Physikalische Schulversuche 3|4|5

Mechanik der Flüssigkeiten und Gase



Physikalische Schulversuche

Dritter bis fünfter Teil
Mechanik der Flüssigkeiten und Gase
Molekulare Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase
Strömungslehre

Herausgegeben von Georg Sprockhoff
Bearbeitet von Josef Fischer

8. Auflage

Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1983

Verfaßt von

Wolfgang Brunstein, Dr. Ernst Estel, Josef Fischer, Rudolf Girke, Dr. Otto Joachimi, Ursula Kindling, Dr. Kurt Knitter, Dr. Egon Kupfer, Dr. Franz Meißner, Werner Oberländer, Heinrich Paucker, Johannes Pötzsch, Hans Reichelt, Dr. Ernst Schneider, Georg Sprockhoff, Dr. Karl Stoye, Reinhold Wolf

Redaktion: Willi Wörstenfeld

3. durchgesehene Auflage des Zusammendrucks. Die 1. bis 3. Auflage erschienen unter den Bestell-Nrn. 022103 bis 05.
Lizenznummer 203 · 1000/82 (UN 022122-5)
Einband: Manfred Behrendt
Zeichnungen: Kurt Dornbusch, Heinrich Linkwitz und Jutta Zaumseil
Typographie: Atelier vwv
Printed in the German Democratic Republic
Satz: VEB Broschurendruck Leipzig
Druck: Offizin Andersen Nexö, Graphischer Großbetrieb, Leipzig
III/18/38-5
Schrift: 9/10 p Extended Monotype
Redaktionsschluß: 14. 10. 1982
Bestell-Nr. 706219 6
DDR 9,50 M

Inhalt

	Einleitung	15
1.	**Mechanik der Flüssigkeiten**	19
1.0.	**Methodische Bemerkungen**	19
1.1.	**Flüssigkeiten mit freier Oberfläche — Verbundene Gefäße**	30
1.1.1.	Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Visieren	30
1.1.2.	Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Abtasten	31
1.1.3.	Beständigkeit des Volumens beim Umgießen einer Flüssigkeit	32
1.1.4.	Flüssigkeitsmodelle	32
1.1.5.	Versuch zum Nachweis der Unveränderlichkeit des Wasservolumens	33
1.1.6.	Ausdehnung des Wassers bei Druckabnahme	34
1.1.7.	Standzylinder mit eingetauchtem Glasrohr als Beispiel verbundener Gefäße	35
1.1.8.	Flüssigkeitsstand in zwei durch einen Schlauch verbundenen Röhren	35
1.1.9.	Flüssigkeitsstand in einem U-Rohr mit Öffnung	36
1.1.10.	Versuch zur Erklärung der Wirkungsweise verbundener Gefäße mit Hilfe eines Glastrogs mit Trennwand	37
1.1.11.	Modell eines Wasserstandsanzeigers	38
1.1.12.	Modell einer Gießkanne	39
1.1.13.	Modell einer Schlauchwaage	39
1.1.14.	Modell einer Kanalwaage	41
1.1.15.	Modell einer Röhrenlibelle	41
1.1.16.	Modell einer Dosenlibelle	43
1.2.	**Der Kolbendruck in einer allseitig abgeschlossenen Flüssigkeit — Die Druckübertragung**	44
1.2.1.	Vorversuch zur Druckübertragung in einer Flüssigkeit	44
1.2.2.	Allseitige Druckübertragung in Flüssigkeiten	44
1.2.3.	Druckübertragung durch einen mit Wasser gefüllten Gummischlauch	47
1.2.4.	Benutzung eines Manometers zur Anzeige der Gewichtskraft	47
1.2.5.	Hydraulische Druckübertragung auf ein Druckgefäß mit offenem Manometer	50

1.2.6. Modellversuch zur Druckübertragung 51
1.2.7. Verschieben einer Flüssigkeitssäule in verbundenen Röhren mit unterschiedlichem Querschnitt 52
1.2.8. Vergleich der Druckkräfte bei der Druckübertragung in Flüssigkeiten 54
1.2.9. Modellversuch zur Wirkungsweise hydraulischer Anlagen . . 57

1.3. Der Schweredruck 59

1.3.1. Nachweis des Schweredrucks mit Glasröhren als Drucksonden . . . 59
1.3.2. Untersuchung des Schweredrucks in einer Flüssigkeit mit Hilfe einer Druckdose 62
1.3.3. Untersuchung des Schweredrucks in einer Flüssigkeit mit einer Gummiblase als Drucksonde 64
1.3.4. Untersuchung des Bodendrucks mit der Pascalschen Waage 65
1.3.5. Untersuchung des Bodendrucks mit dem Bodendruckapparat nach Haldat 66
1.3.6. Untersuchung des Bodendrucks mit einem aus Aufbauteilen zusammengesetzten Bodendruckgerät 67
1.3.7. Nachweis des Seitendrucks mit Hilfe von Spritzdüsen 71
1.3.8. Nachweis des Seitendrucks an einem Standzylinder mit seitlichem Tubus 72
1.3.9. Nachweis des Aufdrucks im Innern einer Flüssigkeit 73
1.3.10. Untersuchungen am Modell eines Springbrunnens 75
1.3.11. Bestimmung der Dichte einer mit Wasser mischbaren Flüssigkeit mit Hilfe eines Tauchrohres 76
1.3.12. Bestimmung der Dichte des Quecksilbers mit Hilfe eines U-Rohres 78
1.3.13. Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten mit Hilfe eines U-Rohres 80
1.3.14. Bestimmung der Dichte von Brennspiritus durch Vergleich der Saughöhen zweier Flüssigkeiten 81

1.4. Der Auftrieb in Flüssigkeiten 82

1.4.1. Auftrieb einer luftdicht verschlossenen Dose . . . 82
1.4.2. Nachweis des Auftriebs mit einem Kraftmesser 83
1.4.3. Vergleich des Auftriebs eines Körpers mit seinem Volumen 83
1.4.4. Fehlen des Auftriebs beim Fehlen des Aufdrucks 87
1.4.5. Vergleich der Auftriebskraft und der Wasserverdrängung eines Körpers unter Verwendung einer Balkenwaage 88
1.4.6. Vergleich der Auftriebskraft und der Wasserverdrängung eines Körpers mit Hilfe einer Tafelwaage 89
1.4.7. Nachweis des Archimedischen Prinzips mit einem Modell der Krone des Hieron 91
1.4.8. Bestätigung des Archimedischen Prinzips mit Hilfe verschiedener Körper mit gleichem Volumen 92
1.4.9. Wichtebestimmung fester Körper mit Hilfe des Auftriebs in Wasser 93
1.4.10. Dichtebestimmung eines Körpers mit Hilfe des Auftriebs in Wasser 94
1.4.11. Wichtebestimmung einer Flüssigkeit durch Vergleich der Auftriebskräfte 96

1.4.12. Dichtebestimmung einer Flüssigkeit durch Vergleich der Auftriebskräfte 97
1.4.13. Dichtebestimmung einer Flüssigkeit mit der Mohrschen Waage . . 98
1.4.14. Vorversuch zur Untersuchung der Schwimmfähigkeit eines Körpers. 100
1.4.15. Sinken, Steigen, Schweben einer geschlossenen Flasche in Abhängigkeit von der Gewichtskraft 102
1.4.16. Modellversuch zum Schwimmen eines festen Körpers 103
1.4.17. Modellversuch zum Auftrieb in Flüssigkeiten 104
1.4.18. Änderung der Gewichtskraft und der Auftriebskraft einer schwimmenden Kerze 105
1.4.19. Beobachtungen an einem kartesianischen Taucher 106
1.4.20. Kaltwasserschwimmer 107
1.4.21. Veränderung der Schwimmlage eines Dreikantholzes in reinem und in salzhaltigem Wasser 108
1.4.22. Schwimmen von Metallkugeln auf Quecksilber 109
1.4.23. Schwimmfähigmachen eines nicht schwimmenden festen Körpers . 109
1.4.24. Schweben eines Hühnereies in einer Kochsalzlösung 110
1.4.25. Bestimmung der Dichte des Bernsteins im Schwebeverfahren . . . 111
1.4.26. Reagenzglas als Aräometermodell 111
1.4.27. Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten mit Aräometern . 113

1.5. Wasserkraftmaschinen 114

1.5.1. Beobachtungen am Modell eines oberschlächtigen Wasserrades 114
1.5.2. Beobachtungen am Modell eines unterschlächtigen Wasserrades . . 115
1.5.3. Beobachtungen am Modell einer Freistrahlturbine (Peltonturbine) . 115
1.5.4. Beobachtungen am Modell einer Axialturbine 116

2. Mechanik der Gase 118

2.0. Methodische Bemerkungen 118

2.1. Wirkungen und Nachweis des Luftdrucks 124

2.1.1. Wirkung des Luftdrucks auf einseitig verschlossene und mit Wasser gefüllte Gefäße 124
2.1.2. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe eines Kolbens mit seitlichem Ansatz 125
2.1.3. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe der Magdeburger Halbkugeln . 126
2.1.4. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe eines Blasensprengers . . . 127
2.1.5. Nachweis der Gleichheit des Luftdrucks in allen Richtungen 128
2.1.6. Wirkung des Luftdrucks auf ein mit Wasser gefülltes Gefäß 129
2.1.7. Nachweis des Luftdrucks an zwei ineinandergesteckten Reagenzgläsern 131
2.1.8. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe einer Gummiblase in einer Flasche 131
2.1.9. Nachweis der Spannkraft der Luft an einer Gummiblase . 133
2.1.10. Heronsball und Spritzflasche 134
2.1.11. Heronsball in einem Einweckglas. 135
2.1.12. Nachweis der Spannkraft der Luft in einem Rundkolben . 135
2.1.13. Nachweis von Luft in Wasser 137

2.1.14. Vorversuch zum Saugheber 138
2.1.15. Der Saugheber 139
2.1.16. Saugheber im luftverdünnten Raum 140
2.1.17. Selbstanlaufende Heber 142
2.1.18. Der Giftheber 144
2.1.19. Modell eines Ventilhebers 145

2.2. Luftdruckmessungen — Barometer und Manometer 146
2.2.1. Der Torricelli-Versuch — Das Quecksilberbarometer 146
2.2.2. Der Guericke-Versuch — Das Wasserbarometer 147
2.2.3. Modell eines Huygensschen Kontrabarometers 149
2.2.4. Modell eines Dosenbarometers 150
2.2.5. Bestimmung des Luftdrucks mit Hilfe der Meldeschen Röhre 152
2.2.6. Nachweis der Abhängigkeit des Luftdrucks von der Höhe mit Hilfe eines Variometers 153
2.2.7. Nachweis unterschiedlicher Druckdifferenz zwischen Luft und Stadtgas mit dem Behnschen Rohr 155
2.2.8. Höhenmessungen mit einem Dosenbarometer 156
2.2.9. Modellversuch zur Veranschaulichung der Abnahme der Dichte mit zunehmender Höhe in der Erdatmosphäre 157
2.2.10. Messen niedriger Drücke mit Hilfe eines verkürzten Barometers . . 159
2.2.11. Das geschlossene Manometer — Bestimmung des Druckes in einer Wasserleitung 160
2.2.12. Das offene Manometer — Messen des Druckes in einer Stadtgasleitung 162
2.2.13. Messen sehr geringer Drücke mit einem Mikromanometer 163

2.3. Das Boylesche Gesetz 165
2.3.1. Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines ungleichschenkligen U-Rohres 165
2.3.2. Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines technischen Manometers 166
2.3.3. Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines Kolbenprobers . 168
2.3.4. Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe einer Meldeschen Röhre 170
2.3.5. Bestätigung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines Manometers und einer Gasmeßglocke 172

2.4. Der Auftrieb in Gasen 174
2.4.1. Auftrieb eines Körpers in Kohlendioxid 174
2.4.2. Bestimmung der Auftriebskraft eines Kinderluftballons 176
2.4.3. Bestimmung der Auftriebskraft eines mit Stadtgas gefüllten Ballons 177
2.4.4. Füllen eines Luftballons mit Stadtgas 178
2.4.5. Vergrößerung der Auftriebskraft einer Gummiblase durch Dampffüllung 179
2.4.6. Der Auftrieb mit Stadtgas gefüllter Seifenblasen in Luft 180
2.4.7. Auftrieb einer mit Kohlendioxid gefüllten Seifenblase in verschiedenen Gasen 181
2.4.8. Nachweis des Auftriebs eines Körpers in Luft — Benutzung eines Dasymeters 182

2.4.9. Bestimmung der Wichte von Stadtgas mit Hilfe eines Dasymeters 182
2.4.10. Nachweis des Auftriebs erwärmter Luft 183

2.5. Pumpenmodelle — Wirkungsweise der Pumpen 184

2.5.1. Glasmodell einer Handspritze 184
2.5.2. Glasmodelle von Wasserpumpen 184
2.5.3. Abhängigkeit des Luftdrucks in einer Flasche von der Saugzeit der Luftpumpe 185

3. Die molekularen Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase . . . 189

3.0. Methodische Bemerkungen 189

3.1. Der molekulare Aufbau der Flüssigkeiten und Gase — Die Verschiebbarkeit der Moleküle 192

3.1.1. Bestimmung der Größenordnung des Durchmessers eines Ölmoleküls 192
3.1.2. Die Brownsche Bewegung im Wasser 193
3.1.3. Die Brownsche Bewegung in der Luft 195
3.1.4. Modellversuch zur Brownschen Bewegung 196
3.1.5. Vorversuch zum Vergleich der Viskosität von Flüssigkeiten mit Hilfe der Sinkzeiten von Kugeln 197
3.1.6. Messung der Viskosität von Flüssigkeiten 198
3.1.7. Bestimmung der Viskosität dünnflüssigen Öls 200
3.1.8. Bestimmung der Viskosität des Glyzerins 201
3.1.9. Verformung plastischer Körper durch ihr Eigengewicht 202
3.1.10. Verformung eines Glasstabes durch Belastung mit einem Wägestück 202

3.2. Oberflächenspannung und Kapillarität . . . 203

3.2.1. Vorversuch zum Nachweis der Oberflächenspannung des Wassers . . 203
3.2.2. Nachweis der Oberflächenspannung des Wassers mit Hilfe einer Nähnadel oder einer Rasierklinge 204
3.2.3. Nachweis der Oberflächenspannung des Wassers mit Hilfe eines U-förmig gebogenen Glasrohrs 205
3.2.4. Tropfenbildung des Anilins beim Eintropfen in Wasser 206
3.2.5. Erzeugen großer Anilintropfen durch Erhitzen 206
3.2.6. Kugelförmige Tropfen „schwerelos" gemachter Flüssigkeiten 207
3.2.7. Abhängigkeit der Tropfgeschwindigkeit des Wassers von der Oberflächenspannung 208
3.2.8. Veränderung der Oberflächenspannung des Wassers durch Berühren mit Kampfer 208
3.2.9. Wirkung der Oberflächenspannung verschiedener Stoffe auf zwei eng nebeneinander befindliche bewegliche Körper 210
3.2.10. Modellversuche zur Flotation 210
3.2.11. Verdrängung von Wasser durch Äthanol oder Äther 211

3.2.12. Nachweis der Oberflächenspannung einer Seifenhaut in einem Drahtring 212
3.2.13. Nachweis der Oberflächenspannung einer Seifenhaut mit Hilfe eines aus Fäden gebildeten Rahmens 214
3.2.14. Bestimmen der Oberflächenspannung einer Seifenhaut durch Messen der Zugkraft 214
3.2.15. Bestimmen der Oberflächenspannung einer Seifenlösung nach dem Abreißverfahren 216
3.2.16. Aufsteigen einer Seifenhaut in einem Trichter 218
3.2.17. Abhängigkeit des Druckes in einer Seifenblase vom Durchmesser der Blase 218
3.2.18. Wirkung des Druckes in zwei miteinander verbundenen Seifenblasen verschiedenen Durchmessers 220
3.2.19. Minimalflächenbildung bei Seifenhäutchen 222
3.2.20. Steigfähigkeit des Wassers in Röhren verschiedenen Durchmessers . 223
3.2.21. Kapillare Depression des Quecksilbers 224
3.2.22. Kapillarwirkung zwischen zwei Glasplatten 225
3.2.23. Kapillarwirkung an Filterpapier 226
3.2.24. Kapillarwirkung in Löß und Sand 228

3.3. Lösen, Mischen, Adsorption, Absorption . . . 229

3.3.1. Lösen fester Körper in Wasser — Herstellung einer gesättigten Zucker- und Salzlösung 229
3.3.2. Abhängigkeit der Löslichkeit fester Stoffe von der Oberfläche und von der Temperatur 230
3.3.3. Volumenzunahme beim Auflösen fester Körper in Wasser . . . 231
3.3.4. Lösen von Äther in Wasser 232
3.3.5. Volumenverminderung beim Mischen von Wasser und Äthanol . . 232
3.3.6. Herstellen und Entmischen einer Emulsion verschiedener nicht mischbarer Flüssigkeiten 233
3.3.7. Adsorption von Farbstoffen durch Aktivkohle 234
3.3.8. Adsorption von Bromdampf durch Aktivkohle . . . 234
3.3.9. Adsorption von Benzoldampf durch Aktivkohle . . . 235
3.3.10. Adsorption von Ammoniak durch Aktivkohle . . . 236
3.3.11. Adsorption von Stadtgas durch Platin 237
3.3.12. Absorption von Ammoniak durch Wasser 238
3.3.13. Absorption von Kohlendioxid durch Gummi . . . 240

3.4. Diffusion und Osmose 241

3.4.1. Diffusion von Kupfersulfat in Wasser 241
3.4.2. Nachweis der Diffusion von Flüssigkeiten unter Benutzung einer Projektionseinrichtung 243
3.4.3. Modellversuch zur Diffusion 245
3.4.4. Trennung kolloidaler Bestandteile einer Flüssigkeit von kristallisierenden Stoffen nach Graham 247
3.4.5. Nachweis des osmotischen Druckes einer Zuckerlösung — Benutzung eines Glastrichters 248
3.4.6. Modellversuch zur Osmose 249
3.4.7. Diffusionserscheinungen von Metallsalzen in Wasserglaslösungen . 250

3.4.8. Nachweis der Diffusion von Kohlendioxid und Luft mit Hilfe einer Präzisionswaage . . . 251
3.4.9. Nachweis der Diffusion von Stadtgas und Brom in Luft . . . 252
3.4.10. Vergleich der Diffusionsgeschwindigkeit von Brom in verschiedenen Gasen . . . 253
3.4.11. Druckerhöhung durch Diffusion von Stadtgas durch eine Tonzelle . 254
3.4.12. Druckverminderung bei Diffusion von Kohlendioxid durch eine Tonzelle . . . 255
3.4.13. Betrieb einer Spritzflasche durch Diffusion eines Gases durch eine Tonzelle . . . 256
3.4.14. Modellversuch zur Wirkungsweise eines Schlagwetteranzeigers . . 257

4. Allgemeine Strömungslehre . . . 259

4.0. Methodische Bemerkungen . . . 259

4.1. Laminare Strömungen . . . 266

4.1.1. Veranschaulichung der Stromfäden durch das Stromfädengerät nach Pohl . . . 266
4.1.2. Veranschaulichung der Stromfäden in Gasen mit Hilfe einer behelfsmäßigen Strömungskammer . . . 267
4.1.3. Veranschaulichung der Grenzschicht zwischen ruhenden und bewegten Flüssigkeitsteilchen . . . 268
4.1.4. Nachweis des Geschwindigkeitsgefälles bei einer Flüssigkeit innerhalb eines Rohres . . . 269
4.1.5. Geschwindigkeitsverteilung in einer laminaren Strömung . . . 270
4.1.6. Messung der Geschwindigkeitsverteilung in bewegter Luft . . . 271
4.1.7. Parabolische Form einer in Wasser aufsteigenden Luftblase . . . 272

4.2. Turbulente Strömungen . . . 273

4.2.1. Turbulenz am aufsteigenden Rauch . . . 273
4.2.2. Laminarität und Turbulenz eines Flüssigkeitsfadens — Die Bestimmung der Reynoldsschen Zahl . . . 274
4.2.3. Untersuchung des Luftstromes eines Luftstromerzeugers mit einem Drallprüfer . . . 276
4.2.4. Veranschaulichung des Stromlinienverlaufs um verschiedene Widerstandskörper mit Hilfe einer Fadensonde . . . 277
4.2.5. Strömungen an verschiedenen Widerstandskörpern — Untersuchung mit dem Nebelströmungsgerät . . . 279
4.2.6. Strömung an einem Fallschirm mit Scheitelöffnung . . 281
4.2.7. Strömung an verschiedenen Formen von Kraftfahrzeugen . . . 282
4.2.8. Nachweis der Wirbelbildung hinter einer Platte mit Hilfe einer Luftschraubensonde . . . 283
4.2.9. Wirbelbildung hinter einer Platte — Nachweis mit Hilfe brennender Kerzen . . . 284
4.2.10. Umströmung einer schräg zur Strömung gestellten Platte . . . 285
4.2.11. Veranschaulichung der Stromlinien mit Hilfe einer Flammensonde . 286
4.2.12. Erzeugung ringförmig geschlossener Wirbel in der Luft . . . 287

4.2.13. Projektion von Wirbelringen im Wasser 288
4.2.14. Wirbelbildung beim Umströmen von Hindernissen in einer Strömungswanne 289
4.2.15. Wirbelbildung beim Umströmen von Hindernissen in einer Strömungswanne — Benutzung des WSP 220 . . . 290
4.2.16. Wirbelbildung beim Umströmen von Hindernissen im Strömungskanal 290
4.2.17. Wirbelbildung beim Schleppen von Widerstandskörpern 291

4.3. Widerstand eines Körpers in strömenden Gasen und Flüssigkeiten . . . 293

4.3.1. Vergleich der Strömungswiderstände verschieden geformter Körper 293
4.3.2. Widerstandsmessung mit einer Einkomponentenwaage 296
4.3.3. Widerstandsmessung mit einer Tafelwaage 298

4.4. Druck- und Geschwindigkeitsmessungen in strömenden Stoffen — Die Kontinuitätsgleichung — Die Bernoullische Gleichung 299

4.4.1. Bestätigung der Kontinuitätsgleichung mit Hilfe eines Wasserstrahls 299
4.4.2. Bestätigung der Kontinuitätsgleichung durch Messen der Strömungsgeschwindigkeiten in zwei Rohren verschiedenen Querschnitts . . . 301
4.4.3. Nachweis des Druckgefälles in einem durchströmten Rohr von gleichmäßigem Querschnitt 303
4.4.4. Nachweis des Druckgefälles in einem mit einer Verengung versehenen Rohr 305
4.4.5. Nachweis des Druckgefälles in einem Rohr mit einer Verengung von veränderlicher Lage 306
4.4.6. Nachweis der Abhängigkeit des statischen Druckes von der Strömungsgeschwindigkeit 307
4.4.7. Staudruckmessung mit Hilfe eines Pitotrohres 309
4.4.8. Messung des statischen Druckes mit Hilfe einer Drucksonde 309
4.4.9. Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe eines Prandtlschen Staurohres 310
4.4.10. Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe einer Venturidüse . 311
4.4.11. Festlegen der Skale eines Schalenkreuzanemometers 313
4.4.12. Messung der Durchflußmenge mit Hilfe einer Ringblende 314
4.4.13. Messung des statischen Druckes in einer Wasserstrahlpumpe . . . 316
4.4.14. Druckmessung an einem Zerstäuber 317

4.5. Aerodynamisches und hydrodynamisches Paradoxon . . . 317

4.5.1. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit einem selbstgefertigten Gerät 317
4.5.2. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit einer Luftdusche und einem selbstgefertigten Gerät 319
4.5.3. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit einem Glastrichter 319
4.5.4. Nachweis des hydrodynamischen Paradoxons 320
4.5.5. Versuch zum aerodynamischen Paradoxon 321
4.5.6. Versuch zum aerodynamischen und hydrodynamischen Paradoxon mit zwei Löffeln 321
4.5.7. Verhalten einer Stoffsonde am Rande eines Luftstroms 322

4.5.8. Verhalten eines Pappzylinders beim Annähern an einen Luftstrom . 322
4.5.9. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons 323
4.5.10. Kraftmessung an einer im Luftstrom schwebenden Gummiblase . . 324
4.5.11. Verhalten von mehreren im Luftstrom schwebenden Luftballons . . 325
4.5.12. Nachweis der Reibung im freien und im gebündelten Luftstrom . . 327

5. Strömungsvorgänge am Flugzeug 328

5.0. Methodische Bemerkungen 328

5.1. Strömung um einen Tragflügel — Widerstand und Auftrieb des Tragflügels 330

5.1.1. Strömung um einen Tragflügel 330
5.1.2. Untersuchung der Strömung um einen Tragflügel mit einer Flammensonde 331
5.1.3. Untersuchung der Strömung um einen Tragflügel mit Hilfe eines Nebelströmungsgerätes 331
5.1.4. Untersuchung der Strömung um einen Tragflügel mit Hilfe einer Fadensonde 332
5.1.5. Veranschaulichung der Druckzustände an einem Tragflügelmodell mit beweglicher Papierbespannung 333
5.1.6. Messung der Druckverteilung an einem Tragflügelprofil bei verschiedenen Anstellwinkeln 334
5.1.7. Nachweis der Randwirbel an einem Tragflügelmodell mit Hilfe eines Drallprüfers und einer Fadensonde 336
5.1.8. Nachweis der Randwirbel an einem Tragflügelmodell im Nebelströmungsgerät 337
5.1.9. Messung des Widerstandes eines Tragflügelmodells bei verschiedenen Anstellwinkeln mit Hilfe einer Tafelwaage 338
5.1.10. Messung des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Tafelwaage 340
5.1.11. Messung des Widerstandes und des Auftriebs eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Drehmomentenwaage oder Einkomponentenwaage . 342
5.1.12. Ermittlung des Polardiagramms eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Tafelwaage 345
5.1.13. Ermittlung des Polardiagramms eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Zweikomponentenwaage 347
5.1.14. Ermittlung des Polardiagramms eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Schraubenfeder 347

5.2. Die Stabilität des Flugzeuges — Das Leitwerk — Start- und Landehilfen 349

5.2.1. Die Strömungsverhältnisse an einem Tragflügel mit Vorflügel . . . 349
5.2.2. Veranschaulichung der Wirkung eines Vorflügels und einer Landeklappe mit Hilfe des Nebelströmungsgerätes 351
5.2.3. Nachweis der Stabilität eines Flugzeuges um die Hochachse bei Pfeilstellung und bei V-Stellung der Tragflügel 352

5.2.4. Nachweis der Stabilität eines Flugzeuges um die Längsachse bei V-Stellung der Tragflügel 353
5.2.5. Versuche zur Wirkungsweise des Leitwerks 354
5.2.6. Versuche zur Autorotation eines Tragflügels 357

5.3. Die Luftschraube 358

5.3.1. Messung der Drehzahl einer Luftschraube mit Hilfe eines Stroboskops und eines Drehzahlmessers 358
5.3.2. Messung der Drehzahl einer Luftschraube durch Bestimmen der Tonhöhe 359
5.3.3. Nachweis der Zugkraft einer Luftschraube mit Hilfe einer Luftschraubensonde 360
5.3.4. Nachweis der Zugkraft einer Luftschraube mit Antriebsmotor 360
5.3.5. Zugkraft einer Luftschraube in Abhängigkeit von der Drehzahl . . 361
5.3.6. Verhalten einer Luftschraube in einem Luftstrom 363
5.3.7. Nachweis der Wirkungsweise einer Hubschraube an einem selbstgefertigten Modell 364
5.3.8. Schweben einer Luftschraubensonde im horizontalen Luftstrom . . 365

5.4. Das Strahltriebwerk 365

5.4.1. Bestimmung der Schubkraft eines Luftstromerzeugers — Modellversuch zum Strahltriebwerk 365
5.4.2. Versuch zur Wirkungsweise eines Strahltriebwerks 368
5.4.3. Modellversuch zum Raketenantrieb 368

6. Der Magnuseffekt — Bumerangmodelle 370

6.0. Methodische Bemerkungen 370

6.1. Der Magnuseffekt 370

6.1.1. Strömungsverlauf um einen rotierenden Zylinder 370
6.1.2. Nachweis des Magnuseffekts an einem herabrollenden Papierzylinder 371
6.1.3. Nachweis des Magnuseffekts an einem fallenden und gleichzeitig rotierenden Pappzylinder 371
6.1.4. Ablenkung einer rotierenden Kugel durch den Magnuseffekt 372

6.2. Bumerangmodelle 373

6.2.1. Versuche mit Bumerangmodellen 373

Register 374

Einleitung

1. Das vorliegende Buch der Physikalischen Schulversuche ist ein Zusammendruck des 3. bis 5. Teils des von Rudolf Girke und Georg Sprockhoff begonnenen Gesamtwerkes. Es behandelt in zwei Kapiteln die Mechanik der Flüssigkeiten und Gase. Das dritte Kapitel bringt Versuche über die molekularen Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase. Es folgt als viertes Kapitel die Strömungslehre, die ja ebenfalls zur Mechanik der Flüssigkeiten und Gase gehört. Das fünfte Kapitel behandelt Strömungsvorgänge am Flugzeug, und das sechste Kapitel bringt Versuche zum Magnuseffekt und Versuche mit Bumerangmodellen.
2. Die methodischen Grundsätze, die für die anderen Teile des Werkes bestimmend waren, wurden unverändert beibehalten. Eine Änderung tritt insofern ein, als den Versuchen „Methodische Hinweise" beigeordnet wurden.
   Wie die anderen Teile der Buchreihe will auch dieser Teil kein Lehrbuch sein. Er wendet sich nicht an Schüler, sondern an die Physiklehrer selbst und setzt die Kenntnis der rein physikalischen Zusammenhänge voraus. Die Aufgabe des Buches ist es, den Lehrern eine Hilfe bei der Auswahl und bei der Durchführung von Experimenten zu geben. Wer sich darüber hinaus über diese oder jene physikalischen Zusammenhänge genauer unterrichten will, muß zu einem der bekannten Physiklehrbücher greifen. Wo den einzelnen Versuchsbeschreibungen Herleitungen beigefügt wurden, geschah es, um dem Leser Hinweise zu geben, wie er den Sachverhalt im Unterricht in methodisch zweckmäßiger Weise behandeln kann. Aus demselben Grunde wurden hier und da Rechenbeispiele beigefügt; insbesondere dort, wo es sich um das Unterscheiden von Masse und Gewichtskraft, von Dichte und Wichte handelt oder wo die mathematischen Überlegungen einen Bestandteil der Versuchsdurchführung selbst bilden. Auch die vielfach den Versuchsbeschreibungen beigefügten Meßwerttabellen sollen lediglich einen Hinweis geben, wie man das betreffende Naturgesetz, zu dessen Auffindung das Experiment dienen soll, unter Bevorzugung des induktiven Unterrichtsverfahrens aus den Versuchsergebnissen herleitet. Selbstverständlich brauchen die im Unterricht gefundenen Meßwerte keineswegs mit den als Beispiel angeführten Werten übereinzustimmen. Sie richten sich ganz nach den jeweiligen Versuchsbedingungen. Im übrigen aber sind die im Buch angegebenen Werte an keiner Stelle künstlich zurechtgemacht. Sie sind sämtlich aus durchgeführten Versuchsreihen erwachsen.
3. Auch in diesem Buche wird jedes Kapitel durch methodische Bemerkungen eingeleitet. Dabei wird aber auf allgemeine methodische Fragen nicht eingegangen, da dies nicht die Aufgabe dieses Buches ist, sondern in ein besonderes methodisches Handbuch gehört. Die methodischen Bemerkungen dieses Buches beziehen sich vielmehr auf die in dem betreffenden Kapitel behandelten Ver-

suche. Sie geben Hinweise allgemeiner Art, die für das Gelingen der Versuche zu beachten sind und dem Lehrer bei der Auswahl und der Durchführung der Versuche nützlich sein können.

4. Wie die anderen Teile ist auch dieses Buch nicht für einen bestimmten Lehrplan oder Schultyp geschrieben. Der sachliche Inhalt, auf den sich die Experimente beziehen, geht über die Anforderungen der zehnklassigen allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule, auch der erweiterten Oberschule, hinaus. Dadurch kann das Buch auch in Arbeitsgemeinschaften und im fakultativen Unterricht der erweiterten Oberschule und an anderen Schultypen, z. B. an Berufsschulen, z. T. sogar an Fachschulen, besonders aber in der Ausbildung von Fachlehrern für Physik, benutzt werden.
   Das Buch will seinem Benutzer auch nicht einen ganz bestimmten methodischen Gang aufzwingen. Dieser Gedanke kommt schon dadurch zum Ausdruck, daß das Buch nicht nach methodischen, sondern nach fachsystematischen Gesichtspunkten gegliedert ist. Die einzelnen Versuche sind in zwangloser Weise nach sachlich zusammenhängenden Stoffgebieten geordnet. Diese Reihenfolge muß sich keineswegs mit der Reihenfolge der Stoffgebiete im Lehrplan oder mit der Folge der Stoffeinheiten decken. Es bleibt den Physiklehrern überlassen, aus den nach rein sachlichen Gesichtspunkten zusammengestellten Versuchsgruppen die methodisch zweckmäßigste Auswahl zu treffen.
   Damit hängt noch eine andere Überlegung eng zusammen. Das Buch berücksichtigt zwar alle im Lehrplan der zehnklassigen allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule als verbindlich aufgeführten Themen, es bietet aber zu jeder Unterrichtseinheit weit mehr Versuche, als man etwa im Unterricht bringen könnte. Wenn das Buch diesen Weg beschreitet, so geschieht es deshalb, um den Lehrern viele Versuchsmöglichkeiten zu bieten, aus denen sie die Versuche auswählen müssen, die sich je nach der unterrichtlichen Situation am besten für den Unterricht eignen. Dabei kann es vorkommen, daß für Parallelklassen verschiedene Versuchsvarianten als am rationellsten und effektivsten erscheinen. Auf keinen Fall soll sich ein Benutzer des Buches von der falschen Vorstellung leiten lassen, er müsse seinen Schülern möglichst alle beschriebenen Versuche zeigen. Wenige, wirklich gut durchgeführte und von den Schülern in allen Einzelheiten verstandene Versuche sind methodisch wirkungsvoller als eine Fülle halbverstandener und mit unzureichenden Mitteln ausgeführter Versuche.
5. Bei der Auswahl und der Beschreibung der Versuche waren die Verfasser darauf bedacht, in erster Linie solche Experimente zu bringen, bei denen die Versuchsanordnungen unter Verwendung von Lehrmitteln zusammengestellt werden können, die im allgemeinen in den Schulen vorhanden sind. Für die allgemeinbildende Schule sind das die Lehrmittel, die im Grundausstattungsplan für die jeweilige Klassenstufe aufgeführt sind. Bei der Einrichtung einer Lehrmittelsammlung sollten diese Pläne die Richtschnur sein.
   Neben Versuchsbeschreibungen, die sich auf die Benutzung moderner Lehrmittel beziehen, wurden aber auch Beschreibungen aufgenommen, wie man dieselben Gesetzmäßigkeiten mit älteren Geräten herleiten oder bestätigen kann. Einige Hinweise dazu sind in den Methodischen Bemerkungen vor den einzelnen Kapiteln bzw. in den Methodischen Hinweisen der einzelnen Versuchsbeschreibungen enthalten.
   Dem Gedanken der Durchführung von Versuchen unter Verwendung von Aufbauteilen wird weitgehend Rechnung getragen. Selbstverständlich müssen für

wichtige Einzelversuche bestimmte Sondergeräte vorhanden sein. Dazu gehören für die in diesem Buch erfaßten Gebiete in erster Linie eine zweckmäßige Projektionseinrichtung, eine für hydrostatische Versuche brauchbare Waage und eine gute Luftpumpe. Für viele Experimente eignet sich als Projektionseinrichtung der Tageslichtschreibprojektor „Polylux".

Großer Wert wurde auf die Darbietung von ganz einfachen Versuchen und Freihandversuchen gelegt, wenn sie im Buch als solche auch nicht immer besonders bezeichnet sind.

Gerade diese Versuche sind gut dazu geeignet, die Schüler zum eigenen Experimentieren anzuregen und sie zur kritischen Naturbeobachtung zu erziehen. Auch guten Modellversuchen ist im Buch Raum gegeben.

6. Der Rahmen des Buches wäre zu eng gesteckt, wenn es sich lediglich auf die Beschreibung von Versuchsdurchführungen beschränken würde. Alles, was der experimentellen Gestaltung des Unterrichts förderlich ist, gehört in dieses Buch. Deshalb ist auch in bescheidenem Umfang der Bau von Modellen mit aufgenommen. Die Modellbeschreibungen sind so gehalten, daß die Modelle von den Schülern unter Anleitung ihres Lehrers hergestellt werden können. Die Modelle sollten deshalb in erster Linie in Arbeitsgemeinschaften angefertigt werden. Die Schüler lernen dabei nicht nur die physikalischen Zusammenhänge besser verstehen, sondern haben noch in der Entwicklung manueller Fertigkeiten einen Gewinn, was im Hinblick auf die polytechnische Bildung von Wert ist.
7. Damit auch den Lesern, die nicht im Besitz der schon erschienenen Teile sind, die Benutzung des Buches erleichtert wird, sei noch einmal auf folgende Einzelheiten hingewiesen:
   1. Jede Versuchsbeschreibung ist in sich abgeschlossen und mit einer laufenden Nummer versehen. Diese besteht aus drei durch Punkte getrennten Zahlen. Die erste Zahl gibt das Kapitel, die zweite den Abschnitt, die dritte den Versuch an.
   2. Das der Versuchsüberschrift in eckigen Klammern beigefügte Zeichen [SE] bringt zum Ausdruck, daß der Versuch als Schülerexperiment oder als Praktikumsversuch geeignet ist. Selbstverständlich können diese Versuche auch als Demonstrationsexperimente ausgeführt werden.
   3. Auf Gefahrenmomente wird durch besondere Marken hingewiesen, die hinter den Überschriften angebracht sind. Diese Gefahren erwachsen vorwiegend aus der Möglichkeit des Zustandekommens gesundheitsschädigender Dämpfe bei der Arbeit mit Quecksilber. In die Methodischen Bemerkungen 1.0.6. wurden Anweisungen zum Experimentieren mit Quecksilber aufgenommen. Wenn sie beachtet werden, ist die Gefahr gering.
   4. Jede Versuchsbeschreibung beginnt mit einer Aufzählung sämtlicher zum Versuch verwendeter Geräte. Sie sind mit laufenden Nummern versehen, die gegebenenfalls auch in den Abbildungen wiederkehren.

      Es wurde darauf verzichtet, die für den mechanischen Aufbau verwendeten Teile des Stativmaterials und Verbindungsleitungen in die Gerätelisten aufzunehmen, weil es selbstverständlich erscheint, daß diese Teile in ausreichender Menge zur Verfügung stehen müssen und für die gleiche Versuchsanordnung jeweils verschiedene Varianten möglich sind.
   5. Die in den Gerätelisten angegebenen Gerätedaten sind bis auf wenige Ausnahmen, die besonders genannt werden, nicht als verbindlich zu betrachten. Ihre Angaben dienen nur zur Orientierung. Die Geräte können durch andere, gleichartige ersetzt werden.

6. Das hinter einem Gerät stehende Zeichen Ⓢ bedeutet, daß das Gerät zur Selbstherstellung empfohlen wird.
7. Längen in den Zeichnungen werden in Millimetern angegeben.
8. Die in die Versuchsbeschreibungen eingefügten „Methodischen Hinweise" beziehen sich nur auf den jeweiligen Versuch. Sie sollen die Auswahl der Experimente erleichtern und zu ihrer effektivsten methodischen Gestaltung beitragen oder auf besondere erzieherische Potenzen der Experimente hinweisen.
9. Zusätzliche Ausführungen, die über die eigentlichen Versuchsbeschreibungen hinausgehen, erscheinen unter der Überschrift „Bemerkungen".
10. Bei Hinweisen auf andere Versuche des Buches wird der Versuchsnummer das Zeichen V vorangesetzt, z.B. V 3.2.8. Auf Versuche aus anderen Teilbänden der „Physikalischen Schulversuche" wird hingewiesen durch Angaben wie z.B. siehe 1. Teil, V 1.1.8. Bei Hinweisen auf „Methodische Bemerkungen" ist das Zeichen MB unter Beifügung der Nummer des Abschnitts, z.B. MB 1.0.6., angegeben. Auf „Methodische Hinweise" verweisen die Zeichen MH, z.B. vergleiche MH Nr. 2 V 3.4.1.!
11. Bei der Bearbeitung dieser Auflage wurde die TGL 31548 „Einheiten physikalischer Größen", die auf dem Internationalen Einheitensystem „*Système International d'Unités*" (SI) beruht, berücksichtigt.

1. Mechanik der Flüssigkeiten

1.0. Methodische Bemerkungen

1.0.1. Im ersten Abschnitt sind Experimente zum Thema *Flüssigkeiten mit freier Oberfläche* beschrieben. Es wird die Lage der Flüssigkeitsoberfläche untersucht. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sind die Voraussetzungen für das Verständnis der Erscheinungen an *verbundenen Gefäßen*, ohne daß zunächst auf den Schwerpunkt eingegangen wird. Diese Versuche sind in erster Linie für den Anfangsunterricht bzw. für den Unterricht in unteren Klassen geeignet. Dabei können erste Fertigkeiten im zielgerichteten Beobachten, im bewußten Abstrahieren beim Unterscheiden von speziellen Einzelmerkmalen der Flüssigkeiten und ihrer Eigenschaften und im Trennen wesentlicher Merkmale von unwesentlichen herausgebildet werden. Außerdem kann man die Schüler in die Methoden physikalischer Erkenntnisgewinnung einführen:

Frage — Beobachten — Überlegen — Vermuten — Prüfen — Ergebnis formulieren.

Bei Volumenmessungen können die international festgelegten Einheitenvorsätze Milli-, Zenti- und Dezi- geübt werden. Die Experimente zur Demonstration technischer Anwendungen verbundener Gefäße können Verbindungen zum polytechnischen Unterricht herstellen.

Bei den meisten Experimenten mit Flüssigkeiten wird Wasser benutzt. Man kann die Anschaulichkeit meist verbessern, wenn man das Wasser anfärbt, auch wenn das in der Versuchsbeschreibung nicht ausdrücklich verlangt wird. In unteren Klassen sollte das Anfärben grundsätzlich vor den Schülern erfolgen, um den Eindruck zu vermeiden, daß es sich um eine unbekannte Flüssigkeit handele. In vielen Fällen genügen einige Tropfen blaue oder rote Tinte. Mitunter wird Kaliumpermanganat benutzt. Es ist sehr farbstark, hinterläßt aber nach längerem Stehen in Glasgefäßen einen braunen Belag von Mangandioxid, den man mit Oxalsäure entfernen kann.

Folgende Farbstoffe sind zum Färben von Wasser geeignet:

1. Fuchsin in Brennspiritus: tief dunkelrot.
2. Methylenblau in destilliertem Wasser: dunkelblau.
3. Fluoreszein in destilliertem Wasser unter Zusatz einiger Tropfen Natronlauge: grün fluoreszierend.
4. Phenolphthalein in Alkohol unter Zusatz einiger Tropfen Natronlauge: rot.
5. Eosin in destilliertem Wasser: intensiv rot.

Benzin, Benzol und Petroleum färbt man mit Drachenblut, einem tropischen Harz. Es gibt eine intensiv rote Farbe.

1.0.2. Der zweite Abschnitt enthält Versuche zum *Kolbendruck in allseitig abgeschlossenen Flüssigkeiten* und zur *Druckübertragung in Flüssigkeiten*.
Besondere Sorgfalt ist auf die Klärung des Begriffes *hydrostatischer Druck* zu verwenden. Von Anfang an ist zwischen den Größen Kraft und Druck streng zu unterscheiden. Diese beiden Begriffe traten bereits in der Mechanik fester Körper auf. Bei der Behandlung der Flüssigkeiten wird man auf die Ähnlichkeiten und Unterschiede des Verhaltens von festen und flüssigen Körpern ausführlich eingehen und auch Modellversuche heranziehen (vgl. V 1.2.6.).
Grundsätzlich sei an folgendes erinnert:
Wenn auf eine Fläche A an der Oberfläche eines festen Körpers in Richtung auf den Körper hin eine Kraft einwirkt, dann heißt die senkrecht zur Fläche wirkende Komponente F_p dieser Kraft die *Druckkomponente* oder die *Druckkraft*. Die in der Richtung der Fläche wirkende Komponente F_s der ursprünglichen Kraft ist die *Schubkomponente* oder die *Schubkraft*. Der Quotient $\frac{F_p}{A}$ wird als *Druck* p definiert:

$$p = \frac{F_p}{A}.$$

Im Internationalen Einheitensystem (SI = Système International d'Unités) ist für den Druck das *Pascal* (Pa) angegeben.

$$1\ \text{Pa} = 1\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1\ \text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Diese Einheit ist wie folgt definiert:
„Das Pascal ist der Druck, der durch eine auf die Fläche 1 m² senkrecht wirkende, gleichmäßig verteilte Kraft 1 N erzeugt wird."
Mit befristeter Gültigkeitsdauer ist auch die Einheit *Bar* zugelassen.

$$1\ \text{bar} = 10^5\ \text{Pa}.$$

Die Versuche 1.2.7. und 1.2.8. dienen zur Erklärung der Wirkungsweise einer hydraulischen Presse. Besonders bei diesen Versuchen wird man klar herausarbeiten müssen, daß zwar der Druck in der Flüssigkeit, vom Schweredruck abgesehen, in allen Richtungen gleiche Beträge hat, daß aber gerade dadurch auf verschieden große Kolbenflächen auch unterschiedliche Druckkräfte wirken müssen. Einflüsse des Schweredrucks kann man dabei ausschalten, wenn man die Kolben in gleicher Höhe anbringt.
Wesentlich ist hierbei auch der Hinweis auf den *Satz von der Erhaltung der Energie*. Die *hydraulische Presse* und ganz allgemein die *hydraulische Druckübertragung* werden in der Technik äußerst vielseitig angewendet. Die hydraulische Druckübertragung spielt besonders bei Steuerungs- und Regelungsvorgängen eine Rolle. Dabei erkennt der Schüler, daß der Mensch durch die Nutzung erkannter Gesetzmäßigkeiten seine Arbeit erleichtern und sein Leben verbessern kann.
Auch in der Biologie ist die hydraulische Druckübertragung anzutreffen. So dient beim Wassergefäßsystem (Ambulakralsystem) des Seeigels und des Seesterns der Wasserdruck zur Betätigung des Saugfüßchens.
Das Tafelschaltgerät hat sich zur Vertikaldemonstration elektrischer Schaltungen bewährt. In Verbindung mit dem *Aufbausatz für Aero- und Hydromechanik* bietet es auch für dieses Gebiet Möglichkeiten der Vertikaldemonstration. In den Versuchen V 1.2.2., V 1.2.8., V 1.4.2. und V 1.4.8. sind Varianten für die Benutzung dieses Aufbausatzes beschrieben.

Da zu diesem Aufbausatz außer Kolbenprobern mit unterschiedlichen Kolbenflächen auch Absperr- und Rückschlagventile gehören, kann man damit Versuchsanordnungen zur Demonstration der Wirkungsweise hydraulischer Anlagen aufbauen (vgl. V 1.2.9.).

1.0.3. Der *Schweredruck* in einer ruhenden, von einer freien Oberfläche begrenzten Flüssigkeit wird durch die Schwerkraft hervorgerufen. Er wird im Gegensatz zum Kolbendruck auch als *Wanddruck* bezeichnet. Nach der Wirkungsrichtung unterscheidet man den *Bodendruck*, den *Seitendruck* und den *Aufdruck*. Bei den Experimenten V 1.3.1. bis V 1.3.10. kommt es in erster Linie darauf an, zu zeigen, daß der Schweredruck proportional ist der Höhe der Flüssigkeitsoberfläche über der untersuchten Stelle bzw. daß in der Flüssigkeit Boden-, Seiten- und Aufdruck in gleicher Höhe gleiche Beträge haben. Im Gegensatz zum Kolbendruck kann der Schweredruck durch das Vorhandensein einer freien Flüssigkeitsoberfläche mit Drucksonden (V 1.3.1. bis V 1.3.3.) untersucht werden.
In allseitig eingeschlossenen Flüssigkeiten addieren sich Kolbendruck und Schweredruck zum *hydrostatischen Druck*. Bei Flüssigkeiten mit freier Oberfläche entfällt der Kolbendruck. In diesem Falle ist der hydrostatische Druck gleich dem Schweredruck. In der Hydrostatik kommt es meist darauf an, den Schülern zu zeigen, daß die von einer Flüssigkeit auf den Boden ausgeübte Kraft von der Bodenfläche und der Flüssigkeitshöhe abhängt und von der Gefäßform unabhängig ist. Außerdem wird der Betrag dieser Kraft durch die Dichte der Flüssigkeit mitbestimmt. Den Kernpunkt dieses Stoffgebietes bildet das hydrostatische Paradoxon. Die Erscheinungen des hydrostatischen Paradoxons sollten in überzeugender Weise experimentell vermittelt werden. Dazu dienen die Bodendruckgeräte, die in den Schulen in mannigfacher Form vorhanden sind.
Das bekannteste dieser Geräte ist die Pascalsche Waage. Bei ihr bildet den Boden des Versuchsgefäßes eine Platte, die von einem Waagebalken getragen wird. Durch die Gewichtskraft von Wägestücken, die auf das andere Ende des Waagebalkens wirken, wird sie gegen den Gefäßrand gedrückt.
Das Flüssigkeitsniveau im Versuchsgefäß wird durch einen verschiebbaren Zeiger markiert und die Flüssigkeitshöhe an einer Höhenskale abgelesen. Leider befriedigt die Pascalsche Waage experimentell meist nur wenig. Der Austritt des Wassers ist bei den meisten Geräten dieser Art nicht genau fixiert. Er beginnt häufig schon weit vor dem Eintritt des Kräftegleichgewichts. Der Versuch wirkt infolgedessen nicht überzeugend. Leichtes Einfetten der Platte und des Gefäßrandes kann das Ergebnis verbessern.
Eine Verbesserung der Konstruktion stellt eine Ausführungsform dar, bei der die Versuchsgefäße auf einem Zylinder aufsitzen. In ihm ist ein Kolben leicht verschiebbar angeordnet, der gegen die Zylinderwand durch einen Quecksilberring gut abgedichtet ist. Die gegen den Boden gerichtete Kraft wird bei diesem Gerät auf eine Zeigerwaage übertragen.
Bei anderen Bodendruckgeräten ist die abhebbare Bodenplatte durch eine Gummimembran ersetzt, die gegen eine Zeigerwaage wirkt. Sie arbeiten recht befriedigend, haben aber den Nachteil, daß die Gummimembran allmählich brüchig wird und infolgedessen öfter ausgewechselt werden muß.
Eine besonders einfache Form der Bodendruckgeräte ist die von Haldat angegebene. Bei ihr dient ein mit Quecksilber gefülltes Manometer als Druckanzeiger. Der Umstand, daß zur Herleitung des Bodendruckgesetzes ein Flüssigkeitsmanometer verwendet wird, obwohl dessen Wirkungsweise erst aus den Druckgesetzen

heraus erklärt werden kann, braucht in methodischer Hinsicht keine Bedenken zu erregen. Das Manometer dient beim Versuch lediglich als Anzeigegerät, ohne daß man auf seine Funktion einzugehen braucht. Die Erarbeitung seiner Wirkungsweise wird später nachgeholt. Die Situation ist hier eine ganz ähnliche wie bei der Balkenwaage, die man im Unterricht vor der Durchnahme der Hebelgesetze benutzt.
Alle genannten Bodendruckgeräte haben den Nachteil, daß sie als Einzelgeräte für einen Versuch angeschafft werden müssen. Das Bestreben, auch die Bodendruckversuche mit Hilfe von Aufbaugeräten durchzuführen, veranlaßte die Verfasser zur Erprobung des in V 1.3.6. beschriebenen Versuches. Er ermöglicht es in einfacher Weise, aus Aufbauteilen ein Bodendruckgerät zusammenzustellen, das die Erscheinungen des hydrostatischen Paradoxons nicht nur qualitativ zu zeigen gestattet, sondern auch die quantitative Herleitung des Bodendruckgesetzes zuläßt.
Zu beachten ist, daß alle sogenannten Bodendruckgeräte im Grunde nicht den Bodendruck selbst, sondern die gegen den Boden wirkende Druckkraft untersuchen. Die mit Hilfe dieser Geräte gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich stets auf die Bodendruckkraft. Das Bodendruckgesetz selbst wird daraus erst durch Abstraktion gefunden. Man sollte bei der Benutzung der Bodendruckgeräte die Schüler über diesen Zustand nicht im unklaren lassen.

1.0.4. Zur Bestimmung der Auftriebskraft in Flüssigkeiten wurden früher vorwiegend Balkenwaagen benutzt. Die sogenannte „hydrostatische Waage", deren eine Waagschale mit einem verkürzten Bügel versehen war, ist in verschiedenen Varianten in den Lehrmittelsammlungen zu finden. Obwohl mit diesem Gerät sehr genaue Meßwerte ermittelt werden können, sollte man bei der Einführung des Begriffes Auftrieb die hydrostatische Waage nicht benutzen. Der Auftrieb ist eine Kraft. Es ist deshalb sinnvoll, ihn mit Hilfe eines Kraftmessers zu bestimmen. Die Balkenwaage sollte dagegen in erster Linie zum Massenvergleich benutzt werden. So kann auch durch die Wahl der richtigen Meßgeräte das Bestreben, bei den Schülern Klarheit über die Begriffe Kraft und Masse zu erlangen, unterstützt werden. Wenn in höheren Klassenstufen später trotzdem auch Balkenwaagen zur Ermittlung der Auftriebskraft eingesetzt werden (z. B. Mohr-Westphalsche Waage), dann sollte ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß die Balkenwaage hier ausnahmsweise zum Vergleich von Kräften benutzt wird.
Im Zusammenhang mit dem Auftrieb wird meist das *Archimedische Prinzip* behandelt. Zur Problemstellung hat sich V 1.4.7. sehr gut bewährt, weil er in Verbindung mit der Sage des Archimedes und der Krone des Hieron stets das Interesse der Schüler weckt. Zur Erinnerung sei hier der Inhalt dieser Sage in knapper Form dargestellt:
König Hieron II. hatte sich eine Krone anfertigen lassen, und obwohl ihr Gewicht mit dem des dafür abgegebenen Goldes übereinstimmte, hatte der König den Verdacht, daß er betrogen worden sei. Archimedes erhielt den Auftrag, zu überprüfen, ob die Krone massiv aus Gold wäre, ohne jedoch die Krone zu beschädigen. Als er im Bade saß, kam ihm der Gedanke, das Problem mit Hilfe des Auftriebs im Wasser zu lösen.
Mit dem Ruf „heureka", ich habe gefunden, sprang er aus dem Bad, um das Experiment auszuführen. Tatsächlich konnte er den Betrug nachweisen.
Nachdem das Archimedische Prinzip im Unterricht erarbeitet wurde, kann es zur Wichtebestimmung fester Körper benutzt werden. Die Wichte des Körpers ist

gleich dem Quotienten aus der Gewichtskraft F_G des Körpers und seinem Volumen V.

$$\gamma = \frac{F_G}{V}.$$

Nach dem Archimedischen Prinzip ist die Auftriebskraft F_A eines Körpers gleich der Gewichtskraft der von ihm verdrängten Flüssigkeit

$$F_A = V \cdot \gamma_{Fl}.$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich für das Volumen des Körpers

$$V = \frac{F_A}{\gamma_{Fl}}.$$

Setzt man diesen Wert in die Ausgangsgleichung ein, dann erhält man

$$\gamma = \frac{F_G}{F_A} \cdot \gamma_{Fl}.$$

Da die Gewichtskraft und die Wichte ortsabhängig sind, ist in der TGL 31548 nur noch die Dichte enthalten. Wenn hier trotzdem von der Bestimmung der Wichte gesprochen wird, dann deshalb, weil es sich tatsächlich um diese physikalische Größe handelt. Setzt man jedoch für die Gewichtskraft F_G nach dem Grundgesetz der Mechanik

$$F_G = m \cdot g,$$

dann erhält man

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V}$$

oder

$$\gamma = g \cdot \varrho.$$

Demnach ist die Dichte proportional der Wichte, wobei die Fallbeschleunigung g als Proportionalitätsfaktor steht. Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Wichte- und Dichtebestimmung von Flüssigkeiten.

1.0.5. Von der Lehrmittelindustrie wurden verschiedene Funktionsmodelle von Wasserkraftmaschinen angeboten, die in verschiedenen Ausführungsformen in den Lehrmittelsammlungen der Schulen anzutreffen sind. In der Abbildung 1.0.5./1 ist das Modell einer *Freistrahlturbine* (Peltonturbine) wiedergegeben. Die Abbildung 1.0.5./3 zeigt das Modell einer *Axial-* oder *Reaktionsturbine*. Beide Modelle können als Antriebsaggregate, als „Wassermotoren", benutzt werden.
Mit einem Aufbaugerät zur Demonstration von Wasserkraftmaschinen (Abb. 1.0.5./2) können die Modelle eines *Segnerschen Wasserrades*, eines *oberschlächtigen Wasserrades*, einer *Peltonturbine* und einer *Axialturbine* aufgebaut werden.
Im Unterricht werden diese Modelle gewöhnlich nur vorgeführt. In den „Methodischen Hinweisen" der einzelnen Versuchsbeschreibungen werden Anregungen gegeben, welche Besonderheiten bei den verschiedenen Modellen als charakteristisch herausgearbeitet werden sollten. Dabei bietet sich Gelegenheit, auf das Problem der Speicherung von Energie einzugehen und die volkswirtschaftliche Bedeutung der Talsperren, Pumpspeicherwerke und Wasserkraftwerke zu erläutern.

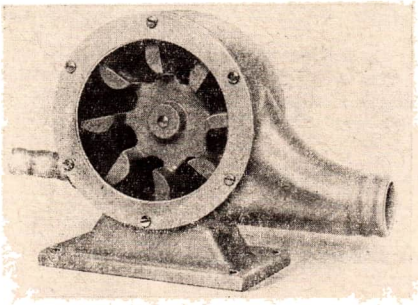


Abb. 1.0.5./1
Modell einer Freistrahlturbine

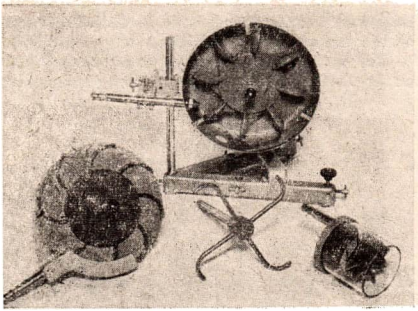


Abb. 1.0.5./2
Aufbaugerät zur Demonstration von Wasserkraftmaschinen

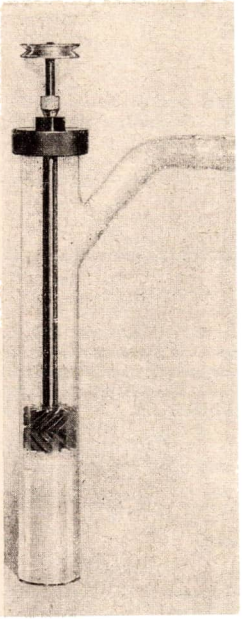


Abb. 1.0.5./3
Modell einer Reaktionsturbine

1.0.6. Die *Arbeit mit Quecksilber* erfordert besondere Vorsicht und Sorgfalt. Es sei hier ausdrücklich auf den § 4 (Verantwortlichkeit) des Gesetzes über den Verkehr mit Giften — Giftgesetz — vom 7. April 1977 hingewiesen, dessen Bestimmungen jeder kennen und beachten muß, der mit Giften umzugehen hat. Außerdem sind hier einige wichtige Hinweise für das Aufbewahren, die Reinigung und den Einsatz des Quecksilbers in Schulversuchen zusammengestellt.

1. *Aufbewahren von Quecksilber.* Zum Aufbewahren des gebrauchsfertigen Quecksilbers dient eine Stöpselflasche aus Glas oder Porzellan. In diese Flasche darf nur ganz sauberes Quecksilber zurückgegossen werden. Sie erhält die zusätzliche Aufschrift „Flasche 1 — reines Quecksilber". Zur Aufnahme des Quecksilbers nach einem Versuch dient eine zweite Flasche; Flaschenaufschrift „Flasche 2 — gebrauchtes Quecksilber". Grob verunreinigtes Quecksilber, das größere Mengen Staub, Schmutz,

Wasser, Fett, Metalloxide und Metalle, wie Blei, Zink, Kupfer, enthält, wird in einer weiteren Flasche aufbewahrt. Flaschenaufschrift „Flasche 3 — unsauberes Quecksilber".

2. *Quecksilberbrett.* Das Quecksilberbrett ist ein Tablett mit erhöhten Rändern. In einer Ecke ist es mit einer Bohrung versehen, die mit einem Gummistopfen verschlossen werden kann. Sie erleichtert das Zurückgießen verschütteten Quecksilbers in die Flasche.

3. *Experimentiergefäße für Quecksilber.* Die beim Versuch mit Quecksilber zu füllenden Gefäße, Schalen, Wannen, Röhren, sind stets vor dem Gebrauch sorgfältig zu reinigen und von Staub zu befreien.

4. *Einfüllen von Quecksilber.* Zum Einfüllen des Quecksilbers in enge Gefäße, insbesondere in Röhren, bedient man sich stets eines Quecksilbertropfers (Abb. 1.0.6./1). Zum Füllen etwas weiterer Röhren kann man auch einen Trichter mit einem verjüngten Ausflußrohr verwenden. Auch zum Zurückgießen in eine der Vorratsflaschen wird dieser Trichter verwendet.

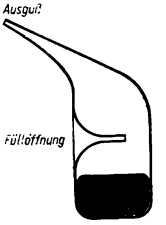


Abb. 1.0.6./1
Quecksilbertropfer

5. *Verspritztes Quecksilber.* Quecksilberdämpfe sind in hohem Grade gesundheitsschädlich. Das Verschütten von Quecksilber auf den Tisch oder gar auf den Fußboden ist daher peinlich zu vermeiden. Sollte trotz aller Achtsamkeit etwas Quecksilber verspritzt werden, so ist es mit Hilfe eines Pinsels sorgfältig zu einem größeren Tropfen zusammenzukehren. Dieser wird mittels einer Quecksilberzange aufgehoben. Das so geborgene Quecksilber wird in Flasche 3 gesammelt.

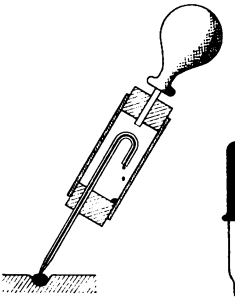


Abb. 1.0.6./2
Tropfensammler für Quecksilber

Abb. 1.0.6./3
Glaspipette mit Gummisauger

6. *Tropfensammler für Quecksilber.* Zum Heben eines in eine Tisch- oder Fußbodenritze geratenen Quecksilbertropfens dient ein Tropfensammler für Quecksilber. Er enthält ein kurzes, weites Rohrstück, das durch zwei einfach durchbohrte Gummistopfen verschlossen wird. Durch diese führt auf der einen Seite ein U-förmig gebogenes, nach außen ausgezogenes Kapillarrohr, auf der anderen Seite ein kurzes Glasrohr, auf das ein Gummiball, wie er beispielsweise an Säureprüfern und ähnlichen Geräten benutzt wird, aufgeschoben ist (Abb. 1.0.6./2). Will man Quecksilbertropfen aus einer Ritze entfernen, so drückt man den Ball zusammen, nähert das Gerät mit der Kapillarrohrspitze dem Tropfen und gibt den Ball frei. Die Tropfen werden dadurch in das weite Rohr gerissen und sammeln sich dort. Sie werden nach Entfernen des Stopfens mit dem Ball in Flasche 3 geschüttet. Als Behelf kann auch eine kleine Glaspipette mit Gummisauger benutzt werden (Abb. 1.0.6./3).

7. *Durchtrichtern von Quecksilber.* Das Quecksilber darf nach Gebrauch bei einem Versuch niemals ohne weiteres in die Flasche 2 und erst recht nicht in Flasche 1 zurückgegossen werden, insbesondere, wenn es bei dem Versuch feucht oder staubig geworden sein sollte. Man gießt es zunächst in einen Trichter, dessen Ausflußrohr zu einer Spitze ausgezogen ist, und läßt es in einem feinen Strahl behutsam in eine daruntergestellte, sorgfältig gereinigte Porzellanschale fließen. Man wählt zweckmäßigerweise dazu eine mit einem Ausguß versehene Schale. Etwa dem Quecksilber beigemengte leichte Verunreinigungen und Wassertropfen schwimmen dann im Trichter auf der Quecksilberoberfläche. Ist diese bis zum oberen Ende des Trichterrohres abgesunken, so unterbricht man das Abfließen, indem man die Austrittsöffnung durch Gegenhalten einer sauberen Fingerkuppe verschließt, und läßt den Rest des Quecksilbers in Flasche 3 fließen.
Das in der Porzellanschale befindliche Quecksilber gießt man unter Verwendung eines Trichters in Flasche 2 zurück.
Statt des spitz ausgezogenen Trichters ist auch ein gewöhnlicher Glastrichter geeignet, dessen Ausflußrohr man mit den gekrümmten Fingern der gut gesäuberten Hand umfaßt, während man mit dem gegen das Rohrende gedrückten Daumen derselben Hand die Austrittsöffnung verengt.
8. *Beseitigen von Fettspuren aus Quecksilber.* Man schüttet das Quecksilber in eine dickwandige Stöpselflasche mit Kali- oder Natronlauge, mit Benzin, Benzol oder Alkohol. Dann schüttelt man es mehrmals mit Wasser nach, nachdem man die über dem Quecksilber stehenden Flüssigkeiten abgehebert und den dabei noch verbleibenden Rest mit einer Pipette abgesaugt hat.
9. *Beseitigen von Fremdmetallen und Metalloxiden aus Quecksilber.* Man schüttelt das verunreinigte Quecksilber kräftig mit verdünnter Salpetersäure (5%) oder mit einer Lösung von Kaliumbichromat und schüttelt danach mit Wasser nach (vgl. 8). Sehr zweckmäßig ist die Verwendung eines Durchlaufrohrs, das man am besten immer betriebsfertig bereithält. Es besteht im wesentlichen aus einem etwa 150 cm langen und 4 cm weiten, von einem hölzernen Gestell in vertikaler Stellung gehaltenen Rohr, an das unten ein Rohr mit einer lichten Weite von etwa 3 mm angeschmolzen ist. Dieses ist etwa 12 cm hoch, S-förmig nach oben geführt und endet mit einem wieder nach unten gebogenen Schenkel. Unter der nach unten gerichteten Öffnung steht ein Auffangglas (Abb. 1.0.6./4). Das Gerät ist unten mit

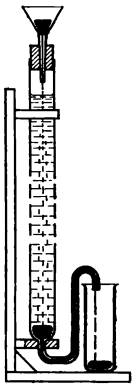


Abb. 1.0.6./4
Durchlaufrohr zum Reinigen von Quecksilber



Abb. 1.0.6./5
Quecksilberfilter

ein wenig reinem Quecksilber gefüllt. Auf diesem ruht im langen Rohr eine bis zum oberen Rand reichende Säule von 8%iger Salpetersäure, in die von oben her ein von einem Gummistopfen gehaltener, mit einem fein ausgezogenen zugespitzten Ausflußrohr versehener Trichter hineinragt. Gießt man das verunreinigte Quecksilber durch den Trichter in das Rohr, so durchfällt es die Salpetersäure in einem ganz feinen Strahl. Unten fließt durch das S-Rohr das gereinigte Quecksilber in das daruntergestellte Glas. Auch hier ist das Quecksilber mit Wasser nachzuspülen.

10. *Reinigen mit dem Quecksilberfilter.* Im unteren Teil des Gerätes ist eine Filterscheibe eingeschmolzen, die aus feinen Kapillaren besteht (Abb. 1.0.6./5). Man befestigt das Gerät in lotrechter Stellung an einem Stativ dicht über einer gut gereinigten Glas- oder Porzellanschale. Füllt man das Gerät mit verunreinigtem Quecksilber, so fließt infolge des Bodendrucks ein Teil des Quecksilbers durch das Filter. Ist der Quecksilberspiegel im Rohr auf eine bestimmte Höhe abgesunken, dann reicht der Bodendruck nicht mehr aus. Das zurückbleibende Quecksilber ist stark verunreinigt und wird in die Flasche 3 gefüllt, während das filtrierte Quecksilber in die Flasche 1 zurückgegossen werden kann.

11. *Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber.*

1. Damit kein verschüttetes Quecksilber verlorengeht und nicht durch Entwickeln von Quecksilberdämpfen gesundheitliche Schäden entstehen, müssen alle Arbeiten mit Quecksilber, auch das Zurückgießen des Quecksilbers in die Vorratsflasche, über einem *Quecksilberbrett* ausgeführt werden.

2. Zum Einfüllen des Quecksilbers in Röhren mit geringer lichter Weite benutzt man einen *Quecksilbertropfer* (Abb. 1.0.6./1). Zum Einfüllen in Röhren mit größerer lichter Weite oder in Flaschen benutzt man einen Trichter.

3. Quecksilber darf wegen der Amalgambildung nicht mit Metallen — außer mit Eisen — in Berührung kommen. Deshalb müssen Fingerringe vor dem Arbeiten mit Quecksilber abgestreift werden.

4. Fallen trotz aller Vorsicht einige Tropfen Quecksilber auf den Tisch, so sind sie mit Hilfe einer Quecksilberzange zu sammeln. Kleine Tröpfchen fegt man mit einem Pinsel vorsichtig zusammen. Vereinigen sie sich nicht zu einem größeren Tropfen, fegt man sie in eine Glasschale, die man unter den Rand der Tischplatte hält. Bei neueren Experimentiertischen sind die Tischplatten am Rand mit einer Rinne versehen, um zu verhindern, daß Quecksilbertropfen herunterrollen können. Es dürfen unter keinen Umständen Quecksilberkügelchen in Rillen des Experimentiertisches liegenbleiben, in das Ausgußbecken des Tisches oder auf den Fußboden fallen.

5. Verunreinigtes Quecksilber ist auf jeden Fall zu reinigen und erst dann in die Vorratsflasche zurückzugießen.

6. Die Vorratsflasche ist stets unter Verschluß zu halten.

7. Für Schülerexperimente darf Quecksilber nicht benutzt werden.

1.0.7. Da zu den Versuchen häufig Teile aus Glasrohr benötigt werden, sind nachfolgend einige einfache *Glasarbeiten* beschrieben.

1. *Schneiden eines Glasrohrs.* Zum Schneiden von Glasrohren oder Glasstäben mit einem Durchmesser bis zu etwa 20 mm verwendet man einen Glasrohrschneider. Er ist ein Rollenglasschneider, seine Handhabung geht aus der Abbildung 1.0.7./1 hervor. Das Rohr wird einmal um seine Achse gedreht und dabei ringsherum eingeritzt. Danach faßt man das Rohr so, daß die Sollbruchstelle zwischen beiden Händen liegt, und reißt das Rohr mit einem kurzen Ruck, mehr ziehend als brechend, auseinander. Als Notbehelf kann auch eine scharfkantige Dreikantfeile

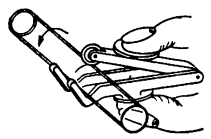


Abb. 1.0.7./1
Glasrohrschneider

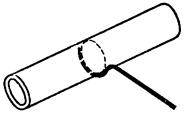


Abb. 1.0.7./3
Absprengen eines Glasrohres
unter Verwendung eines erhitzten gebogenen Eisendrahtes

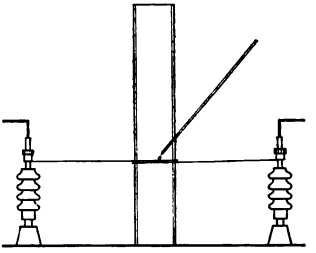


Abb. 1.0.7./2
Absprengen eines Glaszylinders mit Hilfe
eines elektrisch erhitzten Drahtes

mit feinem Hieb verwendet werden, die man ähnlich handhabt wie den Glasrohrschneider. Bei dünnwandigen Kapillarröhren ist sie dem Glasrohrschneider sogar vorzuziehen.

2. *Absprengen eines Glasrohrs.* Rohre mit größerem Durchmesser werden abgesprengt. Sie werden vorher ebenfalls ringsherum eingeritzt. Man erhitzt einen spitzgezogenen Glasstab über einem Bunsenbrenner. An der Spitze bildet sich eine kleine, heiße Glaskugel, die man nach und nach ringsherum auf die eingeritzte Rinne drückt. Beim Berühren des Rohrs mit der glühenden Glasspitze springt das Rohr jedesmal ein wenig in Richtung der geritzten Bahn weiter und zerfällt schließlich in zwei Teile.

Eine sehr saubere Sprengspur erhält man durch Erhitzen eines Sprengdrahtes mit Hilfe des elektrischen Stromes. Man legt einen etwa 0,3 mm dicken Eisendraht um das abzusprengende Rohr und klemmt die Drahtenden an zwei Holtzsche Klemmen (Abb. 1.0.7./2), die man an das Stromversorgungsgerät anschließt. Man wählt die Stromstärke so, daß der Draht hellrot glüht. Mit Hilfe eines anderen Drahtes tupft man Wasser auf den die Glasröhre umschlingenden Sprengdraht. Dieser kühlt sich sofort ab; unter ihm entsteht infolge der plötzlichen Abkühlung ein feiner Riß, der sich rings um das Rohr ausbreitet.

Statt des Glasstabes kann man auch eine spitze, kleine Gasflamme verwenden. Man dreht die eingeritzte Stelle gleichmäßig vor der Flamme und sprengt das Rohr durch Gegenblasen oder Betupfen der erhitzten Stelle mit kaltem Wasser auseinander.

Zum Sprengen von dickwandigen und weiten Rohren eignet sich besonders ein etwa 3 mm dicker Eisendraht, der an einem Ende entsprechend dem Durchmesser des Rohrs halbrund gebogen wird (Abb. 1.0.7./3). Man erhitzt den Draht in einer Flamme bis auf Rotglut, legt auf die Rundung des Drahtes die angeritzte Stelle des Rohrs und dreht das Rohr gleichmäßig in einer Richtung. Beim Abkühlen des Drahtes durch Gegenblasen springt das Rohr an der eingeritzten Stelle auseinander.

3. *Rundschmelzen eines Glasrohrendes.* Man hält die scharfkantige Bruchstelle des geschnittenen Glasrohrs gleichmäßig drehend in die leuchtende Flamme eines

Bunsenbrenners. Nach kurzer Zeit fängt der Rand an zu glühen; das Rundschmelzen ist damit vollzogen.

4. *Ausziehen von Glasspitzen.* Das Glasrohr wird mit Hilfe eines mit einem Schlitzaufsatz versehenen Bunsenbrenners über einer breiten Flamme erhitzt. Beginnt das Rohr weich zu werden, so nimmt man es aus der Flamme und zieht es langsam so weit auseinander, bis die gewünschte Rohrverjüngung erreicht ist. Dann läßt man das Rohr erkalten, ritzt es an der Verengung ein und bricht es auseinander. Die Bruchstelle wird in der Flamme rundgeschmolzen.

5. *Herstellen einer Kapillare.* Der Arbeitsvorgang verläuft ähnlich wie beim Ausziehen einer Glasspitze. Zieht man das Rohr weiter auseinander, so verjüngt es sich zu einer Kapillare. Man erhält sehr feine und lange Kapillarröhren, wenn man das Rohr sehr rasch auseinanderzieht.

6. *Zuschmelzen eines Glasrohrs.* Man verfährt beim Zuschmelzen eines Glasrohrs ähnlich wie beim Ausziehen einer Spitze.

Das zu einer kurzen Spitze ausgezogene Ende des Rohrs wird in die Flamme gehalten; dabei schmilzt die Spitze in sich zusammen und bildet einen runden Abschluß des Rohres. Man verbessert die Rundung dadurch, daß man das spitz verlaufende Ende vorsichtig aufbläst.

Ein glatt abgeschnittenes Glasrohrende schmilzt man zu, indem man es unter stetem Drehen vor einer Gebläseflamme stark erhitzt. Dabei ziehen sich die Schnittränder immer mehr zusammen und verschmelzen schließlich. Das überschüssige Glas entfernt man durch Berühren des heißen Endes mit einem in die Flamme gehaltenen Glasstab und Ausziehen zu einem Faden. Die verbleibende Glaskuppe wird durch vorsichtiges Aufblasen vor der spitzen Gebläseflamme gerundet.

7. *Biegen eines Glasrohrs.* Zum Biegen eines Glasrohrs verwendet man einen Bunsenbrenner mit Schlitzaufsatz. Die mit diesem Aufsatz erzeugte breite Flamme erhitzt das Rohr gleichmäßig auf einer Länge von etwa 5 cm. Man faßt das Rohr mit beiden Händen und hält die zu biegende Stelle der Länge nach unter gleichmäßigem Drehen des Rohres in die Flamme. Beginnt die erwärmte Stelle teigig zu werden, so nimmt man das Rohr aus der Flamme heraus und hält es nur noch mit einer Hand. Das freie Ende des Rohrs neigt sich infolge seines Eigengewichtes und biegt das Rohr an der erwärmten Stelle. Ausstauchungen und Verengungen, die beim Biegen von Rohren, insbesondere bei solchen größeren Durchmessers, leicht entstehen, beseitigt man dadurch, daß man das eine Ende des Rohrs durch einen kleinen, aus weichem Papier zusammengedrehten Stopfen verschließt und beim Biegen kräftig in das Rohr bläst. Sollte trotzdem eine Einknickung entstehen, so erweicht man die Knickstelle vor einer spitzen Gebläseflamme und treibt die Rohrverengung durch vorsichtiges Hineinblasen in das Rohr auf. Dies setzt man so lange fort, bis die Glasmasse an der Knickstelle sich gleichmäßig über den ganzen Rohrumfang verteilt hat.

8. *Aneinanderschmelzen zweier Glasrohrenden.* Die Glasrohre müssen an den aneinanderzuschmelzenden Enden gerade und glatt abgeschnitten sein. Man hält die Rohre mit beiden Enden so in eine Gebläseflamme, daß sich die zu vereinigenden Enden gegenüberstehen, und erhitzt sie unter ständigem Drehen. Sobald die Enden zu glühen beginnen, setzt man sie unter schwachem Druck aufeinander, zieht sie sofort wieder ein wenig auseinander und bläst leicht auf. Sollte trotzdem ein Randwulst entstehen, so richtet man bei fortwährendem Drehen eine spitze Gebläseflamme dagegen und wechselt mehrere Male mit Aufblasen und Zusammenfallenlassen, bis sich die Glasmasse über einen größeren Wandbereich verteilt hat (Abb.1.0.7./4).

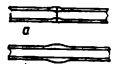


Abb. 1.0.7./4
Nahtstelle zwischen zwei aneinandergeschmolzenen Glasrohrenden
a) unmittelbar nach dem Zusammenfügen,
b) nach dem Ausgleich des Wulstes

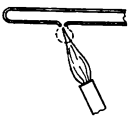


Abb. 1.0.7./5
Einblasen einer spitzen Öffnung in ein Glasrohr

9. *Einblasen einer spitzen Öffnung in ein Glasrohr oder in ein dünnwandiges Gefäß.* Man verschließt das Rohr an einem Ende. Dann richtet man gegen die Stelle, an der die Öffnung entstehen soll, die Spitze einer spitzen Gebläseflamme und bringt die Glaswand in einem ganz eng begrenzten Bereich zum Glühen. Durch plötzliches, kräftiges Hineinblasen treibt man die erhitzte Stelle nach außen auf, wobei sie sich in der Mitte stark aufbläht und zerreißt (Abb. 1.0.7./5). Meist ist die Reißstelle noch mit daranhängenden Glasflittern umgeben, die man durch vorsichtiges Gegenklopfen entfernt. Der Bruchrand der kleinen nach außen gewölbten Spitze wird rundgeschmolzen.
10. *Anblasen einer Kugel an einem Ende.* Man erhitzt das zugeschmolzene Ende eines Glasrohrs in einer Länge von 2 cm bis 4 cm, wobei man es senkrecht in die Gebläseflamme hält und ständig um die Rohrachse dreht. Das freie Ende des Rohrs ist dabei ebenfalls verschlossen zu halten. Sobald das erhitzte Ende des Rohrs stark glüht, bläst man es außerhalb der Flamme unter fortgesetzter Drehung vorsichtig zu einer kleinen Kugel auf. Diese erhitzt man von neuem, bläst wieder auf und setzt dies fort, bis die Kugel die gewünschte Größe angenommen hat.
Zur Beachtung bei Nr. 6, 7, 8, 9, 10: Die bearbeiteten Glasteile dürfen nach dem Fertigstellen zum Abkühlen niemals unmittelbar aus der Gebläseflamme genommen und beiseite gelegt werden, da sonst die Gefahr des nachträglichen Springens besteht. Man stelle die Luftzufuhr zum Gebläsebrenner ab, bringe die Werkstücke zunächst in die sich bildende leuchtende Gasflamme und halte sie zuerst ganz allmählich immer höher über diese, so daß sie sich langsam abkühlen. Größere Stücke läßt man so lange in der Flamme, bis sich Ruß auf ihnen absetzt.

1.1. Flüssigkeiten mit freier Oberfläche — Verbundene Gefäße

1.1.1. Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Visieren [SE]

1. Großes Becherglas oder Glastrog (Aquarienglas)
2. Unterlegklotz
3. Zeiger mit Federklammer

Methodischer Hinweis

Die Tatsache, daß sich freie Flüssigkeitsoberflächen im Ruhezustand waagerecht einstellen, ist zwar auch den Schülern der unteren Klassen i. a. schon bekannt, sollte

Ihnen aber durch ein Experiment bewußtgemacht werden, weil sie die Voraussetzung für das Verständnis einer Reihe weiterer Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten ist.

Versuch

Ein großes Becherglas oder ein Glastrog (Aquarienglas) wird auf eine waagerechte Tischplatte gestellt und mit Wasser gefüllt. Man visiert genau die Oberfläche des Wassers und markiert die Blickrichtung durch einen Zeiger mit Federklammer, den man an einem Stativ befestigt. Bei einer Wiederholung des Versuchs in einer beliebigen anderen Blickrichtung behält der Zeiger seine Höhenlage bei. Die Wasseroberfläche ist demnach der Tischplatte parallel, sie ist eine waagerechte Ebene. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Tischplatte selbst waagerecht steht. Stellt man das Glasgefäß durch einen untergestellten Holzklotz schräg, so zeigt ein entsprechender Versuch wieder die waagerechte Lage der Oberfläche des Wassers (Abb. 1.1.1./1).

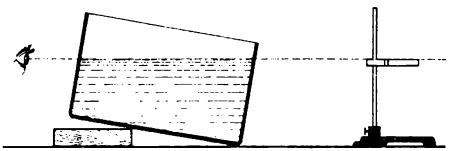


Abb. 1.1.1./1
Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Visieren

Bemerkungen

1. Die waagerechte Lage der Tischplatte sollte vor dem Versuch mit einer Wasserwaage überprüft werden.
2. Das Experiment eignet sich dazu, im Anfangsunterricht des Faches Physik den Schülern eine einfache Möglichkeit zu zeigen, auf welchem Wege Erkenntnisse gewonnen werden können. Man kann auch Anfänge der Fertigkeit im zielgerichteten Beobachten herausbilden.

1.1.2. Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Abtasten [SE]

1. Großes Becherglas oder Glastrog (Aquarienglas)
2. zugespitzter Holzstab oder Glasstab
3. Unterlegklotz

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.1.1.!

Versuch

Ein Glasgefäß wird wie in V 1.1.1. mit Wasser gefüllt und auf den Tisch gestellt. Der Holz- oder Glasstab wird in lotrechter Lage so an einem Stativ befestigt, daß er die Oberfläche des Wassers gerade berührt (Abb. 1.1.2./1). An diesem Befund wird nichts geändert, wenn das Stativ verschoben wird. Es ergeben sich auch bei schräg

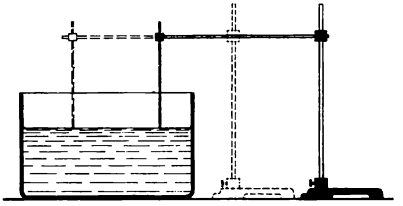


Abb. 1.1.2./1
Prüfen von Gestalt und Lage der freien Oberfläche einer Flüssigkeit durch Abtasten

gestelltem Gefäß dieselben Folgerungen wie bei V 1.1.1. Die Tischplatte selbst muß waagerecht liegen.

1.1.3. Beständigkeit des Volumens beim Umgießen einer Flüssigkeit

1. Verschiedene Meßzylinder (100 ml, 200 ml, 500 ml)
2. verschiedene Bechergläser, Kochflaschen, Glasschalen u. a. m.

Methodische Hinweise

1. Obwohl das Versuchsergebnis den Schülern aus ihrer Erfahrungswelt bekannt ist, sollte man diesen Versuch ausführen, damit den Schülern diese Eigenschaft der Flüssigkeiten bewußt wird. Sie kann dann mit Hilfe des Modellversuchs V 1.1.4. aus der Struktur der Flüssigkeiten erklärt werden.
2. Bei diesem Experiment lernen die Schüler, beim Unterscheiden von speziellen Einzelmerkmalen der Flüssigkeiten und ihrer Eigenschaften bewußt wesentliche Merkmale (Volumen) von unwesentlichen (Form) zu trennen.

Versuch

Verschiedene Flüssigkeitsmengen werden abgemessen und in Bechergläser, Kochflaschen, Standzylinder und andere graduierte und nichtgraduierte Gefäße umgegossen. Es wird festgestellt, daß sich das Volumen dabei nicht ändert. Von der geringen Differenz, die durch Adhäsion an der Gefäßwand bedingt ist, kann abgesehen werden. Man kann aber auch diesen Verlust stark einschränken, wenn man die Gefäße vor dem Versuch mit Wasser ausspült und sie beim Umgießen im Experiment gut austropfen läßt.
Nützlich ist ein Hinweis auf die mannigfachen Formen des von der Flüssigkeit erfüllten Raumes, die sich bei Lageveränderungen der Gefäße ergeben. Vgl. 1. Teil, V 1.1.9., V 2.1.1.

1.1.4. Flüssigkeitsmodelle

1. Becherglas oder Glastrog
2. kleine Kugeln (Glasperlen, kleine Stahlkugeln) oder Erbsen, kleine Kieselsteine
3. Pulver (trockener Sand, Schwefelblume, Bärlappsporen, Blütenstaub von Hasel oder Kiefer)
4. angespitzter Holzstab

Methodischer Hinweis

Im 1. Teil wurde bereits beschrieben, wie man mit den oben angegebenen körnigen Substanzen eine Flüssigkeit modellmäßig veranschaulichen kann. Die folgende Versuchsbeschreibung dient der Erklärung, wie die waagerechte Lage der Flüssigkeitsoberfläche zustande kommt. Dabei muß beachtet werden:

a) Die Gestalt der Modellkörper berechtigt nicht zu einem Schluß auf die Gestalt der Moleküle.
b) Es fehlen am Modell gänzlich die Kohäsions- und Adhäsionskräfte.
c) Es fehlt am Modell die Eigenbewegung der Moleküle.

Versuch

Schüttet man Glasperlen oder andere kleine Kugeln in ein Gefäß, so kann man durch Rütteln eine annähernd waagerechte Oberfläche herstellen. Stößt man einen angespitzten Holzstab hinein, so fühlt man, daß die Teilchen um so leichter ausweichen, je kleiner sie sind. Hält man eine mit Lykopodium oder Blütenstaub gefüllte Flasche schräg und dreht sie langsam um ihre Achse, so stellt sich fast von selbst eine waagerechte Oberfläche des Inhalts ein. Die einzelnen Körnchen gleiten wie auf einer geneigten Ebene herab und füllen vorhandene Vertiefungen aus, bis die Oberfläche waagerecht ist.

Bemerkung

Bärlappensporen (Lykopodium) und Blütenstaub bewahrt man am besten in Pulverflaschen auf.

1.1.5. Versuch zum Nachweis der Unveränderlichkeit des Wasservolumens

1· Glasrohr (∅ 10 mm bis 15 mm, Länge 25 cm bis 30 cm)
2· zwei gut eingepaßte Korken
3· Holzstab

Methodische Hinweise

1. Im 1. Teil wurde bereits ein Versuch beschrieben, mit dem die unterschiedliche Kompressibilität flüssiger und gasförmiger Körper nachgewiesen werden kann. Aus Gründen der Systematik soll hier ein Teil dieses Experiments wiederholt werden.
2. Vergleiche MH V 1.1.3. und V 1.1.4.!

Versuch

Wie bei dem Experiment im 1. Teil wird der eine Korken in die Röhre, etwa bis zu ihrer Mitte, hineingestoßen. Man füllt den einen Röhrenteil mit gefärbtem Wasser und verschließt ihn durch den anderen Korken. Drückt man diesen mittels des Holzstabes in die Röhre hinein, so verschiebt sich die Flüssigkeitssäule, ohne daß eine Änderung ihrer Länge zu beobachten ist.
Der Versuch zeigt, daß bei den verwendeten Druckkräften eine Zusammendrückbarkeit des Wassers nicht festzustellen ist.

Bemerkung

Zur Verbesserung ihrer Elastizität sind die Korken vor dem Gebrauch längere Zeit zu kochen.

1.1.6. Ausdehnung des Wassers bei Druckabnahme

1. Standkolben (500 ml) mit Gummistopfen
2. zweimal rechtwinklig gebogene Kapillarröhre aus Glas (innerer Durchmesser 1 mm)
3. kleines Becherglas
4. gefärbtes, abgekochtes Wasser
5. Luftpumpe mit Teller
6. Rezipient

Methodischer Hinweis

Die Kompressibilität des Wassers kann mit schulischen Mitteln in der Regel nicht gezeigt werden. Man kann aber umgekehrt die Ausdehnung des Wassers bei der Abnahme des Druckes nachweisen.
Bei der Auswertung des Experiments kann man darauf hinweisen, daß unsere Umwelt und ihre Gesetzmäßigkeiten erkennbar sind, daß es oft nur darauf ankommt, die richtige Methode zu finden, um die Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten zu untersuchen.

Versuch

Ein Glaskolben wird mit gekochtem, gefärbtem Wasser gefüllt und mit einem durchbohrten Stopfen verschlossen. Durch die Bohrung führt man ein zweimal rechtwinklig gebogenes, 1 mm weites Kapillarrohr, dessen waagerechter Schenkel etwa 70 mm lang ist (Abb. 1.1.6./1). Man paßt die Kapillare so in den Stopfen, daß

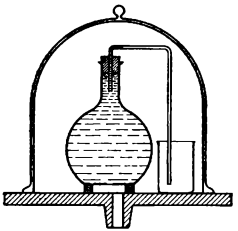


Abb. 1.1.6./1
Nachweis der Volumenelastizität des Wassers bei Druckverminderung

die Flüssigkeit im waagerechten Schenkel dicht hinter dem Knick des Rohres steht. Die Vorrichtung wird unter den Rezipienten einer Luftpumpe gestellt, wobei man die Zuführung zur Pumpe durch Unterlegen einiger Klötzchen frei hält. Unter die Ausflußröhre stellt man ein kleines Becherglas, um auf jeden Fall zu verhindern, daß ausfließendes Wasser in die Pumpe gelangt.

Beim Auspumpen beobachtet man ein Vorrücken des Flüssigkeitsfadens in der Kapillare. Das Volumen des Wassers hat sich demnach bei der Druckabnahme vergrößert. Wenn man wieder Luft einläßt, geht die Flüssigkeit auf den alten Stand zurück. Wasser verhält sich somit bei Druckveränderungen hinsichtlich seines Volumens wie ein elastischer Körper.

Bemerkungen

1. Der beschriebene Versuch zeigt, daß die relative Volumenänderung einer Wassermenge bei der Druckabnahme von etwa 1 bar (10^5 Pa) sehr gering ist. Für genaue Versuche ist ein Piezometer erforderlich, das Schulen kaum zur Verfügung steht. Versuche mit einem Piezometer haben ergeben, daß die Zusammendrückbarkeit des Wassers von dem Anfangsdruck und der Temperatur abhängt. Bei einer Druckerhöhung von 50 bar und bei einer Temperatur von 20 °C läßt sich 1 l Wasser um 48,3 ml zusammendrücken.
2. Voraussetzung für das eindeutige Gelingen des Versuches ist, daß das Wasser durch Sieden von Luft befreit ist und daß beim Verschließen der Flasche mit dem durchbohrten Stopfen keine Luft mit eingeschlossen wird.

1.1.7. Standzylinder mit eingetauchtem Glasrohr als Beispiel verbundener Gefäße

1. Standzylinder
2. Glasrohr

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist als Vorversuch zur Behandlung der verbundenen Gefäße geeignet.

Versuch

Taucht man ein Glasrohr in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder, so steht das Wasser im Rohr ebenso hoch wie im Zylinder. Das Rohr bildet mit dem Zylinder ein einziges Gefäßsystem mit zwei Zylinderflächen als Wandungen. In diesem Gefäßsystem ist die freie Oberfläche des Wassers eine waagerechte Ebene.

Bemerkung

Das Rohr muß so weit sein, daß die Beobachtungen nicht durch Kapillarwirkungen gestört werden.

1.1.8. Flüssigkeitsstand in zwei durch einen Schlauch verbundenen Röhren

1. Zwei gleich weite Glasröhren, an einem Ende mit einer Schlaucholive versehen (∅ etwa 15 mm, Länge etwa 50 cm)
2. großer Glastrichter oder Trichterrohr aus einem Kippschen Apparat
3. Kugelrohr
4. Schlauch

Methodischer Hinweis

Der Vorzug dieser Versuchsanordnung besteht darin, daß die verbundenen Gefäße in ihrer Form verändert werden können.

Versuch

In zwei gleich weite, durch einen Gummischlauch verbundene Glasröhren mit einem Durchmesser von etwa 15 mm füllt man gefärbtes Wasser. Luftblasen werden durch Drücken auf den Schlauch und durch wiederholtes Heben und Senken der Röhren entfernt. Die Wasserspiegel in den beiden Röhren liegen stets in einer waagerechten Ebene, unabhängig von der Lage des Schlauches und der Neigung der Röhren, auch wenn man die Röhren kreuzt (Abb. 1.1.8./1a bis c).

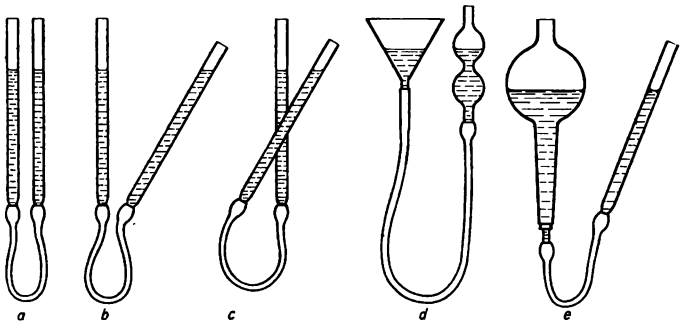


Abb. 1.1.8./1a bis e
Verschiedene Formen und Stellungen beweglich verbundener Röhren als Beispiele verbundener Gefäße

Dasselbe gilt, wenn man eine Röhre oder beide durch Trichter oder beliebig geformte Röhren ersetzt (Abb. d und e). Die so entstandenen Gefäße kann man als ein einziges Gefäß mit freier Oberfläche ansehen, in welchem der Wasserspiegel waagerecht steht

Bemerkung

Um störende Kapillarwirkungen zu vermeiden, wähle man keine zu engen Glasröhren.

1.1.9. Flüssigkeitsstand in einem U-Rohr mit Öffnung

1. U-Rohr (⌀ 2 cm, Schenkellänge etwa 16 cm)
2. Glastrog (Aquarienglas)

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt im Prinzip dasselbe wie die beiden vorhergehenden. Er ist zusätzlich aufgenommen, weil die im Rohr befindliche Flüssigkeit ein Teil einer größeren Wassermenge ist. Hierdurch wird die Möglichkeit geboten, das Gesetz der verbundenen Gefäße verständlich zu machen, ohne sich auf den Druck beziehen zu müssen.

Versuch

Man versieht ein U-Rohr an seiner Biegung mit einer kleinen Öffnung. Das so vorbereitete Rohr wird in ein mit Wasser gefülltes Gefäß getaucht (Abb. 1.1.9./1).

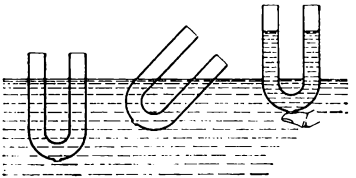


Abb. 1.1.9./1
Flüssigkeitsstand in einem mit einer Öffnung versehenem U-Rohr

Das Wasser dringt durch die Öffnung und steht in beiden Schenkeln in der Höhe des äußeren Wasserspiegels, wie man das U-Rohr auch halten mag.
Verschließt man die untere Öffnung mit dem Finger und hebt das U-Rohr heraus, ohne seine Lage zu ändern, so bleibt der Wasserstand in beiden Schenkeln erhalten. Neigt man das Rohr nachträglich, so stellen sich die Oberflächen in beiden Schenkeln bei jeder Lage immer wieder in ein und dieselbe waagerechte Ebene ein.

1.1.10. Versuch zur Erklärung der Wirkungsweise verbundener Gefäße mit Hilfe eines Glastrogs mit Trennwand

1. Glastrog (Aquarienglas)
2. Brett von der Breite des Trogs
3. Tuch- oder Filzstreifen, wasserunlöslicher Klebstoff

Methodischer Hinweis

Der Vorzug dieses Experiments liegt in der einfachen und deshalb leicht zu übersehenden Versuchsanordnung. Entfernt man das Brett aus dem Trog, dann werden beide Teile des Gefäßes wieder vereinigt, und der Schüler erkennt, daß die Flüssigkeitsoberflächen in verbundenen Gefäßen als Teile einer gemeinsamen Flüssigkeitsoberfläche betrachtet werden können.

Versuch

Bei dem Versuch wird ein mit Wasser gefüllter Glastrog durch ein eingeschobenes Brett von der Breite des Trogs in zwei Räume unterteilt, die nur am Boden des

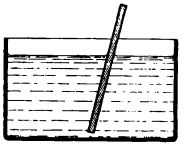


Abb. 1.1.10./1
Versuch zur Wirkungsweise verbundener Gefäße

Gefäßes in Verbindung stehen (Abb. 1.1.10./1). Um das Brett an den Seiten gegen die Gefäßwände abzudichten, klebt man auf die Stirnflächen des Brettes mit wasserunlöslichem Klebstoff Tuch- oder Filzstreifen. Es zeigt sich, daß das Wasser bei jeder Stellung des Brettes, auch bei Schräglage, in den beiden Gefäßräumen eine waagerechte Ebene bildet.

1.1.11. Modell eines Wasserstandsanzeigers

1
2. Hoher Standzylinder mit drei seitlichen Tuben
3. drei durchbohrte Gummistopfen
. Glasrohr, Gummischlauch
4. Glasschale oder Glastrog
5. Schraubhahn

Versuch

Als Wasserbehälter, der mit einem Wasserstandsanzeiger versehen werden soll, verwendet man einen Standzylinder mit mehreren seitlichen Tuben. Solche Standzylinder sind in vielen Lehrmittelsammlungen vorhanden und dienen im allgemeinen zum Nachweis des Seitendrucks in Flüssigkeiten (vgl. V 1.3.7.). Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 1.1.11./1 wiedergegeben. Die Glasrohrstücke werden selbst angefertigt. Besondere Sorgfalt erfordert das Biegen des U-förmigen

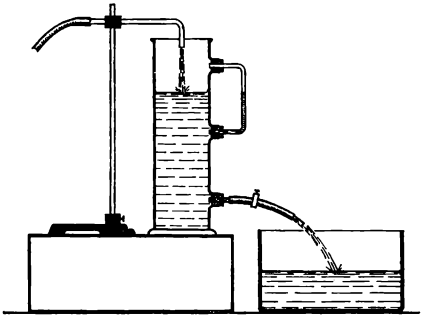


Abb. 1.1.11./1
Modell eines
Wasserstandsanzeigers

Rohres, das als Anzeigerohr dient. Es muß dem Abstand der oberen Tuben genau angepaßt sein. Der untere Tubus dient als Ausfluß. Er wird mit einem Schlauchstück und einem Schraubhahn versehen, mit dem man die Ausflußmenge einstellen kann. Man führt dem Zylinder Wasser von der Wasserleitung zu, so daß sich der Wasserspiegel in ihm zwischen den oberen Tuben einstellt. Jede Änderung der Füllstandshöhe wird vom Schauglas angezeigt. Man kann die Wirkung des Versuches noch dadurch erhöhen, daß man den Standzylinder durch ein Stück Pappe zeitweise verdeckt.

1.1.12. Modell einer Gießkanne

1. Flasche mit seitlichem Tubus
2. durchbohrter Gummistopfen
3. S-förmig gebogenes Glasrohr ⑧

Versuch

Das Modell ist in der Abbildung 1.1.12./1 dargestellt. Man füllt die Flasche bis dicht unter die Ausflußöffnung, so daß das Wasser beim Neigen des Gefäßes ausfließt.

Bemerkungen

1. Statt der Flasche (Abklärflasche) kann auch ein Standzylinder mit seitlichem Tubus verwendet werden.
2. Die Versuchsanordnung kann auch als Modell einer Kaffeekanne, eines Teekessels oder eines Geruchverschlusses bei Abwasserleitungen verwendet werden.

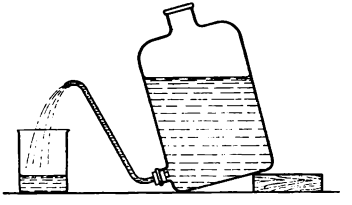


Abb. 1.1.12./1
Modell einer Gießkanne, hergestellt aus einer Abklärflasche

1.1.13. Modell einer Schlauchwaage

1. Zwei rechtwinklig gebogene Glasröhren (⌀ 10 mm, Schenkellängen 100 mm und 200 mm)
2. zwei Halterungen für die Glasröhren ⑧, dazu erforderliches Material:
   a) zwei Holzklötze (2 cm × 5 cm × 7 cm)
   b) vier Leisten (1 cm × 2 cm × 7 cm)
   c) zwei Brettchen (1 cm × 3 cm × 5 cm)
   d) Blei
3. langer Gummischlauch
4. zwei Federklammern
5. Pappe

Methodischer Hinweis

Die Schlauchwaage ist eine Anwendung der verbundenen Gefäße. Sie dient dazu, Höhenunterschiede zwischen zwei Stellen zu messen, auch wenn die Meßstellen relativ weit voneinander entfernt sind und keine Sichtverbindung zwischen ihnen besteht. Das sollte bei der Ausführung des Versuchs beachtet werden. Es ist deshalb zweckmäßig, zwischen die beiden Meßröhren eine Pappe zu stellen, damit die Vorzüge des Gerätes für die Schüler erkennbar werden.

Herstellung des Gerätes

Zwei rechtwinklig gebogene Röhren mit den angegebenen Abmessungen werden mit den kurzen Schenkeln auf zwei bleibeschwerten Holzklötzchen nach Abbildung 1.1.13./1 unter Verwendung von Leisten und Brettchen befestigt. Es ist zweckmäßig, die Fugen mit Siegellack auszufüllen. Die Röhren werden durch einen langen Gummischlauch verbunden und mit gefärbtem Wasser etwa bis zur Hälfte gefüllt. Luftblasen werden dadurch entfernt, daß man das eine Rohr hebt, während man das andere mit dem Finger verschließt.

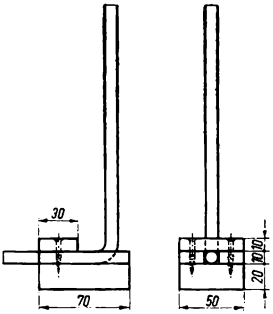


Abb. 1.1.13./1
Meßrohr zum Modell einer Schlauchwaage

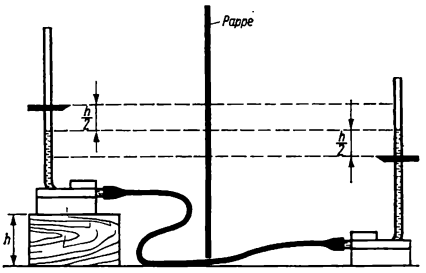


Abb. 1.1.13./2
Modell einer Schlauchwaage

Versuch

Das so hergerichtete Modell einer Schlauchwaage stellt man auf eine waagerechte Tischplatte und markiert die Höhen der Wassersäulen durch Federklammern. Legt man einen Klotz unter das eine Rohr, so sinkt in ihm der Wasserspiegel um die Hälfte der Höhe des Klotzes, während er in dem anderen um den gleichen Betrag steigt (Abb. 1.1.13./2).
Mit den Federklammern werden nun die neuen Wasserstände markiert. Stellt man danach beide Meßrohre wieder nebeneinander auf die Tischplatte, dann ergibt sich der Höhenunterschied der Meßstellen, also die Höhe des Klotzes, als Höhenunterschied der Federklammern.

Bemerkung

Die Schlauchwaage wird zum Ausrichten von Wellenlagern, für Grundungsarbeiten beim Fundamentieren von Gebäuden und für ähnliche Arbeiten benutzt.

1.1.14. Modell einer Kanalwaage

1. Glasrohr (⌀ 1 cm, Länge 1 m, an den Enden rechtwinklig umgebogen) ⑤

Versuch

Aus einer etwa 1 m langen Glasröhre, die man an beiden Enden mit einer Schenkellänge von etwa 20 cm rechtwinklig umbiegt, fertigt man ein Modell einer Kanalwaage (Abb. 1.1.14./1) an. Die Röhre wird in waagerechter Lage an einem Stativ

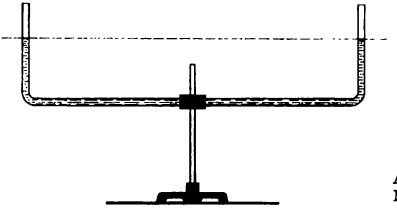


Abb. 1.1.14./1
Modell einer Kanalwaage

befestigt und mit gefärbtem Wasser bis zur halben Höhe der Schenkel gefüllt. Beim Visieren über beide Wasserspiegel ergibt sich stets eine waagerechte Blicklinie. Dreht man das Modell um eine lotrechte Achse, z. B. um den Stativstab, so kann man im Klassenraum Punkte mit gleicher Höhenlage aufsuchen.

Bemerkung

Die Kanalwaage wird als einfaches Nivelliergerät bei Erdarbeiten verwendet.

1.1.15. Modell einer Röhrenlibelle

1. Glasrohr (⌀ 10 mm, Länge 65 cm)
2. Holzleiste (70 cm × 6 cm × 2,5 cm)
3. zwei Gummistopfen zum Verschließen der Glasröhre
4. zwei aus Blechstreifen gebogene Rohrschellen ⑤
5. vier Holzschrauben
6. dünner Holzkeil (25 mm × 5 mm × 5 mm) ⑤
7. Brennspiritus, mit Fuchsin oder Fluoreszein gefärbt
8. Millimeterpapier
9. Glasstreifen (etwa 2 cm × 4 cm × 2,5 mm)
10. Feinmeßschraube

Methodische Hinweise

1. Die Libelle ist eine Anwendung der waagerechten Lage einer Flüssigkeitsoberfläche.
2. Die Wirkungsweise der Röhrenlibelle kann bereits von Schülern der unteren Klassen verstanden werden.

Herstellen des Libellenmodells

Man füllt das einseitig verschlossene Glasrohr bis etwa 10 mm unterhalb der Rohröffnung mit gefärbtem Brennspiritus. Die Öffnung wird mit einem Gummistopfen verschlossen. Neigt man das Rohr, bis es eine annähernd waagerechte Lage einnimmt, so bewegt sich die zwischen Flüssigkeit und Gummistopfen eingeschlossene Luft als Luftblase nach der Mitte des Rohres hin. Durch Herausziehen oder Hineinschieben des Gummistopfens bringt man die Länge der Blase auf etwa 40 mm.



Abb. 1.1.15./1 Modell einer Röhrenlibelle

Das Rohr wird an den Enden mittels zweier aus Blechstreifen gebogener Rohrschellen und einiger Holzschrauben auf einer etwa 70 cm langen Holzleiste befestigt. In der Mitte zwischen beiden Schellen drückt man einen etwa 5 mm breiten und 5 mm dicken Holzkeil unter die Glasröhre. Das Rohr wird dadurch etwas gebogen (Abb. 1.1.15./1).

Justieren des Modells

Zum Justieren legt man die Libelle auf den Tisch, schiebt einen etwa 20 cm langen Papierstreifen zwischen den Keil und die Holzleiste und klebt ihn an die Holzleiste. Man markiert die Lage des linken Blasenrandes auf dem Papier. Dann dreht man die Libelle in der Horizontalebene um 180° und markiert die Lage des gleichen Randes von neuem. Die Mitte zwischen beiden Strichen gibt die Mittelstellung des linken Blasenrandes an. Von diesem Punkt aus trägt man nach der Blasenseite hin die Blasenlänge ab. Man markiert ihre Enden und die Blasenmitte durch Querstriche. Von den Endstrichen aus werden, wie es bei Röhrenlibellen üblich ist, nach links und nach rechts weitere Striche im Abstand von 2 mm auf das Papier aufgetragen.

Bemerkung

Bauarbeiter (Maurer, Betonierer, Tiefbauer u. a.) benutzen zum Überprüfen der horizontalen oder vertikalen Richtung an Bauwerken die *Wasserwaage* (Abb. 1.1.15./2). In ihr sind zwei Röhrenlibellen eingebaut.

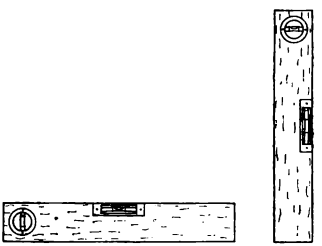


Abb. 1.1.15./2
Wasserwaage

1.1.16. Modell einer Dosenlibelle

1. Glasschale, Kristallisierschale (⌀ 10 cm)
2. Uhrglas (⌀ etwa 9 cm)
3. Brennspiritus, mit Fuchsin oder Fluoreszein gefärbt
4. Fensterkitt oder spiritusunlöslicher Klebstoff
5. Pipette mit möglichst großem Volumen
6. Filterpapier
7. Zirkel, Ausziehtusche
8. Röhrenlibelle

Methodischer Hinweis

Man kann als Anschauungsmittel auch eine Dosenlibelle an einem Gerät, z. B. einer Balkenwaage, benutzen. Das hier beschriebene Modell hat aber den Vorzug, größer und damit anschaulicher zu sein.

Herstellung des Modells

Man legt ein Uhrglas mit der Öffnung nach unten in eine Kristallisierschale und füllt die Schale etwa zu drei Vierteln mit gefärbtem Brennspiritus. Das Uhrglas wird mit Hilfe eines Messers an einer Seite etwas angehoben und die Schale so geneigt, daß die Flüssigkeit in den zwischen dem Uhrglas und der Schale vorhandenen Hohlraum eintreten kann. Man läßt so viel Spiritus zufließen, bis die sich unter dem Uhrglas bildende Luftblase etwa die Größe eines 5-Pfennig-Stückes erreicht hat (Abb. 1.1.16./1). Mit einer Pipette wird der außerhalb des Uhrglases



Abb. 1.1.16./1
Ein mit rotgefärbtem Brennspiritus gefülltes Uhrglas als Dosenlibelle

befindliche Spiritus abgesaugt und der Rest mit Filterpapier entfernt. Den Rand des Uhrglases dichtet man mit Fensterkitt oder mit einem in Spiritus nicht löslichen Klebemittel gegen den Boden der Kristallisierschale ab.
Als Einstellmarke zeichnet man mit Ausziehtusche einen Kreis auf das Uhrglas. Zu diesem Zweck stellt man die Glasschale auf eine mit einer Röhrenlibelle waagerecht gerichtete Platte und klebt auf den Scheitelpunkt des Uhrglases ein kleines Stückchen Papier, dessen Durchmesser kleiner ist als der der Luftblase. Es dient als Gleitschutz für die Zirkelspitze. Auf dem Papierscheibchen wird der Mittelpunkt der Luftblase markiert und mit dem Zirkel ein Kreis entsprechend der Größe der Luftblase gezogen. Damit die Tusche am Glase haftet, wird an den Anfangspunkt des zu schlagenden Kreises mit einer gewöhnlichen Tuschfeder ein Tuschetröpfchen gebracht. Außerdem empfiehlt es sich, der Tusche zur Erhöhung der Haftfähigkeit etwas Büroleim zuzusetzen. Nachdem der Kreis gezogen und die Tusche getrocknet ist, wird das Papierstückchen wieder entfernt.

Bemerkung

Dosenlibellen sind gewöhnlich an Geräten angebracht, deren Grundplatten zum Gebrauch exakt horizontal justiert werden müssen, wie Labor- und Analysenwaagen, Spiegelgalvanometer, Kathetometer, Nivelliergeräte u. a.

1.2. Der Kolbendruck in einer allseitig abgeschlossenen Flüssigkeit — Die Druckübertragung

1.2.1. Vorversuch zur Druckübertragung in einer Flüssigkeit

1. Glasrohr (⌀ 10 mm, Länge 25 cm bis 30 cm), unter beliebigem Winkel gebogen, mit geraden Schenkeln ®
2. zwei gut eingepaßte Korken
3. Holzstab

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch knüpft an V 1.1.5. an. Er kann mit der molekularen Struktur der Flüssigkeit und ihrer Inkompressibilität erklärt werden. Er zeigt qualitativ, wie durch die Druckübertragung eine Richtungsänderung einer Kraft möglich ist.

Versuch

Wie in V 1.1.5. wird eine gefärbte Wassersäule in einem Glasrohr zwischen zwei Korken abgesperrt. Sie läßt sich durch Druck mit dem Holzstab auf einen der beiden Verschlußkorken ohne erkennbare Längenänderung hin und her schieben.

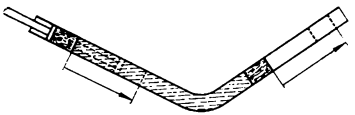


Abb. 1.2.1./1
Druckübertragung durch Wasser

Der Versuch zeigt die Druckübertragung durch das eingeschlossene Wasser. Ein entsprechender Versuch mit einer gebogenen Röhre läßt erkennen, daß der Druck nicht nur in der Bewegungsrichtung des Stabes übertragen wird (Abb. 1.2.1./1).

Bemerkung

Für diesen Versuch kann auch ein nicht zu enges rechtwinklig gebogenes Glasrohr oder U-Rohr verwendet werden, das i. a. in den Lehrmittelsammlungen bereits vorhanden ist.

1.2.2. Allseitige Druckübertragung in Flüssigkeiten

Zu Variante a

1. Kugelspritze mit Düsen und Manometereinsätzen
   oder Gerät zum Nachweis der gleichmäßigen Druckausbreitung mit Manometerröhren und Spritzdüsen
2. Eimer

Zu Variante b

3. Tafelschaltgerät
4. Aufbausatz Aero- und Hydromechanik
   1 Behälter I (geschlossen)
   1 Gummistopfen
   1 Kolbenprober 5 ml
   1 Gewindestopfen
   2 U-Rohr-Manometer
   2 Schlauchstücke 22 cm
   1 Schlauchstück 7,5 cm
5. Fluoreszein oder anderer Farbstoff

Methodische Hinweise

1. Die allseitige Wirksamkeit des Druckes kann durch Kugelspritzen mit Spritzdüsen in erster Linie qualitativ gezeigt werden. Wenn die Düsen gleich große Öffnungen haben, ist auch ein quantitativer Nachweis möglich. Aus der Tatsache, daß das Wasser aus allen Düsen gleich weit spritzt, kann man schließen, daß der Druck in allen Richtungen gleich groß ist.
   Zur Erklärung dieser Erscheinung kann man die leichte Verschiebbarkeit der Flüssigkeitsmoleküle heranziehen.
2. Zur Variante b vgl. MB 1.0.2.

Variante a: Nachweis mit der Kugelspritze

Die Kugelspritze besteht aus einem Glasrohr (∅ etwa 20 mm) mit angeblasener großer Kugel (Abb. 1.2.2./1a). Auf dieser sitzen zahlreiche Tuben zur Aufnahme von durchbohrten Stopfen. In diese werden Glasröhrchen mit zugespitzten Ausflußöffnungen eingesetzt. Bei manchen Kugelspritzen sind die Ausspritzdüsen unmittelbar an die Kugel ohne Zwischentuben angeschmolzen.

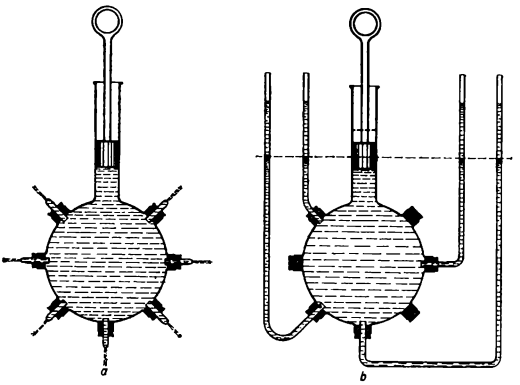


Abb. 1.2.2./1
Kugelspritze

Nach dem Entfernen des Kolbens füllt man das Gefäß in einem Eimer vollständig mit Wasser. Hält man das Gefäß beim Hineindrücken des Kolbens so, daß die Düsen in einer waagerechten Ebene liegen, dann spritzt das Wasser aus allen Öffnungen nach allen Richtungen hin gleich stark heraus.
Der Versuch zeigt, daß der im Innern der Kugel erzeugte Druck nach allen Seiten und mit der gleichen Stärke wirkt.
Diese Erkenntnis findet man bestätigt, wenn man statt der Düsen Manometerröhren in die Tuben einsetzt (Abb. 1.2.2./1b). Das Gerät wird hierbei so gehalten, daß die Manometerröhren lotrecht stehen. Für diesen Teilversuch kann auch das Gerät zum Nachweis der gleichmäßigen Druckausbreitung benutzt werden, bei dem die Manometerröhren direkt an die Kugel angeschmolzen sind.

Variante b: Nachweis mit dem Aufbausatz Aero- und Hydromechanik

Man verschließt die große Bohrung des Behälters mit dem Gewindestopfen und befestigt ihn etwa in der Mitte der Montagetafel des Tafelschaltgerätes. Die beiden Manometer werden vorerst nur mit je einem Stecker befestigt und mit Schlauchstücken mit dem Behälter verbunden. Den Kolbenprober ordnet man über dem Behälter an (Abb. 1.2.2./2). Nachdem man den Kolben entfernt hat, füllt man den

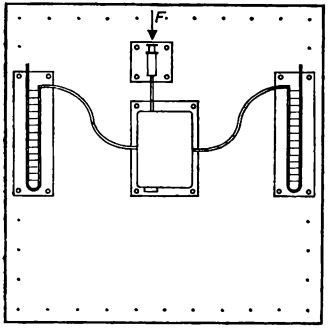


Abb. 1.2.2./2
Versuchsaufbau mit dem Aufbausatz für Aero- und Hydromechanik

Behälter bis über den Kolbenprober mit gefärbtem Wasser. Um Luftblasen aus den Leitungen zu entfernen, löst man eines der Manometer von der Tafel, verschließt sein freies Ende mit dem Finger und neigt es schräg nach unten. In dieser Lage läßt man vorsichtig einige Tropfen ausfließen, bis die Luftblasen beseitigt sind. Danach kann man das Manometer fest montieren. Den gleichen Vorgang wiederholt man mit dem zweiten Manometer.
Nachdem man in den Kolbenprober bis zum Rand Wasser nachgefüllt hat, setzt man den Kolben ein. Dabei muß man darauf achten, daß unter dem Kolben keine Luftblase entsteht.
Übt man auf den Kolben einen Druck aus, so zeigen stets beide Manometer die gleiche Druckzunahme an. Der Druck breitet sich in der Flüssigkeit nach allen Seiten gleichmäßig aus.

1.2.3. Druckübertragung durch einen mit Wasser gefüllten Gummischlauch

1. Gummischlauch (Länge etwa 2 m)
2. Gummistopfen zum Verschließen des Schlauchendes oder Quetschhahn
3. rechtwinklig gebogenes Glasrohr (langer Schenkel 20 cm lang)

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch zeigt stark schematisiert die Ausbreitung des Druckes im menschlichen und tierischen Gefäßsystem.
Man kann die Schüler bei dieser Gelegenheit darauf hinweisen, daß sich die Physik mit Vorgängen befaßt, die sowohl in der unbelebten wie auch in der belebten Natur ablaufen.

Versuch

Ein gewinkeltes Rohr wird so in ein Stativ gespannt, daß der lange Schenkel lotrecht steht. An den anderen wird ein langer Gummischlauch angeschlossen, dessen Ende durch einen Quetschhahn oder durch einen Stopfen verschlossen ist. Die Vorrichtung wird unter Vermeidung von Luftblasen (vgl. V 1.1.8. und V 1.1.13.) mit Wasser gefüllt und der Schlauch auf den Tisch gelegt (Abb. 1.2.3./1). Drückt man auf den Schlauch an einer beliebigen Stelle, so zeigen die Schwankungen des Wasserstandes im Winkelrohr die Übertragung des Druckes an.
Dadurch, daß man in der Nähe des geschlossenen Endes mit einer Holzleiste gegen den Schlauch schlägt, kann man eine Druckwelle hervorrufen, die durch die gesamte im Schlauch befindliche Flüssigkeit hindurchläuft und am Manometer Schwankungen hervorruft. Man kann dadurch geradezu Morsezeichen übertragen. Läßt man einige Schüler an den Tisch herantreten und den Schlauch behutsam mit den Fingerspitzen berühren, so können die Druckänderungen durch die Schüler gefühlt werden.

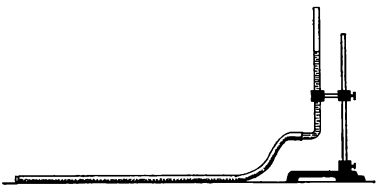


Abb. 1.2.3./1
Wassergefüllter Gummischlauch mit Manometer

1.2.4. Benutzung eines Manometers zur Anzeige der Gewichtskraft

Zu Variante a

1. Fahrradschlauch
2. Gummischlauch
   (Ø zum Ventilrohr passend, Länge 1 m)
3. Glasrohr
   (Ø zum Gummischlauch passend, Länge 1 m)
4. Holzplatte (Fläche etwa 80 cm × 80 cm)
5. Vertikalmeßstab
6. Trichter

Zu Variante b

Geräte 5. und 6., außerdem

7. Fußballblase oder Gummiflasche
8. offener Holzkasten mit Überwurfdeckel zur Aufnahme der Blase ⑥
9. Glasrohr mit rechtwinklig gebogenem Ende (⌀ dem Schlauchansatz der Blase angepaßt, Länge etwa 1 m)

Methodischer Hinweis

In der BMSR-Technik bedient man sich häufig hydraulischer Einrichtungen, um Kräfte zu messen, zu übertragen oder zu vergleichen. Die hier beschriebenen Experimente zeigen zwei interessante Varianten, wie man mit einfachen Mitteln hydraulische Kraftmessungen ausführen kann. An diesen Beispielen kann man den Schülern erläutern, daß auf der Grundlage physikalischer Erkenntnisse immer neue technische Spezialwissenschaften wie *Hydraulik und Pneumatik* entstehen und die Wissenschaft immer umfassender und wirkungsvoller in der Produktion zur Erleichterung der Arbeit und zur Steigerung der Produktivität genutzt wird. Außerdem können bei dieser Gelegenheit wichtige Grundbegriffe aus der Automatisierungstechnik, wie *Wirkungskette, Meßwertwandler* und *Analogbetrachtung,* erläutert werden.

Variante a

Man legt einen Fahrradschlauch ohne Ventileinsatz so zusammen, daß möglichst die gesamte Luft daraus entweichen muß, und füllt ihn dann mit Hilfe eines Trichters ganz mit Wasser. Dazu legt man ihn am besten gleich neben dem Tisch auf den Fußboden. Man achte darauf, daß möglichst keine Luftblasen im Schlauch bleiben. Über den Ventilansatz schiebt man ein Ende eines etwa 1 m langen Schlauches, der noch mit einem ebenso langen Glasrohr verlängert wird. Das Rohr wird lotrecht an einem Stativ befestigt und daneben ein Vertikalmeßstab gestellt. Auf den Schlauch legt man eine Holzplatte, die den Schlauch vollständig bedeckt (Abb. 1.2.4./1). Stellt sich ein Schüler auf die Mitte der Platte, dann steigt das Wasser im Gummischlauch und Glasrohr, bis der Druck der Wassersäule gleich dem Druck im Fahrradschlauch ist. Die Höhe der Wassersäule ist proportional der Gewichtskraft des auf der Platte stehenden Schülers. Man kann das Gerät znr Ermittlung der Gewichtskraft benutzen, wenn man auf empirischem Wege eine Skale ermittelt.

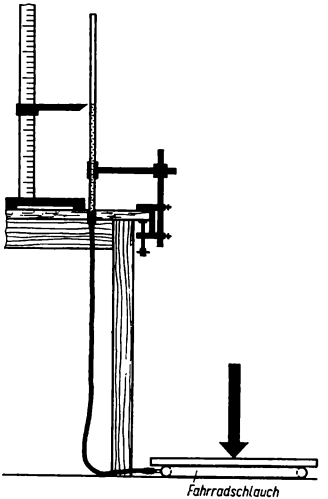


Abb. 1.2.4./1
Wassergefüllter Fahrradschlauch mit angeschlossenem Steigrohr als Mittel zur Druckübertragung

Bemerkungen

1. Man muß sich genau in die Mitte der Platte stellen, damit der Schlauch überall gleichmäßig belastet wird.
2. Man muß die Platte vorsichtig betreten, damit das Wasser bei rascher Bewegung nicht über das obere Ende des Glasrohres hinausschießt.

Variante b

Der Versuch ähnelt dem oben beschriebenen. Statt des Fahrradschlauches wird eine Fußballblase benutzt. Auf den Gummischlauch kann hier verzichtet werden (Abb. 1.2.4./2).

Schon wenn man mit der Hand kräftig auf die mit Wasser gefüllte Gummiblase drückt, kann man die Änderung des Druckes an der Änderung des Wasserstandes erkennen. Soll das Gerät ähnlich wie eine Personenwaage benutzt werden, dann stellt man dazu einen Holzkasten her, in den die Gummiblase gerade hineinpaßt. Die Seitenwände dürfen nicht höher sein als drei Viertel des Durchmessers der prall gefüllten Blase. In eine der Seitenwände wird ein Schlitz für den Schlauchansatz geschnitten. Der Überwurfdeckel wird aus starken Brettern hergestellt. Das Füllen der Blase und die Ausführung des Versuches erfolgen wie in der Variante a. Um eine gute Dichtung an der Ansatzstelle des Glasrohres zu erreichen, ist es zweckmäßig, an das Glasrohr eine Schlaucholive anzublasen und den aufgeschobenen Schlauch zu umbinden.

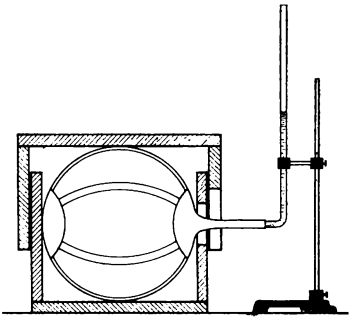


Abb. 1.2.4./2
Wassergefüllte Fußballblase mit angeschlossenem Steigrohr als Druckübertragungsgerät

Bemerkungen

1. Das Experiment kann auch zu einem quantitativen ausgebaut werden, wenn man am Manometerrohr eine Skale aus Millimeterpapier anbringt und das Gerät durch Auflagen von 1, 2, 3 usw. Mauerziegeln mit einer Teilung versieht.
2. Es ist für die Schüler überraschend und lehrreich, daß im Gegensatz zum Experiment der Variante a beim Versuch der Variante b der Gewichtskraft eines Schülers eine Wassersäule von nur 40 cm bis 50 cm das Gleichgewicht hält.
3. In einer Überschlagsrechnung kann man angenähert auch die wirksame Fläche beim Erzeugen des Druckes ermitteln.
   Entspricht z. B. einer Belastung von 200 N eine Steighöhe von 200 mm, dann ist die wirksame Fläche etwa 1000 cm^2; denn einer Wassersäule von 20 cm Höhe entspricht ein Druck von 0,2 $\frac{N}{cm^2}$ oder $\frac{200\ N}{1000\ cm^2}$.

1.2.5. Hydraulische Druckübertragung auf ein Druckgefäß mit offenem Manometer

1. Zwei Flaschen (1000 ml)
2. ein dreifach und ein zweifach durchbohrter Stopfen
3. zwei offene Manometer mit 30 cm langen Schenkeln
4. T-Stück
5. kurzes Glasrohr
6. drei rechtwinklig gebogene Glasröhren
7. Verbindungsschlauch (Länge 1 m)
8. Druckballon aus Gummi mit Saug- und Druckventil
9. Quetschhahn

Methodischer Hinweis

Der Versuch stellt eine hydraulische Kraftübertragung dar und vermittelt das Verständnis für die Druckgleichheit in kommunizierenden Druckgefäßen. Er kann als Modell für die Kraftübertragung einer hydraulischen Kraftwagenbremse, einer hydraulischen Presse, eines hydraulischen Wagenhebers und anderer hydraulischer Anlagen dienen. Sehr häufig werden hydraulische Kraftübertragungen in Anlagen der BMSR-Technik verwendet.

Versuchsaufbau

Zwei 1-l-Flaschen werden durch einen Gummischlauch unter Verwendung zweier gewinkelter Glasröhren miteinander verbunden (Abb. 1.2.5./1). Beide Flaschen werden etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Der Verbindungsschlauch muß ganz

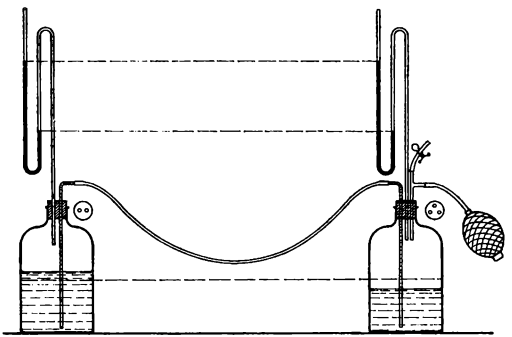


Abb. 1.2.5./1
Modellversuch einer hydraulischen Druckübertragung

mit Wasser gefüllt sein und darf keine Luft enthalten. Die eine Flasche, im Bilde links, erhält einen doppelt durchbohrten, die andere einen dreifach durchbohrten Verschlußstopfen. Beide Flaschen werden mit einem mit gefärbtem Wasser gefüllten offenen Manometer versehen. An die dritte Öffnung der rechten Flasche wird

der Druckballon angeschlossen. In seine Druckleitung wird ein T-Stück gelegt, dessen dritter Schenkel durch ein Schlauchstück und einen Quetschhahn verschlossen wird.

Versuch

Setzt man die Luft in der an den Druckballon angeschlossenen Flasche unter Druck, so wird dieser durch das im Schlauch befindliche Wasser auf die andere Flasche übertragen. Die Manometer zeigen beide den gleichen Niveauunterschied. Nimmt man durch Öffnen des Quetschhahns einen Druckausgleich vor, so gehen die Manometerausschläge auf Null zurück.

Bemerkung

Steht kein Druckballon zur Verfügung, so kann man sich behelfen, indem man statt des T-Stücks ein kurzes Glasrohr mit einem Schlauchstück verwendet, in das man hineinbläst. Der Schlauch wird dann durch einen Quetschhahn verschlossen.

1.2.6. Modellversuch zur Druckübertragung

1. Holzklotz (15 cm × 15 cm × 10 cm) mit zwei sich kreuzenden Bohrungen (⌀30 mm und ⌀40 mm) Ⓢ
2. zwei Zylinder aus Holz (⌀30 mm, Länge 70 mm), in die Bohrungen mit ⌀30 mm passend Ⓢ
3. Zylinder aus Holz (⌀40 mm, Länge 80 mm), in die Bohrung mit ⌀40 mm passend Ⓢ
4. Zylinder aus Holz (⌀40 mm, Länge 50 mm), in die Bohrung mit ⌀40 mm passend Ⓢ
5. drei Holzschrauben
6. Stahlkugeln

Methodischer Hinweis

Der Versuch veranschaulicht als Modellversuch den grundlegenden Unterschied zwischen der Druckausbreitung in festen Körpern und in Flüssigkeiten. Dabei werden makrophysikalische Vorgänge zur Veranschaulichung mikrophysikalischer, molekularer Vorgänge genutzt. An die Stelle der Flüssigkeitsmoleküle treten Stahlkugeln. Sie veranschaulichen die Übertragung der Druckkräfte von einem Teilchen auf die benachbarten. Die zwischen den Teilchen wirkenden Molekularkräfte brauchen vom Modell nicht wiedergegeben zu werden, weil sie für den Vorgang der Druckausbreitung in Flüssigkeiten nicht von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Herstellen des Versuchsgerätes

Einen Holzklotz mit quadratischen Grundflächen versieht man parallel zu diesen mit einer zylindrischen Bohrung, deren Durchmesser etwa 30 mm beträgt. Die Bohrung durchsetzt den Holzklotz der ganzen Breite nach. Eine zweite Bohrung verläuft senkrecht zur Grundfläche und kreuzt die erste Bohrung. Sie hat nur eine Tiefe von etwa drei Vierteln der Klotzhöhe und endet blind (Abb. 1.2.6./1). Ihren Durchmesser wählt man etwas größer als den der ersten Bohrung, etwa 40 mm. Die Innenwandungen der Bohrungen werden gut geglättet. Zu den Bohrungen passend werden vier in ihnen leicht verschiebbare zylindrische Kolben aus Holz

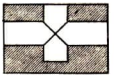


Abb. 1.2.6./1
Holzklotz mit Bohrungen

angefertigt. Die zwei für die waagerechte Bohrung bestimmten Kolben werden mit einer Schraube als Griff versehen, damit man sie leicht herausziehen kann. Der dritte Kolben soll die lotrechte Bohrung ganz füllen und noch etwas aus ihr herausragen. Der vierte Kolben ist eine Walze mit demselben Durchmesser, aber nur etwa der halben Länge wie der dritte Kolben, so daß sie die Bohrung nur etwa zur Hälfte füllt.

1. Teilversuch: Druckausbreitung in einem festen Körper

Man legt den Klotz so auf den Tisch, daß die Blindbohrung nach oben zeigt, und schiebt in die lotrechte Bohrung die kurze Walze ein. In die waagerecht liegende Querbohrung führt man von beiden Seiten her die dazu passenden Kolben ein, so daß sie die in der lotrechten Bohrung steckende Walze berühren. Stößt man nun von oben her den langen Kolben in die Bohrung hinein, so wird durch ihn gegen die Walze und dadurch gegen den Boden des Klotzes eine Druckkraft ausgeübt, die auf die anderen Teile der Vorrichtung nicht übertragen wird (Abb. 1.2.6./2a). Man erkennt daraus, daß in einem festen Körper eine Druckkraft nur in ihrer Wirkungsrichtung weitergegeben wird.

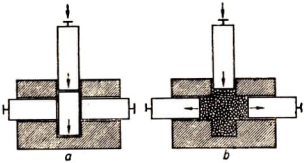


Abb. 1.2.6./2
Holzklotz mit verschiebbaren Kolben

2. Teilversuch: Druckausbreitung in einer Flüssigkeit

Man zieht den Mittelkolben und die kurze Walze heraus und füllt den Innenraum mit einem Flüssigkeitsmodell. Dazu eignen sich vorzüglich kleine Stahlkugeln (vgl. V 1.1.4.). Um den Innenraum etwas zu vergrößern, zieht man die seitlichen Kolben zweckmäßigerweise etwas heraus. Führt man nun den langen Kolben von oben in die mittlere Bohrung ein, so wird der Druck durch die Kügelchen wie in einer Flüssigkeit auf die Stirnflächen der seitlichen kurzen Kolben übertragen und verursacht an diesen eine Verschiebung nach außen (Abb. 1.2.6./2b).

1.2.7. Verschieben einer Flüssigkeitssäule in verbundenen Röhren mit unterschiedlichem Querschnitt

1. Modell einer Spritze aus Glas
2. T-Stück aus Glas
3. Glasrohr (⌀ etwa 8 mm, Länge 1 m)
4. Verbindungsschlauch
5. Quetschhahn
6. Vertikalmeßstab
7. Becherglas

Methodischer Hinweis

In diesem Versuch soll der Zusammenhang zwischen den Wegen beider Flüssigkeitsspiegel in den Röhren und den Röhrenquerschnitten ermittelt werden. Die hier gewonnenen Erkenntnisse können zum Verständnis der physikalischen Zusammenhänge bei der hydraulischen Druckübertragung beitragen.

Versuchsvorbereitung

Vor dem Versuch ermittelt man möglichst genau die lichte Weite d_1 des Zylinders am Modell der Spritze und die lichte Weite d_2 der Glasröhre. Daraus errechnet man die zugehörigen Flächeninhalte der Querschnittsflächen A_1 und A_2.

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 1.2.7./1 zu ersehen. Nachdem man die Glasteile durch Schlauchstücke miteinander verbunden und an einem Stativ befestigt hat, füllt man den Zylinder der Spritze bis zum Rand mit gefärbtem Wasser, setzt den Kolben ein und drückt ihn vorsichtig etwa bis zu einem Drittel der Rohrlänge hinein. Dabei soll sich unter dem Kolben möglichst keine Luft befinden. Man öffnet dann den Quetschhahn und läßt so viel Wasser abfließen, daß es in beiden Röhren gleich hoch steht. Am Vertikalmeßstab wird diese Stellung mit einem Zeiger markiert.

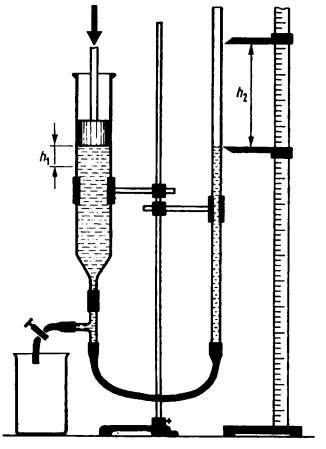


Abb. 1.2.7./1
Druckausbreitung in einer Flüssigkeit, Abhängigkeit der Steighöhe von der Querschnittsfläche

Versuch

Senkt man den Kolben um eine kleine Strecke h_1, so steigt das Wasser im Glasrohr um die Strecke h_2. Vergleicht man die Verschiebungen der Wasseroberflächen mit den Querschnittsflächen in den Röhren, so erkennt man, daß sich die Verschiebungen umgekehrt verhalten wie die Flächeninhalte der Querschnittsflächen. Es ist

$$h_1 : h_2 = A_2 : A_1$$

oder

$$h_1 \cdot A_1 = h_2 \cdot A_2.$$

Dieses Ergebnis war zu vermuten, weil die in der Glasröhre hochgestiegene Wassermenge gleich der Wassermenge ist, die durch den Kolben verdrängt wurde.

Bemerkungen

1. Man kann die Meßgenauigkeit erhöhen, indem man statt des Glasmodells einer Spritze einen großen Kolbenprober verwendet.
2. Steht ein Modell einer Spritze oder ein Kolbenprober nicht zur Verfügung, so kann auch ein weites Glasrohr verwendet werden, das man durch einen durch-

bohrten Gummistopfen verschließt. Als Kolben kann ein etwas kleinerer Stopfen dienen, den man zur besseren Dichtung mit einem starken Wollfaden umwickelt. Als Kolbenstange ist ein Glasstab geeignet.

1.2.8. Vergleich der Druckkräfte bei der Druckübertragung in Flüssigkeiten

Zu Variante a

1. Zwei Kolbenprober mit verschiedenen Querschnittsflächen
2. T-Stück aus Glas
3. Verbindungsschlauch
4. Quetschhahn
5. zwei Vertikalmeßstäbe
6. Becherglas
7. Wägesatz
8. Meßschieber
9. Kraftmesser

Zu Variante b

Geräte 6. bis 9., außerdem

10. Tafelschaltgerät
11. Aufbausatz Aero- und Hydromechanik

1 Kolbenprober 20 ml mit Auflage	1 Gummistopfen
1 Kolbenprober 5 ml mit Auflage	1 Absperrventil
2 Schlauchstücke 5 cm	2 Schlauchstücke 19 cm
2 T-Verbindungsstücke	1 Schlauchstück 22 cm

Methodische Hinweise

1. Der Versuchsaufbau der Variante a ähnelt dem in V 1.2.7. Der erste Teil des Versuchs führt auch zu den gleichen Erkenntnissen. Die Meßergebnisse sind jedoch bei der Verwendung von Kolbenprobern wesentlich genauer.
2. In der Auswertung des zweiten Teils der Variante a ist besonderer Wert auf die Feststellung zu legen, daß der Druck in beiden Kolbenprobern gleich ist. Dieser Versuch ist zur Erklärung der Wirkungsweise einer hydraulischen Presse, eines hydraulischen Wagenhebers, der hydraulischen Bremsen an Kraftfahrzeugen u. dgl. geeignet. Er ist dann besonders überzeugend, wenn Kolbenprober mit möglichst unterschiedlichen Querschnittsflächen zur Verfügung stehen. Das enge Rohr stellt den Pumpenzylinder, das weite den Druckzylinder dar.
3. Zur Variante b vgl. MB 1.0.2.
   Dieses Experiment ähnelt dem der Variante a. Wie dort beschrieben ist, können auch hier die Proportionen

   $$A_1 : A_2 = s_2 : s_1$$

   und

   $$F_1 : F_2 = A_1 : A_2$$

   bestätigt werden. In beiden Varianten kann auch die Proportion

   $$F_1 : F_2 = s_2 : s_1$$

   nachgewiesen werden. Durch Umstellen erhält man

   $$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2.$$

Das ist die mathematische Formulierung des Satzes von der Gleichheit der Arbeiten. An der großen Bedeutung des Prinzips der hydraulischen Presse für die Wirkungsweise vieler verschiedener technischer Geräte und Einrichtungen kann man den Schülern bewußt machen, welchen Wert wissenschaftliche Erkenntnisse für die Produktion, für die Erleichterung der Arbeit und für die Beherrschung der Umwelt haben.

Variante a

Zuerst ermittelt man die Kolbenflächeninhalte der Kolbenprober. Dazu bestimmt man mit Hilfe eines Meßschiebers die Kolbendurchmesser und berechnet daraus ihre Flächeninhalte. Der Versuchsaufbau geht aus der Abbildung 1.2.8./1 hervor. Die Kolbenprober werden so am Stativ befestigt, daß ihre oberen Ränder in gleicher Höhe sind. Man entfernt die Kolben und füllt das Röhrensystem bis zum Rand der

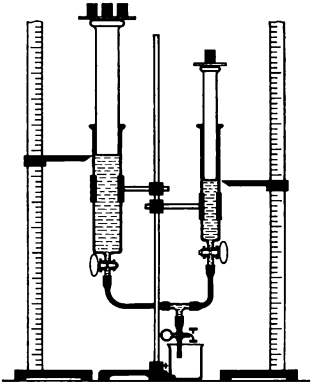


Abb. 1.2.8./1
Untersuchung der Druckübertragung in einer Flüssigkeit

Kolbenprober mit Wasser. Nun setzt man beide Kolben gleichzeitig ein und achtet darauf, daß sich unter den Kolben keine Luftblasen bilden. Durch Öffnen des Quetschhahnes läßt man so viel Wasser abfließen, daß die Kolben etwa bis zur Hälfte in die Zylinder sinken. Dann wird der Quetschhahn wieder geschlossen. Senkt man nun einen der Kolben, dann hebt sich der andere. Die Verschiebungen s_1 und s_2 der Kolben kann man an den beiden Vertikalmeßstäben ablesen. Ein Vergleich mit den Querschnittsflächen A_1 und A_2 führt zur Beziehung

$$A_1 : A_2 = s_2 : s_1.$$

Legt man auf die Kolbenplatten Wägestücke, die sich etwa das Gleichgewicht halten, dann kann man mit guter Annäherung die Beziehung erkennen

$$F_1 : F_2 = A_1 : A_2.$$

Die Druckkräfte F_1 und F_2 verhalten sich so wie die Kolbenflächeninhalte A_1 und A_2. Durch Umstellen erhält man

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

oder

$$p_1 = p_2.$$

Infolge der Reibung zwischen Kolben und Zylinderwand ist es bei diesem Experiment nicht immer einfach, den Gleichgewichtszustand zu erkennen. Bei Berechnungen muß zur Gewichtskraft der aufgelegten Wägestücke jeweils die Gewichtskraft der Kolben addiert werden.

Variante b

Vor der Montage der Versuchsanordnung ermittelt man die Flächeninhalte und die Gewichtskräfte der Kolben. Der Versuchsaufbau ist aus der Abb. 1.2.8./2 zu ersehen. Zum Einfüllen des Wassers entfernt man beide Kolben. Man füllt den Zylinder des großen Kolbenprobers bis zum Rand und setzt den Kolben so ein, daß sich darunter keine Luftblase bildet. Danach drückt man ihn vorsichtig nach unten, bis der kleine Kolbenprober überläuft, und setzt dessen Kolben ebenfalls blasenfrei ein. Bei geöffnetem Absperrventil läßt man so viel Wasser abfließen, bis der große Kolben etwa bis zur Mitte abgesunken ist.

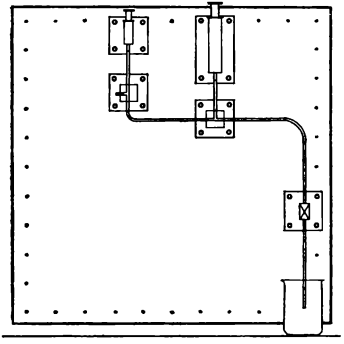


Abb. 1.2.8./2
Versuchsanordnung zum Vergleich der Druckkräfte aus Teilen des Aufbausatzes Aero- und Hydromechanik

Der weitere Ablauf des Experiments erfolgt wie bei der Variante a. Wegen der Reibung der Kolben ist es zweckmäßig, möglichst große Wägestücke zu verwenden. Das ist möglich, weil die Auflagen der Kolbenprober über der Oberkante der Montagetafel stehen und die Steckverbindungen der Kolbenprober mit der Tafel eine Gewichtskraft von etwa 10 N zulassen.

1.2.9. Modellversuche zur Wirkungsweise hydraulischer Anlagen

Zu Variante a

1. Glasmodell einer hydraulischen Presse
2. Becherglas

Zu Variante b

3. Tafelschaltgerät
4. Aufbausatz Aero- und Hydromechanik
   1 Behälter I
   3 Gummistopfen
   1 Kolbenprober 20 ml
   1 Kolbenprober 5 ml
   3 T-Verbindungsstücke
   2 Rückschlagventile
   1 Absperrventil
   2 Schlauchstücke 5 cm
   3 Schlauchstücke 7,5 cm
   3 Schlauchstücke 19 cm
   1 Schlauchstück 22 cm

Zu Variante c

Geräte 5. bis 8. von V 1.2.4., außerdem

5. kräftiger, um den Holzkasten passender Holzrahmen Ⓢ (lichte Höhe des Rahmens etwa 10 cm größer als die Höhe des Kastens)
6. drei Dreikantprismen aus Hartholz Ⓢ
7. Rohrzwischenstück, möglichst mit Schlaucholiven
8. Gummischlauch (Länge etwa 2 m)
9. einige fingerdicke Holzscheite

Methodische Hinweise

1. In der Variante a wird das Glasmodell einer hydraulischen Presse vorgeführt. Das sollte erst erfolgen, wenn ihre prinzipielle Wirkungsweise sowie die Druck- und Kraftverhältnisse durch V 1.2.2. bis V 1.2.8. geklärt sind. Das Glasmodell zeigt besonders die Wirkungsweise der Ventile und ist nicht für quantitative Untersuchungen gedacht.
   Dieses Modell ist so, wie es von der Unterrichtsmittelindustrie angeboten wird, eigentlich unvollständig. Es fehlen die Rücklaufleitung und das Absperrventil, mit dem man den Druckkolben wieder senken kann.
2. Zur Variante b vgl. MB 1.0.2.
   Diese Versuchsanordnung hat gegenüber der der Variante a den Vorteil, daß die Rücklaufleitung und das Absperrventil vorhanden sind, dafür kann aber hier das Spiel der Rückschlagventile nicht beobachtet werden.
3. In den Varianten a und b kann man die Gültigkeit des Satzes von der Gleichheit der Arbeiten erläutern.
4. Das in der Variante c vorgestellte Modell gibt eine hydraulische Presse nicht in allen Einzelheiten wieder. Es bietet anderen Modellen gegenüber den Vorteil, eine Vorstellung davon zu vermitteln, welche Kräfte an einer hydraulischen Presse auftreten können. Wenn man die Schüler darauf hinweist, daß bei diesem Experiment der Druck nicht durch einen Pumpenkolben erzeugt, sondern der Wasserdruck in der Wasserleitung genutzt wird, kann man mit diesem Modell die Wirkungsweise eines Wagenhebers und — mit Verwendung des Holzrahmens — die der hydraulischen Presse veranschaulichen.

Variante a

Das Glasmodell einer hydraulischen Presse ist in der Abbildung 1.2.9./1 wiedergegeben. Bei der Betätigung des Pumpenkolbens kann man die Wirkungsweise der Ventile sehr gut beobachten. Das Glasmodell ist in der Abbildung nicht maßstabsgetreu wiedergegeben. Beim Modell hat der Arbeitskolben eine wesentlich größere Querschnittsfläche als der Pumpenkolben. Dadurch wird bei der Betätigung auch der Unterschied der Kolbenwege deutlich sichtbar.

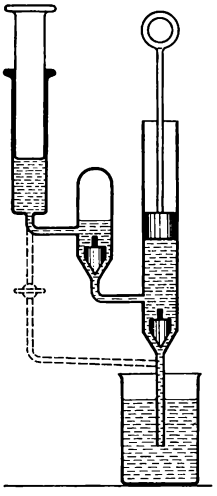


Abb. 1.2.9./1
Glasmodell einer hydraulischen Presse

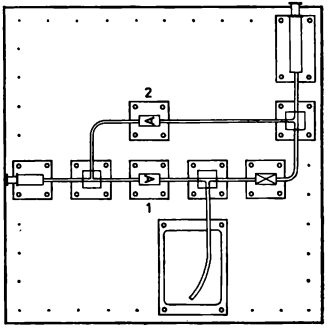


Abb. 1.2.9./2
Versuchsaufbau

Variante b

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 1.2.9./2 zu ersehen. Nachdem alle Teile montiert sind, wird das Absperrventil geöffnet und der Kolben des großen Kolbenprobers herausgenommen. Über diesen Kolbenprober wird der Behälter I etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Danach schließt man das Absperrventil wieder und führt mit dem Kolben des kleinen Kolbenprobers Pumpbewegungen aus. Dadurch wird Wasser in den Zylinder des großen Kolbenprobers befördert. Ist dieser bis zum Rand gefüllt, setzt man den Kolben ein und öffnet das Absperrventil wieder. Mit dem Abfließen des Wassers senkt sich der Kolben. Ist er in seiner tiefsten Stellung angelangt, schließt man das Absperrventil. Die Anlage ist nun betriebsbereit. Bei der Betätigung des Pumpkolbens wird Wasser über das untere Rückschlagventil aus dem Behälter angesaugt und über das obere Rückschlagventil in den Arbeitszylinder gedrückt. Der Arbeitskolben hebt sich um ein kleines Stück. Soll der Arbeitskolben wieder gesenkt werden, öffnet man das Absperrventil, so daß das Wasser in den Behälter zurückfließen kann.

Bemerkungen

1. Beim Einfüllen des Wassers und beim Einsetzen des großen Kolbens ist darauf zu achten, daß der kleine Kolben nicht herausgedrückt wird.
2. In den Lehrmittelsammlungen der Schulen sind vereinzelt auch industriell gefertigte Modelle anzutreffen, die an die Wasserleitung anzuschließen sind. Sie nutzen den Druck des Wassers in der Wasserleitung.

Variante c

Man kann die im V 1.2.4. verwendeten Geräte zu einem Modellversuch zur hydraulischen Presse benutzen. Wie dort füllt man die Gummiblase mit Wasser. Mit Hilfe eines Zwischenstücks schließt man an den Schlauchansatz der Blase einen längeren Gummischlauch an. Durch diesen läßt man so viel Wasser aus der Gummiblase auslaufen, bis der Deckel auf dem Kastenrand aufliegt.
Dann schließt man den Schlauch an den Hahn einer Wasserleitung an. Sämtliche Schlauchverbindungsstellen werden durch Umbinden gesichert.
Öffnet man den Wasserleitungshahn behutsam, so nimmt der Wasserdruck in der Blase zu. Es kommt dabei zu einer beträchtlichen Kraftwirkung am Deckel. Man kann auf diese Weise einen auf dem Deckel stehenden Schüler etwa einen Zentimeter heben.
Die Versuchsanordnung kann man dadurch erweitern, daß man den Kasten mit der nur mäßig gefüllten Blase in einen kräftigen Rahmen hineinstellt (Abb. 1.2.9./3). Lagert man unter dem Rahmen in dem freien Raum über dem Kastendeckel zwischen drei dreikantigen Prismen aus Hartholz ein etwa fingerdickes Holzscheit, so wird es zerbrochen, sobald man die Fußballblase unter Wasserdruck setzt.

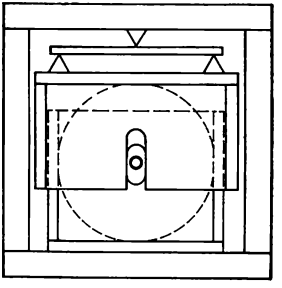


Abb. 1.2.9./3
Modellartige Darstellung einer hydraulischen Presse mit Hilfe einer an die Wasserleitung angeschlossenen Fußballblase

1.3. Der Schweredruck

1.3.1. Nachweis des Schweredrucks mit Glasröhren als Drucksonden [SE]

Zu Variante a

1. Hoher Standzylinder
2. verschieden geformte Drucksonden aus Glas (⌀5 mm) ⑧
3. durchbohrtes Brettchen ⑨
4. Federklammer
5. Farblösung

Zu Variante b

Geräte 1. und 2., außerdem
6. offenes Manometer
7. Schlauchverbindung zum Manometer

Methodischer Hinweis

Die Variante a gestaltet sich sehr einfach, besitzt für die Schüler aber wenig Überzeugungskraft, wenn man einen ähnlichen Versuch, z.B. V 1.1.7., zur Veranschaulichung und Erklärung der Wirkungsweise verbundener Gefäße vorgeführt hat. Es ist dann besser, die Variante b zu wählen.

Variante a

Zunächst stellt man die in der Abbildung 1.3.1./1 dargestellten Drucksonden aus Glas her. Man biegt das Ende der Glasröhre in der Gasflamme in die gewünschte Form, schneidet das Glasrohr in der Länge des Standzylinders mit einem Glasrohrschneider oder einer Feile und schmilzt die Schnittflächen rund. In einen hohen, mit Wasser gefüllten Standzylinder taucht man zuerst ein gerades Glasrohr ein, dessen obere Öffnung mit dem Daumen verschlossen gehalten wird.
Gibt man diese frei, so steigt das Wasser im Innern der Röhre hoch und stellt sich in gleicher Höhe mit dem äußeren Wasserspiegel ein. Um den Wasserstand im Rohr deutlich sichtbar zu machen, taucht man die Drucksonde vor dem Versuch einige Zentimeter tief in eine starke Farblösung ein, verschließt die obere Öffnung mit dem Daumen und führt den Versuch in der beschriebenen Weise durch. Die Farblösung wird dann von dem hochsteigenden Wasser mitgenommen und markiert deutlich den Wasserstand im Rohr.
Auf diese Weise untersucht man den *Aufdruck* in verschiedenen Wassertiefen und erkennt, daß der Druck mit zunehmender Tiefe ebenfalls zunimmt. Statt des geraden Rohres werden nacheinander auch die anderen in der Abbildung 1.3.1./1 dargestellten Rohre benutzt und so auch der Seitendruck und der Bodendruck in unterschiedlichen Wassertiefen untersucht. Man erhält stets das gleiche Ergebnis. Außerdem kann man feststellen, daß der Bodendruck, der Seitendruck und der Aufdruck an ein und derselben Stelle in der Flüssigkeit gleich groß sind. Unab-

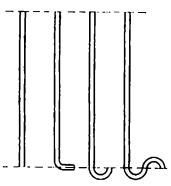


Abb. 1.3.1./1
Verschiedene Formen von Drucksonden

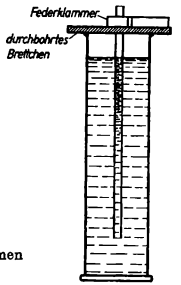


Abb. 1.3.1./2
Verwendung einer Drucksonde in einem Standzylinder

hängig von der Form der Sonde steigt das Wasser in ihr immer wieder bis zur Höhe des äußeren Wasserspiegels empor.
Wenn man das Rohr nicht dauernd mit der Hand halten will, legt man auf den Standzylinder ein durchbohrtes Brettchen, steckt die Sonde hindurch und klemmt eine Federklammer an, die sie dann am weiteren Absinken hindert (Abb. 1.3.1./2). Durch horizontales Verschieben des Brettchens kann man auch zeigen, daß der Druck in einer horizontalen Wasserschicht überall gleich groß ist.

Variante b

Die Durchführung des Experiments erfolgt in der gleichen Weise wie in der Variante a. Dabei wird die Drucksonde durch einen dünnen Verbindungsschlauch mit einem offenen U-Rohrmanometer verbunden, das dann den jeweiligen Druck anzeigt. Sehr zweckmäßig ist die in der Abbildung 1.3.1./3 wiedergegebene Form. In dem kugelförmigen Gefäß im linken Schenkel des Manometers schwankt die Flüssigkeitshöhe kaum merklich, dafür aber im rechten Schenkel um so stärker.

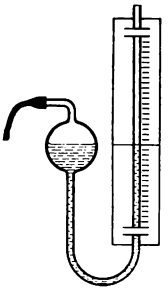


Abb. 1.3.1./3
Offenes U-Rohrmanometer

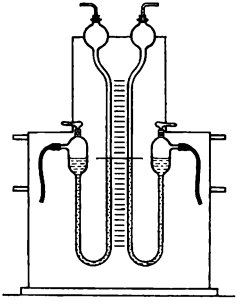


Abb. 1.3.1./4
Zweifachmanometer

Bemerkungen

1. Fehlt am Manometer die Skale, dann kann man aus einem Streifen Millimeterpapier leicht eine behelfsmäßige Skale herstellen. Man versieht den Streifen mit vier Einschnitten, durch die man die Manometerröhre steckt (Abb. 1.3.1./3).
2. Als Manometer eignet sich sehr gut das im Lehrmittelhandel unter dem Namen „Loosersches Doppelthermoskop" erhältliche zweifache Manometer (Abb. 1.3.1./4).
   Da man beide Manometer gleichzeitig benutzen kann, ist es mit diesem Gerät besonders leicht möglich, gleiche oder verschiedene Druckarten in unterschiedlichen Wassertiefen zu vergleichen.
3. Mit der Versuchsanordnung nach der Variante b, besonders bei der Benutzung eines Zweifachmanometers, kann man auch nachweisen, daß der Schweredruck in einer Flüssigkeit auch von der Dichte der Flüssigkeit abhängt. Dazu vergleicht man den Druck in gleicher Tiefe in verschiedenen Flüssigkeiten, z. B. in Wasser und in Brennspiritus, Benzin u. ä. m.

1.3.2. Untersuchung des Schweredrucks in einer Flüssigkeit mit Hilfe einer Druckdose

1. Druckdose mit Manometer und Zubehör
   dazu gehören:
   a) Druckdose mit Tauchrohr und Schwenkeinrichtung
   b) Halter für das Tauchrohr
   c) U-Rohr-Manometer
   d) Pipette zum Einfüllen der Manometerflüssigkeit
   e) Verbindungsschlauch
   f) Lineal zum Anklemmen an das Tauchrohr
2. Fluoreszein, Lebensmittelfarbe oder anderer Farbstoff zum Anfärben der Manometerflüssigkeit
3. hoher Standzylinder oder Aquarienglas

Methodische Hinweise

1. Das Experiment ähnelt im Aufbau und in der Ausführung V 1.3.1. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, daß hier die Sonde durch eine Gummimembran abgeschlossen ist, während dort die zu untersuchende Flüssigkeit z. T. in die Sonde eindringt. Es ist angebracht, den Schülern die Wirkungsweise des Gerätes (Druckübertragung durch die Membran und pneumatische Druckübertragung auf die Manometerflüssigkeit) zu erläutern.
2. Bei diesem Experiment können Begriffe aus der Automatisierungstechnik angewandt und erläutert werden, wie *Wirkungskette*, *Meßwandler* und *Analogbetrachtung*.

Beschreibung des Gerätes

Die *Druckdose* dient zum Messen des Schweredrucks in verschiedenen Richtungen und unterschiedlichen Eintauchtiefen. Sie kann über einen Seiltrieb durch Drehen an der oben angebrachten Rolle in jede beliebige Richtung geschwenkt werden. Bei dieser Drehung bleibt die Membran der Dose stets in derselben Eintauchtiefe. Um eine maximale Empfindlichkeit des Gerätes zu erreichen, darf die Gummimembran nicht zu straff gespannt sein.
Die Druckdose kann mit Hilfe eines *Halters*, der am Rand des Gefäßes festgeklemmt wird, in der eingestellten Tiefe festgehalten werden.
Das *U-Rohr-Manometer* kann am Rand des Gefäßes oder an einem Stativ befestigt werden. Man füllt es mit Hilfe der Pipette bis zur halben Höhe mit einer gefärbten Flüssigkeit. Zwischen den beiden U-Rohr-Schenkeln ist eine verschiebbare Skale angebracht. Man stellt sie so ein, daß ihre Nullmarke mit dem unteren Flüssigkeitsspiegel auf gleicher Höhe steht, und kann so die Höhendifferenz der Flüssigkeitssäulen ablesen (Abb. 1.3.2./1).
Zum Messen der Eintauchtiefe kann am Tauchrohr ein *Lineal* angeklemmt werden. Dabei ist darauf zu achten, daß die Nullmarke des Lineals etwa in der Höhe der Gummimembran steht.

Versuch 1: Abhängigkeit des Schweredrucks von der Flüssigkeitshöhe

Die Gummimembran der Druckdose wird zunächst nach oben gedreht. Dann wird die Kapsel in einem mit Wasser gefüllten Standzylinder allmählich in der Feder-

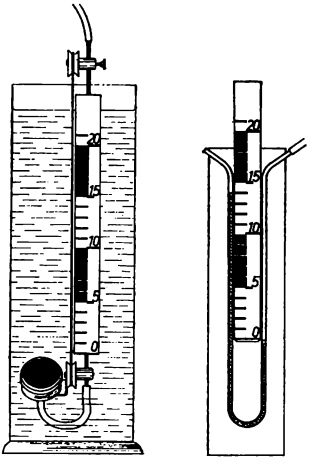


Abb. 1.3.2./1
Druckdose mit Manometer

halterung nach unten gesenkt. In beliebigen Stellungen wird am Lineal die Eintauchtiefe und am Manometer der Druck in Skalenteilen abgelesen. Beide Werte können in einer Tabelle erfaßt werden. Man erkennt, daß der Schweredruck der Eintauchtiefe proportional ist.

Versuch 2: Vergleich von Bodendruck, Seitendruck und Aufdruck

Die Druckdose wird in eine beliebige Tiefe gebracht und nacheinander in verschiedene Richtungen geschwenkt. Dabei bleibt der vom Manometer angezeigte Druck unverändert.
Dieser Vorgang wird in verschiedenen Tauchtiefen wiederholt. Man erkennt, daß in einundderselben Tiefe Bodendruck, Seitendruck und Aufdruck gleich groß sind.

Bemerkungen

1. Das Eintauchen und das Schwenken der Druckdose müssen langsam ausgeführt werden, weil sonst Druckschwankungen auftreten und die Manometerflüssigkeit herausgedrückt werden kann.
2. Nach Gebrauch sind die Geräte abzuspülen und zu trocknen. Ist in die Druckdose Flüssigkeit eingedrungen, so muß die Gummihaut entfernt werden. Dazu drückt man mit dem Daumen auf die Gummimembran, erfaßt den Haltering von innen und außen und hebt ihn ab.
3. Bei diesem Experiment können Begriffe aus der Automatisierungstechnik angewandt und erläutert werden, wie *Wirkungskette, Meßwandler* und *Analogbetrachtung.*

1.3.3. Untersuchung des Schweredrucks in einer Flüssigkeit mit einer Gummiblase als Drucksonde

1. Drucksonde mit Manometer und Zubehör
   dazu gehören:
   a) Drucksonde mit Tauchrohr
   b) Halter für das Tauchrohr
   c) U-Rohr-Manometer
   d) Pipette zum Einfüllen der Manometerflüssigkeit
   e) Verbindungsschlauch
   f) Lineal zum Anklemmen an das Tauchrohr
2. Fluoreszein, Lebensmittelfarbe oder anderer Farbstoff zum Anfärben der Manometerflüssigkeit
3. hoher Standzylinder
4. verschiedene Flüssigkeiten (Spiritus, Kochsalzlösung)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt ähnlich wie V 1.3.1. und V 1.3.2. die Druckverhältnisse in einer Flüssigkeit. Während dort zur Untersuchung der Wirkungsrichtungen jeweils die Sonde ausgewechselt oder verändert werden muß, zeigt dieses Experiment bei jeder Stellung der Sonde, daß der Druck von allen Seiten her wirkt. Besonderer Wert ist auf die klare Unterscheidung der skalaren Größe *Druck* und der vektoriellen Größe *Druckkraft* zu legen.
2. In der Auswertung kann auf die Wirkung des Druckes beim Tauchen eingegangen werden.

Beschreibung des Gerätes

Am unteren Ende des Tauchrohres der Sonde ist eine Gummiblase angebracht. Das Tauchrohr kann mit einem Halter am Rand des Gefäßes festgeklemmt werden. Das Lineal wird so an das Tauchrohr geklemmt, daß die untere Haltefeder auf der Platte mit der Gummiblase aufsitzt (Abb. 1.3.3./1).
Das Manometer füllt man mit Hilfe der Pipette bis zur halben Höhe mit einer gefärbten Flüssigkeit. Mit dem Verbindungsschlauch schließt man das Manometer an das Tauchrohr der Sonde an.

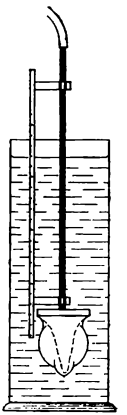


Abb. 1.3.3./1
Drucksonde

Versuch 1: Abhängigkeit des Schweredrucks von der Flüssigkeitshöhe

Die Drucksonde wird in der Federhalterung allmählich nach unten verschoben. Bei verschiedenen Eintauchtiefen wird am Lineal die Flüssigkeitshöhe und am Manometer der Druck in Skalenteilen abgelesen. Beide Werte werden in einer Tabelle erfaßt.
Man erkennt, daß der Schweredruck in der Flüssigkeit mit zunehmender Eintauchtiefe zunimmt und daß der Druck der Flüssigkeitshöhe über der Meßstelle proportional ist.

Versuch 2: Abhängigkeit des Schweredrucks von der Dichte der Flüssigkeit

In den Standzylinder werden nacheinander Wasser, Spiritus und Kochsalzlösung eingefüllt, und die Drucksonde wird jedesmal bis zur gleichen Tiefe eingetaucht. Man erkennt, daß bei gleicher Eintauchtiefe der Schweredruck in der Flüssigkeit um so größer ist, je größer die Dichte der untersuchten Flüssigkeit ist.

Bemerkungen

1. Man kann auch nachweisen, daß der Schweredruck unabhängig ist von der Gefäßform, wenn man nacheinander Gefäße verschiedener Form (Becherglas, weithalsiger Erlenmeyerkolben, weithalsiger Rundkolben u. a. m.) verwendet.
2. Das Senken der Drucksonde muß langsam erfolgen, weil sonst Druckschwankungen auftreten und die Manometerflüssigkeit herausgedrückt werden kann.

1.3.4. Untersuchung des Bodendrucks mit der Pascalschen Waage

1. Pascalsche Waage mit Zubehör
2. Wägesatz
3. Meßzylinder (250 ml)
4. Vaseline, Wasserpumpenfett oder dgl.
5. Kochsalzlösung, Brennspiritus

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 1.0.3.!
2. Bei Experimenten mit Bodendruckapparaten sollte herausgearbeitet werden, daß zwar meist nur die Bodendruckkräfte verglichen werden, daß man daraus aber auf den Druck schließen kann, weil die wirksame Fläche stets dieselbe bleibt.
3. An den Experimenten zur Untersuchung des Bodendrucks kann gut erklärt werden, auf welchem Wege man in der Physik Erkenntnisse gewinnt: Fragen — Beobachten — Überlegen — Vermuten — Prüfen (Experimentieren) — Formulieren des Ergebnisses.

Versuch

Auf das Gestell der Pascalschen Waage wird als erstes Versuchsgefäß der Zylinder geschraubt. Auf die an einem Ende des Waagebalkens hängende Waagschale wird als Belastung ein Wägestück von 100 g gelegt. Dadurch wird die am anderen Ende gelenkig angebrachte Scheibe fest gegen den Verschlußring gedrückt; der Zylinder wird dadurch nach unten hin abgeschlossen (Abb. 1.3.4./1). Dann gießt man vorsichtig Wasser aus dem Meßzylinder in das Gefäß. Beim Erreichen einer bestimmten Höhe wird die Scheibe durch das Gewicht des Wassers vom Ring losgedrückt, so daß das Wasser ausfließt. Die Wasserstandshöhe wird durch einen verschiebbaren Zeiger markiert und das Volumen des aus dem Meßzylinder ausgegossenen Wassers notiert. Nun wird der Versuch der Reihe nach mit den anderen Aufsätzen durchgeführt. Immer wird dieselbe Wasserstandshöhe erreicht. Man gewinnt die Erkenntnis, daß der Bodendruck von der Höhe der Flüssigkeitssäule abhängt, nicht aber von der Form und vom Volumen des Gefäßes.

Meist variiert die kritische Flüssigkeitshöhe etwas, die Platte fällt mitunter etwas zu zeitig ab. Dieser Fehler kann verringert werden, wenn man den Verschlußring oder die Andruckplatte leicht einfettet und das Wasser möglichst vorsichtig und nicht aus großer Höhe zugießt.
Wiederholt man den Versuch mit Kochsalzlösung oder mit Brennspiritus, dann erkennt man an den anderen kritischen Höhen, daß der Bodendruck auch von der Dichte der Flüssigkeit abhängig ist.

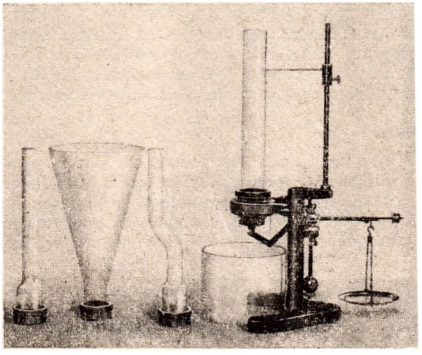


Abb. 1.3.4./1 Pascalsche Waage

Giftige Dämpfe

1.3.5. Untersuchung des Bodendrucks mit dem Bodendruckapparat nach Haldat

1. Bodendruckapparat nach Haldat mit verschiedenen Einsätzen
2. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett oder Tablett mit erhöhten Rändern, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
3. Becherglas
4. flache Glasschale

Methodische Hinweise

1. Bei dem hier verwendeten Bodendruckapparat wird als Anzeigegerät ein Manometer benutzt. Im Gegensatz zur Pascalschen Waage wird hier nicht die Druckkraft, sondern der Druck gemessen.
2. Vergleiche MH Nr. 3 V 1.3.4.1

Versuch

Das Bodendruckgerät nach *Haldat* ist in der Abbildung 1.3.5./1 wiedergegeben. Es besteht aus einem U-Rohr-Manometer mit drei verschieden geformten Einsätzen. Der kurze Schenkel des Manometers ist zur Aufnahme der Einsätze mit einem Normalschliff versehen. Unterhalb dieses Schliffes ist dieser Schenkel kugelförmig erweitert.
Zum Gebrauch stellt man das Gerät in ein Tablett mit erhöhten Rändern (Quecksilberbrett) und füllt mit Hilfe eines Quecksilbertropfers so viel Quecksilber in das Manometer, daß es die kugelförmige Erweiterung etwa zur Hälfte füllt. Dann steckt man den zylindrischen Einsatz auf und füllt bis zur eingeätzten Marke Wasser ein. Die Höhe des Quecksilberspiegels im engen Manometerrohr wird durch einen kleinen

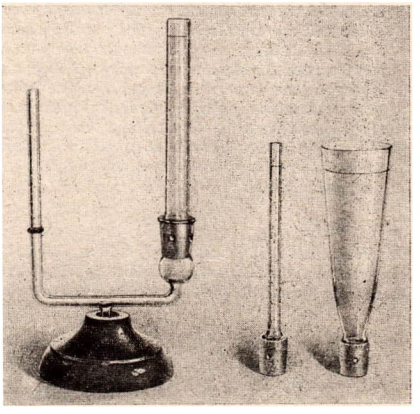


Abb. 1.3.6./1
Bodendruckgerät nach Haldat

Gummiring markiert. Zum Ablassen der Wasserfüllung sind die Normalschliffstücke der Einsätze und der Normalschliff des Manometers mit je einer seitlichen Öffnung versehen.
Das Wasser fließt aus, wenn man den Einsatz so dreht, daß die Öffnungen zur Dekkung kommen. Dazu stellt man das Gerät in eine flache Schale. Bei der Wiederholung des Versuchs mit den anderen Einsätzen ergibt sich trotz der unterschiedlichen Gefäßform stets dieselbe Manometeranzeige.

Bemerkungen

1. Verwendet man statt des Wassers Flüssigkeiten mit anderer Dichte, dann ergeben sich bei der gleichen Füllhöhe der Einsätze andere Manometeranzeigen. Der Bodendruck ist also auch von der Dichte der Flüssigkeit abhängig.
2. Beim Umgang mit Quecksilber ist besondere Vorsicht geboten. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!

1.3.6. Untersuchung des Bodendrucks mit einem aus Aufbauteilen zusammengesetzten Bodendruckgerät [SE]

1. Glasgefäße verschiedener Form, an beiden Enden offen, der untere Rand plangeschliffen
2. Scheibe aus Leichtmetall
3. Kraftmesser (10 N)
4. großes Becherglas
5. Meßzylinder (100 ml)
6. Vertikalmeßstab
7. Faden, Hahnfett
8. Kochsalzlösung
9. Aräometer ($\varrho > 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$)

Methodische Hinweise

1. Diese Versuchsanordnung hat gegenüber den bekannten Bodendruckgeräten den Vorzug, aus Aufbauteilen zu bestehen. Sie ist sowohl im Aufbau wie auch in ihrer Wirkungsweise leicht zu übersehen.
2. Die Verwendung von Aufbauteilen ermöglicht es, die Anordnung zu variieren und auch die Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Bodenfläche zu untersuchen.

3. Diese Versuchsanordnung ermöglicht auch eine quantitative Auswertung und die Herleitung der Gleichung für den Bodendruck. Diese Möglichkeit sollte in den höheren Klassenstufen unbedingt genutzt werden. Dabei kann das Lesen von funktionalen Abhängigkeiten aus Tabellen geübt werden
4. Strenggenommen wird in diesem Versuch jeweils die Bodendruckkraft vorgegeben und somit die Abhängigkeit der Flüssigkeitshöhe von der Bodendruckkraft untersucht. Auch die Umkehrung wäre möglich. Man müßte dann zu einer vorgegebenen Flüssigkeitshöhe durch Probieren die zugehörige Bodendruckkraft suchen. Das wäre aber sehr zeitaufwendig.
5. Vergleiche MH Nr. 3. V 1.3.4.!

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 1.3.6./1 zu ersehen. Die Andruckplatte kann notfalls aus Leichtmetall selbst gedreht werden (Abb. 1.3.6./2). Als Gefäße können die älterer Bodendruckapparate benutzt werden. Man ergänzt diese Reihe

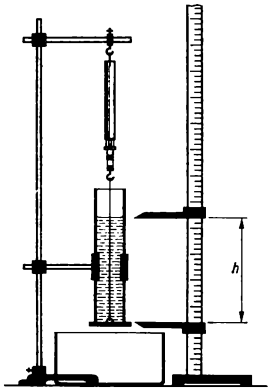


Abb. 1.3.6./1
Bodendruckgerät aus Aufbauteilen

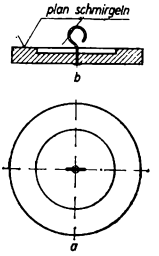


Abb. 1.3.6./2
Scheibe aus Leichtmetall mit plangeschmirgeltem, überhöhtem Rand

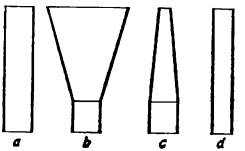


Abb. 1.3.6./3
Glasgefäße für den Nachweis der Bodendruckkraft

durch einen weiteren Zylinder mit kleinerer Bodenfläche (Abb. 1.3.6./3). Mit Hilfe eines Meßschiebers ermittelt man den Durchmesser der Bodenfläche eines der Gefäße a, b oder c und den Durchmesser des Gefäßes d und errechnet daraus ihre Bodenflächen A_1 und A_2. Damit die Andruckplatte besser abdichtet, bestreicht man sie und die Ränder der Glasgefäße leicht mit Fett. Vor dem Zusammenbauen des Gerätes bestimmt man schließlich noch die Gewichtskraft F_G der Andruckplatte.

Versuch 1: Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Gefäßform und dem Volumen der Flüssigkeit

Durch Verschieben der Aufhängung des Kraftmessers gibt man der Feder des Kraftmessers eine Vorspannung, so daß die Andruckplatte mit einer Kraft F_1 gegen den Rand des Gefäßes gedrückt wird. Die vom Kraftmesser angezeigte Kraft F ist gleich der Summe von F_1 und F_G.

$$F = F_1 + F_G.$$

Man verwendet das zylindrische Gefäß a und stellt eine Andruckkraft F_1 von 2 N ein. Wenn die Platte z. B. eine Gewichtskraft von 0,2 N hat, dann muß der Kraftmesser eine Kraft von $F = 2{,}2$ N anzeigen.
In den Zylinder gießt man nun vorsichtig Wasser, wobei man das Wasser nicht auf den Boden herabfallen, sondern an der Wand herabrinnen läßt. Besonders behutsam muß man verfahren, wenn die Ausflußgrenze nahezu erreicht ist. Schon kurz vor dem Abheben der Scheibe tritt mitunter am Gefäßrand etwas Wasser hindurch, doch beeinträchtigt dies den Versuch nicht wesentlich. Erst wnn die Gre nzhöhe der Wassersäule erreicht ist, fließt eine größere Wassermenge ab. Die Grenzhöhe h wird mit Hilfe eines Vertikalmeßstabes bestimmt (Abb. 1.3.6./1). Hierbei ist die Bodendruckkraft der Flüssigkeitssäule gleich der Andruckkraft F_1.
Beim Einfüllen der Flüssigkeit aus einem Meßzylinder stellt man fest, wieviel Flüssigkeit zum Erreichen der kritischen Höhe h erforderlich ist.
Man wiederholt den Versuch mit den Gefäßen b und c und stellt die Meßwerte in einer Tabelle zusammen.
Der Versuch zeigt, daß gleiche Bodendruckkräfte stets bei gleichen Flüssigkeitshöhen auftreten. Bei gleich großen Bodenflächen ist die Bodendruckkraft und damit auch der Bodendruck unabhängig von der Form des Gefäßes und vom Volumen der Flüssigkeit im Gefäß (*Hydrostatisches Paradoxon*).
Ein Experiment ergab folgende Werte:

Tabelle 1: Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Gefäßform und dem Volumen der Flüssigkeit

Durchmesser der Bodenfläche: 4,9 cm
Flächeninhalt A_1 der Bodenfläche: 18,9 cm²

Form des Gefäßes	Volumen der Flüssigkeit V in cm³	Flüssigkeitshöhe h in cm	Bodendruckkraft F_1 in N	Bodendruck $p = \frac{F_1}{A_1}$ in N · cm⁻²
a	200	10,6	2,00	0,106
b	340	10,6	2,00	0,106
c	165	10,6	2,00	0,106

Versuch 2: Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Flüssigkeitshöhe

Man setzt in die Versuchsanordnung ein Gefäß ein, z. B. das der Form a, und bestimmt nacheinander die kritische Füllhöhe für verschiedene Bodendruckkräfte, d. h. für verschiedene Vorspannungen der Feder. Die Ergebnisse werden wieder in einer Tabelle festgehalten.

Tabelle 2: Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Flüssigkeitshöhe

Durchmesser der Bodenfläche: 4,9 cm
Flächeninhalt A_1 der Bodenfläche: 18,9 cm²

Bodendruckkraft F_1 in N	Flüssigkeitshöhe h in cm	$\frac{F_1}{h}$ in N · cm⁻¹	Bodendruck $p = \frac{F_1}{A_1}$ in N · cm⁻²
2,00	10,6	0,189	0,106
3,00	15,9	0,189	0,159
3,50	18,5	0,189	0,185

Der Quotient aus der Bodendruckkraft und der Flüssigkeitshöhe erweist sich mit guter Annäherung als konstant.

$$\frac{F_1}{h} = 0{,}189\,\frac{\text{N}}{\text{cm}} = \text{konstant}.$$

Es folgt daraus, daß die Bodendruckkraft F_1 proportional der Flüssigkeitshöhe h ist.

$$F_1 \sim h.$$

Versuch 3: Abhängigkeit der Bodendruckkraft von der Bodenfläche

Die Bodendruckkraft kann man für ein zylinderisches Gefäß nach der Gleichung

$$F_1 = \gamma \cdot V$$

berechnen. Setzt man für das Volumen V das Produkt aus Grundfläche A und Höhe h ein, so erhält man

$$F_1 = \gamma \cdot A \cdot h.$$

Die Gleichung zeigt, daß die Bodendruckkraft auch proportional dem Flächeninhalt der Bodenfläche ist. Verwendet man als Versuchsgefäß einen Zylinder mit kleinerem Durchmesser (Abb. 1.3.6./3), dann kann man diese Beziehung bestätigen. Bei einem Experiment betrug die lichte Weite des Zylinders 4 cm und der Flächeninhalt der Bodenfläche A_2 somit 12,6 cm². Durch Rechnung erhält man die Bodendruckkräfte, die zum Erreichen der gleichen Flüssigkeitshöhen wie im Versuch 2 erforderlich sind.
Die so erhaltenen Werte trägt man in eine Tabelle ein.

Tabelle 3: Bodendruckkräfte in einem Zylinder mit kleinerer Bodenfläche

Durchmesser der Bodenfläche: 4 cm
Flächeninhalt A_2 der Bodenfläche: 12,6 cm²
Wichte des Wassers γ: 9,81 mN · cm⁻³

Flüssigkeitshöhe h in cm	Bodendruckkraft $F_1 = \gamma \cdot A_2 \cdot h$ in N	Bodendruck $p = \frac{F_1}{A_2}$ in N · cm⁻²
10,6	1,31	0,104
15,9	1,97	0,156
18,5	2,29	0,182

Das Experiment zeigt, daß bei der entsprechenden Einstellung der Bodendruckkräfte die kritischen Flüssigkeitshöhen mit den der Rechnung zugrunde gelegten annähernd übereinstimmen. Ein Vergleich der Bodendruckkräfte mit den entsprechenden der Tabelle 2 zeigt, daß die Bodendruckkraft proportional dem Flächeninhalt der Bodenfläche ist.

Bemerkung

Man achte darauf, daß die Gefäße genau lotrecht befestigt werden. Beim Einstellen der Federspannung soll der Faden genau in der Achse des Gefäßes verlaufen.
Vor der Durchführung des Versuches empfiehlt es sich, den Kraftmesser ein wenig nach der Seite zu verschieben, damit der Faden ganz wenig zur Achse geneigt ist. Die Vorspannung der Kraftmesser darf dabei nicht verändert werden. Dadurch erreicht man, daß auf die Bodenplatte eine ganz geringe seitliche Kraftkomponente wirkt. Bei der kritischen Höhe gleitet die Bodenplatte nach der Seite und gibt die Bodenfläche frei.

1.3.7. Nachweis des Seitendrucks mit Hilfe von Spritzdüsen

1. Hoher Standzylinder mit mehreren übereinander angeordneten seitlichen Tuben
2. durchbohrte Gummistopfen als Verschlüsse für die Tuben
3. kurze Glasröhren mit Spitzen als Spritzdüsen
4. große, flache Schale

Methodischer Hinweis

Bei der Auswertung dieses Experiments kann man darauf hinweisen, daß man beim Bau einer Talsperre die Zunahme des Seitendrucks mit der Wassertiefe berücksichtigen muß. Um dem Wasserdruck standhalten zu können, sind Staumauern unten sehr breit. Ihre Breite nimmt mit der Höhe ab. Außerdem bietet sich hier die Möglichkeit, auf die volkswirtschaftliche Bedeutung der Talsperren hinzuweisen.

Versuch

In die seitlichen Tuben eines Standzylinders werden Gummistopfen mit Spritzdüsen aus Glas eingesetzt. Man stellt den Standzylinder auf einen Unterstellkasten

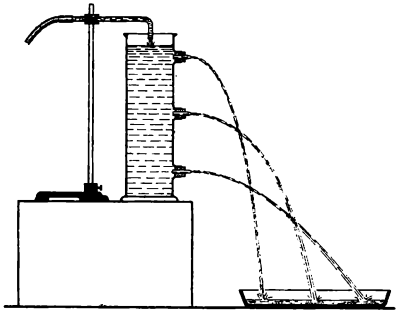


Abb. 1.3.7./1
Nachweis des Seitendrucks

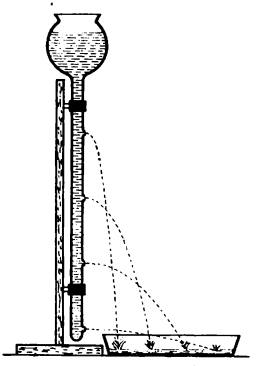


Abb. 1.3.7./2
Seitendruckapparat aus Glas

und füllt ihn mit Wasser. Aus den Glasröhren treten Wasserstrahlen aus, die man in einer untergestellten Schale auffängt. Aus ihrer Reichweite kann man auf den Seitendruck in den verschiedenen Wassertiefen schließen (Abb. 1.3.7./1). Es ist deutlich zu erkennen, daß der Seitendruck mit der Wassertiefe zunimmt. Während des Versuches muß ständig Wasser nachgefüllt werden.

Bemerkungen

1. Will man den Zufluß des Wassers kontinuierlich gestalten, dann führt man das Wasser mit einem Schlauch und einem gebogenen Glasrohr von der Wasserleitung her zu.
2. Als Ausflußgefäß ist in mancher Lehrmittelsammlung ein „Seitendruckapparat" aus Glas vorhanden, wie er in der Abb. 1.3.7./2 dargestellt ist. Er wird ebenso benutzt wie der Standzylinder mit Spritzdüsen.

1.3.8. Nachweis des Seitendrucks an einem Standzylinder mit seitlichem Tubus

1. Standzylinder mit seitlichem Tubus
2. durchbohrter Gummistopfen
3. rechtwinklig gebogenes Glasrohr
4. Fluoreszein oder anderer Farbstoff zum Färben des Wassers
5. Becherglas

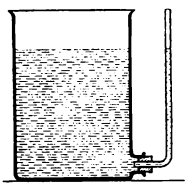


Abb. 1.3.8./1
Flasche mit seitlichem Steigrohr zum Nachweis des Seitendrucks

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt im Endzustand die Eigenschaft verbundener Gefäße. Er kann auch zur Erklärung der Wirkungsweise verbundener Gefäße vorgeführt werden. Zeigt man ihn zur Demonstration des Seitendrucks, dann bietet sich dabei eine günstige Gelegenheit, als Wiederholung und Vertiefung die Wirkungsweise verbundener Gefäße durch das Wirken des Seitendrucks zu erklären. Am Gleichstand der Wasserspiegel ist zu erkennen, daß der Seitendruck in gleichen Wassertiefen gleich ist.

Versuch

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 1.3.8./1 dargestellt. Das Glasrohr hat die Funktion eines Manometers. Man füllt den Standzylinder vorerst nur etwa bis zur Hälfte. Das Wasser steht im Rohr ebenso hoch wie im Zylinder. Dieser Zustand stellt sich immer wieder ein, auch wenn man z. B. aus einem Becherglas Wasser zugießt.
Besonders eindrucksvoll kann man das Wirken des Seitendrucks erkennen, wenn man beim Füllen des Zylinders die obere Öffnung des Glasrohres mit dem Finger verschließt. Erst wenn man die Öffnung freigibt, dringt das Wasser plötzlich in das Rohr ein.

1.3.9. Nachweis des Aufdrucks im Innern einer Flüssigkeit

Zu Versuch 1

1. Weites Glasrohr (⌀ etwa 4 cm, Länge etwa 25 cm) mit plangeschliffenem Rand oder Lampenzylinder
2. kreisförmige Platte aus Glas oder Metall mit einer Öse in der Mitte (⌀ etwas größer als der des Glasrohres)
3. großer, weiter Standzylinder oder Aquarienglas
4. Bindfaden, Fluoreszein oder anderer Farbstoff
5. Becherglas

Zu Versuch 2

Geräte 1., 3. und 4., außerdem
6. großer Korken oder durchbohrter Gummistopfen
7. spitz ausgezogenes Glasröhrchen

Methodischer Hinweis

Die besondere Bedeutung dieser Versuche liegt in ihrer Anschaulichkeit und im Überraschungsmoment, das die Aufmerksamkeit und das Interesse der Schüler weckt.

Versuch 1

Man legt gegen den plangeschliffenen Rand eines an beiden Enden offenen Glaszylinders eine möglichst leichte Platte aus Glas oder Metall. Mit einem Faden zieht man sie fest gegen den Zylinder und taucht diesen lotrecht ins Wasser ein. Läßt

man bei ausreichender Eintauchtiefe den Faden los, so fällt die Platte nicht ab, wie es die Schüler unterer Klassen zunächst erwarten. Sie wird vom Aufdruck des Wassers getragen (Abb. 1.3.9./1). Man muß beim Eintauchen des Zylinders Kraft aufwenden, um die Aufdruckkraft zu überwinden. Gießt man gefärbtes Wasser in den Zylinder, so sinkt die Platte zu Boden, wenn die innere Wassersäule den äußeren Wasserstand nahezu erreicht hat. Der geringe Höhenunterschied der Wassersäulen ist bedingt durch die Gewichtskraft der Verschlußplatte.

Bemerkung

Man kann den Versuch dadurch abändern, daß man eine Verschlußplatte mit einem kleinen Loch benutzt. Durch dieses Loch dringt langsam Wasser ein. Hat es die Höhe des äußeren Wasserspiegels fast erreicht, so fällt die Platte ab.

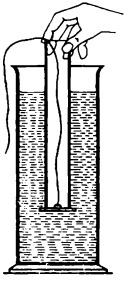


Abb. 1.3.9./1
Nachweis des Aufdrucks im Wasser. Die Bodenplatte wird vom Aufdruck gegen den Zylinderrand gepreßt.

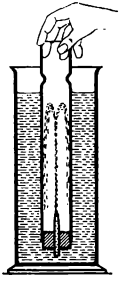


Abb. 1.3.9./2
Nachweis des Aufdrucks im Wasser durch die Entstehung eines Springbrunnens

Versuch 2

Ein anderer Versuch, der entweder an Stelle des ersten ausgeführt werden kann oder sich an den ersten anschließt, ist in der Abbildung 1.3.9./2 dargestellt. Das Glasrohr wird mit einem durchbohrten Stopfen verschlossen, in dem ein spitz ausgezogenes Glasröhrchen steckt. Taucht man den Zylinder lotrecht in das Wasser, dann entsteht in ihm ein kleiner Springbrunnen. Die Ursache dafür ist wieder der Aufdruck im Wasser. Daß dieser Druck mit der Tiefe zunimmt, kann man dadurch zeigen, daß man die Eintauchtiefe leicht variiert. Immer erreicht das hochspritzende Wasser nahezu die Höhe des äußeren Wasserstandes. Das in den Zylinder spritzende Wasser sammelt sich über dem Stopfen an und behindert bald die Ausbildung des Springbrunnens. Der innere Wasserspiegel erreicht schließlich die Höhe des äußeren.

1.3.10. Untersuchungen am Modell eines Springbrunnens

1. Standzylinder oder Flasche mit seitlichem Tubus
2. zwei durchbohrte Gummistopfen
3. rechtwinklig gebogenes Glasröhrchen
4. spitz ausgezogenes Glasröhrchen mit Öffnungen unterschiedlicher Durchmesser
5. Gummischlauch
6. große, flache Schale
7. Quetschhahn

Methodische Hinweise

1. In der Auswertung des Experiments kann man auf den Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie eingehen und Überlegungen anstellen, warum der Wirkungsgrad kleiner als 1 ist und warum das Wasser nicht bis zur Höhe des Wasserspiegels im Vorratsgefäß spritzt.
2. Es kann auch der allgemeine Energieerhaltungssatz vorbereitet werden, indem man die Hubarbeit als umkehrbaren Vorgang, die Reibungsarbeit dagegen als nicht umkehrbaren Vorgang herausstellt.

Versuch

Die Versuchsanordnung ist aus der Abbildung 1.3.10./1 ersichtlich. Das als Strahlrohr dienende Glasröhrchen steckt man durch einen Gummistopfen, damit es beim Anklemmen am Stativmaterial nicht beschädigt wird. Der Verbindungsschlauch wird vorerst durch einen Quetschhahn abgeklemmt und der Vorratsbehälter mit Wasser gefüllt. Öffnet man den Quetschhahn, dann entsteht ein Springbrunnen. Der Wasserstrahl löst sich schon in geringer Höhe über der Ausflußdüse in ein-

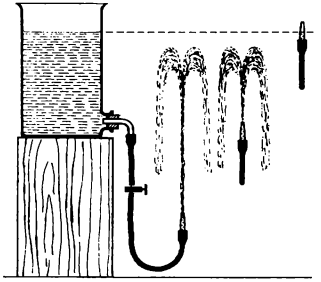


Abb. 1.3.10./1
Versuchsanordnung zur Erzeugung eines Springbrunnens

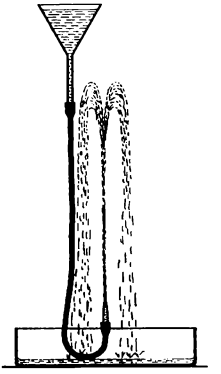


Abb. 1.3.10./2
Verwendung eines Glastrichters als Vorratsgefäß für das Modell eines Springbrunnens

zelne Tropfen auf, die, jeder für sich, in einer steilen Wurfparabel emporsteigen und zurückfallen. Sie erreichen dabei nicht ganz die Höhe des Wasserspiegels im Vorratsbehälter. Das hat seine Ursache in der Reibung des Wassers in der Schlauchleitung und in der Ausflußdüse sowie im Luftwiderstand.
Der Wasserstrahl erreicht auch dann nicht ganz die Höhe des Wasserspiegels im Vorratsgefäß, wenn man das Strahlrohr hebt. Hebt man es so hoch, daß die Ausflußöffnung über dem Wasserspiegel im Standzylinder liegt, dann fließt kein Wasser mehr aus. Man erkennt, daß das Gesetz der verbundenen Gefäße auch hier gilt (Abb. 1.3.10./1).
Ersetzt man das Strahlrohr nacheinander durch andere mit unterschiedlich großen Austrittsöffnungen, dann erkennt man, daß bei größeren Öffnungen nur geringere Steighöhen erreicht werden. Die entstehenden Wassertropfen haben einen größeren Luftwiderstand. Auch bei extrem kleinen Austrittsöffnungen verringert sich die Steighöhe, weil sich dann die Reibung und die Oberflächenspannung des Wassers sowie die Adhäsion in der Austrittsöffnung stärker bemerkbar machen.

Bemerkung

Statt des Standzylinders kann als Vorratsgefäß auch ein großer Glastrichter verwendet werden (Abb. 1.3.10./2).

1.3.11. Bestimmung der Dichte einer mit Wasser mischbaren Flüssigkeit mit Hilfe eines Tauchrohres [SE]

1. Großer, weiter Standzylinder
2. Glasrohr (⌀1 cm, Länge 30 cm), das an einem Ende zu einer Spitze ausgezogen ist
3. Glasrohr (⌀1 cm, Länge 30 cm), das am Ende mit einer hakenförmig umgebogenen Spitze versehen ist
4. Kochsalzlösung
5. Brennspiritus
6. Fluoreszein oder anderer Farbstoff
7. Vertikalmeßstab oder Lineal mit Millimeterteilung

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 1.0.4.!
2. Soll statt der Dichte die Wichte ermittelt werden, so geschieht das ähnlich wie bei der Bestimmung der Dichte, die im folgenden Versuch beschrieben ist. Für die Gewichtskraft F_G wird jedoch $\gamma \cdot V$ bzw. $\gamma \cdot A \cdot h$ eingesetzt. Man erhält dann

   $$p_1 = \gamma_1 \cdot h_1 \text{ und } p_2 = \gamma_2 \cdot h_2.$$

   Die gesuchte Wichte ist dann

   $$\gamma_2 = \gamma_1 \cdot \frac{h_1}{h_2}.$$

3. Im Gegensatz zu den Dichtebestimmungen mit Aräometern wird nur wenig Flüssigkeit gebraucht. Die beschriebenen Versuche eignen sich daher gut für Schülerexperimente.

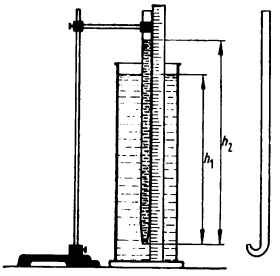


Abb. 1.3.11./1
Bestimmung der Dichte einer Flüssigkeit mit einem geraden Tauchrohr, daneben Tauchrohr mit hakenförmig gebogener Spitze

Versuch

Man füllt das gerade Tauchrohr durch Ansaugen mit der zu untersuchenden Flüssigkeit. Man verschließt die obere Öffnung mit dem Finger. Dann taucht man das Rohr etwa 20 cm tief in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder, hält es durch ein Stativ fest und gibt die Öffnung frei (Abb. 1.3.11./1). Es fließt so viel Flüssigkeit aus, bis an der Ausflußöffnung innen und außen der gleiche Schweredruck herrscht. Damit sich dadurch die Dichte des Wassers nicht wesentlich ändert, wird man zu dem Versuch einen möglichst weiten Standzylinder benutzen. Mit Hilfe eines Vertikalmeßstabes, den man neben das Tauchrohr in das Wasser stellt, bestimmt man die Flüssigkeitshöhen h_1 und h_2.
Bezeichnet man die Dichte der Flüssigkeit im Tauchrohr mit ϱ_2 und die Fläche der Austrittsöffnung mit A, dann ist der Bodendruck an dieser Öffnung

$$p_2 = \frac{F_{G_2}}{A}$$

oder unter Berücksichtigung des Newtonschen Grundgesetzes

$$p_2 = \frac{m_2 \cdot g}{A}.$$

Setzt man für $m_2 = \varrho_2 \cdot V_2$ und für $V_2 = A \cdot h_2$ ein, dann erhält man

$$p_2 = \varrho_2 \cdot h_2 \cdot g.$$

Ebenso ergibt sich für den Aufdruck des Wassers an der Öffnung des Tauchrohres

$$p_1 = \varrho_1 \cdot h_1 \cdot g.$$

Da nach dem Erreichen des Gleichgewichtszustandes, der schon nach wenigen Sekunden eintritt, Druckausgleich herrscht, gilt die Gleichung

$$p_2 = p_1$$

oder

$$\varrho_2 \cdot h_2 \cdot g = \varrho_1 \cdot h_1 \cdot g.$$

Die zu bestimmende Dichte errechnet man dann aus der Gleichung

$$\varrho_2 = \varrho_1 \cdot \frac{h_1}{h_2}.$$

Für Flüssigkeiten mit einer größeren Dichte als Wasser benutzt man ein Tauchrohr mit hakenförmig gebogener Spitze (Abb. 1.3.11./1, Nebenbild). Zweckmäßigerweise färbt man die zu untersuchenden Flüssigkeiten.

Bemerkung

Bei der Verwendung brennbarer Flüssigkeiten sind die Brandschutzbestimmungen zu beachten.

Giftige Dämpfe

1.3.12. Bestimmung der Dichte des Quecksilbers mit Hilfe eines U-Rohres

Zu Variante a

1. U-förmiges Glasrohr (∅ etwa 1 cm, Länge des langen Schenkels etwa 50 cm, Länge des kurzen Schenkels etwa 10 cm)
2. hoher Standzylinder
3. Quecksilber, Quecksilberzange, Quecksilbertropfer, Quecksilberbrett oder Tablett mit erhöhten Rändern, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
4. Vertikalmeßstab
   oder Lineal mit Millimeterteilung

Zu Variante b

Geräte 1., 3. und 4., außerdem
5. Bürette oder kleines Becherglas

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 1.0.4., MH Nr. 2 V 1.3.11.!
2. Die Variante a lehnt sich eng an V 1.3.11. an. Die quantitative Auswertung ist so wie dort durchzuführen, sie ist in der folgenden Beschreibung weggelassen. Die Variante b stellt eine Vereinfachung dar.

Variante a

Über einem Quecksilberbrett füllt man vorsichtig mit einem Quecksilbertropfgefäß in das ungleichschenklige U-Rohr so viel Quecksilber ein, daß es in beiden Schenkeln etwa 50 mm hoch steht. Taucht man das Rohr in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder, dann dringt das Wasser in den kurzen Schenkel des U-Rohres ein. Durch den Schweredruck des Wassers wird das Quecksilber etwas verschoben und steigt im langen Schenkel einige Millimeter empor (Abb. 1.3.12./1). Das U-Rohr wird an einem Stativ befestigt.
Mit einem Vertikalmeßstab, den man in das Wasser hinter das U-Rohr stellt, bestimmt man den Höhenunterschied h_1 und h_2 und errechnet die Dichte des Quecksilbers nach der Gleichung

$$\varrho_2 = \varrho_1 \cdot \frac{h_1}{h_2}.$$

Für die Dichte des Wassers wird $\varrho_1 = 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ eingesetzt.

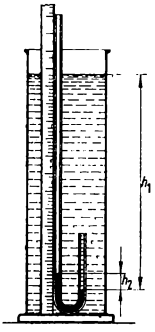


Abb. 1.3.12./1
Versuchsanordnung zur Dichtebestimmung des Quecksilbers mit Hilfe eines U-Rohres

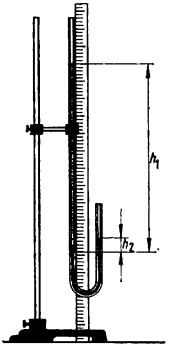


Abb. 1.3.12./2
Versuchsanordnung zur Dichtebestimmung von Quecksilber oder anderer Flüssigkeiten

Variante b

Das U-Rohr wird wie in der Variante a mit Quecksilber gefüllt und an einem Stativ befestigt. Mit einer Bürette oder einem kleinen Becherglas füllt man in den langen Schenkel etwas Wasser ein und liest die Höhenunterschiede h_1 und h_2 ab (Abb. 1.3.12./2). Die Länge der Wassersäule soll dabei vorerst nur etwa 100 mm betragen. Man gießt mehrfach ungefähr die gleiche Wassermenge zu und trägt die abgelesenen Höhenunterschiede in eine Tabelle ein. Nach der Gleichung

$$\varrho_2 = \varrho_1 \cdot \frac{h_1}{h_2}$$

wird für die einzelnen Messungen die jeweilige Dichte errechnet.

Tabelle: Auswertung der Meßergebnisse bei einer Dichtebestimmung

Höhe der Wassersäule h_1 in mm	Höhe der Quecksilbersäule h_2 in mm	$\frac{h_1}{h_2}$
115	8,5	13,5
240	17,5	13,7
320	23,5	13,6
381	28	13,6
458	33,5	13,7
	Mittelwert	13,6

Die Dichte des Quecksilbers beträgt $\varrho_2 = 13{,}6\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$.

Bemerkungen

1. Quecksilberdämpfe sind giftig. Beim Umgang mit Quecksilber ist deshalb äußerste Vorsicht geboten. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!
2. Das Entleeren des U-Rohres gelingt am besten, wenn man seinen Inhalt aus dem kurzen Schenkel in ein großes Becherglas schüttet. Man kann dann das Wasser vorsichtig in ein weiteres Becherglas (vorerst nicht in den Ausguß!) abgießen und das über dem Quecksilber verbleibende Wasser mit Filterpapier abtupfen.
3. Mit der Versuchsanordnung nach der Variante b kann auch die Dichte anderer Flüssigkeiten bestimmt werden, wenn man die Dichte des Quecksilbers als bekannt voraussetzt (vgl. V 1.3.13.!).
4. Bei exakten Messungen muß auch die Temperatur berücksichtigt werden.
5. Bei Schülerexperimenten ist statt des Quecksilbers eine andere Flüssigkeit zu verwenden, die sich mit Wasser nicht mischt und nicht mit ihm chemisch reagiert. Geeignet dafür ist z. B. Öl.



1.3.13. Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten mit Hilfe eines U-Rohres

Geräte wie in V 1.3.12., Variante b, außerdem
6. Brennspiritus, Kochsalzlösung oder andere Flüssigkeit

Methodischer Hinweis

Vergleiche MB 1.0.4., MH Nr. 2 V 1.3.11.!

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.3.12./2. Die Durchführung und Auswertung des Experiments geschieht so wie in V 1.3.12., Variante b beschrieben. Statt des Wassers wird die zu untersuchende Flüssigkeit in den langen Schenkel des U-Rohres gefüllt und die Dichte nach der Gleichung

$$\varrho_1 = \varrho_2 \cdot \frac{h_2}{h_1}$$ errechnet. Die Dichte des Quecksilbers beträgt $\varrho_2 = 13{,}6\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$.

Bemerkungen

1. Vgl. MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!
2. Bei der Verwendung brennbarer Flüssigkeiten sind auch die Brandschutzbestimmungen zu beachten.

1.3.14. Bestimmung der Dichte von Brennspiritus durch Vergleich der Saughöhen zweier Flüssigkeiten

1. Zwei Glasrohre (⌀1 cm, Länge 70 cm)
2. T-Stück aus Glas oder Metall
3. kurzes Glasrohr als Mundstück (⌀1 cm, Länge etwa 5 cm) mit rundgeschmolzenem Rand
4. Gummischlauch
5. zwei Bechergläser (100 ml)
6. Quetschhahn
7. Vertikalmeßstab
8. Brennspiritus oder andere Flüssigkeit

Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment nimmt gegenüber den vorangegangenen eine Sonderstellung ein. Während dort auf die Flüssigkeitssäulen in den Röhren der äußere Luftdruck wirkte, ist hier im oberen Teil des Rohrsystems ein Unterdruck p. Er ist geringer als der äußere Luftdruck p_b.

   $$p < p_b.$$

   Bezeichnet man die Schweredrücke der beiden Flüssigkeitssäulen mit p_1 und p_2, dann gelten die Gleichungen

   $$p_b = p + p_1 \text{ und } p_b = p + p_2,$$

   weil auf den freien Flüssigkeitsoberflächen in den Bechergläsern der barometrische Luftdruck p_b lastet.
   Aus diesen beiden Gleichungen folgt die Gleichheit der Schweredrücke beider Flüssigkeitssäulen

   $$p_2 = p_1 \text{ bzw.}$$

   nach der Herleitung in V 1.3.11. die Beziehung

   $$\varrho_2 = \varrho_1 \cdot \frac{h_1}{h_2}.$$

   Es wird sich nach dem Entwicklungsstand der Schüler richten, in welcher Form man diese Herleitung mit ihnen erarbeitet oder sie selbständig erarbeiten läßt.
2. Vergleiche MB 1.0.4. und MH Nr. 2 V 1.3.11.

Versuch

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 1.3.14./1 dargestellt. Die oberen Enden der Rohre sind durch kurze Schlauchstücke über ein T-Stück mit einem Glasröhrchen als Mundstück verbunden. Das Schlauchstück vor dem Mundstück kann durch einen Quetschhahn verschlossen werden. Die Glasrohre werden so an einem Stativ befestigt, daß ihre unteren Enden in zwei kleine Bechergläser mit der Versuchsflüssigkeit bzw.

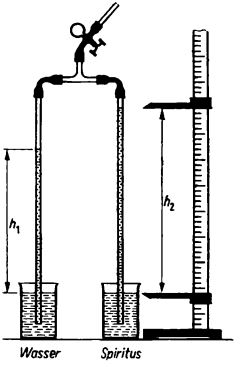


Abb. 1.3.14./1
Versuchsanordnung zur Bestimmung der Dichte von Spiritus durch Vergleichen der Saughöhen zweier Flüssigkeiten

der Vergleichsflüssigkeit Wasser tauchen. Man öffnet den Quetschhahn, saugt am Glasmundstück die beiden Flüssigkeiten bis auf etwa drei Viertel der Rohrlänge hoch und schließt den Quetschhahn wieder. Am Vertikalmeßstab liest man die Flüssigkeitsstände in den Bechergläsern und in den Röhren ab und ermittelt durch Differenzbildung die Saughöhe des Wassers h_1 und die des Spiritus h_2. Der Versuch wird mehrmals mit verschiedenen Saughöhen wiederholt. Die gemessenen Werte werden in eine Tabelle eingetragen.

Tabelle: Meßwerte beim Ermitteln der Saughöhen von Wasser und Spiritus

Flüssigkeitstemperatur 19,5 °C

Höhe der Wassersäule h_1 in mm	Höhe der Spiritussäule h_2 in mm	$\frac{h_1}{h_2}$
521	652	0,799
490	609	0,805
512	639	0,801
366	455	0,804
	Mittelwert	0,802

Der Quotient aus h_1 und h_2 erweist sich als annähernd konstant. Da Wasser die Dichte $\varrho_1 = 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ hat, ergibt sich nach der Gleichung $\varrho_2 = \varrho_1 \cdot \frac{h_1}{h_2}$ für Brennspiritus die Dichte $\varrho_2 = 0{,}802\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$.

Bemerkungen

1. An Stelle von Brennspiritus können auch andere Flüssigkeiten verwendet werden. Es eignen sich
   Kochsalzlösung mit einem Salzgehalt bis zu 20%,
   Zuckerlösung mit einem Zuckergehalt bis zu 60%,
   Benzin, Petroleum, Glyzerin, Paraffinöl.
2. Bei exakten Messungen muß auch die Temperatur berücksichtigt werden.
3. Bei der Verwendung brennbarer Flüssigkeiten sind die Brandschutzbestimmungen zu beachten.

1.4. Der Auftrieb in Flüssigkeiten

1.4.1. Auftrieb einer luftdicht verschlossenen Dose

1. Plastdose mit Deckel
2. großes Becherglas
3. Zellglasklebestreifen

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist als Einführungsversuch zur Problemstellung besonders für untere Klassen geeignet.

Versuch

An einer Plastdose verklebt man die Fuge zwischen Dose und Deckel mit Klebestreifen. Taucht man die luftdicht verschlossene Dose in Wasser, dann verspürt man einen Widerstand, eine Kraft, die dem Eintauchen entgegenwirkt. Man bemerkt deutlich den *Auftrieb*.

1.4.2. Nachweis des Auftriebs mit einem Kraftmesser

1. Zylindrischer Metallkörper (z. B. Hakenkörper 50 g)
2. Becherglas
3. Kraftmesser

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment ist ebenso wie V 1.4.1. als Einführungsversuch gedacht. Es soll qualitativ gezeigt werden, daß der Auftrieb eine nach oben gerichtete Kraft ist, die der Gewichtskraft des Körpers entgegenwirkt.
Als Versuchsobjekt wurde ein Körper gewählt, an dem man anschaulich die Ursachen des Auftriebs, die unterschiedlichen Beträge der Bodendruckkraft und der Aufdruckkraft, die auf die Deckfläche und die Grundfläche des zylindrischen Körpers wirken, erörtern kann. Statt des Zylinders kann auch ein Quader verwendet werden.

Versuch

Man hängt einen zylindrischen Metallkörper mit Hilfe eines Fadens an einen Kraftmesser und liest seine Gewichtskraft ab. Senkt man den Körper in ein mit Wasser gefülltes Becherglas, so kann man eine Verminderung der Gewichtskraft, den *Auftrieb*, beobachten (Abb. 1.4.2./1).

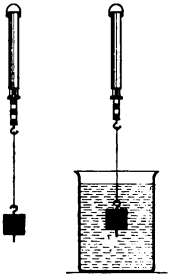


Abb. 1.4.2./1
Nachweis des Auftriebs mit einem Kraftmesser

1.4.3. Vergleich des Auftriebs eines Körpers mit seinem Volumen [SE]

Zu Variante a

1. Zylindrischer Metallkörper (z. B. Hakenkörper)
2. Kraftmesser
3. Becherglas
4. Meßschieber

Zu Variante b

Geräte 1. und 2., außerdem
5. Überlaufgefäß
6. Meßzylinder (100 ml)

Zu Variante c

Geräte 2. und 5., außerdem

7. zylindrischer Metallkörper und zylindrisches Gefäß gleichen Volumens zur Demonstration des Archimedischen Prinzips
8. kleines Becherglas

Methodische Hinweise

1. Die Erkenntnis, daß die Auftriebskraft in einer Flüssigkeit gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit ist, kann auf verschiedene Weise gewonnen werden. Drei dieser Möglichkeiten sind in den Varianten a bis c dargestellt.
2. Die Variante a ist besonders für die deduktive Methode geeignet. An einem Quader oder an einem Zylinder zeigt man in einer Tafelskizze, daß sich die auf den in eine Flüssigkeit getauchten Körper wirkenden Seitendruckkräfte aufheben müssen, daß aber die nach oben gerichtete Aufdruckkraft F_2, die von

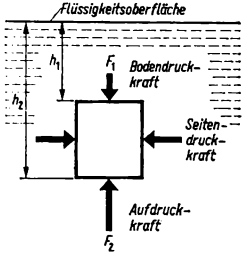


Abb. 1.4.3./1
Entwurf eines Tafelbildes zur Veranschaulichung der Verteilung der auf die Oberfläche eines untergetauchten Quaders wirkenden Druckkräfte

unten her auf die Grundfläche des Körpers wirkt, größer sein muß als die auf seine Deckfläche wirkende Bodendruckkraft F_1 (Abb. 1.4.3./1). Die Auftriebskraft F_A ergibt sich dann als Differenz dieser beiden Kräfte

$$F_A = F_2 - F_1.$$

Die Bodendruckkraft F_1 ist die Gewichtskraft der auf der Deckfläche lastenden Flüssigkeitssäule:

$$F_1 = m_1 \cdot g,$$

$$F_1 = \varrho \cdot A \cdot h_1 \cdot g.$$

Entsprechend gilt für die Aufdruckkraft

$$F_2 = \varrho \cdot A \cdot h_2 \cdot g.$$

Die Auftriebskraft ist demnach

$$F_A = \varrho \cdot A \cdot h_2 \cdot g - \varrho \cdot A \cdot h_1 \cdot g,$$

$$F_A = \varrho \cdot A \cdot (h_2 - h_1) \cdot g.$$

Diese Gleichung zeigt, daß die Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit ist.

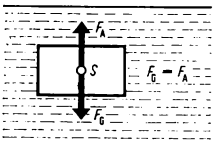


Abb. 1.4.3./2
Auf eine abgegrenzte Flüssigkeitsmenge wirkende Kräfte
S Schwerpunkt
F_G Gewichtskraft der abgegrenzten Flüssigkeitsmenge
F_A Auftriebskraft (Resultierende der auf den abgegrenzten Teil wirkenden Druckkräfte)

Auch durch den folgenden Gedankenversuch kann man zu diesem Ergebnis gelangen. Denkt man sich einen abgegrenzten Teil einer ruhenden Flüssigkeit erstarrt, ohne daß sich dabei die Dichte ändert, so wird an dem Gleichgewichtszustand nichts geändert (Abb. 1.4.3./2).
Man kann sich dann vorstellen, daß die Druckkräfte, die auf die Oberfläche des erstarrt gedachten Teils durch die umgebende Flüssigkeit ausgeübt werden, den umschlossenen Teil gerade in der Schwebe halten. Die Resultierende aller von außen einwirkenden Druckkräfte, die Auftriebskraft F_A, muß daher gleich der Gewichtskraft F_G des abgegrenzten Teils sein und in seinem Schwerpunkt S lotrecht nach oben wirken.
Ersetzt man den erstarrt gedachten Teil der Flüssigkeit in Gedanken durch irgendeinen festen Körper von gleicher Gestalt, so wird an dem Zustand der umgebenden Flüssigkeit nichts geändert. Sie drückt in derselben Weise wie vorher auf die Oberfläche des Körpers. Er erfährt demnach eine Auftriebskraft, die gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit ist. Diese deduktiv gewonnene Gesetzmäßigkeit wird dann durch das Experiment bestätigt.

3. Für die induktive Methode zur Herleitung des Archimedischen Prinzips sind besonders die Varianten b und c geeignet, weil hier mit der vom Körper verdrängten Flüssigkeit direkt gearbeitet wird.

Variante a

Mit einem Meßschieber bestimmt man den Durchmesser und die Höhe des zylindrischen Körpers und errechnet daraus sein Volumen.
Danach hängt man den Metallzylinder mit Hilfe eines Fadens an einen Kraftmesser und ermittelt wie in V 1.4.2. seine Auftriebskraft in Wasser (Abb. 1.4.2./1). Sie wird in N angegeben. Berechnet man die Gewichtskraft des verdrängten Wassers nach der Gleichung

$$F_G = \gamma_W \cdot V$$

und setzt für die Wichte des Wassers

$$\gamma_W = 10 \frac{\text{mN}}{\text{cm}^3}$$

ein, so stellt man fest, daß die Gewichtskraft des verdrängten Wassers gleich der Auftriebskraft ist.

Variante b

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 1.4.3./3 zu ersehen. Zuerst füllt man das Überlaufgefäß, bis ein Teil des Wassers ausfließt. Dann stellt man den leeren Meßzylinder unter das Ausflußrohr und bestimmt die Auftriebskraft des Versuchskörpers wie in V 1.4.2. Das von dem Körper verdrängte Wasser wird im Meß-

zylinder aufgefangen und sein Volumen abgelesen. Wie in der Variante a berechnet man die Gewichtskraft des verdrängten Wassers. Sie stimmt mit der Auftriebskraft mit guter Annäherung überein.

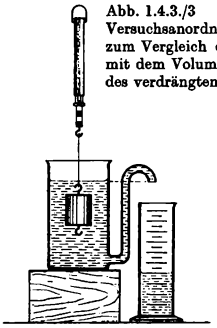


Abb. 1.4.3./3
Versuchsanordnung zum Vergleich des Auftriebs mit dem Volumen des verdrängten Wassers

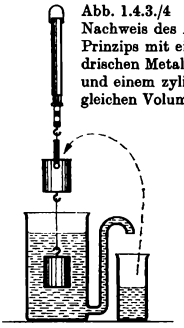


Abb. 1.4.3./4
Nachweis des Archimedischen Prinzips mit einem zylindrischen Metallkörper und einem zylindrischen Gefäß gleichen Volumens

Variante c

Der Versuch ähnelt in der Durchführung dem in der Variante b. An den Kraftmesser werden der Hohlzylinder und an einem Faden der abgeschlossene Metallzylinder angehängt (Abb. 1.4.3./4). Das vom eingetauchten Körper verdrängte Wasser wird in einem kleinen Becherglas aufgefangen und in das zylindrische Gefäß gegossen. Durch die Gewichtskraft des Wassers wird die Auftriebskraft wieder kompensiert.

Bemerkungen

1. Im Versuch der Variante b ist es zweckmäßig, verschiedene beliebig geformte Körper zu verwenden, z. B. eine Schraube oder eine Stativmuffe, weil das Experiment dadurch an Überzeugungskraft gewinnt.
2. Beim Experiment der Variante c sollte man das kleine Becherglas vor dem Versuch mit Wasser ausspülen, da sonst das am Becherglas haftende Wasser beim Füllen des Gefäßes fehlt.
   Man kann bei diesem Experiment statt des Überlaufgefäßes auch ein gewöhnliches Becherglas verwenden und das zylindrische Metallgefäß mit Wasser aus einer Pipette oder Bürette füllen, muß aber darauf achten, daß man nur *randvoll* füllt. Infolge der Oberflächenspannung des Wassers könnte es auch übervoll werden.
   Um nachzuweisen, daß das Fassungsvermögen des Gefäßes gleich dem Volumen des zylindrischen Körpers ist, steckt man ihn in das Gefäß. Er füllt es ganz aus.
3. Es empfiehlt sich, das Experiment der Variante c auch mit einer anderen Flüssigkeit, z. B. mit Kochsalzlösung, auszuführen.

Giftige Dämpfe

1.4.4. Fehlen des Auftriebs beim Fehlen des Aufdrucks

Zu Variante a

1. Großer, möglichst porenfreier Korken
2. Wachs, Stearin oder Paraffin
3. Spiegelglasplatte oder Fliese
4. Glastrog
5. Spiritusflamme oder Kerze
6. Glasstäbchen oder Holzstäbchen

Zu Variante b

Geräte 6., außerdem

7. Glasschale mit möglichst ebenem Boden
8. breiter Gummistopfen
9. Quecksilber, Quecksilberzange, Quecksilberbrett oder Tablett mit erhöhten Rändern, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment zeigt, daß kein Auftrieb zustande kommen kann, wenn der Aufdruck fehlt. Es sollte besonders dann vorgeführt werden, wenn das Archimedische Prinzip deduktiv (vgl. MH Nr. 2 V 1.4.3.!) hergeleitet wurde.

Variante a

Herstellen des Versuchskörpers

Über einer Spiritusflamme oder einer Kerzenflamme erwärmt man behutsam etwas Wachs, Stearin oder Paraffin und knetet aus der erweichten Masse einen runden, scheibenartigen Körper mit einem Durchmesser von ungefähr 5 cm bis 6 cm und einer Dicke von etwa 1 cm. Als Unterlage benutzt man dabei eine kleine Spiegelglasscheibe oder eine ganz ebene, flache Wandfliese, gegen die man die Knetmasse unter ständiger Bewegung im Kreise drückt. Man erreicht dadurch, daß der entstehende Körper eine möglichst glatte, ebene Grundfläche erhält. Als zweckmäßig erweist es sich, die Glasscheibe vorher vorsichtig zu erwärmen, damit der Knetkörper besser gleitet.

Solange die Knetmasse noch plastisch ist, drückt man in sie von oben einen großen Korken hinein, dessen Oberfläche möglichst frei von Poren und anderen Öffnungen ist. Er erhält auf diese Weise eine Grundplatte mit ganz ebener Grundfläche, mit der er auf der Unterlage fugenlos aufliegt (Abb. 1.4.4./1a). Man faßt die entstandene Vorrichtung am Korken an und hebt sie von der Glasscheibe ab, ohne die ebene Grundfläche dabei zu beschädigen.

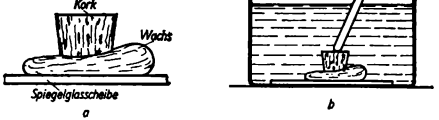


Abb. 1.4.4./1
Fehlen des Auftriebs bei einem Korken
a) Herstellen des Versuchskörpers aus Kork und Wachs
b) Der Versuchskörper bleibt unter Wasser am Boden liegen

Versuch

Man legt die als Knetunterlage benutzte Glasscheibe in einen mit Wasser gefüllten Glastrog. Taucht man den Versuchskörper ebenfalls unter Wasser und läßt ihn los,

so steigt er infolge seines Auftriebes empor und schwimmt. Drückt man dagegen den Versuchskörper mit seiner glatten Grundfläche unter kreisender Bewegung gegen die als Unterlage benutzte Glasscheibe und läßt ihn dann vorsichtig los, so steigt er nicht empor. Da sich jetzt kein Wasser unter dem Versuchskörper befindet, ist kein Auftrieb vorhanden (Abb. 1.4.4./1b).
Lagert man die Unterlage ein wenig geneigt, so folgt der Versuchskörper dem von unten her überwiegenden Seitendruck und gleitet allmählich nach oben. Sobald seine Grundfläche über die Unterlage hinausragt, steigt er empor.

Bemerkung

Als Versuchskörper sind auch kleine Dosen aus Plast sehr gut geeignet, wenn sie eine ebene Bodenfläche haben. Solche Behälter werden häufig für Salben, Hautcreme, Konfitüre u. a. m. verwendet. Man kann sie ohne weitere Hilfsmittel wie Wachs oder Stearin für den eben beschriebenen Versuch benutzen.

Variante b

Sehr eindrucksvoll ist ein derartiger Versuch mit Quecksilber. Infolge seiner großen Dichte schwimmt sogar eine Stahlkugel auf einer Quecksilberoberfläche (vgl. V 1.4.22.!). Um so erstaunlicher ist es, wenn ein Gummistopfen auf dem Boden eines mit Quecksilber gefüllten Gefäßes bleibt. Das erreicht man, wenn man den Stopfen mit einem Stäbchen gegen den Gefäßboden drückt und dann Quecksilber einfüllt, bis es die obere Fläche des Gummistopfens überdeckt. Man kann dann das Stäbchen entfernen (Abb. 1.4.4./2).

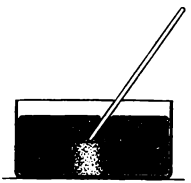


Abb. 1.4.4./2
Fehlen des Auftriebs bei einem Gummistopfen in Quecksilber

Bemerkung

Quecksilberdämpfe sind giftig. Beim Umgang mit Quecksilber ist deshalb äußerste Vorsicht geboten. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!

1.4.5. Vergleich der Auftriebskraft und der Wasserverdrängung eines Körpers unter Verwendung einer Balkenwaage [SE]

1. Balkenwaage mit verkürzter Waagschale
2. Tarierbecher, Schrot
3. Versuchskörper (Hakenkörper, Stein)
4. Überlaufgefäß
5. kleines Becherglas
6. Faden

Methodische Hinweise

1. Beachte MB 1.0.4.!
2. Bei dem Versuch wird die Auftriebskraft unmittelbar durch die Gewichtskraft des verdrängten Wassers veranschaulicht. Die Durchführung des Versuches ähnelt der in V 1.4.3., Variante c.

Versuch

An die verkürzte Waagschale einer Balkenwaage hängt man mit einem Faden als Versuchskörper einen Hakenkörper oder einen Stein.
Auf dieselbe Schale stellt man ein kleines Becherglas und bringt die Waage durch Tarieren ins Gleichgewicht (Abb. 1.4.5./1). Dann stellt man ein mit Wasser gefülltes Überlaufgefäß unter den Körper und senkt ihn hinein. Das ausfließende Wasser fängt man in dem vorher von der Waagschale genommenen Becherglas aufe

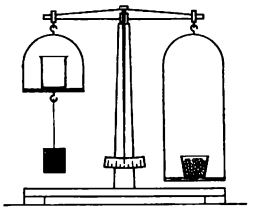


Abb. 1.4.5./1
Wägen eines Körpers auf einer Balkenwaage durch Austarieren

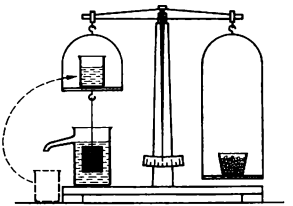


Abb. 1.4.5./2
Ausgleichen des Auftriebs durch Aufsetzen des verdrängten Wassers auf die Waagschale

Nach dem Einsenken des Körpers überwiegt die Gewichtskraft des Tarierbechers. Das Gleichgewicht wird wiederhergestellt, wenn man das mit dem ausgeflossenen Wasser gefüllte Becherglas auf die Waagschale setzt (Abb. 1.4.5./2). Damit ist gezeigt, daß die Auftriebskraft des eingetauchten Körpers gleich der Gewichtskraft des von ihm verdrängten Wassers ist.

Bemerkung

Um die Gültigkeit des Archimedischen Prinzips für beliebige Flüssigkeiten zu zeigen, wiederholt man den Versuch mit Kochsalzlösung, Brennspiritus oder dgl.

1.4.6. Vergleich der Auftriebskraft und der Wasserverdrängung eines Körpers mit Hilfe einer Tafelwaage [SE]

1. Tafelwaage
2. großes Becherglas
3. kleines Becherglas
4. Tarierbecher, Schrot
5. Kraftmesser
6. Überlaufgefäß
7. kleiner Meßzylinder
8. Hakenkörper, Stein oder dgl. als Versuchskörper
9. Faden

Methodische Hinweise

1. Beachte MB 1.0.4.!
2. Das Experiment zeigt in anschaulicher Weise die im Archimedischen Prinzip erfaßten Zusammenhänge. Es kann unter Beachtung der unter 1. genannten Hinweise als Einführungsversuch gezeigt werden. Läßt man es später im Rahmen eines Praktikums als Bestätigungsversuch ausführen, dann kann man bei dieser Gelegenheit auch das 3. Newtonsche Gesetz wiederholen.
   Es ist als Vorteil anzusehen, daß man bei der Ausführung des Experiments ohne langwierige Wägungen auskommt.

Versuch

Der Versuchskörper wird mit einem Faden über einen Kraftmesser an ein Stativ gehängt und zunächst mit einem Überlaufgefäß sein Volumen ermittelt (vgl. V 1.4.3.!). Das in den Meßzylinder abgeflossene Wasser wird aufbewahrt, es wird später noch gebraucht.
Danach stellt man ein nicht ganz mit Wasser gefülltes großes Becherglas auf eine Tafelwaage und tariert aus. Dazu benutzt man außer einem Tarierbecher mit Schrot auch ein kleines Becherglas, das man gemeinsam mit dem Tarierbecher auf die Waagschale stellt (Abb. 1.4.6./1).

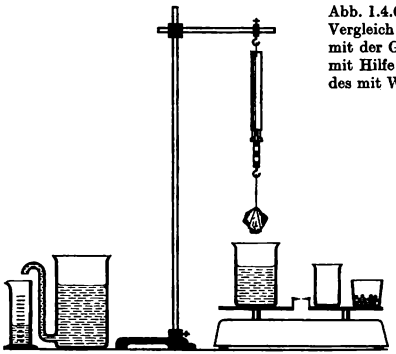


Abb. 1.4.6./1
Vergleich der Auftriebskraft mit der Gewichtskraft des verdrängten Wassers mit Hilfe einer Tafelwaage. Austarieren des mit Wasser gefüllten Becherglases

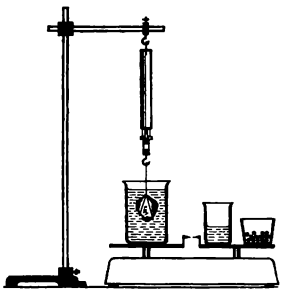


Abb. 1.4.6./2
Ausgleich der Auftriebskraft durch die Gewichtskraft der verdrängten Wassermenge

Dann senkt man den Versuchskörper in das Wasser ein. Am Kraftmesser kann man die Größe der Auftriebskraft ablesen. Beim Einsenken des Tauchkörpers beobachtet man infolge des Auftretens einer Gegenkraft ein Absinken der Waagschale, auf der das gefüllte Becherglas steht. Gießt man nun das vom Versuchskörper verdrängte Wasser aus dem Meßzylinder in das leere Becherglas auf der anderen Waagschale, dann herrscht wieder Gleichgewicht (Abb. 1.4.6./2). Die Gewichtskraft des verdrängten Wassers ist also ebenso groß wie die durch den Auftrieb hervorgerufene Gegenkraft. Da nach dem 3. Newtonschen Gesetz der Betrag der Gegenkraft gleich dem Betrag der Kraft ist, ist durch das Experiment das Archimedische Prinzip bestätigt.

1.4.7. Nachweis des Archimedischen Prinzips mit einem Modell der Krone des Hieron

1. Waagebalken mit einem Modell der Krone des Hieron ⑧,
   dazu erforderliches Material
   a) Messingblech (15 cm × 3 cm)
   b) Aluminiumdraht (⌀ etwa 5 mm, Länge 35 cm)
   c) massives Messingstück
   d) Faden
2. Glastrog

Methodischer Hinweis

Anknüpfend an die Sage von Archimedes und der Krone des Hieron (vgl. MB 1.0.4.), kann dieses Experiment zur Problemstellung dienen.

Anfertigen des Versuchsgerätes

Das Modell der Krone stellt man aus Messingblech her (Abb. 1.4.7./1). Innen befestigt man einen Ring aus dickem Aluminiumdraht. Man hängt das Modell mit einem Faden an einen etwa 20 cm langen Aluminiumdraht, der als Waagebalken dient. Als „Gegengewicht" hängt man ein Massestück beliebiger Form, das aus massivem Messing gefertigt ist, an. Seine Gewichtskraft wird durch Befeilen abge-

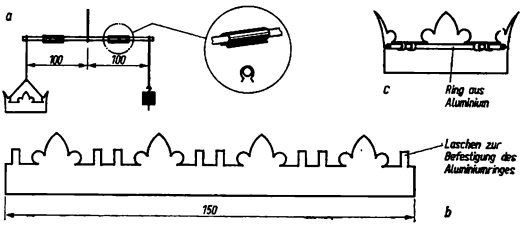


Abb. 1.4.7./1
Modell der Krone des Hieron
a) fertiges Gerät, im Nebenbild Reiter aus Messingblech
b) Abwicklung des Modells der Krone
c) Schnitt durch das Modell

glichen. Damit die Fäden auf dem Waagebalken nicht verrutschen, feilt man vorher eine Nut in den Draht.
Schließlich klemmt man auf jede Hälfte des Waagebalkens einen kleinen Reiter aus Messingblech (Abb. 1.4.7./1, Nebenbild). Durch Verschieben dieser Reiter können kleine Gewichtsunterschiede ausgeglichen werden.

Versuch

Taucht man die Krone und das Messingstück gleichzeitig in Wasser, dann stellt sich der Waagebalken schräg ein, die Auftriebskraft der Krone ist größer als die des Messingstücks.

1.4.8. Bestätigung des Archimedischen Prinzips mit Hilfe verschiedener Körper mit gleichem Volumen [SE]

1. Kraftmesser
2. Körper aus verschiedenen Stoffen mit gleichem Volumen (Würfel aus Blei, Eisen, Messing, Aluminium, Plast) ®
3. Meßzylinder (250 ml)
4. Faden

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment kann als Vorversuch zu V 1.4.10. ausgeführt werden.

Herstellen der Versuchskörper

Man sägt aus verschiedenen Stoffen Körper gleicher Form und gleichen Volumens, z. B. Würfel mit einer Kantenlänge von 2,5 cm. Man kontrolliert die Volumina der Körper durch Messen der Kanten mit einem Meßschieber oder durch Volumenbestimmung mit einem Überlaufgefäß. Der Abgleich erfolgt durch Abfeilen oder Abschleifen.

Versuch

Einen Meßzylinder mit dem Meßbereich von 250 ml füllt man bis zur 200-ml-Marke mit Wasser. Dann hängt man einen der Versuchskörper mit einem Faden an einen Kraftmesser und taucht ihn in den Meßzylinder. Dabei bestimmt man seine Auftriebskraft als Verminderung der Gewichtskraft beim Eintauchen. Gleichzeitig steigt der Flüssigkeitsspiegel im Meßzylinder und zeigt damit das Volumen des Körpers an. Man stellt fest, daß einem Volumen von 100 ml eine Auftriebskraft von 1 N entspricht.
Ersetzt man den Versuchskörper der Reihe nach durch andere, dann zeigt der Kraftmesser zwar jedesmal eine andere Gewichtskraft an, aber Volumen und Auftriebskraft stehen stets im selben Zahlenverhältnis.
Der Versuch zeigt, daß die Auftriebskraft nur vom Volumen abhängt, nicht aber von der Gewichtskraft und vom Material, aus dem der Körper besteht.

1.4.9. Wichtebestimmung fester Körper mit Hilfe des Auftriebs in Wasser [SE]

1. Kraftmesser verschiedener Meßbereiche
2. Becherglas
3. Körper aus verschiedenen Stoffen (Blei, Eisen, Glas, Stein u. a. m.)
4. Faden

Methodischer Hinweis

Bei diesem Experiment wird die Wichte eines Körpers nach der Gleichung $\gamma = \frac{F_G}{V}$ berechnet, wobei man das Volumen aus dem Auftrieb in Wasser bestimmt. Dadurch gestaltet sich dieser Versuch besonders einfach.

Versuch

Die Durchführung des Experiments gleicht der in V 1.4.2. Der zu untersuchende Körper wird mit einem Faden an einen Kraftmesser gehängt und die Gewichtskraft F_G des Körpers abgelesen. Danach taucht man den Körper in Wasser und liest wiederum die vom Kraftmesser angezeigte Gewichtskraft F_{Gw} ab. Man erhält die Auftriebskraft als Differenz dieser beiden Werte

$$F_A = F_G - F_{Gw}\,.$$

Für die Auftriebskraft gilt außerdem

$$F_A = \gamma_w \cdot V\,.$$

Das Volumen des Körpers ist demnach

$$V = \frac{F_A}{\gamma_w}.$$

Setzt man die für F_A und V gefundenen Beziehungen in die Gleichung zur Berechnung der Wichte des eingetauchten Körpers

$$\gamma = \frac{F_G}{V}$$

ein, so erhält man die Gleichung

$$\gamma = \frac{F_G}{F_G - F_{Gw}} \cdot \gamma_w.$$

Für die Wichte des Wassers ist der Wert

$$\gamma_w = 9{,}81\,\frac{\mathrm{mN}}{\mathrm{cm^3}}$$

einzusetzen.
Bei einem Experiment mit einem Bleistück ergaben sich folgende Größen:

Gewichtskraft des Körpers in Luft $F_G = 0{,}90$ N
Gewichtskraft des Körpers in Wasser $F_{Gw} = 0{,}82$ N
Auftriebskraft des Körpers in Wasser $F_G - F_{Gw} = 0{,}08$ N
Der Körper hat demnach das Volumen $V = 8\ \mathrm{cm^3}$

$$\gamma = \frac{F_G}{V} = \frac{0{,}90\ \mathrm{N}}{8\ \mathrm{cm^3}} = 0{,}11\ \mathrm{N \cdot cm^{-3}}.$$

Bemerkungen

1. Die in diesem Experiment ermittelten Werte für die Wichte sind meist ungenau. Die Ursache dafür ist in der geringen Empfindlichkeit und Ablesegenauigkeit bei Messungen mit Kraftmessern zu suchen. Um diesen Fehler gering zu halten, wählt man für das Experiment einen Kraftmesser mit einem Meßbereich, bei dem der Meßwert in der Nähe des oberen Skalenendes liegt. Für den oben beschriebenen Versuch ($F_G = 0{,}90$ N) wurde ein Kraftmesser mit dem Meßbereich 1 N benutzt.
2. Bei Körpern mit geringerer Wichte als der des Wassers, z. B. einem Stück Paraffin, verfährt man so, daß man den Versuchskörper mit einem Stück Metall durch einen feinen Faden zusammenbindet. Man wägt vorher jeden Körper einzeln in Luft, bestimmt die Auftriebskraft der miteinander verbundenen Körper und die des Metallstückes für sich. Die Auftriebskraft des Versuchskörpers ergibt sich dann durch Differenzbildung aus der Auftriebskraft des zusammengesetzten Körpers und der des Metallstückes.

1.4.10. Dichtebestimmung eines Körpers mit Hilfe des Auftriebs in Wasser [SE]

1. Balkenwaage mit verkürzter Waagschale
2. Becherglas
3. Körper aus verschiedenen Stoffen (Blei, Eisen, Glas, Stein u. a. m.)
4. Wägesatz
5. Faden

Methodischer Hinweis

Auch bei diesem Versuch wird wie in V 1.4.7. das Volumen eines Versuchskörpers aus dem Auftrieb bestimmt, den der Körper in Wasser erfährt.
Obwohl man im Unterricht aus methodischen Gründen (vgl. MB 1.0.4,) Kräfte grundsätzlich nur mit Kraftmessern bestimmen sollte, wird hier eine Balkenwaage zur Ermittlung der Auftriebskraft benutzt. Der Vorteil liegt in einer erheblichen Steigerung der Meßgenauigkeit. Man sollte die Schüler aber darauf hinweisen, daß hier die Balkenwaage zum Vergleichen von Kräften eingesetzt wird.

Versuch

Der Versuchskörper wird mit einem Faden an die verkürzte Waagschale einer Balkenwaage gehängt und seine Masse m ermittelt. Danach taucht man den Körper in Wasser. Durch den Auftrieb wird das Gleichgewicht gestört. Man stellt es wieder her, indem man auf die Seite, an der der Körper hängt, weitere Wägestücke auflegt, ohne die Belastung der anderen Waagschale zu verändern. Die Gewichtskraft der nachträglich aufgelegten Wägestücke entspricht der Auftriebskraft F_A.
Aus der Beziehung

$$F_A = \gamma_w \cdot V$$

folgt für das Volumen

$$V = \frac{F_A}{\gamma_w}.$$

Für die Dichte gilt somit

$$\varrho = \frac{m}{V}$$

bzw.

$$\varrho = \frac{m}{F_A} \cdot \gamma_w .$$

In diese Gleichung ist für die Wichte des Wassers der Wert

$$\gamma_w = 9{,}81 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{cm}^{-3}$$

einzusetzen.

Beispiel für die Durchführung eines Experiments:

Masse des Versuchskörpers $m = 141{,}2$ g
Zur Herstellung des Gleichgewichts aufgelegte Wägestücke 12,5 g
Die Auftriebskraft des Körpers beträgt demnach $F_A = 0{,}123$ N
Berechnung der Dichte des Körpers:

$$\varrho = \frac{141{,}2\ \mathrm{g}}{0{,}123\ \mathrm{N}} \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-3}\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{cm}^3}$$

$$\varrho = 11{,}25\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^{-3}} .$$

Der Versuchskörper besteht aus Blei.

Bemerkung

Steht keine Waage mit verkürzter Waagschale zur Verfügung, dann kann mit gutem Erfolg auch eine Hornschalenwaage benutzt werden, die man an einem Stativ aufhängt (Abb. 1.4.10./1). Die eine Schale der Hornschalenwaage ist mit einer Aufhängevorrichtung für den Versuchskörper zu versehen (Abb. 1.4.10./2). Diese fertigt man aus einem etwa 1 mm dicken Draht an. Bei einem Schalendurchmesser von 90 mm braucht man drei etwa 110 mm lange Drahtstücke. Diese werden

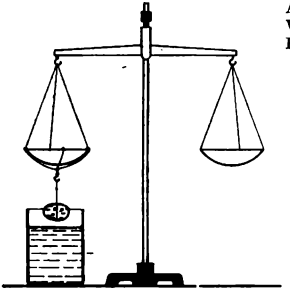


Abb. 1.4.10./1
Versuchsanordnung zur Bestimmung der Dichte fester Körper mit einer Hornschalenwaage



Abb. 1.4.10./2
Schale einer Hornschalenwaage mit Aufhängevorrichtung

an dem einen Ende auf eine Länge von etwa 30 mm so verflochten und verlötet, daß ein Draht etwas herausragt. Dieses Ende wird zu einem Haken umgebogen. Die anderen Drahtenden werden auf gleiche Länge abgeglichen und so gebogen, daß sie sich der Rundung der Schale anpassen und durch Endhaken an ihr befestigt werden können. Das Gleichgewicht wird durch Tarieren hergestellt.

1.4.11. Wichtebestimmung einer Flüssigkeit durch Vergleich der Auftriebskräfte [SE]

1. Kraftmesser (1 N)
2. Körper aus Glas oder Metall (m = 80 g bis 100 g)
3. zwei Bechergläser
4. dünner Draht
5. verschiedene Flüssigkeiten (Kochsalzlösung, Brennspiritus u. a. m.)

Methodischer Hinweis

Bei diesem Versuch bestimmt man die Auftriebskraft eines Körpers in einer zu untersuchenden Flüssigkeit und in Wasser. Man erhält die Wichte der Flüssigkeit, indem man diese Größen in die Gleichung

$$\text{Wichte der Flüssigkeit} = \text{Wichte des Wassers} \cdot \frac{\text{Auftriebskraft in der Flüssigkeit}}{\text{Auftriebskraft im Wasser}}$$

einsetzt.
Bei der mathematischen Begründung des Verfahrens geht man von der Tatsache aus, daß die Auftriebskraft eines Körpers in einer Flüssigkeit gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit und damit gleich dem Produkt aus dem Volumen V der Flüssigkeit und ihrer Wichte γ ist. Es gilt also
für die Auftriebskraft in Wasser

$$F_{A_1} = \gamma_1 \cdot V,$$

für die Auftriebskraft in der Versuchsflüssigkeit

$$F_{A_2} = \gamma_2 \cdot V.$$

Somit ist

$$\frac{F_{A_1}}{F_{A_2}} = \frac{\gamma_1 \cdot V}{\gamma_2 \cdot V}$$

und

$$\gamma_2 = \gamma_1 \cdot \frac{F_{A_2}}{F_{A_1}}.$$

Versuch

An einem Kraftmesser befestigt man mit einem dünnen Draht einen Tauchkörper, der möglichst aus Glas bestehen sollte, damit er mit der Versuchsflüssigkeit chemisch nicht reagiert. Man bestimmt der Reihe nach

seine Gewichtskraft in Luft F_G,
seine Gewichtskraft in Wasser F_{G_1} und
seine Gewichtskraft in der Flüssigkeit F_{G_2}.

Man setzt die gemessenen Größen in die Gleichung

$$\gamma = \gamma_1 \frac{F_G - F_{G_2}}{F_G - F_{G_1}}$$

ein und erhält damit die Wichte der Flüssigkeit, wenn man für die Wichte des Wassers $\gamma_1 = 9{,}81\ \mathrm{mN \cdot cm^{-3}}$ einsetzt.

Bemerkungen

1. Bedingt durch die geringe Empfindlichkeit der Kraftmesser sind die auf diese Weise ermittelten Meßergebnisse relativ ungenau. Das ist besonders dann der Fall, wenn ein Kraftmesser mit zu großem Meßbereich verwendet wird und in der unteren Skalenhälfte abgelesen werden muß.
2. Genauere Ergebnisse bekommt man, wenn man den Versuch mit einer Balkenwaage ausführt (vgl. V 1.4.8. und 1.4.10.!).

1.4.12. Dichtebestimmung einer Flüssigkeit durch Vergleich der Auftriebskräfte [SE]

1. Balkenwaage mit verkürzter Waagschale oder Hornschalenwaage
2. Wägesatz
3. Tarierbecher, Schrot
4. Körper aus Glas oder Metall
5. zwei Bechergläser
6. dünner Draht
7. verschiedene Flüssigkeiten (Kochsalzlösung, Brennspiritus u. a. m.)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.4.9. und MH V 1.4.10.!

Versuch

Die Durchführung des Versuches ähnelt der in V 1.4.10. und in V 1.4.11.
Der Tauchkörper aus Glas oder Metall wird mit einem dünnen Draht an der verkürzten Waagschale einer Balkenwaage befestigt und die Waage austariert. Taucht man den Körper in Wasser, dann wird das Gleichgewicht gestört. Man stellt es wieder her, indem man Wägestücke auf die Waagschale legt, an der der Körper hängt. An der Belastung der anderen Schale (Tarierbecher mit Schrot) wird nichts verändert. Die Gewichtskraft der aufgelegten Wägestücke entspricht der Auftriebskraft in Wasser F_{A_1} bzw. der Gewichtskraft des verdrängten Wassers F_{G_1}. Nach dem Newtonschen Grundgesetz gilt auch

$$F_{A_1} = F_{G_1} = m_1 \cdot g.$$

In der gleichen Weise bestimmt man auch die Auftriebskraft F_{A_2} in der zu untersuchenden Flüssigkeit. Aus den oben beschriebenen Gründen ist dann

$$F_{A_2} = F_{G_2} = m_2 \cdot g.$$

Demnach verhalten sich die Auftriebskräfte in der Flüssigkeit und in Wasser wie

$$\frac{F_{A_2}}{F_{A_1}} = \frac{m_2 \cdot g}{m_1 \cdot g} \quad \text{oder} \quad \frac{F_{A_2}}{F_{A_1}} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Für die Dichten der Flüssigkeiten kann man setzen

$$\varrho_1 = \frac{m_1}{V} \text{ und } \varrho_2 = \frac{m_2}{V}.$$

Daraus folgt $\varrho_2 = \varrho_1 \cdot \frac{m_2}{m_1}$ oder $\varrho_2 = \varrho_1 \frac{F_{A_2}}{F_{A_1}}$.

Setzt man für die Dichte des Wassers $\varrho_1 = 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ ein, dann ist ϱ_2 die Dichte der untersuchten Flüssigkeit.

Bemerkung

Bei Arbeiten mit brennbaren Flüssigkeiten sind die Brandschutzbestimmungen zu beachten.

1.4.13. Dichtebestimmung einer Flüssigkeit mit der Mohrschen Waage [SE]

1. Mohrsche Waage mit Zubehör
   1 Tauchkörper aus Glas mit eingeschmolzenem Thermometer
   2 $\frac{1}{1}$-Reiter
   1 $\frac{1}{10}$-Reiter
   1 $\frac{1}{100}$-Reiter
2. kleiner Standzylinder
3. verschiedene Flüssigkeiten (destilliertes Wasser, Kochsalzlösung, Brennspiritus, Benzin, Petroleum, Kalilauge u. a. m.)

Methodischer Hinweis

Die Dichtebestimmung einer Flüssigkeit mit der Mohrschen Waage liefert sehr genaue Ergebnisse. Dieses Gerät hat in seiner Wirkungsweise Ähnlichkeit mit einer römischen Schnellwaage (vgl. 1. Teil). Das Gleichgewicht wird hergestellt, indem man an verschiedenen Stellen des ungleicharmigen Waagebalkens Reiter anhängt. Die Messung wird dadurch vereinfacht, daß man einen Tauchkörper verwendet, dessen Auftriebskraft F_{A_1} in einer Testflüssigkeit mit der Dichte $\varrho_1 = 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ genau definiert ist und durch die Gewichtskraft eines $\frac{1}{1}$-Reiters kompensiert werden kann. Die Gewichtskraft des $\frac{1}{10}$-Reiters entspricht dem zehnten Teil und die des $\frac{1}{100}$-Reiters dem hundertsten Teil dieser Auftriebskraft.

Zur Erklärung der Wirkungsweise der Mohrschen Waage kann man die Schüler auf folgende Zusammenhänge hinweisen:

Die Auftriebskraft F_A ist gleich der Gewichtskraft F_G der verdrängten Flüssigkeit

$$F_G = F_A = m \cdot g.$$

Aus der Beziehung

$$\varrho = \frac{m}{V}$$

erhält man

$$m = \varrho \cdot V.$$

Somit ist

$$F_A = \varrho \cdot V \cdot g.$$

In dieser Gleichung ist ϱ die Dichte der verdrängten Flüssigkeit, V das Volumen des Tauchkörpers und g die Fallbeschleunigung. Da V und g konstant sind, ist die Auftriebskraft des Tauchkörpers der Dichte der untersuchten Flüssigkeit proportional.

$$F_A \sim \varrho_{Fl}.$$

Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Dichte der zu untersuchenden Flüssigkeit mit der Dichte des Wassers ($\varrho_1 = 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$) zu vergleichen. Legt man das in der folgenden Versuchsbeschreibung gewählte Beispiel zugrunde, so ist die am Ende des Waagebalkens wirksame Kraft F_A unter Berücksichtigung des Hebelgesetzes

$$F_A = 1 \cdot F_{A_1} + 0{,}7 \cdot F_{A_1} + 0{,}2 \cdot \frac{1}{10} F_{A_1} + 0{,}5 \cdot \frac{1}{100} F_{A_1},$$

$$F_A = F_{A_1} + 0{,}7\, F_{A_1} + 0{,}02\, F_{A_1} + 0{,}005\, F_{A_1},$$

$$F_A = 1{,}725\, F_{A_1}.$$

Da die Auftriebskräfte des Tauchkörpers den Dichten der Flüssigkeiten proportional sind, gilt auch die Gleichung

$$\varrho_{Fl} = 1{,}725\, \varrho_1$$

beziehungsweise

$$\varrho_{Fl} = 1{,}725\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}.$$

Versuch

Der Glaskörper wird an einen Haken am äußeren Ende des Waagebalkens gehängt, der durch Kerben in 10 gleiche Teile unterteilt ist. Durch das am anderen Ende des

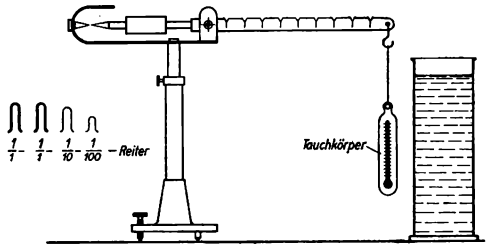


Abb. 1.4.13./1
Mohrsche Waage

Waagebalkens befindliche „Gegengewicht" wird der Ausschlag kompensiert. Durch Drehen der Einstellschraube am Fuß der Waage wird erreicht, daß die Zungenmarke genau einspielt (Abb. 1.4.13./1). Dann wird der Standzylinder mit möglichst kaltem Wasser gefüllt und der Glaskörper vollständig eingetaucht. Er erfährt dadurch einen Auftrieb, der durch einen an denselben Haken gehängten $\frac{1}{1}$-Reiter ausgeglichen wird. Ersetzt man das Wasser durch eine andere Flüssigkeit mit einer Dichte, die zwischen 1 und 2 $g \cdot cm^{-3}$ liegt, so genügt der am Haken hängende $\frac{1}{1}$-Reiter nicht mehr zum Ausgleich des Auftriebs. Man hängt den zweiten $\frac{1}{1}$-Reiter, von innen nach außen vorgehend, in die einzelnen Kerben des Waagebalkens und beläßt ihn in der letzten Kerbe, bei der noch ein Auftrieb zu beobachten ist. Ebenso verfährt man mit dem $\frac{1}{10}$-Reiter und dem $\frac{1}{100}$-Reiter. Man kann dann den Zahlenwert der Dichte der Versuchsflüssigkeit aus der Reiterstellung unter Berücksichtigung der Reitergröße unmittelbar ablesen.

Beispiel

Erster $\frac{1}{1}$-Reiter am Endhaken	Anteil am Zahlenwert: 1
zweiter $\frac{1}{1}$-Reiter in Kerbe 7	Anteil am Zahlenwert: 0,7
$\frac{1}{10}$-Reiter in Kerbe 2	Anteil am Zahlenwert: 0,02
$\frac{1}{100}$-Reiter in Kerbe 5	Anteil am Zahlenwert: 0,005

Dichte der Flüssigkeit 1,725 $g \cdot cm^{-3}$

Bei Flüssigkeiten mit einer Dichte unter 1 $g \cdot cm^{-3}$ verfährt man ebenso, nur entfällt dabei das Anhängen des ersten $\frac{1}{1}$-Reiters an den Aufhängehaken des Tauchkörpers.

Bemerkungen

1. Destilliertes und durch Kochen entgastes Wasser hat nur bei 4 °C eine Dichte von 1 $g \cdot cm^{-3}$. Bei höheren und tieferen Temperaturen ist die Dichte etwas geringer.
2. Beim Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten sind die Brandschutzbestimmungen zu beachten.

1.4.14. Vorversuch zur Untersuchung der Schwimmfähigkeit eines Körpers

1. Kraftmesser
2. Überlaufgefäß
3. Meßzylinder (100 ml)
4. Stein, Holzklotz (in das Überlaufgefäß passend)
5. Faden
6. steifer Draht

Methodischer Hinweis

Durch den Versuch wird in quantitativer Weise ein Vergleich zwischen der Gewichtskraft eines festen Körpers und seiner Auftriebskraft im Wasser ermöglicht. Dadurch kann das Verständnis für das Schwimmen vorbereitet werden. Als Versuchskörper wählt man einen Stein und einen kleinen Holzklotz, die beide in ein Überlaufgefäß hineinpassen müssen.

Versuch 1

Man hängt einen kleinen Stein mit Hilfe eines Fadens an einen Kraftmesser und liest seine Gewichtskraft F_G ab. Dann taucht man ihn in ein gefülltes Überlaufgefäß und fängt das verdrängte Wasser in einem Meßzylinder auf. Am Kraftmesser stellt man eine Verminderung der Gewichtskraft, die Auftriebskraft F_A fest. Sie ist gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit. Man kann sie nach der Gleichung

$$F_A = \gamma_w \cdot V$$

berechnen. V ist das Volumen des verdrängten Wassers und γ_w die Wichte des Wassers ($\gamma_w = 9{,}81\ \mathrm{mN \cdot cm^{-3}}$). Man stellt fest, daß der so errechnete Wert mit der Verminderung der Gewichtskraft, die vom Kraftmesser angezeigt wurde, übereinstimmt.
Ein Vergleich der Auftriebskraft mit der Gewichtskraft des Steines außerhalb der Flüssigkeit ergibt die Feststellung, daß die Gewichtskraft des Steines größer ist als seine Auftriebskraft im Wasser.

$$F_G > F_A.$$

Der Stein sinkt im Wasser.

Versuch 2

Man bestimmt mit dem Kraftmesser die Gewichtskraft F_G des Holzklotzes und hängt ihn dann in das gefüllte Überlaufgefäß, so daß er bei schlapp herabhängendem Faden schwimmt. Wieder fängt man das überlaufende Wasser im Meßzylinder auf. Der Kraftmesser geht auf Null zurück. Man erkennt, daß die wirksame Auftriebskraft F_A des schwimmenden Körpers gleich ist seiner Gewichtskraft außerhalb der Flüssigkeit.

$$F_G = F_A.$$

Diese Tatsache bestätigt sich auch, wenn man die Auftriebskraft nach der Gleichung

$$F_A = \gamma_w \cdot V$$

aus dem Volumen des verdrängten Wassers berechnet.

Versuch 3

Ohne den Meßzylinder zu entleeren, taucht man den Holzklotz mit Hilfe eines steifen Drahtes vollends unter. Es fließt noch mehr Wasser aus. Berechnet man die Auftriebskraft aus dem Volumen des vom Körper im untergetauchten Zustand verdrängten Wassers, so erkennt man, daß die Auftriebskraft des untergetauchten Körpers größer ist als seine Gewichtskraft.

$$F_G < F_A.$$

Entfernt man den Draht, dann steigt der Körper im Wasser. Insgesamt gewinnt man die Erkenntnis:
Ein in Wasser vollständig untergetauchter Körper sinkt oder steigt, je nachdem, ob seine Gewichtskraft größer oder kleiner ist als die des verdrängten Wassers.

1.4.15. Sinken, Steigen, Schweben einer geschlossenen Flasche in Abhängigkeit von der Gewichtskraft

1. Kleine Flasche mit Schraubverschluß
2. Glasperlen, Bleischrot oder Sand
3. hoher Standzylinder
4. Faden

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist als Einführungsversuch zur Unterscheidung des Steigens und Schwimmens, des Sinkens und des Schwebens besonders geeignet, da er sämtliche Erscheinungen unter gleichen Vorbedingungen zeigt. Bei allen Versuchen ist das Volumen des Versuchskörpers, einer kleinen Flasche, und damit auch die Auftriebskraft gleich groß. Durch Einfüllen von Sand, Bleischrot, Glasperlen oder dgl. kann man die Gewichtskraft verändern und so ohne große Mühe die drei charakteristischen Fälle vorführen.

Versuch

1. Die leere verschlossene Flasche *steigt* und *schwimmt* horizontal liegend auf dem Wasser. Ihre Gewichtskraft ist kleiner als ihre Auftriebskraft im untergetauchten Zustand.
   $$F_G < F_A.$$
2. Die gefüllte Flasche *sinkt* auf den Boden des Gefäßes und bleibt dort stehen. Ihre Gewichtskraft ist größer als ihre Auftriebskraft.
   $$F_G > F_A.$$
3. Durch Abgleichen des Ballastes kann man es erreichen, daß die Flasche im Wasser *schwebt*. Ihre Gewichtskraft und ihre Auftriebskraft sind dann gleich groß.
   $$F_G = F_A.$$

Bemerkungen

1. Damit man die auf den Boden gesunkene Flasche leicht wieder hochheben kann, bindet man sie an einen dünnen Faden.
2. Man kann den 3. Versuch dadurch in interessanter Weise abändern, daß man ihn zunächst mit Wasser von Zimmertemperatur durchführt. Dann ersetzt man das Wasser durch wärmeres und schließlich durch kälteres. Im wärmeren Wasser sinkt der Versuchskörper, im kälteren steigt er.

1.4.16. Modellversuch zum Schwimmen eines festen Körpers

1. Großes Becherglas
2. drei Kugeln aus verschiedenen Stoffen (Wachs oder Stearin, Holz und Eisen) und möglichst gleichen Volumens (⌀ etwa 10 mm)
3. feinkörniger, trockener Sand

Methodischer Hinweis

Bei der Durchführung von Modellversuchen müssen die Schüler unbedingt auf den Modellcharakter und auf die Abweichung von der Wirklichkeit hingewiesen werden. Bei diesem Experiment fehlen die leichte Verschiebbarkeit und die Eigenbewegung der Teilchen in einer Flüssigkeit. Diesen Mangel ersetzt man modellmäßig durch Schütteln.

Versuch

Man legt auf den Boden eines großen Becherglases eine Wachs- oder eine Stearinkugel, eine Holzkugel und eine Eisenkugel von annähernd gleichem Durchmesser und füllt das Glas zur Hälfte mit feinkörnigem, trockenem Sand. Schüttelt man kurze Zeit das Glas hin und her oder klopft man mit einem Holzstück behutsam gegen die Wandung des Glases, so werden die Wachs- und die Holzkugel bald an der Sandoberfläche sichtbar.
Die Wachskugel liegt fast vollständig frei auf dem Sand, während die Holzkugel etwa mit drei Vierteln ihres Volumens aus dem Sand herausragt (Abb. 1.4.16./1).

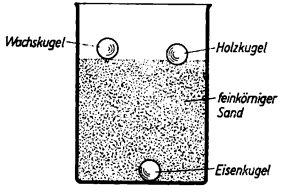


Abb. 1.4.16./1
Modellversuch zum Schwimmen eines Körpers

Mit einem dünnen Stäbchen tastet man die Lage der Eisenkugel ab. Sie liegt am Boden des Glases.
Bei der Wachs- und der Holzkugel ist der Auftrieb im Sand größer als ihre Gewichtskraft, bei der Eisenkugel ist es umgekehrt.

Bemerkungen

1. Die Dichte der verwendeten Stoffe beträgt
   für Sand $\varrho = 1{,}7\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$,
   für Wachs $\varrho = 0{,}9\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$,
   für Holz (Rotbuche) $\varrho = 1{,}2\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$,
   für Eisen $\varrho = 7{,}8\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$.

2. Man kann den Versuch auch in umgekehrter Reihenfolge ausführen, indem man alle drei Kugeln auf die Sandoberfläche legt. Beim Schütteln des Glases sinkt die Eisenkugel zu Boden, während die Wachs- und die Holzkugel auf dem Sand „schwimmen".

1.4.17. Modellversuch zum Auftrieb in Flüssigkeiten

1. Gerät für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie
   1 Kammer mit Antrieb
   1 leichter Stempel mit Stempelhalter
   1000 bis 1500 Glaskugeln ∅ 4 mm
   1 Glaskugel ∅ 12 mm
   1 Holzkugel ∅ 12 mm oder 2 Holzstückchen
2. Experimentiermotor

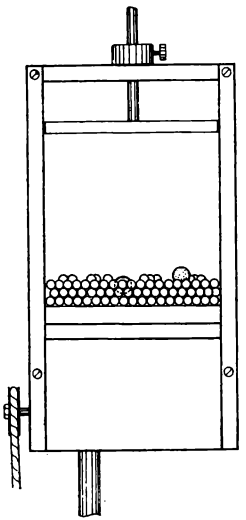


Abb. 1.4.17./1
Modellversuch zum Auftrieb in Flüssigkeiten, Verwendung von Glaskugeln als Modellflüssigkeit

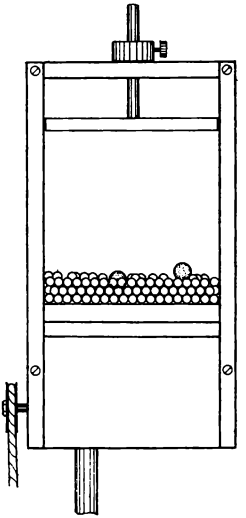


Abb. 1.4.17./2
Modellversuch zum Auftrieb in Flüssigkeiten, Verwendung von Stahlkugeln als Modellflüssigkeit

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.1.!
2. Durch dieses Experiment wird modellmäßig gezeigt, wie durch die ständige Bewegung der Flüssigkeitsmoleküle größere, spezifisch leichtere Körper einen Auftrieb erfahren und an die Flüssigkeitsoberfläche gehoben werden.
3. Auf den Modellcharakter des Experiments ist unbedingt hinzuweisen.

Versuch

Als Modellflüssigkeit werden etwa 1000 bis 1500 Glaskugeln in die Kammer eingefüllt. Ein oder zwei Holzkugeln und Glaskugeln werden in dieser Kugelmenge „vergraben". Durch den leichten Stempel wird das Kammervolumen nach oben hin begrenzt.
Man schaltet den Motor ein und erhöht seine Drehzahl allmählich von 0 bis etwa 800 min^{-1}. Die Drehzahl des Motors entspricht auch der Frequenz der Bodenplatte der Kammer. Durch die Schwingungen dieser Platte werden die Modellmoleküle in heftige Bewegung versetzt und stoßen von allen Seiten gegen die größeren Kugeln. Schon nach kurzer Zeit kann man beobachten, daß die spezifisch leichtere Holzkugel an die Oberfläche der Modellflüssigkeit gehoben wird und an ihrer Oberfläche „schwimmt", während die Glaskugel in der Modellflüssigkeit schwebt. Dieser Zustand bleibt auch erhalten, wenn man den Motor abschaltet (Abb. 1.4.17./1).

Bemerkungen

1. Verwendet man statt der Glaskugeln Stahlkugeln als Modellflüssigkeit, dann „schwimmen" beide größeren Kugeln, wobei die Holzkugel höher aus der „Flüssigkeitsoberfläche" herausragt als die Glaskugel (Abb. 1.4.17./2).
2. Zur besseren Sichtbarkeit kann die Kammer mit Hilfe eines Tageslichtschreibprojektors mit Kippeinrichtung projiziert werden.
3. Zum Entleeren der Kammer benutzt man die Fangmulde (vgl. MB 3.0.1.!).

1.4.18. Änderung der Gewichtskraft und der Auftriebskraft einer schwimmenden Kerze

1. Becherglas
2. Kerzenstummel

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist als Einführungsversuch zur Problemstellung geeignet.

Versuch

Man füllt ein Becherglas zur Hälfte mit Wasser und läßt in diesem einen etwa 1 cm hohen Rest einer nicht zu dünnen Kerze in aufrechter Lage schwimmen. Zündet man die Kerze an, so verkürzt sie sich allmählich. Das Wasser erreicht die Flamme aber erst, wenn das Stearin ganz verbrannt ist. Durch die Verbrennung wird die Gewichtskraft der Kerze geringer. Dadurch verringert sich auch die Eintauchtiefe und regelt so selbsttätig den Auftrieb. Auftriebskraft und Gewichtskraft des schwimmenden Körpers sind stets gleich groß.

1.4.19. Beobachtungen an einem kartesianischen Taucher [SE]

1. Kartesianischer Taucher aus Glas
2. hoher, schlanker Standzylinder
3. Gummihaut (Kinderluftballon, Fahrradschlauch)
4. Faden

Methodische Hinweise

1. Experimente mit Spielzeug interessieren Kinder besonders. Sie haben den Vorteil, daß sie mehr als andere Versuche zum Beobachten und zum eigenen Experimentieren anregen. Der kartesianische Taucher eignet sich dazu sehr gut, weil die Schüler mit einfachen Mitteln selbst behelfsmäßige, voll funktionsfähige Taucher herstellen können. Auch im Unterricht muß es nicht unbedingt ein käufliches Spielzeug sein, und wenn man es benutzt, sollte man daneben unbedingt auch ein selbstgefertigtes zeigen und eine kurze Anleitung zur Herstellung geben, um die Schüler zur Selbsttätigkeit anzuregen.
2. Man kann auch darauf hinweisen, daß nach dem gleichen Prinzip auch U-Boote tauchen.

Versuch

Der als Spielzeug bekannte kartesianische Taucher besteht aus einer gläsernen Hohlfigur, die meist die Gestalt eines Teufels hat. An ihrem unteren Ende, gewöhnlich an einer Fußspitze, ist eine kleine Öffnung gelassen.
Man füllt einen hohen Standzylinder fast ganz mit Wasser und führt den Taucher mit der Öffnung nach unten ein. Den Zylinder verschließt man mit einer Gummimembran, die man darüber spannt und festbindet. Drückt man mit der Hand gegen die Gummimembran, so breitet sich der dadurch im Zylinder hervorgerufene Druck durch das Wasser bis in das Innere des Tauchers aus. Die im Taucher befindliche Luft wird dadurch etwas komprimiert; das Volumen verkleinert sich, es dringt Wasser ein. Dadurch vergrößert sich die Gewichtskraft des Tauchers, er sinkt. Vermindert man den Druck gegen die Gummimembran, so dehnt sich die Luft im Taucher wieder aus, verdrängt das eingedrungene Wasser, der Taucher steigt, weil nun die Gewichtskraft kleiner ist als seine Auftriebskraft. Man kann den Druck so regeln, daß seine Gewichtskraft ebenso groß ist wie seine Auftriebskraft, der Taucher schwebt im Wasser. Da die kleine Öffnung in der Glasfigur gewöhnlich schräg nach der Seite gerichtet ist, wird der Taucher beim Heraustreten des Wassers, also beim Steigen, in Rotation versetzt.
Statt mit einer Gummimembran kann man die Öffnung des Standzylinders auch mit einem dicken Korken verschließen. Durch ihn wird ein kurzes Glasröhrchen geführt, an das man einen Verbindungsschlauch anschließt. Bläst man in den Schlauch, so vergrößert man dadurch den Innendruck; läßt man die Luft austreten, so sinkt er wieder ab. Mitunter genügt es auch, den Standzylinder mit dem bloßen Handballen abzudecken und durch den Druck des Handballens den Taucher zum Sinken zu bringen, wobei man vorsichtigerweise das Gefäß mit der anderen Hand festhalten muß.

Herstellen eines behelfsmäßigen kartesianischen Tauchers

Man benutzt dazu ein Tablettenröhrchen mit einer Länge von etwa 6 cm. Das Glas verschließt man mit einem durchbohrten Korken. Man führt ein etwa 8 cm langes Glasröhrchen so ein, daß es noch über dem Korken nach innen hineinragt. Man

füllt vorher so viel Schrotkugeln in das Tablettenröhrchen, daß der Körper in stabiler aufrechter Lage im Wasser schwimmt und mit seinem Scheitel gerade die Wasseroberfläche berührt. Das Wasser soll dabei von unten her etwa bis zur Hälfte in das Rohr eindringen (Abb. 1.4.19./1).

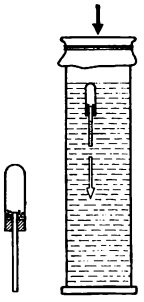


Abb. 1.4.19./1 Behelfsmäßig hergestellter kartesianischer Taucher: Kurzes Tablettenglas mit Steigrohr, Durchführung des Versuches



Abb. 1.4.19./2 Plastpuppe mit der Form eines Tauchers. Bläst man Luft durch den Schlauch in die Plastfigur, dann steigt sie im Wasser empor

Bemerkung

Im Spielzeughandel gibt es eine weitere Ausführung eines Tauchers, die ähnlich wirkt. Es ist eine Hohlfigur aus Plast (Abb. 1.4.19./2). Sie hat am unteren Ende eine kleine Öffnung und oben einen Schlauchansatz. Setzt man den Taucher in Wasser, dann dringt es allmählich durch die Öffnung ein, seine Gewichtskraft vergrößert sich, er sinkt. Bläst man durch den Schlauch, dann wird das Wasser herausgedrückt, der Taucher steigt wieder empor.

1.4.20. Kaltwasserschwimmer

1. Großes Becherglas
2. kleines Fläschchen mit gut dazu passendem zylindrischem Korkstöpsel
3. Schrotkörner
4. Thermometer

Versuch

Man füllt ein großes Becherglas mit etwa 40 °C warmem Wasser. In ein kleines Fläschchen füllt man einige Schrotkörner, setzt es in das Wasser und fügt weiter so lange Schrot hinzu, bis der Wasserspiegel die Kante des Fläschchens erreicht hat. Nun hebt man es aus dem Wasser und gibt noch ein Korn dazu. Das Fläschchen würde jetzt im Wasser untersinken.
Man verstöpselt es so, daß der Stöpsel noch mit dem größten Teil seiner Länge herausragt. Legt man das Fläschchen so verstöpselt wieder auf das Wasser, dann

wird es gerade noch schwimmen. Nunmehr drückt man den Stöpsel versuchsweise vorsichtig so weit in das Fläschchen hinein, bis es langsam zu sinken beginnt. Kühlt sich das Wasser ab, so steigt seine Dichte. Dadurch bedingt, wird die Auftriebskraft des Fläschchens immer größer, und schließlich beginnt das auf dem Boden aufsitzende Fläschchen wieder zu steigen. Erwärmt man das Wasser wieder langsam, so beginnt das Fläschchen wegen Abnahme der Dichte wieder zu sinken. Die Empfindlichkeit der Anordnung ist so groß, daß schon bei geringen Temperaturdifferenzen ein Wechsel auftritt, so daß die Dichteänderung des Wassers für diese geringe Temperaturdifferenz in jedem Falle sehr eindrucksvoll nachgewiesen werden kann.

1.4.21. Veränderung der Schwimmlage eines Dreikantholzes in reinem und in salzhaltigem Wasser

1. Zwei große Bechergläser
2. Dreikantklotz (Seitenlänge etwa 3 cm, Kantenlänge etwa 5 cm) ®
3. Kochsalzlösung

Methodische Hinweise

1. Das plötzliche Umkippen des Dreikantholzes ist darauf zurückzuführen, daß durch die Veränderung der Eintauchtiefe der Körper aus der stabilen in die labile Gleichgewichtslage übergeht. Durch das Umkippen nimmt er eine neue stabile Gleichgewichtslage ein.
2. Der Versuch zeigt im ersten Teil (vor dem Umkippen) modellartig die verschiedenen Eintauchtiefen eines Schiffes in Gewässern mit unterschiedlichem Salzgehalt.

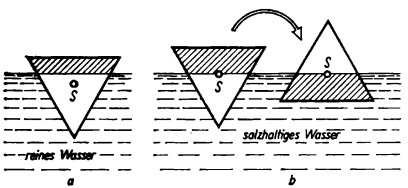


Abb. 1.4.21./1
Schwimmlage eines Dreikantholzes
a) auf Wasser,
b) auf Salzlösung

Versuch

Man füllt ein großes Becherglas zu einem Viertel mit Wasser und läßt auf diesem ein Dreikantholz mit einer Seitenlänge von etwa 3 cm schwimmen. Das Holz nimmt die in Abb. 1.4.21./1a dargestellte Schwimmlage ein. Man gießt gesättigte Salzlösung hinzu. Die Eintauchtiefe des Holzes verringert sich. Bei einem bestimmten Salzgehalt des Wassers verändert das Dreikantholz plötzlich seine Schwimmlage und kippt in die in Abb. 1.4.21./1b angegebene Stellung um.



1.4.22. Schwimmen von Metallkugeln auf Quecksilber

1. Zwei oder mehrere volumengleiche Kugeln aus verschiedenen Metallen (Eisen, Messing, Aluminium)
2. flache Glasschale
3. Quecksilber, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers

Methodische Hinweise

1. Das Ergebnis dieses Experiments ist für die Schüler überraschend. Es ist deshalb als Einführungsversuch zur Problemstellung geeignet.
2. Auf höheren Klassenstufen kann man die Eintauchtiefe einer Metallkugel rechnerisch ermitteln lassen und das Ergebnis dann durch dieses Experiment überprüfen. Nach dem Ausbildungsstand der Schüler kann man die Gleichung für die Volumenberechnung des Kugelsegments den Schülern geben oder sie mit Hilfe der Integralrechnung herleiten lassen.

Versuch

Man füllt über einem Quecksilberbrett eine flache Glasschale fast ganz mit Quecksilber und legt die beiden gleich großen Metallkugeln unmittelbar nebeneinander auf das Quecksilber. Sie schwimmen auf ihm mit einer geringen Eintauchtiefe. Es zeigt sich, daß die Messingkugel infolge ihrer größeren Dichte etwas tiefer eintaucht als die Eisenkugel. Man kann dies leicht erkennbar machen, wenn man eine Holzleiste waagerecht so darüberklemmt, daß sie die Eisenkugel gerade berührt (Abb. 1.4.22./1). Sehr überzeugend läßt sich die Verschiedenheit der Eintauchtiefe mit Hilfe der Schattenprojektion deutlich machen.

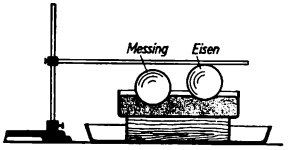


Abb. 1.4.22./1
Schwimmen zweier Metallkugeln auf Quecksilber

Bemerkung

Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!

1.4.23. Schwimmfähigmachen eines nicht schwimmenden festen Körpers

1. Quadratische Scheibe aus dünnem Blech (7 cm × 7 cm)
2. großer Korken
3. Glastrog
4. Flachzange

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist zur Erklärung der Wirkungsweise verschiedener Geräte geeignet. So können als technische Anwendungen der Variante a Flöße, Rettungsringe, Rettungsbälle, Wasserflugzeuge mit Schwimmern, Rettungsboote mit Sinkschutz, Luftsäcke zum Heben gesunkener Schiffe u. a. m. genannt werden. Die Variante b erklärt die Wirkungsweise eiserner Schiffe und Fähren, des Schwimmers im Vergaser von Ottomotoren, des Schwimmers in Spülkästen u. a. m.

Variante a: Schwimmfähigmachen durch Verwenden schwimmfähiger Körper als Träger

Zuerst legt man das Blech auf die Wasseroberfläche. Es sinkt zu Boden. Dann schneidet man einen größeren Korken in drei gleich dicke Scheiben und legt diese in Dreiecksanordnung auf das Wasser. Legt man nun das Blech vorsichtig auf die Korkscheiben, dann sinkt es nicht mehr unter. Es wird von den Korkscheiben getragen.

Variante b: Schwimmfähigmachen durch Hohlraumbildung

Man biegt den Rand des Blechstücks mit einer Flachzange ringsherum um 10 mm nach oben. Das Blech erhält dadurch etwa die Form eines Schachteldeckels (Abb. 1.4.23./1). Legt man das so vorbereitete Blech auf die Wasseroberfläche, so schwimmt es.

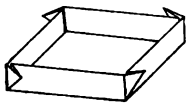


Abb. 1.4.23./1
Durch Hohlraumbildung schwimmfähig gemachtes Blech

1.4.24. Schweben eines Hühnereies in einer Kochsalzlösung [SE]

1. Gekochtes Hühnerei
2. konzentrierte Kochsalzlösung
3. großes Becherglas
4. Standzylinder
5. dünnes Holzscheibchen, in den Standzylinder passend ⑧
6. langer Glasstab

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt, daß die Schwimmfähigkeit eines Körpers in einer Flüssigkeit von der Dichte der Flüssigkeit abhängt.

Versuch

Als Vorversuch zeigt man, daß das Hühnerei im Wasser untergeht, aber auf einer konzentrierten Kochsalzlösung schwimmt. Durch Mischen beider Flüssigkeiten kann man erreichen, daß das Hühnerei in der Lösung schwebt.

Besonders eindrucksvoll verläuft der Versuch, wenn man Kochsalzlösung und Wasser, scharf voneinander getrennt, übereinanderschichtet. Man erreicht dies dadurch, daß man einen Standzylinder zur Hälfte mit konzentrierter Kochsalzlösung füllt und darüber das Wasser schichtet. Zu diesem Zweck läßt man auf der Kochsalzlösung ein rundes Brettchen schwimmen, das fast den Durchmesser des Zylinders hat. Auf dieses Brettchen läßt man an einem langen Glasstab Wasser herabrinnen. Man erhält auf diese Weise eine dem Auge kaum erkennbare scharfe Trennfläche zwischen den beiden Flüssigkeiten. Entfernt man das Brettchen und läßt nun das Ei in die Flüssigkeit hineinsinken, so pendelt es beim Erreichen der Grenzfläche kurze Zeit auf und ab, bis sich die Gleichgewichtslage eingestellt hat.

1.4.25. Bestimmung der Dichte des Bernsteins im Schwebeverfahren

1. Bernsteinstück oder Kunstharzstück
2. Becherglas
3. Kochsalzlösung
4. Glasstab
5. Tropfpipette
6. hoher, schmaler Standzylinder
7. Aräometer

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 1.4.24.!
2. Das Experiment stellt eine interessante Variante zur Ermittlung der Dichte eines festen Körpers dar. Man kann auf diese Weise leicht Bernstein von ähnlich aussehenden Kieselsteinen unterscheiden. Bernstein schwimmt auf konzentrierter Kochsalzlösung, Kieselsteine sinken zu Boden.

Versuch

Als Vorversuch zeigt man, daß ein Stück Bernstein im Wasser untergeht, dagegen auf einer konzentrierten Kochsalzlösung schwimmt. Mischt man beide Flüssigkeiten miteinander, so kann man es bewirken, daß der Bernstein in der Lösung schwebt. Wenn dieser Zustand fast erreicht ist, genügt zu seiner Störung schon ein sehr geringer Zusatz der einen oder der anderen Flüssigkeit. Der Zustand ist sehr labil. Man verwendet zu seiner Einstellung am besten eine Tropfpipette, durch die man der Lösung unter ständigem Umrühren entweder Wasser oder Salzlösung tropfenweise zusetzt, bis der Bernstein in ihr schwebt, ohne seine Höhenlage zu ändern. Ist dies der Fall, so stimmt die Dichte der Kochsalzlösung mit der des Bernsteins überein. Man braucht mithin die Dichte der Mischung nur durch ein Aräometer zu ermitteln. Man gießt zu diesem Zweck die Mischung in einen Standzylinder.
An Stelle der Kochsalzlösung kann man auch eine Lösung von Natriumnitrat verwenden.

1.4.26. Reagenzglas als Aräometermodell [SE]

1. Reagenzglas
2. Bleischrot oder Sand
3. zwei Bechergläser, 500 ml, hohe Form
4. Millimeterpapier
5. Kochsalzlösung
6. Meßschieber oder Lineal

Methodischer Hinweis

Aräometer beruhen auf dem Archimedischen Prinzip. Sie tauchen beim Schwimmen so tief ein, daß die Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit gleich ihrer Gewichtskraft ist. Durch ihre schlanke Form kann man die Eintauchtiefe und damit die Dichte der Flüssigkeit genau ablesen. Diese Wirkungsweise soll an einem Reagenzglas erläutert werden. Das Experiment ist als Vorversuch für die Verwendung von Aräometern geeignet und kann als Schülerexperiment durchgeführt werden.

Herstellung des Modells

Ein Reagenzglas wird so weit mit Schrot gefüllt, daß es im Wasser, etwa 3 cm aus diesem herausragend, in stabiler, aufrechter Lage schwimmt.
Ein etwa 18 cm langer und 2 cm breiter Streifen Millimeterpapier wird je Zentimeter mit fortlaufenden Zahlen beschriftet, oben umgeknifft und in das Reagenzglas eingeführt. Dieses wird mit einem Korken verstöpselt, der das Millimeterpapier festklemmt.

Versuch

Man führt das Reagenzglas in ein Becherglas mit Wasser ein (Abb. 1.4.26./1a). Die Lage des Wasserspiegels wird an der Skale aus Millimeterpapier abgelesen und notiert. Dann nimmt man das Reagenzglas aus dem Wasser heraus und mißt mit einem Meßschieber oder einem Lineal die Eintauchtiefe h_1 des Reagenzglases, die Entfernung vom Boden bis zu der notierten Stelle des Millimeterpapiers.

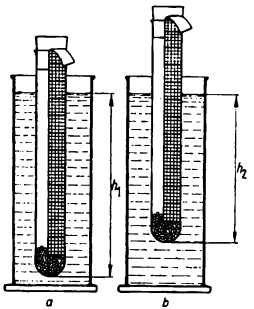


Abb. 1.4.26./1
Schrotbeschwertes Reagenzglas als Aräometermodell

Man steckt nun das Reagenzglas in eine wäßrige Kochsalzlösung und liest wieder die Lage des Flüssigkeitsspiegels auf dem Millimeterpapier ab. In derselben Weise wie vorhin stellt man die Eintauchtiefe h_2 fest (Abb. 1.4.26./1b).
Die Eintauchtiefen h_1 und h_2 verhalten sich umgekehrt wie die Dichten der Flüssigkeiten. Es ist

$$\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{h_1}{h_2} \quad \text{oder} \quad \varrho_2 = \varrho_1 \cdot \frac{h_1}{h_2}.$$

Beispiel

Eintauchtiefe in Wasser	$h_1 = 140$ mm,
Eintauchtiefe in Kochsalzlösung	$h_2 = 133$ mm,
Dichte des Wassers	$\varrho = 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$,
Dichte der Salzlösung	$\varrho_2 = 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}} \cdot \frac{140\ \mathrm{mm}}{133\ \mathrm{mm}}$,
	$\varrho_2 = 1{,}05\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$.

Bemerkung

In das Meßergebnis geht dadurch eine geringfügige Ungenauigkeit ein, daß das Reagenzglas nicht durchgängig zylindrisch, sondern am unteren Ende halbkugelig begrenzt ist. Das Ergebnis ist um so genauer, je größer die Tauchtiefe ist. Man kann diesen Fehler einschränken, wenn man statt des Reagenzglases ein langes Tablettenröhrchen mit flachem Boden verwendet.

1.4.27. Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten mit Aräometern [SE]

1. Aräometer für Flüssigkeiten, $\varrho > 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$
2. Aräometer für Flüssigkeiten, $\varrho < 1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$
3. mehrere hohe, schmale Standzylinder
4. Thermometer (0 °C bis 50 °C)
5. verschiedene Flüssigkeiten
   (Kochsalzlösungen 5-, 10-, 15-, 20%ig,
   Kupfersulfatlösungen verschiedener Konzentration, Spiritus, Petroleum)

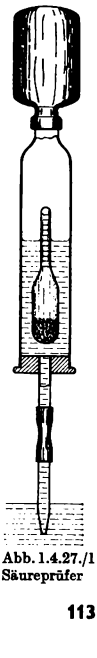


Abb. 1.4.27./1
Säureprüfer

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.4.26.!

Versuch

Man taucht zunächst jedes der beiden Aräometer in reines Wasers und zeigt, daß beide bis zur Marke $1\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ eintauchen. Dann stellt man die einzelnen wäßrigen Lösungen her, mißt jedesmal die Temperatur und liest unmittelbar an den eingetauchten Aräometern die Dichte der Lösung ab. Hat man die erste Messung beispielsweise bei einer Temperatur von 10 °C durchgeführt, dann wiederholt man in einer zweiten Meßreihe für zwei oder drei wäßrige Kochsalzlösungen die Dichtebestimmung mit Hilfe des Aräometers bei einer höheren Temperatur, beispielsweise bei 30 °C, nachdem man die Lösungen erwärmt hat. Daraufhin vergleicht man die entsprechenden Dichten und erkennt, daß sie differieren, daß also die Angabe der Dichte einer Flüssigkeit durch die Angabe der Temperatur ergänzt werden muß. Eine Erwärmung des Spiritus darf wegen der Brandgefahr nicht vorgenommen werden!

Bemerkungen

1. Bei Arbeiten mit brennbaren Flüssigkeiten sind die Brandschutzbestimmungen zu beachten.
2. Bei der Auswertung des Experiments kann man auf die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten des Aräometers in der Industrie hinweisen, so z. B. auf
   a) den *Säureprüfer* (Abb. 1.4.27./1) zur Bestimmung der Säurekonzentration oder des Ladungszustands von Bleiakkumulatoren,
   b) das *Alkoholmeter* zur Bestimmung der Konzentration von Alkohol und
   c) das *Laktometer* zur Bestimmung des Fettgehalts der Milch.

1.5. Wasserkraftmaschinen

1.5.1. Beobachtungen am Modell eines oberschlächtigen Wasserrades

1. Modell eines oberschlächtigen Wasserrades
2. Gummischlauch
3. Glastrog

Methodische Hinweise

1. Oberschlächtige Wasserräder werden dort angewandt, wo ein großes Gefälle, aber nur wenig Wasser zur Verfügung steht. Man wird am Modell erarbeiten, daß die potentielle Energie des Wassers in Rotationsenergie des Rades umgewandelt wird und daß der Wasserverbrauch relativ gering ist.
2. Experimente mit Modellen der Wasserkraftmaschinen eignen sich besonders dazu, die Schüler das Beschreiben der Vorgänge und der Energieumwandlungen üben zu lassen. Man achte dabei auf richtige Verwendung der Fachausdrücke und Begriffe, auf sprachlich saubere Formulierungen, auf schrittweises Vorgehen und auf kausales Verknüpfen von Vorgängen.
3. Der Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie kann auch bei den Experimenten mit Modellen der Wasserkraftmaschinen von den Schülern als eines der wichtigsten Gesetze der Mechanik erkannt werden. Es ist zweckmäßig, hierbei den Geltungsbereich dieses Satzes zu erörtern und auf den Wirkungsgrad der Maschinen einzugehen.
4. Vergleiche MB 1.0.5.!

Versuch

Das Modell wird erhöht aufgestellt. Unter den Abfluß stellt man einen Glastrog, die Zulaufrinne wird durch einen Schlauch mit der Wasserleitung verbunden. Der Wasserzufluß wird so eingestellt, daß das Wasser mit geringer Geschwindigkeit auf das Wasserrad fließt und die Kammern füllt. Durch das Gewicht des Wassers wird das Rad in Drehung versetzt. Der Wasserverbrauch ist gering.

Bemerkung

Das Modell kann aus Teilen des Aufbaugerätes zur Demonstration von Wasserkraftmaschinen (vgl. MB 1.0.5.) zusammengestellt werden.

1.5.2. Beobachtungen am Modell eines unterschlächtigen Wasserrades

1. Modell eines unterschlächtigen Wasserrades
2. Gummischlauch
3. Glastrog

Methodische Hinweise

1. Unterschlächtige Wasserräder erfordern große Strömungsgeschwindigkeiten und einen kräftigeren Wasserstrom als oberschlächtige. Beim Betrieb des Modells erarbeitet man neben diesen Erkenntnissen auch das Grundsätzliche über die Wirkungsweise, die Umwandlung der kinetischen Energie des Wassers in Rotationsenergie des Rades.
2. Vergleiche MB 1.0.5. und MH Nr. 2 und 3 V 1.5.1.!

Versuch

Das Modell wird erhöht aufgestellt, so daß man unter den Wasserabfluß einen Glastrog stellen kann. Man verbindet die Zulaufrinne durch einen Schlauch mit der Wasserleitung. Um das Modell in Betrieb zu nehmen und die gleiche Drehzahl zu erreichen wie bei einem gleich großen oberschlächtigen Wasserrad, muß man den Wasserstrom kräftiger einstellen.

Bemerkung

Vergleiche Bemerkung zu V 1.5.1.!

1.5.3. Beobachtungen am Modell einer Freistrahlturbine (Peltonturbine)

1. Modell einer Freistrahlturbine
2. Gummischlauch
3. Glastrog oder anderes größeres Gefäß

Methodische Hinweise

1. Bei der Ausführung des Experiments beobachtet man, daß das Wasser mit sehr geringer Geschwindigkeit aus dem Modell fließt. Daran kann man folgende Überlegungen anknüpfen.
   Bezeichnet man den Flächeninhalt des Querschnitts des Zuflußrohres mit A_1 und die Strömungsgeschwindigkeit in ihm mit v_1, die entsprechenden Größen im Ausflußrohr mit A_2 und v_2 (Abb. 1.5.3./1), dann gilt die Kontinuitätsgleichung
   $$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2.$$

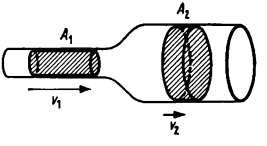


Abb. 1.5.3./1
Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Rohrquerschnitt und Strömungsgeschwindigkeit $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$

Daraus folgt

$$v_1 > v_2.$$

Daraus folgt weiter, daß die kinetische Energie des abfließenden Wassers kleiner sein muß als die des zufließenden.

$$W_{kin1} = \frac{m}{2} \cdot v_1^2; \quad W_{kin2} = \frac{m}{2} \cdot v_2^2, \quad W_{kin1} > W_{kin2}.$$

2. Vergleiche MB 1.0.5. und MH Nr. 2 und 3 V 1.5.1.!

Versuch

Das Modell wird mit dem Schlauch an die Wasserleitung angeschlossen und erhöht aufgestellt (Abb. 1.5.3./2). Unter das Abflußrohr stellt man einen Glastrog oder ein

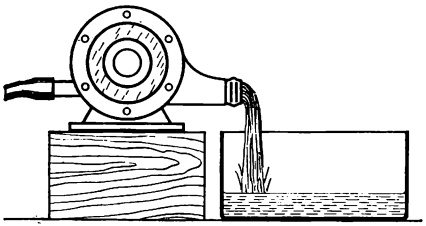


Abb. 1.5.3./2
Versuchsanordnung mit einer Freistrahlturbine

anderes größeres Gefäß. Öffnet man die Wasserzufuhr, dann strömt das Wasser mit großer Geschwindigkeit gegen die Turbinenschaufeln, der Rotor setzt sich in rasche Umdrehung. Das Wasser verläßt den Abfluß der Turbine mit relativ geringer Geschwindigkeit.
Dieses Modell ist auch als Antriebsmodell (Wassermotor) geeignet.

Bemerkung

Vergleiche Bemerkung zu V 1.5.1.!

1.5.4. Beobachtungen am Modell einer Axialturbine

1. Modell einer Axialturbine (Reaktionsturbine)
2. Gummischlauch
3. Glastrog

Methodische Hinweise

1. Während Wasserräder, Freistrahlturbinen und Überdruckturbinen tangential mit Wasser beschickt werden, erfolgt das bei der Reaktionsturbine (Abb. 1.0.5./3) und bei der Kaplanturbine axial. Letztere Formen sind besonders für sehr hohe

Drehzahlen geeignet. Bei der Kaplanturbine sind die Schaufeln verstellbar und können so der Durchlaufmenge angepaßt werden bzw. die Drehzahl bestimmen. Bei Modellen kann diese charakteristische Eigenschaft kaum dargestellt werden. Damit Experimente mit derartigen Turbinenmodellen nicht zur Spielerei werden, wird man im Unterricht stets den Modellcharakter und die Mängel des Modells gegenüber der technischen Ausführung der Maschine herausarbeiten.

2. Vergleiche MB 1.0.5. und MH Nr. 2 und 3 V 1.5.1.!

Versuch mit dem Modell einer Reaktionsturbine (Abb. 1.5.4./1)

Das Modell wird über einem Glastrog an einem Stativ befestigt und durch einen Schlauch mit der Wasserleitung verbunden. Zum Betrieb des Modells braucht man einen kräftigen Wasserstrom. Es ist als Antriebsmodell (Wassermotor) verwendbar.

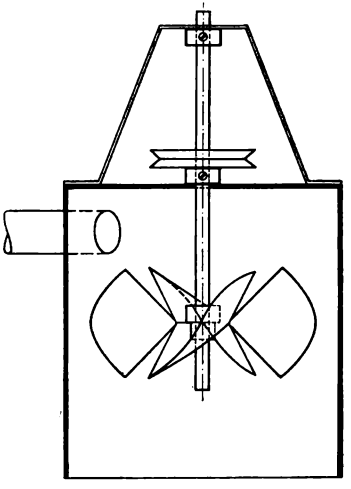


Abb. 1.5.4./1
Modell einer Propellerturbine, bestehend aus dem Propellerrad und dem mit einem Einströmrohr versehenen Gehäuse

Bemerkung

Vergleiche Bemerkung zu V 1.5.1.!

2. Mechanik der Gase

2.0. Methodische Bemerkungen

2.0.1. Solange in der Schule Physikunterricht gegeben wird, ist man bemüht, den Schülern durch möglichst eindrucksvolle Versuche *die Wirkungen des Luftdruckes* nachzuweisen. Die Erkenntnis, daß die Luft auch ein Gewicht besitzt und auf Grund ihres Gewichtes große Kraftwirkungen hervorrufen kann, beeindruckt die Schüler immer wieder von neuem. Die als Luftdruckwirkungen zu beobachtenden Vorgänge sind für viele Menschen genau so überraschend, wie sie es im 17. Jahrhundert waren, als *Otto von Guericke* und *Evangelista Torricelli* sie entdeckten und den Luftdruck näher untersuchten. Gerade die den Luftdruck betreffenden Naturgesetze gehören zu den grundlegenden physikalischen Erkenntnissen. Es gibt kaum einen Naturvorgang, der durch den Luftdruck nicht beeinflußt wird. Es ist deshalb ratsam, bei den Schülern das Wissen um diese Zusammenhänge auf möglichst breiter experimenteller Basis sicher zu gründen. Es gibt gerade auf diesem Gebiet viele interessante Versuche, die mit einfachen Mitteln ausgeführt werden können. Dabei bietet sich die Möglichkeit, in einem historischen Rückblick zu zeigen, wie der Mensch seine Umwelt, die in ihr wirkenden Gesetzmäßigkeiten und deren Ursachen immer besser beherrschen lernt.
Mit dem Vorhandensein des Luftdruckes steht die Wirkung der *Spannkraft* der Luft in engem Zusammenhang. Ihre Wirkungen werden mitunter mit denen des atmosphärischen Luftdruckes selbst verwechselt. Sie sind aber keine Folge des Schweredrucks, sondern der Expansionsfähigkeit, die der Luft in hohem Maße zu eigen ist. In V 2.1.9. bis 2.1.14. ist eine Reihe von Versuchen angegeben, aus denen die Schüler die Spannkraft der Luft erkennen können.

2.0.2. Eine besondere Bedeutung kommt den Experimenten zum *Messen des Luftdrucks* und zur *Behandlung des Barometers* zu. Die Schüler sollen erkennen, daß barometrische Messungen mit besonderer Sorgfalt auszuführen sind, weil es bei einer Reihe von Messungen in der Mechanik der Gase, in der Wärmelehre und in der Chemie auch auf den Luftdruck ankommt.
Exakte Luftdruckmessungen sind vielfach die Voraussetzung für die Genauigkeit anderer Meßergebnisse.
Der Torricelli-Versuch sollte wenn irgend möglich vorgeführt werden. Er zählt zu den elementarsten Schulversuchen überhaupt.
Zu beachten ist, daß sämtliche Versuche, bei denen Quecksilber verwendet wird, mit größter Vorsicht auszuführen sind (beachte „Anweisungen zum Experimentieren mit Quecksilber", MB 1.0.6.!).

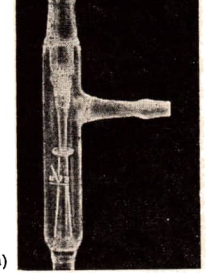
Soll ein Barometer seinen Zweck als Luftdruckmesser erfüllen, so darf man nicht nur den Stand der Quecksilbersäule an der oberen Quecksilberkuppe ablesen. Es muß auch die Höhe des unteren Quecksilberspiegels festgestellt werden. Das ist in der Regel bei einfachen *Gefäßbarometern* nicht vorgesehen. Man beobachtet an ihnen gewöhnlich nur Luftdruckänderungen und schließt daraus auf die Entwicklung des Wettergeschehens. Soll solch ein Barometer für den Unterricht, also für genaue Luftdruckmessungen, benutzt werden, dann muß man am Vorratsgefäß oder am Brett, an dem das Barometerrohr befestigt ist, eine Marke oder Skale anbringen und bei jeder Messung auch diesen Quecksilberstand berücksichtigen.
Zum Gebrauch in der Schule haben sich *Heberbarometer* gut bewährt, weil man an ihnen sowohl den Stand des oberen wie auch des unteren Quecksilberspiegels genau ablesen kann. In verschiedenen Lehrmittelsammlungen trifft man auch das mit Spiegelskalen und Ablesenonius ausgerüstete *Stationsbarometer*, das *Kontrollbarometer* mit selbsttätiger Nullpunkteinstellung oder das *Kontrabarometer* an. Aus diesem Grunde ist in das Buch auch ein Experiment zur Erklärung der Wirkungsweise des Kontrabarometers aufgenommen worden (V 2.2.3.).
Den barometrischen Messungen sehr ähnlich sind Messungen mit *Manometern*. *Offene U-Rohr-Manometer* sind in den Schüler-Experimentiergerätesätzen „Kalorik" enthalten, und als *geschlossene U-Rohr-Manometer* sind die meisten der von der Lehrmittelindustrie gelieferten *kleinen Barometerproben* geeignet. Das richtige Füllen dieses Gerätes mit Quecksilber erfordert etwas Geschick.
Eine Gelegenheit, auf die technischen Manometer einzugehen, bietet sich im Anschluß an die Behandlung des Aneroidbarometers, das man häufig auch als Dosenbarometer bezeichnet. Für den Bau des Modells eines solchen Barometers gibt V 2.2.4. einen Vorschlag. Die Modellbeschreibung wurde deswegen in das Buch aufgenommen, weil das Innere der meisten Aneroidbarometer nur schwer erkennbar ist und weil man bei ihrer Behandlung erfahrungsgemäß gewöhnlich auf Zeichnungen angewiesen ist. Sehr anschauliche Modelle von Aneroidbarometern und Röhrenfedermanometern (Bourdonröhrenmanometern) kann man mit dem aus Schweden eingeführten Aufbausatz zur Demonstration von verschiedenen Meßgeräten aufbauen.
Bei der Behandlung der Manometer sollte auch auf ihre Anwendung als Meßwertwandler in der BMSR-Technik hingewiesen werden. Dabei kann man auch bereits die Begriffe Analogbetrachtung und Wirkungskette erläutern.

2.0.3. Das *Boylesche Gesetz* gilt für die *isotherme Zustandsänderung* einer abgeschlossenen Gasmenge. Es ist damit ein Sonderfall der allgemeinen Zustandsgleichung des idealen Gases. Wichtig ist auch hier wieder die richtige Auslegung des Druckbegriffes. Auch bei diesen Experimenten wird der Druck in Pascal ($1\ \text{Pa} = 1\ \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) gemessen, und so wie beim hydrostatischen Druck handelt es sich auch hier nicht um eine vektorielle, sondern um eine skalare Größe. Wie dort ist auch hier die Bezeichnung *Spannung* gebräuchlich.
Von den Experimenten zur Herleitung oder Bestätigung des Boyleschen Gesetzes kann V 2.3.2. als besonders effektiv und rationell bezeichnet werden. Bei der Benutzung eines Druckkessels kann sogar auf eine Wasserleitung im Unterrichtsraum verzichtet werden. Der Druckkessel kann auch für eine Reihe anderer Experimente aus verschiedenen Gebieten der Physik verwendet werden. Man kann ihm wahlweise Wasser oder Luft bis zu einem Druck von 6 bar ($6 \cdot 10^5$ Pa) entnehmen.
Weil das Boylesche Gesetz zu den fundamentalen Gesetzen der Physik gehört, wird in der Oberstufe gewöhnlich ein Schülerexperiment zu seiner Herleitung oder

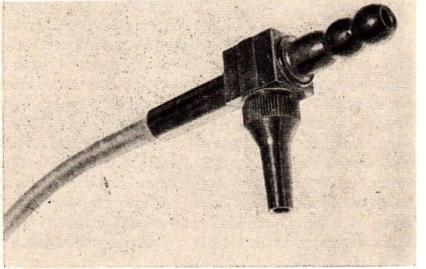
Bestätigung gefordert. V 2.3.2. bis 2.3.5. geben Anregungen dazu. V 2.3.1. ist wegen der Verwendung von Quecksilber als Schülerexperiment nicht geeignet.

2.0.4. Wie bei den Flüssigkeiten infolge des Schweredrucks auf jeden in der Flüssigkeit befindlichen Körper ein Auftrieb hervorgerufen wird, so ist dies auch bei den Gasen der Fall. Wegen der geringen Dichte der Gase ist der Auftrieb in ihnen allerdings schwächer als in Flüssigkeiten und dadurch nicht so leicht zu beobachten wie dort. Deshalb ist im Abschnitt 2.4. eine ganze Reihe von Versuchen angegeben, die dem Zweck dient, den Auftrieb in Gasen nachzuweisen. Besonders eindrucksvoll sind die Versuche mit einem Kinderluftballon und mit Seifenblasen. Man sollte den Schülern den einen oder den anderen der angegebenen Versuche vorführen, auch um sie zum Experimentieren anzuregen. Auch von diesen Versuchen sind einige als Schülerexperimente geeignet.
Die wichtigste den Schülern durch diese Versuche zu vermittelnde Erkenntnis ist, daß für den Auftrieb in Gasen die gleichen Gesetze gelten wie für den Auftrieb in Flüssigkeiten. Aus den in V 2.4.5. bis V 2.4.7. beschriebenen Versuchen geht dies deutlich hervor.

2.0.5. Eine gut wirkende Luftpumpe gehört in jede physikalische Lehrmittelsammlung. Meist genügt eine einfache *Kolbenpumpe*. Für den Anfangsunterricht im Fach Physik wird die Ausstattung mit einer solchen schon aus methodischen Gründen die Regel sein, da das Verständnis der Kolbenpumpe keine Schwierigkeiten bereitet. Eine rotierende *Öl-* oder *Kapselluftpumpe* bietet gegenüber einer Kolbenpumpe erhebliche Vorteile. Sie erreicht ein Vakuum von etwa 0,1 Pa, das vollständig dazu ausreicht, elektrische Entladungsvorgänge in gasverdünnten Räumen vorzuführen. Die *Wasserstrahlpumpe* ist wegen ihres niedrigen Preises und ihrer einfachen Handhabung für den Gebrauch an Schulen sehr zu empfehlen. Ihre Saugleistung reicht zur Durchführung der meisten Schulversuche vollständig aus.
Die *Wasserstrahlpumpe* (Abb. 2.0.5./1) beruht auf der Saugwirkung eines aus einer Düse mit großer Geschwindigkeit austretenden Wasserstrahls. Sie erzeugt bei



a)



b)

Abb. 2.0.5./1
Wasserstrahlpumpe
b) aus Plast, a) aus Glas

guter Leistung ein Vakuum von etwa 2 kPa. Die Saugleistungen mehrerer gleichartiger Wasserstrahlpumpen sind oft verschieden. In manchen Fällen setzt sich bei hartem Wasser an der Strahldüse Kalk ab. Dadurch wird die Saugleistung vermindert. Man entfernt diesen Kalkansatz durch Abkratzen oder mit Hilfe verdünnter Salzsäure.

Die Pumpe wird mittels eines Panzerschlauchs mit einem Wasserleitungshahn verbunden. Es ist zu empfehlen, bei genügend weitem oberem Pumpenansatz und entsprechend weitem Panzerschlauch über den Hahn der Wasserleitung ein Stück Gummischlauch zu ziehen und über diesen den Panzerschlauch zu schieben. Die Pumpe kann auf diese Weise leichter zur Reinigung abgezogen werden. Beim Anbringen der Pumpe ist darauf zu achten, daß der Wasserhahn nicht zu tief über dem Abfluß liegt. Will man das Spritzen des ausströmenden Wassers vermeiden, so verlängert man das Fallrohr mit einem Schlauch.

Bei Druckschwankungen in der Wasserleitung und beim Abstellen der Pumpe kann der äußere Luftdruck das in der Wasserstrahlpumpe befindliche Wasser in das zu evakuierende Gefäß zurückdrücken. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, zwischen die Pumpe und das zu evakuierende Gefäß eine Sicherheitsflasche und, wenn möglich, ein Rückschlagventil einzuschalten. Sehr geeignet dafür ist eine Woulffsche Flasche mit drei Tuben und einem Volumen von mindestens 1 Liter. Der eine Tubus wird mit einem in einem durchbohrten Gummistopfen steckenden Glashahn verschlossen. Man kann durch Öffnen des Hahnes den Unterdruck im Gefäß aufheben. Verwendet man statt des einfachen Glashahns einen Dreiwegehahn und schließt man an diesen ein verkürztes Quecksilberbarometer an, so kann man den Unterdruck jederzeit messen.

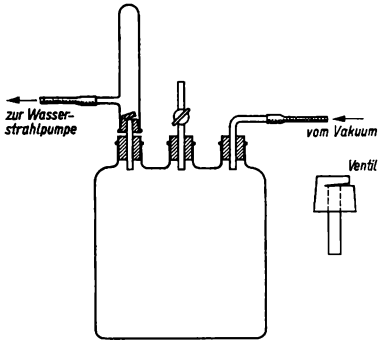


Abb. 2.0.5./2
Sicherheitsflasche
mit Rückschlagventil.
Rückschlagventil
als Nebenzeichnung

Den zweiten Tubus verbindet man mit einem Sicherheitsventil, das an die Wasserstrahlpumpe angeschlossen ist. Ein einfaches, selbst herstellbares Ventil ist in Abb. 2.0.5./2 wiedergegeben. Man schneidet einen konischen Gummistopfen im Abstand von 3 mm von der kleinen Grundfläche parallel zu dieser mit einem angefeuchteten Messer etwa 4 mm tief ein. Der größere Teil des Stopfens wird durch-

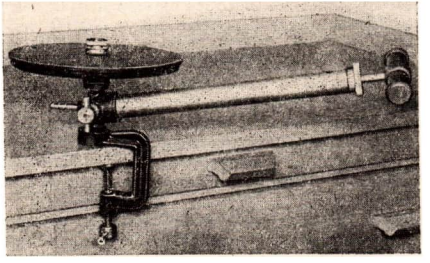


Abb. 2.0.5./3
Einfache Kolbenluftpumpe

bohrt, doch darf die Bohrung nicht die kleine Scheibe verletzen. In die Bohrung schiebt man ein kurzes Glasrohr, das über einem Gummistopfen an den zweiten Tubus der Woulffschen Flasche angeschlossen ist. Über den eingeschnittenen Gummistopfen schiebt man ein starkwandiges Reagenzglas mit seitlichem Rohr, das durch einen Druckschlauch mit der Pumpe verbunden ist. Den dritten Tubus der Woulffschen Flasche verbindet man mit dem zu evakuierenden Gefäß.

Die Bauart und die Wirkungsweise der *Kolbenluftpumpe* (Abb. 2.0.5./3) werden als bekannt vorausgesetzt. Als besonders wirksam haben sich Pumpen mit Öldichtungen erwiesen, da ihre Wartung einfacher ist als die der gewöhnlichen Kolbenpumpen. Außerdem erreicht man mit ihnen infolge Verringerung des schädlichen Raums ein größeres Vakuum als mit Pumpen ohne Öldichtung, nämlich ein Vakuum von etwa 100 Pa. Schaltet man mehrere Pumpenkolben im gleichen Zylinder hintereinander, so ist das erzeugte Vakuum noch größer.

Beim Absaugen von Luft über Flüssigkeitsoberflächen gelangt Wasserdampf in die Luftpumpe. Nach solchen Versuchen ist eine Reinigung der Pumpe notwendig. Man reibt den Stiefel der Pumpe, Kolben und Hähne mit Filterpapier ab. Dann bestreicht man den Kolben und das Hahnküken mit Hahnfett. Es ist falsch, statt des Kolbens den Zylinder einzufetten, da das Fett durch den Kolben auf den Zylinderboden gedrückt wird. Zum Einfetten verwendet man Ramsayfett, das für Messing- und Stahlteile verwendbar ist. Sein großer Vorteil vor anderen Dichtungsfetten ist der, daß die Hähne der Pumpe selbst bei längerer Nichtbenutzung nicht festbacken. Der Dampfdruck des Fettes ist so niedrig, daß er das Vakuum nicht beeinträchtigt. Will man eine unnötige Anstrengung beim Evakuieren mit der Kolbenpumpe vermeiden, so pumpt man am Anfang langsam. Die Dichte der Luft wird durch das Pumpen geringer, ihr Strömungswiderstand nimmt ab.

Mit der rotierenden *Öl- und Kapselluftpumpe* (Abb. 2.0.5./4) erreicht man ein Vakuum von etwa 0,1 Pa. Diese Pumpen genügen damit allen in der Schule an eine Luftpumpe zu stellenden Forderungen und sind deshalb besonders zu empfehlen. Beim Arbeiten mit Ölpumpen ist zu bedenken, daß diese sehr empfindlich sind. Die Dämpfe kondensieren leicht in Öl und können unter Umständen auf die Vakuumseite der Pumpe gelangen und das Vakuum verringern. Diese Pumpen müssen gegen das Eindringen von Wasserdämpfen unbedingt gesichert werden. Dazu führt man die Saugleitung durch ein Gefäß mit konzentrierter Schwefelsäure. Sie ent-

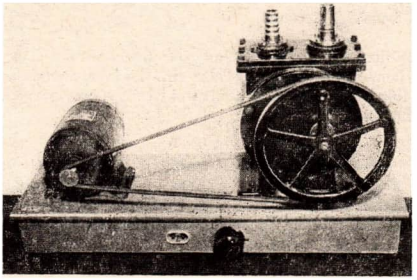


Abb. 2.0.5./4
Rotierende Ölluftpumpe

zieht den Wassergehalt. Nur muß man dann natürlich darauf achten, daß auch nicht ein Tröpfchen dieser aggressiven Säure in die Luftpumpe oder bei einem eventuellen „Zurückschlagen" in das evakuierte Gefäß gelangen kann.
Die Verbindungsleitung zwischen der Pumpe und dem zu evakuierenden Gefäß soll so kurz wie möglich sein. Bei längeren Leitungen und zum Erzielen höherer Vakua benutzt man Glas- oder Metallröhren, die durch übergeschobene Druckschlauchstücke mit der Pumpe und dem Gefäß verbunden werden.
Längere Gummischläuche geben die an den Innenwänden absorbierte Luft ab und verschlechtern dadurch das Vakuum. Die lichte Weite der Verbindungsleitungen ist nicht zu klein zu wählen, da der Strömungswiderstand der Rohrwandung die Sauggeschwindigkeit stark herabsetzt. Werden in die Verbindungsleitung Absperrhähne eingefügt, so müssen sie weite Bohrungen besitzen. Werden Geräte mit Schliffverbindungen an die Pumpe angeschlossen, so sind die inneren Teile der Schliffverbindungen dünn mit Fett zu bestreichen. Es darf nur so viel Fett verwendet werden, daß beim Zusammenstecken der geschliffenen Teile noch ein etwa 3 mm breiter fettfreier Streifen am äußeren Rande bestehenbleibt. Dreht man die Teile einige Male vorsichtig, so muß der Schliff glasklar erscheinen. Zu reichlich gefettete Schliffe zeigen astförmige Figuren im Fett. Die Verbindung ist undicht.
Wird bei den Versuchen ein Luftpumpenteller mit einem Rezipienten verwendet, so sind die Ränder des Rezipienten zum Abdichten mit konsistentem Fett zu bestreichen. Man vermeide ein übermäßiges Fetten, da es zu Undichtigkeiten führt. Das Abheben des Rezipienten vom Teller erfolgt bei gleichem Außen- und Innendruck durch seitliches Verschieben des Rezipienten über den Tellerrand. Entfernt man den Rezipienten vom Teller bei noch bestehendem Unterdruck, so kann eine Beschädigung des Tellers, des Rezipienten und der Pumpe eintreten. Bei Versuchen mit dem Rezipienten verwendet man stets Rezipienten mit möglichst geringem Rauminhalt, damit das notwendige Vakuum in kürzester Zeit erreicht wird. Nach Durchführung der Versuche sind Teller und Rezipient vom Fett zu reinigen.
Zuweilen löst sich die Glasplatte von ihrer metallenen Unterlage. Man erwärmt beide Teile getrennt voneinander, bis der am Metallteller oder an der Glasplatte haftende Kitt flüssig geworden ist, und preßt beide Teile mit einer mit Holz oder starker Pappe unterlegten Schraubzwinge vorsichtig zusammen. Ist an einer Luftpumpe eine Barometerprobe angebracht, so ist diese oft die Ursache einer Undich-

tigkeit. Durch festeres Anziehen der über die Barometerprobe gestülpten Glasglocke kann dieser Fehler meist beseitigt werden.

2.0.6. Im Physikunterricht, besonders bei der Behandlung der Mechanik der Gase, wird häufig Seifenlösung gebraucht. Meist genügt schon eine hochkonzentrierte Lösung eines Waschmittels. Im folgenden Abschnitt sind zwei Rezepte beschrieben, die sich in der Praxis bewährt haben.

a) *Verwendung von Kernseife, Zucker und Wasser*
Etwa 25 g dünne Kernseifenspäne werden in 500 cm³ warmem Wasser gelöst. In einer Abdampfschale werden 25 g Zucker unter dauerndem Umrühren über einer Bunsenflamme langsam hellbraun gebrannt. Man löst den Zucker ebenfalls in 500 cm³ warmem Wasser. Die Seifen- und die Zuckerlösung werden im Verhältnis 1:1 miteinander gemischt.

b) *Verwendung von Kernseife, Glyzerin und destilliertem Wasser*
Es werden etwa 8 g Seifenschnitzel einer Kernseife in 150 cm³ erwärmtem destilliertem Wasser gelöst. Dieser Seifenlösung gibt man etwa 15 cm³ Glyzerin hinzu.

Während die erste Seifenlösung nach ihrer Herstellung bald verbraucht werden muß, kann die zweite längere Zeit aufgehoben werden. Sollte die Lösung im Laufe der Zeit fest werden, so läßt sie sich durch Erwärmen in einem Wasserbad leicht wieder verflüssigen.
Im Spielzeughandel wird eine Seifenlösung angeboten, die sich für die hier beschriebenen Experimente sehr gut eignet.

2.1. Wirkungen und Nachweis des Luftdrucks

2.1.1. Wirkung des Luftdrucks auf einseitig verschlossene und mit Wasser gefüllte Gefäße [SE]

Zu Versuch 1

1. Standzylinder verschiedener Höhen und Durchmesser
2. Glasplatte zum Abdecken der Standzylinder
3. Glastrog (pneumatische Wanne, Aquarienglas)

Zu Versuch 2

Gerät 3., außerdem
4. Glasrohr (∅ etwa 3 cm, Länge etwa 50 cm)
5. Gummistopfen, zum Glasrohr passend

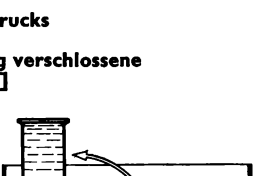


Abb. 2.1.1./1
Aufrichten eines mit Wasser gefüllten Zylinders in einer pneumatischen Wanne

Methodischer Hinweis

Beim Versuch 1 könnte bei den Schülern der Eindruck entstehen, daß die Molekularkräfte das Ausfließen des Wassers verhindern. Der Versuch 2 zeigt, daß dies

nicht der Fall sein kann. Deshalb sollte man beide Versuche nacheinander ausführen. Das Experiment ist zur Einführung geeignet.

Versuch 1: Benutzung verschiedener Standzylinder

Man füllt verschiedene Standzylinder, deren Höhen und lichte Weiten stark voneinander abweichen, mit Wasser. Die Öffnungen werden mit Glasplatten abgedeckt. Man kehrt die Zylinder um und taucht sie einige Zentimeter tief in eine mit Wasser gefüllte pneumatische Wanne. Zieht man die Glasplatte weg, so fließt das im Zylinder befindliche Wasser trotz seines Gewichtes nicht aus. Der auf die Wasseroberfläche wirkende Luftdruck ist größer als der Schweredruck des Wassers und verhindert somit das Ausfließen.
Man kann den Versuch auch so durchführen, daß man einen Standzylinder, ein Reagenzglas oder ein ähnliches Gefäß ganz untertauchend flach in die Wanne legt und dann mit der Öffnung nach unten aufrichtet (Abb. 2.1.1./1).

Versuch 2: Benutzung eines an einem Ende mit einem Gummistopfen verschlossenen weiten Glasrohres

An Stelle des Standzylinders verwendet man ein an einem Ende mit einem Gummistopfen verschlossenes weites Glasrohr. Man führt den Versuch wie beim Versuch 1 durch. Statt mit einer Glasplatte verschließt man das gefüllte Rohr mit dem Handballen. Wieder wirkt der Luftdruck auf die Wasseroberfläche; das Wasser fließt nach dem Entfernen des Handballens nicht aus. Entfernt man den Gummistopfen, so wirkt der Luftdruck auch von oben auf das im Zylinder befindliche Wasser und hebt sich in seiner Wirkung auf. Das Wasser fließt infolge seines Gewichts sofort aus.

2.1.2. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe eines Kolbens mit seitlichem Ansatz [SE]

1. Erlenmeyerkolben mit seitlichem Ansatz
2. Glasrohr (∅ etwa 7 mm, Länge etwa 30 cm)
3. durchbohrter Gummistopfen
4. Verbindungsschlauchstücke
5. 2 kurze Glasrohre
6. Quetschhahn

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment ist zur Problemstellung geeignet.

Versuch

Man füllt den Kolben etwa ein Viertel voll Wasser und verschließt ihn mit einem Gummistopfen, durch den man ein Glasrohr steckt, das fast bis zum Boden des Kolbens reicht. Auf den seitlichen Ansatz und das obere Glasrohrende steckt man schließlich noch je ein Schlauchstück mit einem kurzen Glasröhrchen. Verschließt man zuerst das obere Schlauchstück mit einem Quetschhahn und saugt mit dem

Munde Luft aus dem seitlichen Rohr, dann steigen einige Bläschen aus dem unteren Rohrende im Wasser auf; sonst kann man keine Veränderung beobachten. Gibt man die seitliche Öffnung frei, dann strömt mit einem Zischen Luft in den Kolben und drückt das Wasser im Steigrohr hoch (Abb. 2.1.2./1).
Öffnet man den Quetschhahn, dann kann auch dort der Luftdruck wirken, und das Wasser fließt sofort wieder in den Kolben zurück.

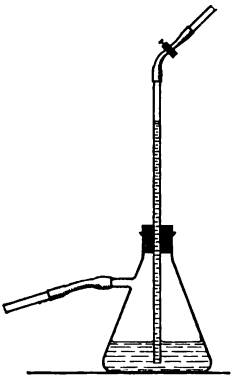


Abb. 2.1.2./1
Versuchsanordnung zum Nachweis des Luftdrucks

2.1.3. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe der Magdeburger Halbkugeln

1. Luftpumpe mit Luftpumpenteller
2. Magdeburger Halbkugeln
3. Pumpenfett (Ramsayfett)

Methodischer Hinweis

Der besondere Wert dieses Experimentes liegt neben seiner starken Überzeugungskraft in seiner geschichtlichen Bedeutung. Man wird deshalb bei dieser Gelegenheit mit den Schülern über Otto von Guericke und sein Werk sprechen.
Durch die Beschäftigung mit dem Wirken Otto von Guerickes werden die Schüler dazu angeregt, über anscheinend selbstverständliche Erscheinungen ihrer Umwelt nachzudenken und gegen unwissenschaftliche Ansichten aufzutreten.

Versuch

Man bestreicht die Ränder der beiden Halbkugeln und den trichterförmigen Ansatz dünn mit Luftpumpenfett, drückt beide Hälften unter gleichzeitigem Drehen kräftig gegeneinander und stellt sie auf den Luftpumpenteller. Der Hahn am Ansatzstück ist dabei geöffnet.
Nach dem Evakuieren schließt man den Hahn am Ansatz der Kugel, öffnet den Hahn am Luftpumpenteller und kann nun die Kugel von der Luftpumpe abheben. Die beiden Hälften werden durch den äußeren Luftdruck fest gegeneinander gedrückt. Man kann sie erst wieder trennen, wenn man Luft einströmen läßt.

Bemerkung

Als Ersatz für die Magdeburger Halbkugeln kann man einen Rezipienten auf dem Luftpumpenteller evakuieren. Er wird fest gegen den Teller gepreßt.

2.1.4. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe eines Blasensprengers

Zu Variante a

1. Kolben- oder Kapselluftpumpe mit Luftpumpenteller
2. Blasensprenger aus Glas oder Metall (dickwandiger kurzer, auf beiden Seiten offener Zylinder mit verstärkten, plangeschliffenen Rändern)
3. Schweinsblase oder Zellglashaut
4. dicker Bindfaden
5. Pumpenfett (Ramsayfett)

Zu Variante b

Geräte 1., 2. und 5., außerdem

6. dünne Glasplatte (etwa 10 cm × 10 cm × 1 mm)

Zu Variante c

Geräte 1., 2. und 5., außerdem

7. Platten aus verschiedenen Stoffen, wie Gummi, PVC, Aluminium oder Stahl
8. Meßfühler mit Anzeigesystem
9. Bindfaden

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt in überzeugender Weise, daß der Luftdruck erhebliche Wirkungen ausüben kann. Dadurch wird das Interesse der Schüler für die Messung des Luftdrucks geweckt.
2. Nachdem die Schüler den Torricellischen Versuch und damit den Betrag des Luftdrucks kennengelernt haben, können sie in einer Leistungskontrolle beauftragt werden, die auf die Folie oder Glasplatte wirkende Druckkraft zu berechnen. Der Druck innerhalb des Ringes kann dabei vernachlässigt werden.

Variante a: Sprengen einer Schweinsblase oder einer Zellglashaut

Ein Stück einer eingeweichten Schweinsblase oder eine Zellglashaut wird straff über den Rand des Blasensprengers gezogen und festgebunden. Nach dem Trocknen der Blase wird der unbedeckte Rand des Ringes eingefettet und fest auf den Luftpumpenteller gedrückt. Die innerhalb des Ringes befindliche Luft saugt man mit der Luftpumpe ab. Durch den äußeren Luftdruck wird die Blase nach innen gedrückt und zerplatzt mit lautem Knall.

Variante b: Sprengen einer Glasplatte

Eine ähnliche Wirkung zeigt der Versuch, bei dem eine Glasplatte statt der Schweinsblase verwendet wird. Beide Ränder des Zylinders werden vor dem Aufsetzen auf den Luftpumpenteller gut eingefettet. Nachdem man die Glasplatte fest auf den Ring gelegt hat, wird wie in Variante a die Luft abgesaugt (Abb. 2.1.4./1). Ist der Druck im Innern des Zylinders genügend gesunken, wird die Platte durch den Luftdruck eingedrückt.

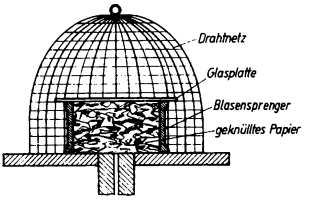


Abb. 2.1.4./1
Blasensprenger mit einer Glasplatte bedeckt auf einem Luftpumpenteller

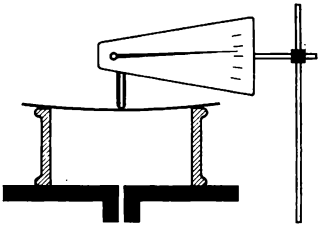


Abb. 2.1.4./2
Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe eines Meßfühlers

Variante c: Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe eines Meßfühlers

Zu dem industriell gefertigten Lehrmittel werden Platten aus verschiedenen Stoffen, wie Gummi, PVC, Aluminium und Stahl, sowie ein Meßfühler mit einem Anzeigegerät mitgeliefert. Man bespannt die obere Öffnung des Zylinders mit der Gummiplatte oder bedeckt sie mit einer Platte aus PVC oder Metall. Den Meßfühler befestigt man so an einem Stativ, daß er die Abdeckung des Glaszylinders berührt und sein Zeiger auf Null einspielt (Abb. 2.1.4./2). Pumpt man nun Luft aus dem Zylinder, dann wölbt sich durch den Druck der äußeren Luft die Deckplatte nach innen, der Meßfühler zeigt einen Ausschlag.

Bemerkungen

1. Damit keine Glassplitter in die Luftpumpe gelangen, empfiehlt es sich, bei der Variante b den Blasensprenger mit zerknülltem Papier auszufüllen. Auch der Verschluß der Telleröffnung durch eine in einem Gummistopfen steckende halbkreisförmig gebogene dickwandige Glasröhre ist zweckmäßig.
2. Zum Schutz der Schüler vor Glassplittern sollte man bei der Variante b über die Versuchsanordnung eine Drahtglocke stülpen.
3. Der Versuch nach Variante c zeigt stark vereinfacht das Prinzip eines Dosenbarometers.

2.1.5. Nachweis der Gleichheit des Luftdrucks in allen Richtungen

1. Glasrohr (⌀ etwa 7 mm, Länge etwa 30 cm)
2. kurzes Glasrohrstück (⌀ etwa 7 mm, Länge etwa 3 cm), nach einem Ende zu etwas verjüngt
3. Verbindungsschlauchstücke
4. Quetschhahn

Methodische Hinweise

1. Um zu vermeiden, daß der Eindruck entsteht, das Wasser könne durch die Molekularkräfte in der Röhre gehalten werden, darf der Durchmesser der Röhre

nicht zu klein gewählt werden. Nach dem Versuch kann man zeigen, daß beim Öffnen des Quetschhahnes das Wasser ausfließt.

2. Der Luftdruck kann als Schweredruck der Luft im Schwerefeld der Erde erklärt werden. Die allseitige Druckausbreitung ist wie die Ausbreitung des Druckes in Flüssigkeiten durch die leichte Verschiebbarkeit der Moleküle zu erklären.

Versuch

Ein kurzes, nach einem Ende zu verjüngtes Glasrohr wird am anderen Ende mit einem längeren Rohr durch ein Schlauchstück verbunden. Dieses versieht man an seinem freien Ende mit einem weiteren kurzen Schlauchstück und füllt beide Rohre durch Ansaugen mit Wasser. Das freie Ende des langen Rohres verschließt man

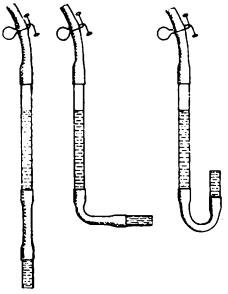


Abb. 2.1.5./1
Flüssigkeit in einem einseitig verschlossenen Glasrohr. Die Rohröffnung kann in verschiedene Richtungen gehalten werden.

danach durch einen Quetschhahn. Hält man das lange Rohr lotrecht, so daß das kurze Rohr mit seinem verjüngten Ende frei herabhängt, so fließt das Wasser nicht aus. Biegt man den Verbindungsschlauch so, daß das kurze Rohr in verschiedene Richtungen zeigt, so bleibt das Wasser unverändert in beiden Rohren stehen (Abb. 2.1.5./1). Der Luftdruck wirkt in gleicher Höhe auf die untere Öffnung des Rohres von allen Richtungen her gleich stark.

Bemerkung

Das Gerät ist nicht so empfindlich, daß sich der geringe Druckunterschied in den verschiedenen Höhen beim Biegen des unteren Rohrstücks bemerkbar macht.

2.1.6. Wirkung des Luftdrucks auf ein mit Wasser gefülltes Gefäß [SE]

Zu Versuch 1

1. Trinkglas
2. Schreibpapier (etwa 10 cm × 10 cm)

Zu Versuch 2

3. Glasröhrchen (Ø etwa 7 mm, Länge etwa 50 cm)
4. Gummistopfen zum Verschließen des Glasröhrchens oder kurzes Schlauchstück mit Quetschhahn

Zu Versuch 3

5. Pipetten verschiedener Formen
6. Stechheber
7. Eimer

Methodischer Hinweis

Der Versuch 1 wirkt auf die Schüler im allgemeinen überraschend und kann deshalb als Einführungsversuch zur Problemstellung gezeigt werden. Der Versuch 2 ermöglicht die Lösung des Problems, die Erkenntnis, daß diese Erscheinung auf den Luftdruck zurückzuführen ist. Der Versuch 3 zeigt einige praktische Anwendungen dieser Wirkung des Luftdrucks.

Versuch 1: Benutzung eines Trinkglases

Ein Trinkglas wird bis zum Rand mit Wasser gefüllt und mit einem Stück Schreibpapier abgedeckt. Man erfaßt das Trinkglas mit der einen Hand, drückt das Papierblatt mit der Handfläche der anderen Hand leicht an und kehrt das Glas um. Entfernt man die Hand von dem Papierblatt, so fließt das Wasser nicht aus. Der Luftdruck ist größer als der Schweredruck des Wassers und drückt das Papierblatt fest gegen das Trinkglas.

Versuch 2: Benutzung einer Glasröhre

Eine Glasröhre wird einseitig mit einem Gummistopfen luftdicht verschlossen und mit Wasser gefüllt. Man legt ein Stückchen Papier auf die Rohrmündung, drückt es mit der Hand leicht an und kehrt das Rohr langsam um. Entfernt man die Hand vom Papier, so fließt kein Wasser aus, da der äußere Luftdruck das Papier an die Rohrmündung preßt. Wiederholt man den Versuch mit einer etwas engeren Röhre, so fließt das Wasser beim Umkehren auch dann nicht aus, wenn das Papierblatt fortgelassen wird. Die Oberflächenspannung ist so stark, daß sie wie eine Haut wirkt, die die Rohrmündung abschließt.

Versuch 3

Man führt den Gebrauch verschiedener Pipetten vor, indem man sie entweder tief eintaucht, oben mit dem Daumen verschließt und aus dem Wasser heraushebt oder mit dem Mund Wasser ansaugt und sie dann am oberen Ende rasch verschließt. Schließlich führt man die Benutzung eines Stechhebers zum Abfüllen von Flüssigkeiten aus einem größeren Behälter vor. Man taucht ihn in einen mit Wasser gefüllten Eimer, verschließt seine obere Öffnung mit dem Daumen und hebt ihn gefüllt heraus (Abb. 2.1.6./1). Auf die Vorzüge des Stechhebers beim Abfüllen von ätzenden oder anderen gesundheitsschädigenden Flüssigkeiten sollte hingewiesen werden.



Abb. 2.1.6./1
Stechheber

Bemerkung

Man achte darauf, daß sich beim Versuch 1 keine Luftblase im Trinkglas befindet.

2.1.7. Nachweis des Luftdrucks an zwei ineinandergesteckten Reagenzgläsern [SE]

1. Zwei Reagenzgläser, die man ineinanderstecken kann

Methodischer Hinweis

Der Versuch erweckt erfahrungsgemäß das ungeteilte Interesse der Schüler. Er ist sowohl als Einführungsversuch geeignet als auch zur Aufgabenstellung bei der Wiederholung (Beschreiben der Beobachtung und Erklären der physikalischen Zusammenhänge).



Versuch

Man wählt für den Versuch zwei Reagenzgläser, von denen sich das eine gerade in das andere einführen und sich in ihm verschieben läßt, ohne zu klemmen. Das größere der beiden Gläser wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Das kleinere Glas führt man in das größere ein und drückt es einige Zentimeter tief in die Flüssigkeit, so daß das Wasser über den Rand des größeren Glases läuft. Kehrt man jetzt beide Gläser um, so wird das innere Glas durch den Luftdruck in das äußere hineingedrückt und gleitet dabei nach oben (Abb. 2.1.7./1). Das im äußeren Glas befindliche Wasser fließt dabei aus, soweit es verdrängt wird.

Abb. 2.1.7./1
Zwei ineinandergesteckte Reagenzgläser.
Der Luftdruck drückt das innere Reagenzglas entgegen der Schwerkraft nach oben.

2.1.8. Nachweis des Luftdrucks mit Hilfe einer Gummiblase in einer Flasche

1. Große Flasche mit seitlichem Tubus
2. Gummiblase (Kinderluftballon)
3. durchbohrter Gummistopfen
4. zwei kurze Glasröhrchen
5. Gummischlauchstück
6. Faden
7. Quetschhahn

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist deswegen für die Schüler überraschend, weil die Blase ihre Gestalt beibehält, obwohl sie unverschlossen ist. Der Versuch ist in seiner Wirkung V 2.1.9. ähnlich. Während aber dort die Gummiblase verschlossen ist, bleibt sie hier offen. V 2.1.9. zeigt die Expansion der in der Gummiblase eingeschlossenen Luft bei Verminderung des äußeren Luftdrucks. Hier dagegen ist es der Druck der äußeren Luft, der das Aufblähen der nicht verschlossenen Blase verursacht.

Vorbereitung des Versuchsgerätes

Bei diesem Versuch wird eine Flasche mit einem seitlichen Tubus als Rezipient verwendet. Ein etwa 10 cm langes Glasrohr wird mit Hilfe eines Eisendorns an einem Ende über einer Flamme etwas konisch erweitert. Über das glatte Ende des Rohrs wird ein zum oberen Tubus der Flasche passender durchbohrter Gummistopfen geschoben. Über das konisch erweiterte Ende zieht man den Schlauchansatz einer Gummiblase und bindet sie nach mehrmaligem Umwickeln mit dünner Schnur fest. Man steckt die Gummiblase in die Flasche und verschließt diese oben

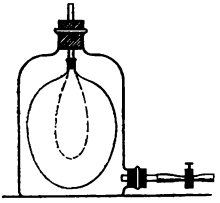


Abb. 2.1.8./1
Flasche mit Gummiblase zum Nachweis des Luftdrucks

mit dem Gummistopfen (Abb. 2.1.8./1). Der seitliche Tubus dient als Saugstutzen. Er wird mit einem durchbohrten Gummistopfen verschlossen. In dessen Bohrung steckt man ein kurzes, mit einem Gummischlauch verbundenes Glasrohr.

Versuch

Saugt man mit dem Munde an dem Gummischlauch, so wird dadurch der Luftdruck in der Flasche verringert. Der äußere Luftdruck bläht die Gummiblase so weit auf, bis ihre weitere Ausdehnung durch die Flaschenwand begrenzt wird. Mit Hilfe eines Quetschhahns verschließt man den Saugschlauch. Die unverschlossene Gummiblase bleibt infolge des auf sie wirkenden Luftdrucks aufgeblasen.
Öffnet man den Quetschhahn, so sinkt die Blase wieder in sich zusammen. Die in ihr befindliche Luft entweicht dabei.

Bemerkungen

1. Der Versuch kann auch in umgekehrter Form durchgeführt werden. Man bläst die in der Flasche befindliche Gummiblase durch das obere Glasrohr auf. Dadurch wird die außerhalb der Blase in der Flasche befindliche Luft verdrängt. Verschließt man den seitlichen Tubus, so wirkt auch jetzt der äußere Luftdruck einseitig auf die Gummiblase. Sie bleibt aufgeblasen.
2. Auch mit einer Seifenblase kann man den Versuch durchführen. Man zieht den Gummistopfen mit Glasrohr aus dem oberen Tubus und löst die Gummiblase vom Glasrohr. Das erweiterte Ende des Rohrs taucht man in die nach den Angaben in 2.0.6. hergestellte Seifenlösung. Hat man den Gummistopfen mit dem Glasrohr wieder in den Tubus eingesetzt, so saugt man am Gummischlauch. An dem Glasrohr bildet sich eine Seifenblase. Besonders wirkungsvoll ist es, wenn man eine zweite Seifenblase in der ersten entstehen läßt. Zu diesem Zweck steckt

man durch das Glasrohr ein zweites Rohr von geringerem Durchmesser, das gerade in das erste Rohr hineinpaßt. Das eingeschobene Ende des Rohres wurde vorher in die Seifenlösung getaucht. Man schiebt das zweite Rohr so weit, bis das benetzte Ende in die Seifenblase des äußeren Rohres hineinragt. Saugt man jetzt am Gummischlauch weiter, so vergrößert sich die bereits vorhandene Seifenblase. Gleichzeitig bildet sich am inneren Rohr in der bereits vorhandenen Blase eine zweite, kleinere Seifenblase, da die schmale Fuge zwischen den beiden Rohren durch die Seifenlösung abgedichtet wird.

2.1.9. Nachweis der Spannkraft der Luft an einer Gummiblase

1. Luftpumpe mit Luftpumpenteller
2. Rezipient
3. Gummiblase
4. runzliger Apfel
5. Pumpenfett (Ramsayfett), Schnur

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 2.1.8.!
2. Bei dem Experiment mit der Gummiblase bietet sich die Möglichkeit an, zu erklären, daß die physikalische Größe Druck in abgeschlossenen Gasen bei konstanter Temperatur durch die Anzahl der in der Volumeneinheit vorhandenen, sich ungeordnet bewegenden Gasmoleküle bestimmt wird. Durch die Schlußfolgerung, daß der Druck eine Aussage über den Zustand der Gase zuläßt, kann der Begriff Zustandsgröße vorbereitet werden.

Versuch

Eine kleine, nicht prall aufgeblasene Gummiblase wird mit einer Schnur fest zugebunden und unter den Rezipienten einer Luftpumpe gelegt. Beim Evakuieren des Rezipienten dehnt sich die Gummiblase aus, beim Einströmen der Luft sinkt sie wieder zusammen.
Ersetzt man die Gummiblase durch einen runzligen Apfel, so sieht man beim Vermindern des Luftdrucks, wie die Runzeln des Apfels allmählich verschwinden. Bei weiterem Evakuieren nimmt das Volumen des Apfels zu, dabei glättet sich die Haut des Apfels vollständig. Läßt man wieder Luft einströmen, so wird der Apfel noch runzliger als vorher, da Luft aus ihm herausgepumpt wurde. Bei der Wiederholung des Versuches ist die Wirkung noch eindrucksvoller.

Bemerkungen

1. Statt des Apfels kann man auch eine runzlige Kartoffel verwenden, bei der noch keine Verhärtung der Schale eingetreten ist.
2. Sehr eindrucksvoll ist es, unter den Rezipienten einen kleinen Becher mit Rasierseifenschaum zu stellen, der sich beim Evakuieren ganz erheblich ausdehnt. Es empfiehlt sich, den Becher in eine Schale zu stellen.
3. Beim Versuch mit der Gummiblase ist es ratsam, die Öffnung im Luftpumpenteller mit einem Drahtsieb zu überdecken.

2.1.10. Heronsball und Spritzflasche [SE]

1. Kleiner Rundkolben
2. durchbohrter Gummistopfen
3. spitz ausgezogenes Glasröhrchen
4. größerer Rundkolben
5. zweifach durchbohrter Gummistopfen
6. spitzwinklig gebogenes Glasröhrchen, den kurzen Schenkel zur Spitze ausgezogen
7. stumpfwinklig gebogenes Glasröhrchen

Methodischer Hinweis

Das Experiment mit dem Heronsball und die Versuche 2.1.11. und 2.1.12. dienen dem Nachweis der Spannkraft der Luft. Am Heronsball sind die physikalischen Vorgänge am leichtesten zu überschauen. Dieser Versuch ist deshalb bereits für Schüler unterer Klassen geeignet. Die Versuche 2.1.12a, b und c erfordern mehr Aufwand, bereiten aber methodisch auch keine Schwierigkeiten. 2.1.11. sollte erst vorgeführt werden, wenn den Schülern das Temperatur-Druck-Gesetz der Gase schon bekannt ist, weil sie erst dann die physikalischen Zusammenhänge erkennen können.

Versuch

Aus einem kleinen Rundkolben, einem Gummistopfen und einem Glasröhrchen stellt man einen Heronsball her (Abb. 2.1.10./1). Man füllt ihn etwa zur Hälfte mit Wasser. Bläst man durch das Glasrohr in den Kolben, so wird die Luft in ihm komprimiert. Beim Expandieren spritzt das Wasser aus dem Röhrchen.

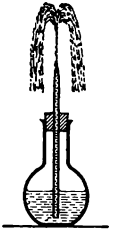


Abb. 2.1.10./1
Heronsball

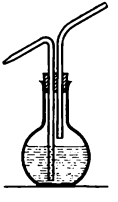


Abb. 2.1.10./2
Spritzflasche

Bei der Spritzflasche (Abb. 2.1.10./2) ist außer dem Steigrohr mit der Spritzdüse ein getrenntes Blasrohr eingesetzt.

Bemerkung

Durch die Entwicklung geeigneter Plaste wurde es möglich, hygienische Spritzflaschen ohne Blasrohr herzustellen. Man komprimiert in ihnen die Luft durch Zusammendrücken der Flasche.

2.1.11. Heronsball in einem Einweckglas

1. Einweckglas mit Deckel und Dichtungsring
2. Arzneifläschchen
3. durchbohrter Gummistopfen
4. Glasröhrchen (⌀ etwa 4 mm, Länge etwa 5 cm), an einem Ende zur Spitze ausgezogen
5. Wägestück (5 kg)
6. Bunsenbrenner, Spiritusbrenner oder Kerze

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.1.10.!

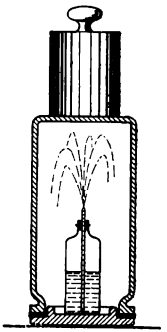


Abb. 2.1.11./1
Arzneifläschchen als Heronsball in einem Einweckglas

Versuch

Man durchbohrt den Verschlußstopfen eines Arzneifläschchens und steckt in die Bohrung ein Glasröhrchen, dessen eines Ende annähernd bis zum Boden des Fläschchens reicht. Das Fläschchen wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt und auf die Innenseite des zum Weckglas gehörenden, mit einem Dichtungsring versehenen Deckels gestellt, den man mit der Innenseite nach oben flach auf den Tisch gelegt hat.

Das Einweckglas wird mit der Öffnung nach unten über eine brennende Kerze, eine Spiritusflamme oder eine Gasflamme gehalten. Hat sich die Luft im Glas fühlbar erwärmt, so stülpt man das Glas über das Arzneifläschchen und drückt das Glas auf den Dichtungsring. Zur besseren Abdichtung beschwert man das Glas durch ein Wägestück von etwa 5 kg (Abb. 2.1.11./1). Kühlt sich die Luft im Einweckglas ab, so entsteht in diesem ein Unterdruck gegenüber der Umgebung. Die im Fläschchen unter atmosphärischem Druck stehende Luft drückt das Wasser aus dem Fläschchen hinaus.

2.1.12. Nachweis der Spannkraft der Luft in einem Rundkolben

Zu Variante a

1. Luftpumpe mit Luftpumpenteller
2. Rezipient
3. Rundkolben (250 ml)
4. Becherglas (250 ml)
5. durchbohrter Gummistopfen
6. U-förmig gebogenes Glasrohr Ⓢ
7. Fluoreszein oder anderer Farbstoff
8. Luftpumpenfett (Ramsayfett)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 4., 7. und 8.

Zu Variante c

9. Rundkolben (500 ml)
10. Flasche mit weitem Hals (500 ml)
11. ein einfach und ein zweifach durchbohrter Gummistopfen
12. U-förmig gebogenes Glasrohr Ⓢ
13. rechtwinklig gebogenes Glasrohr
14. Verbindungsschlauch

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.1.9. und 2.1.10.!

Variante a

Ein mit gefärbtem Wasser halb gefüllter Rundkolben wird mit einem durchbohrten Gummistopfen verschlossen. Durch diesen wird der eine Schenkel eines U-förmig gebogenen Glasrohres geschoben, bis er fast den Boden des Kolbens berührt. Der außerhalb des Kolbens befindliche Schenkel reicht ebenfalls bis zum Boden eines leeren Becherglases, das neben dem Kolben steht. Diese Versuchsanordnung stellt man unter den Rezipienten einer Luftpumpe (Abb. 2.1.12./1). Sobald die Luft abgesaugt wird, fließt das gefärbte Wasser aus dem Kolben durch das U-Rohr in das Becherglas. Läßt man die Luft wieder in den Rezipienten strömen, so fließt das Wasser in den Kolben zurück.

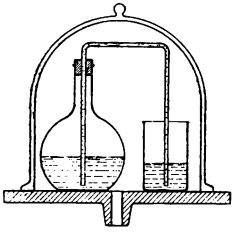


Abb. 2.1.12./1
Heronsball unter einem Rezipienten

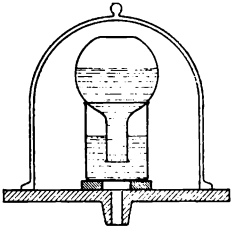


Abb. 2.1.12./2
Ein umgekehrt auf einem Becherglas ruhender Rundkolben unter einem Rezipienten

Variante b

Man füllt einen kleinen Rundkolben mit Wasser, stülpt ein Becherglas darüber und kehrt beides rasch um. Das Wasser fließt so lange aus dem Rundkolben, bis das im Becherglas aufsteigende Wasser die Öffnung des Rundkolbens erreicht hat. Bringt man diese Anordnung unter einen Rezipienten und pumpt Luft aus diesem, so fließt das Wasser weiter aus dem Rundkolben in das Becherglas (Abb. 2.1.12./2).
Läßt man wieder Luft einströmen, dann wird das Wasser durch den Luftdruck in den Rundkolben zurückgedrückt.

Bemerkungen

1. Damit das Becherglas die Öffnung des Luftpumpentellers nicht verschließt, stellt man es auf zwei Holzleisten oder auf ein Drahtsieb.
2. Man lasse die Luft sehr langsam einströmen, damit durch den Luftstrom die Versuchsanordnung im Rezipienten nicht umgestoßen wird.

Variante c

Der Versuch zeigt die gleichen Erscheinungen wie die Variante a. Er ist aber im Gegensatz zu dieser ohne Luftpumpe und Rezipient durchführbar.

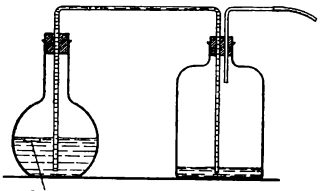


Abb. 2.1.12./3
Versuchsanordnung zum Nachweis der Expansion der Luft

Man füllt den Rundkolben etwa zur Hälfte mit Wasser und verbindet ihn durch ein U-Rohr mit einer weithalsigen Flasche. An diese schließt man außerdem einen Schlauch an (Abb. 2.1.12./3). Man saugt an diesem und ruft dadurch in der Flasche eine Druckverminderung hervor, so daß sich die Luft im Rundkolben ausdehnen kann. Das Wasser strömt aus dem Kolben in die Flasche über.
Läßt man in diese wieder von außen Luft einströmen, so fließt das Wasser in den Kolben zurück. In ihm wird die Luft wieder auf ihr ursprüngliches Volumen zusammengedrückt.

Bemerkung

Der Versuch läßt deutlich das Expansionsvermögen der Luft erkennen. Es empfiehlt sich, das Verbindungsrohr schon vor Beginn des Versuches mit Wasser zu füllen und in die Flasche soviel Wasser zu gießen, daß die Öffnung des U-Rohres noch eintaucht. Auf diese Weise wird erreicht, daß keine Fremdluft zu der im Kolben befindlichen Luft hinzutritt. Den Anfangsstand des Wasserspiegels im Kolben markiert man durch einen Papierstreifen.

2.1.13. Nachweis von Luft in Wasser

1. Luftpumpe mit Luftpumpenteller
2. Rezipient
3. Becherglas (500 ml)
4. Luftpumpenfett (Ramsayfett)

Methodischer Hinweis

Das Experiment zeigt, daß im Wasser, das man einer Wasserleitung oder einem Brunnen entnimmt, Luft gelöst ist. Sie entweicht, wenn man den Luftdruck über der Wasseroberfläche vermindert. Das Entgasen von Wasser darf nicht verwechselt werden mit dem Sieden unter vermindertem Druck. Dieser Vorgang setzt bei kaltem Wasser erst bei erheblich stärkerer Druckverminderung ein.

Versuch

Man füllt ein Becherglas mit Wasser, stellt es unter den Rezipienten auf einen Luftpumpenteller und evakuiert. Nach kurzer Zeit beobachtet man, daß sich die im

Wasser gelöste Luft in kleine Bläschen zusammenschließt, die sich rasch vergrößern und aufsteigen. Diese Erscheinung hört nach einiger Zeit auf, das Wasser ist frei von Luft.
Eindrucksvoll ist es, den Versuch mit abgestandenem Bier durchzuführen. Durch das Evakuieren wird eine kräftige Schaumbildung hervorgerufen, die beim Zuströmen von Luft in den Rezipienten sofort wieder verschwindet.

2.1.14. Vorversuch zum Saugheber

Zu Versuch 1

1. U-Rohr aus Glas mit zwei gleich langen, zu spitzen Öffnungen ausgezogenen Schenkeln (∅ etwa 8 mm, Schenkellänge etwa 20 cm)
2. Glastrog oder Wanne

Zu Versuch 2

Gerät 2., außerdem

3. ungleichschenkliges U-Rohr mit spitz ausgezogenen Enden (∅ etwa 8 mm, Schenkellänge etwa 20 cm und 30 cm)

Methodische Hinweise

1. Zur Einführung des Saughebers ist ein Experiment sehr verbreitet, bei dem eine lange dünne Kette über eine Rolle gehängt wird. Dieses Modell hat nur in seiner Wirkung Ähnlichkeit mit der eines Saughebers. Sie beruht aber beim Modell auf völlig anderen Gesetzmäßigkeiten als beim Saugheber. Der Modellversuch verleitet deshalb zu Trugschlüssen, von seiner Anwendung muß abgeraten werden.
2. Bei diesem Versuch und bei den folgenden Experimenten mit Hebern muß stets klar herausgearbeitet werden, welche Rolle der Luftdruck spielt. Häufig kommt seine Bedeutung klar zum Ausdruck, wenn man sich vorstellt, wie die Versuche ablaufen würden, wenn man sie im Vakuum vorführte.

Versuch 1

Man füllt zunächst das gleichschenklige U-Rohr der ganzen Länge nach mit Wasser und schließt beide nach oben gerichteten Öffnungen mit den Daumen. Dann dreht man das U-Rohr um und löst die Daumen behutsam von den Öffnungen. Liegen dabei die Öffnungen in derselben waagerechten Ebene, so fließt das Wasser nicht aus (Abb. 2.1.14./1a).

Versuch 2

Man wiederholt den Versuch mit dem ungleichschenkligen U-Rohr. Gibt man nach dem Umkehren zunächst nur eine Öffnung frei, so fließt kein Wasser aus. Sobald man aber auch das andere Ende des Rohres öffnet, fließt das Wasser zum langen Schenkel heraus, unabhängig davon, welche Öffnung zuerst freigegeben wurde (Abb. 2.1.14./1b).
Beim Versuch 1 sind die Wassersäulen gleich schwer; sie werden von dem auf beide Öffnungen gleich stark wirkenden Luftdruck getragen. Beim Versuch 2 ist das Gleichgewicht gestört; es überwiegt die Gewichtskraft der Wassersäule im langen Schenkel. Der Luftdruck drückt das Wasser im kurzen Schenkel nach oben.

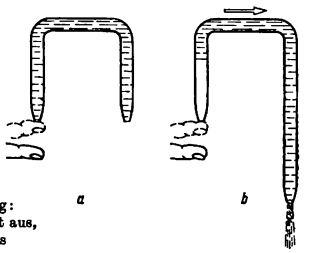


Abb. 2.1.14./1
U-Rohre zur Veranschaulichung der Heberwirkung:
a) gleich lange Schenkel — Flüssigkeit fließt nicht aus,
b) ungleich lange Schenkel — Flüssigkeit fließt aus

Bemerkung

Im Vakuum würde bei beiden Experimenten das Wasser aus beiden Schenkeln ausfließen, wenn die U-Rohr-Schenkel nicht zu kurz gewählt werden.

2.1.15. Der Saugheber [SE]

Zu Versuch 1

1. Spitzwinklig gebogenes, ungleichschenkliges Glasrohr (∅ etwa 8 mm) ⑧
2. zwei große Bechergläser

Zu Versuch 2

3. U-förmig gebogenes Glasrohr mit gleichen Schenkellängen (∅ etwa 8 mm, Schenkellänge etwa 25 cm) ⑧
4. zwei gleiche Standzylinder

Zu Versuch 3

5. Glastrog (Aquarienglas) oder Eimer
6. Gummischlauch (Länge etwa 1 m)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.1.14.!

Versuch 1

Man senkt in ein erhöht aufgestelltes, mit Wasser gefülltes Becherglas den langen Schenkel eines Winkelrohres ein, das man durch Ansaugen mit Wasser gefüllt hat und dessen freie Öffnung man zunächst noch verschlossen hält. Gibt man die Öffnung frei, so fließt Wasser in ein darunter stehendes Becherglas ab (Abb. 2.1.15./1a). Sobald das Wasserniveau unter die freie Öffnung sinkt, tritt Luft in diese ein. Das im Rohr befindliche Wasser fließt zurück, der Heber hört auf zu arbeiten.

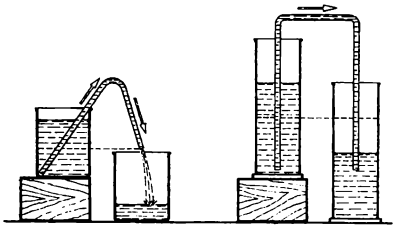


Abb. 2.1.15./1
Saugheber:
a) Abheben einer Flüssigkeit durch einen Winkelheber,
b) zwei durch einen Heber verbundene Gefäße

Versuch 2

Man stellt zwei gleich große, etwas mehr als bis zur Hälfte mit Wasser gefüllte Standzylinder oder Bechergläser nebeneinander und senkt in beide die Schenkel eines ganz mit Wasser gefüllten U-Rohres. Wenn man den einen Zylinder anhebt und ihn auf einen Unterlegklotz stellt, fließt Wasser in den tiefer stehenden Zylinder über, bis wieder Wassergleichstand in beiden Zylindern vorhanden ist (Abb. 2.1.15./1b). Senkt man den hochgestellten Zylinder wieder, so fließt das Wasser in der umgekehrten Richtung.

Versuch 3

In einen mit Wasser gefüllten Trog taucht man einen etwa 1 m langen Schlauch nach und nach ein, so daß er sich ganz mit Wasser füllt. Man verschließt ein Ende des Schlauchs mit dem Finger, hebt es aus dem Wasser heraus und senkt es seitlich bis unter das Wasserniveau. Gibt man das Ende frei, so fließt das Wasser aus.

Bemerkung

Zwei durch einen Heber verbundene Gefäße verhalten sich ebenso wie zwei durch ein Rohr unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche verbundene Gefäße.

Giftige Dämpfe

2.1.16. Saugheber im luftverdünnten Raum

1. Luftpumpe mit Luftpumpenteller
2. Rezipient
3. U-förmig gebogenes Glasrohr
   (⌀ etwa 8 mm, Schenkellänge etwa 12 cm) Ⓢ
4. zwei kleine Bechergläser (100 ml)
5. Glasschale (⌀ etwa 15 cm)
6. Quecksilber, Quecksilbertropfer,
   Quecksilberzange, Quecksilberbrett,
   Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
7. zwei kleine Gummistopfen zum Verschließen des U-Rohres
8. zwei Stopfnadeln oder steifer Draht, Luftpumpenfett

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll zeigen, daß Heber nur wirken können, wenn auf den Flüssigkeitsoberflächen der Luftdruck lastet.
Es ist herauszuarbeiten, daß zwar auch die Kohäsion zwischen den Flüssigkeitsmolekülen eine Rolle, aber nicht die entscheidende, spielt. In einem Saugheber wird also nicht die Flüssigkeit im kurzen Schenkel von der im längeren Schenkel nachgezogen, sondern durch den Luftdruck nachgedrückt (vgl. MB 2.0.1.!).

Vorversuch

Man stellt eine Glasschale mit flachem Boden (Petrischale) auf ein Quecksilberbrett. In die Schale stellt man zwei kleine Bechergläser, die man je etwa zur Hälfte mit Quecksilber füllt. Der Inhalt beider Bechergläser wird mit einem U-Rohr als Heber verbunden.
Das Füllen des U-Rohres mit Quecksilber und das Einbringen in die Bechergläser erfordert besondere Sorgfalt. Man hält zunächst das U-Rohr mit den Öffnungen nach oben und füllt es über dem Quecksilberbrett behutsam mit dem Quecksilbertropfer. Dann verschließt man beide Öffnungen mit je einem kleinen Gummistopfen, in den man vorher eine Stopfnadel oder einen steifen Draht eingestochen hat. Dabei achte man darauf, daß unter den Stopfen keine Luftblasen bleiben. Es läßt sich kaum vermeiden, daß dabei etwas Quecksilber heruntertropft. Man halte deshalb hierbei das Röhrchen dicht über die beiden Bechergläser in der Schale, damit die Tröpfchen nicht unkontrolliert umherspritzen.
Das gefüllte und verschlossene U-Rohr taucht man nun mit je einem Schenkel in eines der Bechergläser und entfernt unterhalb des Quecksilberspiegels die beiden Stopfen mit Hilfe der eingesteckten Nadeln oder Drähte (Abb. 2.1.16./1). Im U-Rohr soll keine Luftblase entstehen. Hebt man eines der Bechergläser um ein kleines Stückchen an, dann stellt sich in wenigen Sekunden Gleichstand der Quecksilberspiegel ein, der Heber funktioniert.

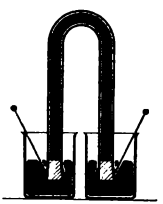


Abb. 2.1.16./1
Einbringen eines mit Quecksilber gefüllten U-Rohres als Heber in zwei Bechergläser

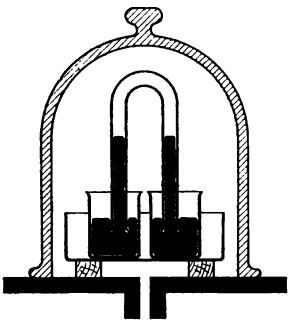


Abb. 2.1.16./2
Saugheber unter dem Rezipienten einer Luftpumpe

Versuch

Stellt man die Glasschale mit den Bechergläsern und dem Heber unter den Rezipienten auf den Teller einer Luftpumpe und setzt die Pumpe in Tätigkeit, dann beobachtet man schließlich nach einigen Minuten, wenn der Druck unter dem Rezipienten ausreichend vermindert wurde, daß sich oben in der Krümmung des Glasröhrchens ein leerer Raum bildet, der sich allmählich vergrößert. Der Quecksilberspiegel sinkt in beiden U-Rohr-Schenkeln gleichmäßig (Abb. 2.1.16./2). Läßt man vorsichtig wieder Luft einströmen, dann steigt das Quecksilber und füllt den Heber wieder restlos aus.

Bemerkungen

1. Quecksilberdämpfe sind giftig. Beachte MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!
2. Der Heber wird zwar unter dem Rezipienten nicht in Tätigkeit gesetzt, an der leeren Stelle in der Krümmung des Röhrchens erkennt man aber, daß er nicht funktionsfähig ist.
3. Damit die Glasschale die Öffnung im Luftpumpenteller nicht verschließt, legt man zwei Leisten oder ein Drahtnetz unter.
4. Man lasse die Luft vorsichtig in den Rezipienten strömen, damit der Luftstrom die Versuchsanordnung nicht umstößt.

2.1.17. Selbstanlaufender Heber

Zu Variante a

1. Spitzwinklig gebogenes Glasrohr (∅ etwa 8 mm, Schenkellänge etwa 25 cm) Ⓢ
2. großes Becherglas oder hoher Standzylinder
3. Becherglas (500 ml)

Zu Variante b

Geräte 2. und 3., außerdem

4. selbstanlaufender Heber (nach Abb. 2.1.17./2), Ⓢ
   dazu erforderliches Material:
   Glasrohr (∅ etwa 8 mm, Länge etwa 80 cm)

Zu Variante c

Geräte 2. und 3., außerdem

5. selbstanlaufender Heber (Abb. 2.1.17./3), Ⓢ
   dazu erforderliches Material:
   Glasrohr (∅ etwa 8 mm, Länge etwa 30 cm)
   Glasrohr (∅ etwa 12 mm, Länge etwa 20 cm)

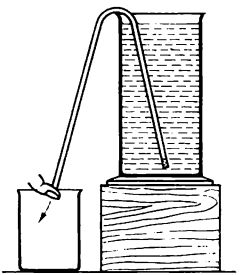


Abb. 2.1.17./1
Spitzwinklig gebogenes Glasrohr als selbstanlaufender Heber

Methodischer Hinweis

Selbstanlaufende Heber dienen in erster Linie zum Abhebern unangenehm schmeckender, übelriechender oder gesundheitsschädigender Flüssigkeiten. In jedem Fall

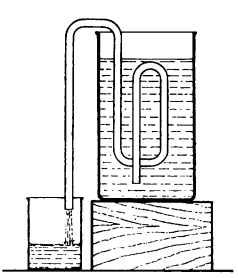


Abb. 2.1.17./2
Selbstanlaufender Heber mit gewundenem Schenkel

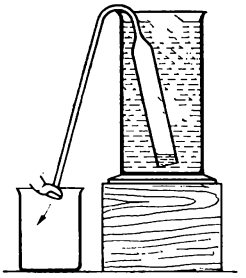


Abb. 2.1.17./3
Selbstanlaufender Heber mit unterschiedlichen Querschnitten

wird die potentielle Energie des Wassers genutzt, die sich beim Einströmen in den eingetauchten Teil des Hebers in kinetische Energie umwandelt, um das selbsttätige Anlaufen zu bewirken.

Variante a

Man verschließt das eine Ende eines Winkelhebers aus Glas mit dem Daumen und taucht sein anderes Ende in ein randvoll mit Wasser gefülltes Becherglas (Abb. 2.1.17./1). Gibt man die Öffnung frei, dann schießt das Wasser im aufsteigenden Schenkel empor, überwindet bei geschickter Ausführung des Experiments die Rohrkrümmung, der Heber beginnt zu fließen.

Variante b

Man biegt ein etwa 80 cm langes Glasrohr über einer Bunsenflamme nach Abbildung 2.1.17./2.
Verschließt man den langen Schenkel des Hebers mit dem Daumen und taucht den gewundenen Teil in ein vollständig gefülltes Gefäß, dann beginnt der Heber nach der Freigabe der äußeren Öffnung von selbst zu fließen.
Beim Füllen des langen, gewundenen Teils der Glasröhre gewinnt das Wasser kinetische Energie, die ausreicht, den gekrümmten Teil der Röhre zu überwinden. Erreicht das Wasser im abwärts führenden Schenkel das Niveau des Wasserspiegels im Gefäß, dann fließt der Heber von selbst weiter.

Variante c

In einer Flamme läßt man ein Ende des dickeren Glasrohres unter ständigem Drehen so weit einlaufen, bis es den Durchmesser des dünneren Rohres erlangt hat. Dann schmilzt man das dünnere Rohr an. Schließlich biegt man das dünne Rohr unter einem spitzen Winkel (Abb. 2.1.17./3). Man verschließt die Öffnung des dünnen Rohres mit dem Daumen und taucht den anderen Schenkel in das Wasser eines fast randvoll gefüllten Gefäßes. Gibt man die Öffnung frei, dann tritt der Heber von selbst in Tätigkeit. Durch die Querschnittsverminderung der Röhre wird nach der Kontinuitätsgleichung die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers erhöht, so daß die kinetische Energie zur Überwindung der Überhöhung des Wasserspiegels ausreicht.

2.1.18. Der Giftheber

1. Giftheber 2. hoher Standzylinder 3. Becherglas

Methodischer Hinweis

Zur Erklärung der Wirkungsweise des Gifthebers bei der Anwendung nach der Abb. 2.1.18./1a wird man die Schüler darauf aufmerksam machen, daß sich beim Eintauchen der gesamte in die Flüssigkeit getauchte Teil des Hebers bis zum Flüssigkeitsspiegel gefüllt hat. Bläst man kurz und kräftig in das Mundstück, dann wird die Flüssigkeit aus dem Blasrohr in das andere Rohr zurückgedrängt. Durch diesen plötzlichen Druckanstieg überwindet die Flüssigkeit die Rohrkrümmung.
Bei der Anwendung nach Abb. 2.1.18./1b kann man sich auf die Vorgänge in V 2.1.12c (Abb. 2.1.12./3) beziehen.

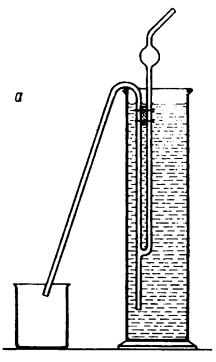


Abb. 2.1.18./1
Giftheber:
a) Benutzung bei hohem Flüssigkeitsstand,
b) Benutzung bei niedrigem Flüssigkeitsstand

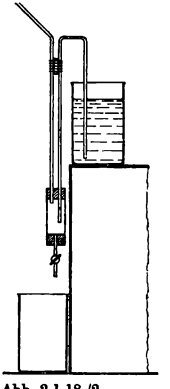


Abb. 2.1.18./2
Modell eines Gifthebers

Versuch

Zum Abhebern gesundheitsschädigender Flüssigkeiten benutzt man den Giftheber. Um seine Wirkungsweise vorzuführen, setzt man ihn in einen mit Wasser randvoll gefüllten Standzylinder. Bläst man einmal kurz in das Mundstück, dann beginnt der Heber zu fließen (Abb. 2.1.18./1a).
Dieses Verfahren versagt, wenn der Standzylinder nicht ganz voll ist. Man benutzt den Giftheber dann so wie in Abbildung 2.1.18./1b. Dazu verschließt man das untere Ende des äußeren Schenkels mit dem Finger und saugt vorsichtig am Mundstück. Hat die Flüssigkeit die Krümmung des Heberrohres überwunden und fließt im äußeren Schenkel abwärts, dann gibt man dessen Öffnung frei. Die kugel-

förmige Erweiterung im Saugrohr schützt davor, daß Flüssigkeit in den Mund gelangt.

Bemerkung

Man kann einen Giftheber behelfsmäßig auch selbst herstellen (Abb. 2.1.18./2). Statt der kugelförmigen Erweiterung hat dieses Modell eine Erweiterung im unteren Teil, die demselben Zweck dient. Das Modell ist mit einem Hahnrohr versehen.

2.1.19. Modell eines Ventilhebers

1. Glasrohr (⌀ etwa 3 cm, Länge 20 cm), an einem Ende konisch verjüngt ⑧
2. Glaskugel
3. zweifach durchbohrter Gummistopfen
4. spitzwinklig gebogenes Glasrohr (Schenkellänge etwa 25 cm)
5. rechtwinklig gebogenes Glasrohr (Schenkellänge etwa 7 cm)
6. großes Becherglas
7. kleines Becherglas

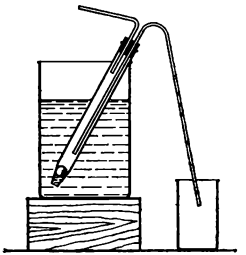


Abb. 2.1.19./1
Modell eines Ventilhebers

Methodischer Hinweis

Auch der Ventilheber eignet sich als Giftheber. Seine Wirkungsweise entspricht der des Gifthebers in der Anwendung nach Abb. 2.1.18./1a. Durch das eingebaute Ventil wirkt er auch noch bei niedrigem Flüssigkeitsstand (vgl. MH V 2.1.18.!).

Versuch

Ein Glasrohr von etwa 3 cm Durchmesser wird in einer Flamme erhitzt und beim Erweichen durch plötzliches Ziehen etwas verengt. Mit einem Glasrohrschneider oder einer Feile trennt man es an der Verengung. Mit diesem Rohr, einem Gummistopfen und zwei entsprechend gebogenen Glasrohren setzt man das Modell eines Ventilhebers zusammen. Als Ventil dient eine Glaskugel (Abb. 2.1.19./1).
Taucht man das Ventilrohr in eine Flüssigkeit, so dringt diese ein und steigt bis zur Höhe der äußeren Flüssigkeitsoberfläche. Bläst man in das kurze Glasrohr, so wird das Ventil geschlossen, die Flüssigkeit wird in das Ausflußrohr getrieben und fließt aus.

Bemerkung

Als Ventilrohr eignet sich auch das Rohr eines Glasmodells einer Handspritze.

Giftige Dämpfe

2.2. Luftdruckmessungen — Barometer und Manometer

2.2.1. Der Torricelli-Versuch — Das Quecksilberbarometer

1. Torricelli-Röhre
2. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
3. Quecksilberwanne
4. Glasschale
5. Meßstab

Methodische Hinweise

1. Viele Lehrer meiden Experimente mit Quecksilber. Vorsicht ist tatsächlich geboten, und man sollte stets überlegen, ob man auch ohne Quecksilberbenutzung auskommen kann. Der Torricelli-Versuch ist von grundlegender Bedeutung, so daß man auf ihn nicht verzichten sollte.
2. Der Luftdruck wird als Schweredruck der Luft erklärt. Man kann ihn mit dem Schweredruck des Wassers vergleichen.

Füllen der Torricelli-Röhre

Die Füllung wird am zweckmäßigsten so vorgenommen, daß sich die Öffnung der aufrecht gestellten Torricelli-Röhre etwa in Brusthöhe befindet. Man legt zu diesem Zweck das Quecksilberbrett auf einen Hocker, klemmt die Torricelli-Röhre mit der Öffnung nach oben lose an ein Stativ und stellt dieses auf das Quecksilberbrett. Mit Hilfe eines Quecksilbertropfers (vgl. 1. Teil, V 2.3.5.), dessen Spitze man in die Öffnung der Torricelli-Röhre einführt, läßt man vorsichtig in einem dünnen Strahl Quecksilber in das Rohr laufen, das man dabei etwas schräg hält (Abb. 2.2.1./1). Man unterbricht die Füllung, sobald die Quecksilbersäule etwa bis auf 1 cm an die Öffnung heranreicht, und löst die Röhre aus ihrer Befestigung. Dabei umfaßt man sie nahe der Öffnung mit der einen Hand und verschließt sie mit dem trockenen und sauberen Daumen. Kehrt man das Rohr nun langsam um, so steigt die noch in der Röhre befindliche Luft als Luftblase nach oben und reißt die noch an der Rohr-

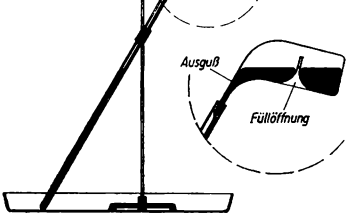


Abb. 2.2.1./1
Füllen eines Torricelli-Rohres

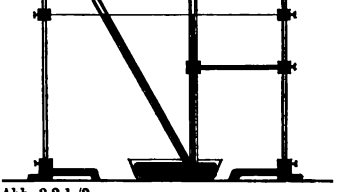


Abb. 2.2.1./2
Versuchsanordnung zum Torricelli-Versuch. Die Höhe der Quecksilbersäule bleibt beim Neigen des Rohres unverändert.

wand haftenden Luftbläschen mit. Diesen Vorgang wiederholt man mehrmals, bis das Quecksilber luftfrei ist. Dann füllt man mit dem Quecksilbertropfer recht behutsam noch so viel Quecksilber nach, bis sich das Quecksilber ein wenig über den Rand der Röhre wölbt.
Nunmehr bringt man die gefüllte Röhre auf den Tisch, wobei man sich von einem Kollegen helfen läßt. Man verschließt dabei die gefüllte Röhre mit dem Zeigefinger, indem man die Fingerkuppe langsam von der Seite her über die Rohröffnung schiebt. Dadurch wird ein Verspritzen des Quecksilbers vermieden. Der helfende Kollege legt das Quecksilberbrett auf den Tisch und stellt eine schon vorher mit Quecksilber gefüllte Quecksilberwanne und das Stativ darauf. Dann kehrt man die Röhre vorsichtig um, taucht bei schräger Lage die Röhrenöffnung in die Quecksilberwanne und entfernt den Finger. Die Röhre wird lotrecht gestellt und an ein Stativ geklemmt. Durch Hin- und Herschieben der Quecksilberwanne zeigt man, daß das Röhrenende frei im Quecksilber hängt.
Die Quecksilbersäule sinkt beim Aufrichten so weit, bis der von ihr ausgeübte Druck gleich dem atmosphärischen Luftdruck ist. Ihre Höhe wird mit einem Meßstab gemessen. Über der Quecksilbersäule hat sich ein luftleerer Raum gebildet, der mit Quecksilberdampf gefüllt ist. Der atmosphärische Luftdruck hält im Mittel einer Quecksilbersäule von 760 mm Höhe das Gleichgewicht.
Man stellt seitlich neben das Stativ ein zweites und spannt zwischen beiden Stativen einen Faden waagerecht und in gleicher Höhe mit dem Quecksilberspiegel in der Torricelli-Röhre aus. Neigt man die Rohre, so bleibt der Quecksilberspiegel unverändert in gleicher Höhe, bis das Quecksilber gegen das verschlossene Röhrenende stößt (Abb. 2.2.1./2).

Ergänzungsversuch

Man hebt das Rohr kurzzeitig so weit, daß etwas Luft in das Rohr eintreten kann. Die eingelassene Luft steigt nach oben. Durch den Druck der eingeschlossenen Luft wird die Quecksilbersäule so weit herabgedrückt, bis wieder Gleichgewicht mit dem äußeren Luftdruck besteht.
Man verschließt das mit Quecksilber gefüllte Rohr wieder mit dem Finger und hebt es aus dem Quecksilber heraus. Die Quecksilberwanne wird durch eine mit Wasser gefüllte Schale ersetzt, in die man die Öffnung der Röhre wieder eintaucht. Gibt man die Öffnung frei, so fließt das Quecksilber in die Schale; das Wasser steigt in der Röhre empor und füllt sie fast ganz aus.

Bemerkung

Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!

2.2.2. Der Guericke-Versuch — Das Wasserbarometer

1. Große Wanne (Länge etwa 1 m)
2. dickwandiger Gummischlauch (lichte Weite etwa 10 mm, Länge 10 m bis 11 m)
3. Glasrohr mit Hahn und Schlauchansatz (äußerer Durchmesser etwa 12 mm, zum Gummischlauch passend)
4. kräftiger Bindfaden
5. dünnes, festes Seil (Länge etwa 15 m)
6. technisches Meßband (25 m)
7. Wägestück (5 kg)
8. Meßstab

Methodische Hinweise

1. Wenn es die örtlichen Verhältnisse ermöglichen, sollte man diesen sehr eindrucksvollen Versuch durchführen. Er erweckt das Interesse aller Schüler und prägt sich fest in ihr Gedächtnis ein. Deswegen sollte allerdings auf den Torricellischen Versuch nicht verzichtet werden. Beide Versuche können zum Anlaß genommen werden, zu erörtern, wie in der Geschichte der Naturwissenschaften Erkenntnisse gewonnen wurden. Der Versuch kann dazu beitragen, das Gedenken an Otto von Guericke zu beleben, und dient so auch der staatsbürgerlichen Erziehung.
2. Vergleiche MH V 2.1.3. und MH Nr. 2 V 2.2.1.!

Versuch

Eine etwa 1 m lange Wanne wird im Schacht eines Treppenhauses oder im Freien an der Fensterseite des Schulgebäudes aufgestellt und etwa zu drei Vierteln mit Wasser gefüllt. Ein 10 m langer Gummischlauch mit einer lichten Weite von 10 mm wird neben dem Behälter ausgelegt. Unter dauerndem Auspressen der Luft aus dem Schlauch zieht man diesen über den Rand des Behälters in das Wasser, so daß er sich luftfrei mit Wasser füllt. Ein etwa 1 m langes Glasrohr mit Schlauchansatz und dichtschließendem Hahn wird bei geöffnetem Hahn schräg in das Wasser geschoben. Hat sich das Rohr luftfrei mit Wasser gefüllt, so schließt man den Hahn und steckt unter Wasser den Schlauchansatz des Rohres in den Schlauch. Das Schlauchende wird mehrfach mit Schnur umwunden und fest verknüpft, so daß sich der Schlauch nicht vom Schlauchansatz lösen kann.

Aus einer Höhe von 10 m wird das Ende eines dünnen festen Seils herabgelassen und unterhalb des Glasrohres am Gummischlauch befestigt. Das freie Ende des Schlauches beschwert man durch das angebundene Wägestück und hält es während des Versuchs unter den Wasserspiegel des Gefäßes. Das andere Ende zieht man so weit hoch, bis sich in der nach oben gerichteten Glasröhre eine freie Wasseroberfläche zeigt. Der Schlauch und die Glasröhre werden am Treppengeländer festgebunden (Abb. 2.2.2./1). Mit Hilfe eines Meßbandes wird die Höhe der Wassersäule gemessen. Sie beträgt je nach den örtlichen Luftdruckverhältnissen etwa 10,3 m. Man kann den Versuch noch dadurch vervollständigen, daß man am Glasrohr einen Meßstab anbringt und in Zeitabständen von etwa 6 Stunden den Stand der Wassersäule feststellen läßt. Es wird dabei deutlich, daß das Wasserbarometer empfindlicher ist als das Quecksilberbarometer.

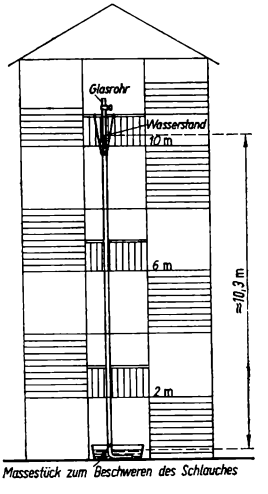


Abb. 2.2.2./1
In einem Treppenhaus aufgestelltes Wasserbarometer

Giftige Dämpfe

2.2.3. Modell eines Huygensschen Kontrabarometers

1. Torricelli-Röhre
2. zylindrischer Hahntrichter
3. Verbindungsschlauch (Länge etwa 15 cm)
4. Gummistopfen, zum Hahntrichter passend
5. Kapillarrohr (lichte Weite 1 mm, Länge etwa 80 cm)
6. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
7. dünner Gummischlauch, auf das Kapillarrohr passend
8. Fluoreszein oder anderer Farbstoff

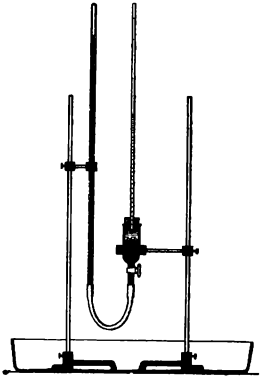


Abb. 2.2.3./1
Versuchsanordnung zum Huygensschen Kontrabarometer

Methodischer Hinweis

Das Huygenssche Kontrabarometer ist eine der in Wetterstationen als Stationsbarometer benutzte Ausführungsform des Quecksilberbarometers. Die große Ablesegenauigkeit und die Empfindlichkeit beruhen auf der Verwendung eines Kapillarrohres als Anzeigerohr. Zur Wirkungsweise vergleiche V 1.2.7.!

Versuchsanordnung

Das offene Ende eines Torricellischen Rohres wird durch einen etwa 15 cm langen Gummischlauch mit einem zylindrischen Hahntrichter verbunden. Die so verbundenen Rohre werden über einem Quecksilberbrett mit Quecksilber gefüllt. Steht das eingefüllte Quecksilber dicht über dem Hahn, so schließt man ihn. Beide Rohrteile klemmt man nach Abb. 2.2.3./1 in vertikaler Stellung an zwei Stative. Dann öffnet man den Glashahn. Das Quecksilber sinkt in der Torricelli-Röhre und füllt den Trichter, bis der Druck der Quecksilbersäule mit dem äußeren Luftdruck im Gleichgewicht steht. Man löst den Trichter vorübergehend vom Stativ und gießt so viel Quecksilber aus, bis der Quecksilberspiegel im Trichter auf die halbe Höhe des Trichterrohres gesunken ist.

Versuch

Man füllt den Trichter oberhalb des Quecksilbers mit einer gefärbten Flüssigkeit und verschließt ihn mit einem durchbohrten Gummistopfen, in dem ein etwa 80 cm langes Kapillarrohr steckt. Die Flüssigkeit steigt beim Eindrücken des Stopfens in den Trichter bis zur halben Höhe des Kapillarrohres. Wesentlich kleinere oder größere Steighöhen sind durch Zugabe oder Abnahme von Flüssigkeit auf den angegebenen Stand abzugleichen. An das freie Ende des Kapillarrohres schließt man einen etwa 50 cm langen Schlauch an.

Bläst man in den Schlauch, so wird dadurch der auf das Barometer wirkende Druck erhöht. Der Flüssigkeitsspiegel im Kapillarrohr sinkt. Der Quecksilberspiegel in der Torricelli-Röhre dagegen steigt. Bei vorsichtigem Saugen kann man das Umgekehrte beobachten. Der Niveauunterschied der Flüssigkeitssäule ist bei gleicher Luftdruckänderung wesentlich größer als der der Quecksilbersäule. Die Niveauunterschiede verhalten sich umgekehrt wie die Querschnitte des Kapillarrohres und der Torricelli-Röhre.

Bemerkungen

1. Beim käuflichen Meßgerät befindet sich die Meßskale zwischen der Torricelli-Röhre und dem Kapillarrohr. Ihre Teilung ist im Verhältnis der Rohrquerschnitte vergrößert und bezieht sich auf den Flüssigkeitsstand in der Kapillare.
2. Als Flüssigkeit eignet sich zum Füllen des Hahntrichters und des Kapillarrohres Wasser, Petroleum oder Toluol.
3. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisungen zum Experimentieren mit Quecksilber!

2.2.4. Modell eines Dosenbarometers

1. Modell eines Dosenbarometers ⑥,
   dazu erforderliches Material:
   kleine Glasschale (Petrischale ∅ etwa 10 cm)
   Zellglasblatt (Einkochfolie)
   Gummistück
   Strohhalme
   Stecknadeln
   kleine Nägel (∅ etwa 2 mm, Länge etwa 3 cm)
   Zwirnfaden
   Haltebrettchen (19 cm × 9 cm × 4 mm)
   Millimeterpapier
   Grundbrettchen (19 cm × 10 cm × 1 cm)
   Alleskleber, Zeichenpapier
2. Kolbenluftpumpe mit Luftpumpenteller
3. Rezipient
4. Luftpumpenfett (Ramsayfett)

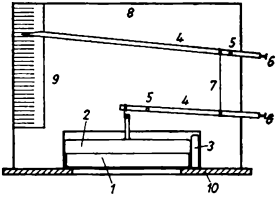


Abb. 2.2.4./1
Modell eines Dosenbarometers

1 Glasschale	6 Nägel
2 Zellglas	7 Zwirnfaden
3 Gummistück	8 Haltebrettchen
4 Strohhalmstücke	9 Millimeterpapier
5 Stecknadeln	10 Grundbrettchen

Methodischer Hinweis

Wenn auch das nachstehend beschriebene Modell in vielen Einzelheiten von den technischen Dosenbarometern abweicht, so vermittelt es doch einen Einblick in die Wirkungsweise dieser Geräte. Die Anfertigung kann auch durch die Schüler erfolgen.
Auf jeden Fall sollte aber der Modellcharakter erörtert werden. Dabei sollen die Schüler erkennen, worin das Modell mit dem Meßgerät übereinstimmt und worin es abweicht.

Herstellen des Modells

Man legt ein auf der Oberseite mit warmem Wasser befeuchtetes Zellglasblatt über die Öffnung einer runden Glasschale mit einem Durchmesser von etwa 95 mm und

drückt es gegen die Wand fest an. Damit die Zellglashaut fest angepreßt wird, klebt man mit wasserunlöslichem Klebstoff aus einem etwa 3 cm breiten Streifen Zeichenpapier einen Ring, dessen Umfang 3 mm zu klein ist, so daß er zunächst nicht um die Schale paßt. Diesen Papierring legt man etwa eine Minute lang in Wasser, trocknet ihn leicht ab und schiebt ihn dann über die mit dem Zellglasblatt bespannte Schale. Beim Trocknen zieht sich der Ring zusammen und preßt das Zellglasblatt luftdicht an die Glasschale. Nachdem das Zellglasblatt und der Papierring gut getrocknet sind, klebt man im Mittelpunkt der Membran ein etwa 1 cm langes Strohhalmstück senkrecht zur Membranebene auf.

Eine durch Druckänderung hervorgerufene Membranbewegung wird mit Hilfe eines aus zwei Strohhalmen bestehenden Hebelsystems angezeigt. Als Drehachsen des Hebelsystems werden Stecknadeln verwendet.

Die dafür in den Strohhalmen erforderlichen Löcher bringt man an den in Abb. 2.2.4./1 ersichtlichen Stellen durch Einbrennen an. Man sticht die kalte Nadel durch den Halm, hält sie an einem Ende mit einer Zange fest und erhitzt sie am anderen Ende behutsam so lange über einer Kerzenflamme, bis der Halm zu sengen anfängt.

Als Träger des Hebelsystems wird ein Brettchen verwendet. Man sägt auf der einen Längsseite, symmetrisch zur Mitte, ein Stück heraus, in das die Schale der Breite nach gerade hineinpaßt, das aber etwas höher ist als die Schale. Sodann leimt und schraubt man das Brettchen senkrecht auf eine Grundplatte, nachdem man aus dieser vorher eine Kreisscheibe herausgesägt hat, deren Durchmesser etwa 2 cm kleiner ist als der der Glasschale (Abb. 2.2.4./1). In die Lücke des Brettchens schiebt man die Schale so weit hinein, daß sich das auf die Membran geklebte Strohhalmstück dicht vor dem Brettchen befindet. Man klemmt die Schale mit einem Gummistückchen am Brettchen fest. An dem Brettchen selbst befestigt man das Hebelsystem entsprechend der Abbildung.

Das lotrechte Strohhalmstück wird mit einem dünnen Zwirnfaden mit dem kurzen Ende des unteren Hebels verbunden. Als Spanngewichtsstück für die Hebel verwendet man zwei Nägel, die man mit etwas Klebstoff in den Strohhalmen befestigt. Die beiden Strohhalme werden durch einen dünnen Faden so miteinander verbunden, daß der als Zeiger dienende obere Strohhalm bei normalem Luftdruck etwa waagerecht steht. Auf das Haltebrettchen wird hinter den Zeiger ein Streifen Millimeterpapier geklebt.

Versuch

Das so hergestellte Modell eines Dosenbarometers wird unter den Rezipienten einer Kolbenluftpumpe gestellt. Verschiebt man den Kolben der Luftpumpe nur um wenige Zentimeter, so bewegt sich der Zeiger über die ganze Skale.

Bemerkung

Das Modell weicht von den gebräuchlichen Dosenbarometern ab, da die Dose nicht evakuiert ist. Infolgedessen ist das Modell gegen Temperaturschwankungen sehr empfindlich. Man kann dies dadurch sichtbar machen, daß man die Glasschale von unten her durch den Ausschnitt des Grundbrettchens leicht erwärmt.

2.2.5. Bestimmung des Luftdrucks mit Hilfe der Meldeschen Röhre [SE]

1. Meldesche Röhre auf Grundbrett mit Millimeterskale (vgl. V 2.3.4.!)

Methodischer Hinweis

Die Meldesche Röhre wird gewöhnlich zur Herleitung des Boyleschen Gesetzes benutzt (vgl. V 2.3.4.!). Die Versuchsbeschreibung zeigt eine Möglichkeit, wie mit Hilfe der Meldeschen Röhre der Luftdruck ermittelt werden kann, wenn man das Boylesche Gesetz als bekannt voraussetzt.

Versuch

Die Meldesche Röhre wird zunächst mit der Röhrenöffnung nach oben lotrecht aufgehängt (Abb. 2.2.5./1a). Man liest die Länge l_1 der eingeschlossenen Luftsäule und die Höhe h der Quecksilbersäule ab. Danach hängt man die Meldesche Röhre so auf, daß die Öffnung nach unten zeigt (Abb. 2.2.5./1b). Die Länge der eingeschlossenen Luftsäule beträgt jetzt l_2, die Höhe der Quecksilbersäule bleibt unverändert. Die Messungen werden mehrmals hintereinander wiederholt und die Mittelwerte von l_1 und l_2 festgestellt.
Nach dem Boyleschen Gesetz ist für die eingeschlossene Luftmenge das Produkt aus Druck und Volumen konstant. Es gilt demnach die Gleichung

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2.$$

Hierin bedeuten, durch Indizes für die beiden Stellungen der Meldeschen Röhre voneinander unterschieden, p den auf der eingeschlossenen Luftsäule lastenden Druck und V ihr Volumen. Bezeichnet man den Druck der Quecksilbersäule der Höhe h mit p_h, so gelten zwischen dem auf der eingeschlossenen Luftsäule lastenden Druck und dem atmosphärischen Luftdruck p_a folgende Beziehungen:

bei Stellung a: $p_1 = p_a + p_h$ bei Stellung b: $p_2 = p_a - p_h$.

Es ist

$$V_1 = A \cdot l_1, \quad V_2 = A \cdot l_2,$$

worin A den Röhrenquerschnitt bezeichnet.
Somit gilt die Gleichung:

$$(p_a + p_h) \cdot A \cdot l_1 = (p_a - p_h) \cdot A \cdot l_2$$

oder

$$(p_a + p_h) \cdot l_1 = (p_a - p_h) \cdot l_2.$$

Für den Luftdruck p_a ergibt sich hieraus

$$p_a = p_h \cdot \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}.$$

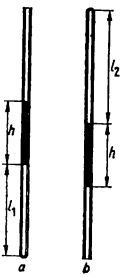


Abb. 2.2.5./1
Meßstellungen der Meldeschen Röhre:
a) Öffnung nach oben,
b) Öffnung nach unten

Da der Gewichtsdruck einer Quecksilbersäule von 1 mm Höhe 133,322 Pa beträgt, kann der herrschende atmosphärische Luftdruck nach der Gleichung

$$p_a = 133{,}322 \frac{\text{Pa}}{\text{mm}} \cdot h \cdot \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}$$

berechnet werden. Die Höhe der Quecksilbersäule ist in Millimeter einzusetzen.

Bemerkung

Durch Temperaturschwankungen während des Meßvorganges können Meßfehler entstehen. Man sollte deshalb die Glasröhre während des Experiments nicht mit der Hand berühren und sie vor Sonneneinstrahlung schützen.

2.2.6. Nachweis der Abhängigkeit des Luftdrucks von der Höhe mit Hilfe eines Variometers

1. Flasche (1 l bis 3 l)
2. Glasröhrchen, zu einer sehr feinen Kapillare ausgezogen
3. rechtwinklig gebogenes Glasrohr (lichte Weite 2 mm bis 3 mm, langer Schenkel 15 cm, kurzer Schenkel 5 cm) ⑤
4. zweifach durchbohrter Gummistopfen
5. dünner weißer Karton
6. Petroleum, Benzol oder Toluol
7. Tiegelzange

Methodischer Hinweis

Variometer dienen zur Anzeige von Druckänderungen. Der Vorzug dieses Experiments ist die Empfindlichkeit der Versuchsanordnung. Schon kleinste Druckunterschiede werden angezeigt, obwohl das Experiment weder an den Geräteaufwand noch an das Experimentiergeschick Anforderungen stellt.
Das Experiment eignet sich sehr gut dazu, die Schüler zum exakten Beobachten zu erziehen und sie die Beschreibung ihrer Beobachtung üben zu lassen. Dabei kann man fordern, daß sie die physikalischen Zusammenhänge zur Erklärung des Vorganges selbst finden.

Versuchsanordnung

Eine Flasche mit einem Inhalt von etwa 1 l bis 3 l wird mit einem doppelt durchbohrten Stopfen verschlossen. In die Bohrungen steckt man ein annähernd rechtwinklig gebogenes Glasrohr mit einer lichten Weite von 3 mm sowie ein zu einer sehr engen Kapillare ausgezogenes kurzes Glasrohr. Der frei stehende Schenkel des gewinkelten Rohres wird vorher über einer Flamme erwärmt und entsprechend Abb. 2.2.6./1 leicht gebogen. In dieses Rohr bringt man einen Tropfen Petroleum, der langsam die tiefste Stelle des Rohres einnimmt. Ein in der Flasche vorhandener Über- oder Unterdruck gleicht sich langsam durch das Kapillarrohr mit dem Außendruck aus.
Zur Bestimmung einer eintretenden Lageveränderung des Tropfens wird hinter dem Glasrohrschenkel ein Kartonstreifen angebracht. Durch vier Einschnitte im

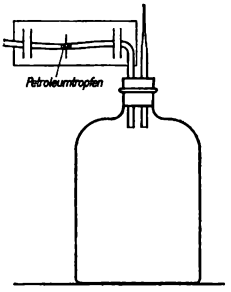


Abb. 2.2.6./1
Variometer

Streifen werden zwei Laschen gebildet, durch die man den Glasrohrschenkel hindurchschiebt.

Versuch 1: Nachweis der Druckänderung bei Höhenänderung

Man stellt die Flasche zunächst auf einen Tisch und wartet, bis der Petroleumtropfen die tiefste Stelle des Rohres eingenommen hat. Dann markiert man diese Stellung auf dem Kartonstreifen. Mit Hilfe einer Tiegelzange hebt man die Flasche etwa einen Meter hoch. Der Tropfen bewegt sich dabei nach dem äußeren Rohrende, da der äußere Luftdruck geringer ist als der Innendruck in der Flasche. Durch das Kapillarrohr erfolgt nur sehr allmählich der Druckausgleich zwischen dem Innendruck und dem äußeren Luftdruck.
Der Tropfen geht langsam in seine Ausgangslage zurück. Nun wird die Flasche auf den Fußboden gestellt. Der Tropfen bewegt sich jetzt auf die Flasche zu. Der äußere Luftdruck ist größer als der Druck in der Flasche.

Versuch 2: Nachweis von Druckwellen

Mit Hilfe des Variometers kann man Druckunterschiede nachweisen, die durch Öffnen oder Schließen einer Tür entstehen und sich als Druckwellen ausbreiten. Besonders eindrucksvoll wird der Versuch, wenn man eine Tür in einem Nebenraum öffnet. Erfolgt das Öffnen oder Schließen dieser für den Schüler unsichtbaren Tür geräuschlos, so kann der Schüler nur aus der Druckanzeige des Variometers auf eine druckändernde Ursache schließen.

Bemerkungen

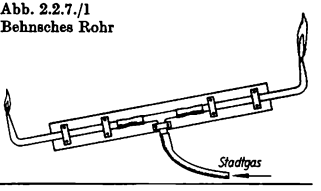
1. Will man Temperatureinflüsse vermeiden, so umwickelt man die Flasche mit Tüchern oder stellt sie in eine passende Kiste, die mit Sägespänen oder Kieselgur angefüllt ist. An Stelle einer gewöhnlichen Flasche kann man auch eine größere Thermosflasche verwenden.
2. Der Tropfen soll möglichst klein sein und sich im Rohr über nicht mehr als 4 mm bis 5 mm erstrecken. Die Empfindlichkeit gegen Druckänderungen wird dadurch gesteigert.
3. Das Kapillarrohr darf nicht zu weit sein, damit der Druckausgleich nicht zu schnell erfolgt.

4. An Stelle des Kapillarrohres kann das Rohr auch mit einem Hahn verschlossen werden. Die Niveauänderungen werden dann bei geschlossenem Hahn durchgeführt. Zum Druckausgleich wird der Hahn vorübergehend geöffnet.
5. Statt Petroleum kann auch Benzol oder Toluol verwendet werden. Man färbt zweckmäßigerweise die Flüssigkeit mit *Drachenblut*, damit auch aus größerer Entfernung die Lageänderung des Tropfens erkannt werden kann.
6. Das Variometer in Flugzeugen arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Die Anzeige erfolgt dort durch eine Membrandose mit Zeigerübertragung. Das Gerät zeigt an, ob das Flugzeug steigt oder sinkt.
7. Einem Höhenunterschied von 1 m entspricht in Erdbodennähe eine Druckdifferenz von etwa 12 Pa.

2.2.7. Nachweis unterschiedlicher Druckdifferenz zwischen Luft und Stadtgas mit dem Behnschen Rohr

1. Behnsches Rohr ⑤,
   dazu erforderliches Material:
   Glasrohr (⌀ 8 mm, Länge 80 cm)
   Gummischlauch, T-Stück
   Holzleiste (60 cm × 4 cm × 5 mm)
   dünnes Blech (zur Herstellung von Schellen)
   kleine Holzschrauben
2. Schlauch für die Gaszufuhr

Abb. 2.2.7./1
Behnsches Rohr



Methodischer Hinweis

Während das Variometer (V 2.2.6.) geringe Druckänderungen anzeigt, kann man mit dem Behnschen Rohr geringe Druckunterschiede nachweisen. Die gleiche Erscheinung kann man auch in mehrstöckigen Wohnhäusern beobachten. Der Druck des Stadtgases scheint in den oberen Stockwerken größer zu sein als in den unteren. Die Erklärungen für diese Erscheinungen können die Schüler selbst finden.

Herstellen des Behnschen Rohres

Die Enden eines etwa 80 cm langen und 8 mm weiten Glasrohres werden über einem Bunsenbrenner erwärmt und zu kurzen spitzen Öffnungen ausgezogen (lichte Weite der Öffnungen etwa 2 mm). Man biegt danach die Enden rechtwinklig um. Das Glasrohr wird in der Mitte durchgeschnitten; zwischen beide Rohrteile wird ein T-Stück eingesetzt, so daß die gewinkelten Rohrenden parallel zueinander stehen (Abb. 2.2.7./1). Das so vorbereitete Rohr wird mit Schellen an einer Holzleiste befestigt. Den frei herausragenden Rohrstutzen des T-Stückes verbindet man durch einen Gasschlauch mit der Stadtgasleitung. Die Gaszufuhr wird am Leitungshahn oder durch einen Quetschhahn geregelt.

Versuch

Bei waagerechter Lage des Rohres strömt das Gas aus beiden Öffnungen gleichmäßig aus. Entzündet man das Gas, so bilden sich an den Ausströmungsstellen zwei

gleich große Flammen. Hebt man das eine Rohrende ein wenig, so wird die höher liegende Flamme größer, während die tiefer liegende Flamme kleiner wird. Das gleiche ist auch zu beobachten, wenn man das eine Rohrende in der gleichen Höhe beläßt und das andere Ende senkt.

Bemerkungen

1. Es ist darauf hinzuweisen, daß durch diesen Versuch nicht unmittelbar die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe nachgewiesen wird; auch der Gasdruck nimmt ab. Da aber Stadtgas eine geringere Dichte hat als Luft, vermindert sich sein Schweredruck nicht in demselben Maße wie der der Luft. Der Überdruck des Stadtgases wird mit zunehmender Höhe größer, und diese Änderung der Druckdifferenz wird beim Versuch wirksam.
2. Damit man bestimmte Druckverhältnisse einstellen kann, klemmt man das Rohr mittels einer Muffe und einer Klemme drehbar an ein Stativ.

2.2.8. Höhenmessungen mit einem Dosenbarometer [SE]

1. Dosenbarometer
2. technisches Meßband (25 m)

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist besonders wirkungsvoll, wenn man größere Höhenunterschiede, wie die Höhe eines Kirchturmes oder Aussichtsturmes, messen kann. Es ist deshalb zweckmäßig, bei Klassenwanderungen, Besichtigung eines Fernsehturmes usw. ein Dosenbarometer mitzunehmen.

Versuch

Man stellt mit Hilfe eines Dosenbarometers den Luftdruck im Keller eines Gebäudes und anschließend auf dem Dachboden des Hauses fest. Man erkennt an den Meßergebnissen die Abnahme des Luftdrucks mit zunehmender Höhe. Da die Luftdruckänderung bei einem Höhenunterschied von 10 m etwa 120 Pa = 12 mbar beträgt, kann man aus dem festgestellten Luftdruckunterschied den Höhenunterschied zwischen den Meßstellen berechnen. Zur Kontrolle des Ergebnisses wird dieser Höhenunterschied mit einem Meßband nachgeprüft.

Bemerkungen

1. Bei der Durchführung des Versuches ist das Barometer während des Ablesens lotrecht zu halten.
2. Infolge der elastischen Nachwirkung des Instruments muß man jedesmal nach Erreichen der Meßstellen einige Minuten mit dem Ablesen warten.
3. Vor dem Ablesen des Meßwertes klopfe man zur Überwindung der Haftreibung leicht an das Glas.
4. Dem Dosen- oder Aneroidbarometer ähneln in ihrer Funktion die Membranmanometer. Man sollte die Schüler auch mit diesen technisch so wichtigen Geräten sowie mit den auf der Bourdonschen Röhre beruhenden Ausführungsformen technischer Manometer vertraut machen. Ein zum Aufsetzen auf den

Luftpumpenteller bestimmtes Modell einer Bourdonschen Röhre wird als Lehrmittel hergestellt. Man sollte auf den Vorzug der linearen Skale hinweisen, den die technischen Manometer haben.

2.2.9. Modellversuch zur Veranschaulichung der Abnahme der Dichte mit zunehmender Höhe in der Erdatmosphäre

Zu Variante a

1. Gerät für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie
   1 Kammer mit Antrieb
   1 Blindschieber
   1 Stufenschieber
   200 Stahlkugeln ∅ 4 mm
2. Experimentiermotor

Zu Variante b

Geräte 1. und 2., außerdem
3. 5 Kugelfänger

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.1.1
2. Mit Hilfe des Modellgases kann qualitativ gezeigt werden, wie die Anzahl der Moleküle mit zunehmender Höhe im Schwerefeld der Erde in ihrer Verteilung abnimmt.

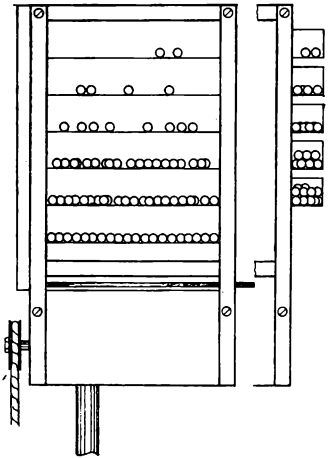


Abb. 2.2.9./1
Gerät für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie:
links: mit eingeschobenem Stufenschieber,
rechts: mit Kugelfängern

Experiment \ Kammer	1	2	3	4	5	6
1	74	45	24	8	1	2
2	75	44	10	12	6	3
3	77	38	19	6	5	3
4	73	42	17	7	3	8
5	74	37	22	8	4	3
$\bar{N}$	75	42	18	8	4	2

Abb. 2.2.9./2
Meßergebnisse von fünf Experimenten

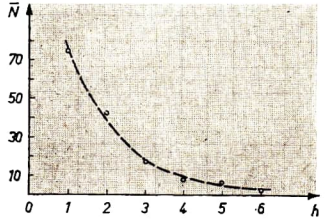


Abb. 2.2.9./3
Grafische Auswertung
des Experiments auf Millimeterpapier

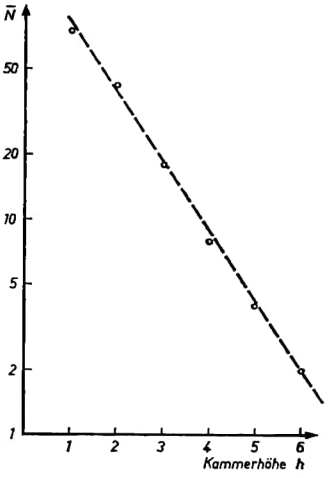


Abb. 2.2.9./4
Grafische Auswertung des Experiments
in halblogarithmischer Darstellung

3. In der quantitativen Auswertung des Experiments erkennt man, daß die Anzahl der in den einzelnen Höhenschichten aufgefangenen Kugeln mit zunehmender Höhe gesetzmäßig abnimmt, ähnlich wie die Teilchendichte in der Erdatmosphäre.

Variante a

In die Kammer werden etwa 200 Stahlkugeln mit dem Durchmesser von 4 mm eingefüllt und der Stufenschieber mit Hilfe des Führungsstabes in die Schlitze der Kammerwand eingeführt, aber noch nicht hineingeschoben. Die Öffnungen in der gegenüberliegenden Kammerwand verschließt man mit dem Blindschieber. Die Schwingungsfrequenz der Bodenplatte soll etwa 2000 min^{-1} betragen.
Kurze Zeit nach der Inbetriebnahme schiebt man den Stufenschieber schnell in die Kammer. Dabei wird das Kammervolumen in sechs Teilvolumen geteilt und die darin befindlichen Kugeln eingefangen (Abb. 2.2.9./1). Danach stellt man den Motor ab und zählt die in den einzelnen Kammerbereichen eingefangenen Kugeln aus. Das Experiment wird vier- bis fünfmal wiederholt, und aus den Einzelmessungen werden Mittelwerte gebildet. Die Ergebnisse werden in eine Tabelle eingetragen (Abb. 2.2.9./2) und grafisch dargestellt (Abb. 2.2.9./3 und 2.2.9./4).

Variante b

An Stelle des Stufenschiebers werden an der gegenüberliegenden Kammerwand fünf Kugelfänger übereinander eingeschoben und der Blindschieber entfernt. Nach

Giftige Dämpfe

2.2.3. Modell eines Huygensschen Kontrabarometers

1. Torricelli-Röhre
2. zylindrischer Hahntrichter
3. Verbindungsschlauch (Länge etwa 15 cm)
4. Gummistopfen, zum Hahntrichter passend
5. Kapillarrohr (lichte Weite 1 mm, Länge etwa 80 cm)
6. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
7. dünner Gummischlauch, auf das Kapillarrohr passend
8. Fluoreszein oder anderer Farbstoff

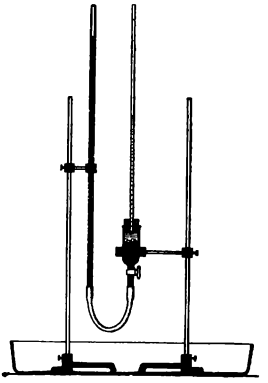


Abb. 2.2.3./1
Versuchsanordnung zum Huygensschen Kontrabarometer

Methodischer Hinweis

Das Huygenssche Kontrabarometer ist eine der in Wetterstationen als Stationsbarometer benutzte Ausführungsform des Quecksilberbarometers. Die große Ablesegenauigkeit und die Empfindlichkeit beruhen auf der Verwendung eines Kapillarrohres als Anzeigerohr. Zur Wirkungsweise vergleiche V 1.2.7.!

Versuchsanordnung

Das offene Ende eines Torricellischen Rohres wird durch einen etwa 15 cm langen Gummischlauch mit einem zylindrischen Hahntrichter verbunden. Die so verbundenen Rohre werden über einem Quecksilberbrett mit Quecksilber gefüllt. Steht das eingefüllte Quecksilber dicht über dem Hahn, so schließt man ihn. Beide Rohrteile klemmt man nach Abb. 2.2.3./1 in vertikaler Stellung an zwei Stative. Dann öffnet man den Glashahn. Das Quecksilber sinkt in der Torricelli-Röhre und füllt den Trichter, bis der Druck der Quecksilbersäule mit dem äußeren Luftdruck im Gleichgewicht steht. Man löst den Trichter vorübergehend vom Stativ und gießt so viel Quecksilber aus, bis der Quecksilberspiegel im Trichter auf die halbe Höhe des Trichterrohres gesunken ist.

Versuch

Man füllt den Trichter oberhalb des Quecksilbers mit einer gefärbten Flüssigkeit und verschließt ihn mit einem durchbohrten Gummistopfen, in dem ein etwa 80 cm langes Kapillarrohr steckt. Die Flüssigkeit steigt beim Eindrücken des Stopfens in den Trichter bis zur halben Höhe des Kapillarrohres. Wesentlich kleinere oder größere Steighöhen sind durch Zugabe oder Abnahme von Flüssigkeit auf den angegebenen Stand abzugleichen. An das freie Ende des Kapillarrohres schließt man einen etwa 50 cm langen Schlauch an.

Bläst man in den Schlauch, so wird dadurch der auf das Barometer wirkende Druck erhöht. Der Flüssigkeitsspiegel im Kapillarrohr sinkt. Der Quecksilberspiegel in der Torricelli-Röhre dagegen steigt. Bei vorsichtigem Saugen kann man das Umgekehrte beobachten. Der Niveauunterschied der Flüssigkeitssäule ist bei gleicher Luftdruckänderung wesentlich größer als der der Quecksilbersäule. Die Niveauunterschiede verhalten sich umgekehrt wie die Querschnitte des Kapillarrohres und der Torricelli-Röhre.

Bemerkungen

1. Beim käuflichen Meßgerät befindet sich die Meßskale zwischen der Torricelli-Röhre und dem Kapillarrohr. Ihre Teilung ist im Verhältnis der Rohrquerschnitte vergrößert und bezieht sich auf den Flüssigkeitsstand in der Kapillare.
2. Als Flüssigkeit eignet sich zum Füllen des Hahntrichters und des Kapillarrohres Wasser, Petroleum oder Toluol.
3. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisungen zum Experimentieren mit Quecksilber!

2.2.4. Modell eines Dosenbarometers

1. Modell eines Dosenbarometers Ⓢ,
   dazu erforderliches Material:
   kleine Glasschale (Petrischale ∅ etwa 10 cm)
   Zellglasblatt (Einkochfolie)
   Gummistück
   Strohhalme
   Stecknadeln
   kleine Nägel (∅ etwa 2 mm, Länge etwa 3 cm)
   Zwirnfaden
   Haltebrettchen (19 cm × 9 cm × 4 mm)
   Millimeterpapier
   Grundbrettchen (19 cm × 10 cm × 1 cm)
   Alleskleber, Zeichenpapier
2. Kolbenluftpumpe mit Luftpumpenteller
3. Rezipient
4. Luftpumpenfett (Ramsayfett)

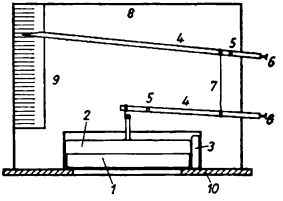


Abb. 2.2.4./1
Modell eines Dosenbarometers

1 Glasschale	6 Nägel
2 Zellglas	7 Zwirnfaden
3 Gummistück	8 Haltebrettchen
4 Strohhalmstücke	9 Millimeterpapier
5 Stecknadeln	10 Grundbrettchen

Methodischer Hinweis

Wenn auch das nachstehend beschriebene Modell in vielen Einzelheiten von den technischen Dosenbarometern abweicht, so vermittelt es doch einen Einblick in die Wirkungsweise dieser Geräte. Die Anfertigung kann auch durch die Schüler erfolgen.
Auf jeden Fall sollte aber der Modellcharakter erörtert werden. Dabei sollen die Schüler erkennen, worin das Modell mit dem Meßgerät übereinstimmt und worin es abweicht.

Herstellen des Modells

Man legt ein auf der Oberseite mit warmem Wasser befeuchtetes Zellglasblatt über die Öffnung einer runden Glasschale mit einem Durchmesser von etwa 95 mm und

drückt es gegen die Wand fest an. Damit die Zellglashaut fest angepreßt wird, klebt man mit wasserunlöslichem Klebstoff aus einem etwa 3 cm breiten Streifen Zeichenpapier einen Ring, dessen Umfang 3 mm zu klein ist, so daß er zunächst nicht um die Schale paßt. Diesen Papierring legt man etwa eine Minute lang in Wasser, trocknet ihn leicht ab und schiebt ihn dann über die mit dem Zellglasblatt bespannte Schale. Beim Trocknen zieht sich der Ring zusammen und preßt das Zellglasblatt luftdicht an die Glasschale. Nachdem das Zellglasblatt und der Papierring gut getrocknet sind, klebt man im Mittelpunkt der Membran ein etwa 1 cm langes Strohhalmstück senkrecht zur Membranebene auf.
Eine durch Druckänderung hervorgerufene Membranbewegung wird mit Hilfe eines aus zwei Strohhalmen bestehenden Hebelsystems angezeigt. Als Drehachsen des Hebelsystems werden Stecknadeln verwendet.
Die dafür in den Strohhalmen erforderlichen Löcher bringt man an den in Abb. 2.2.4./1 ersichtlichen Stellen durch Einbrennen an. Man sticht die kalte Nadel durch den Halm, hält sie an einem Ende mit einer Zange fest und erhitzt sie am anderen Ende behutsam so lange über einer Kerzenflamme, bis der Halm zu sengen anfängt.
Als Träger des Hebelsystems wird ein Brettchen verwendet. Man sägt auf der einen Längsseite, symmetrisch zur Mitte, ein Stück heraus, in das die Schale der Breite nach gerade hineinpaßt, das aber etwas höher ist als die Schale. Sodann leimt und schraubt man das Brettchen senkrecht auf eine Grundplatte, nachdem man aus dieser vorher eine Kreisscheibe herausgesägt hat, deren Durchmesser etwa 2 cm kleiner ist als der der Glasschale (Abb. 2.2.4./1). In die Lücke des Brettchens schiebt man die Schale so weit hinein, daß sich das auf die Membran geklebte Strohhalmstück dicht vor dem Brettchen befindet. Man klemmt die Schale mit einem Gummistückchen am Brettchen fest. An dem Brettchen selbst befestigt man das Hebelsystem entsprechend der Abbildung.
Das lotrechte Strohhalmstück wird mit einem dünnen Zwirnfaden mit dem kurzen Ende des unteren Hebels verbunden. Als Spanngewichtsstück für die Hebel verwendet man zwei Nägel, die man mit etwas Klebstoff in den Strohhalmen befestigt. Die beiden Strohhalme werden durch einen dünnen Faden so miteinander verbunden, daß der als Zeiger dienende obere Strohhalm bei normalem Luftdruck etwa waagerecht steht. Auf das Haltebrettchen wird hinter den Zeiger ein Streifen Millimeterpapier geklebt.

Versuch

Das so hergestellte Modell eines Dosenbarometers wird unter den Rezipienten einer Kolbenluftpumpe gestellt. Verschiebt man den Kolben der Luftpumpe nur um wenige Zentimeter, so bewegt sich der Zeiger über die ganze Skale.

Bemerkung

Das Modell weicht von den gebräuchlichen Dosenbarometern ab, da die Dose nicht evakuiert ist. Infolgedessen ist das Modell gegen Temperaturschwankungen sehr empfindlich. Man kann dies dadurch sichtbar machen, daß man die Glasschale von unten her durch den Ausschnitt des Grundbrettchens leicht erwärmt.

2.2.5. Bestimmung des Luftdrucks mit Hilfe der Meldeschen Röhre [SE]

1. Meldesche Röhre auf Grundbrett mit Millimeterskale (vgl. V 2.3.4.!)

Methodischer Hinweis

Die Meldesche Röhre wird gewöhnlich zur Herleitung des Boyleschen Gesetzes benutzt (vgl. V 2.3.4.!). Die Versuchsbeschreibung zeigt eine Möglichkeit, wie mit Hilfe der Meldeschen Röhre der Luftdruck ermittelt werden kann, wenn man das Boylesche Gesetz als bekannt voraussetzt.

Versuch

Die Meldesche Röhre wird zunächst mit der Röhrenöffnung nach oben lotrecht aufgehängt (Abb. 2.2.5./1a). Man liest die Länge l_1 der eingeschlossenen Luftsäule und die Höhe h der Quecksilbersäule ab. Danach hängt man die Meldesche Röhre so auf, daß die Öffnung nach unten zeigt (Abb. 2.2.5./1b). Die Länge der eingeschlossenen Luftsäule beträgt jetzt l_2, die Höhe der Quecksilbersäule bleibt unverändert. Die Messungen werden mehrmals hintereinander wiederholt und die Mittelwerte von l_1 und l_2 festgestellt.
Nach dem Boyleschen Gesetz ist für die eingeschlossene Luftmenge das Produkt aus Druck und Volumen konstant. Es gilt demnach die Gleichung

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2.$$

Hierin bedeuten, durch Indizes für die beiden Stellungen der Meldeschen Röhre voneinander unterschieden, p den auf der eingeschlossenen Luftsäule lastenden Druck und V ihr Volumen. Bezeichnet man den Druck der Quecksilbersäule der Höhe h mit p_h, so gelten zwischen dem auf der eingeschlossenen Luftsäule lastenden Druck und dem atmosphärischen Luftdruck p_a folgende Beziehungen:

bei Stellung a: $p_1 = p_a + p_h$ bei Stellung b: $p_2 = p_a - p_h$.

Es ist

$$V_1 = A \cdot l_1, \quad V_2 = A \cdot l_2,$$

worin A den Röhrenquerschnitt bezeichnet.
Somit gilt die Gleichung:

$$(p_a + p_h) \cdot A \cdot l_1 = (p_a - p_h) \cdot A \cdot l_2$$

oder

$$(p_a + p_h) \cdot l_1 = (p_a - p_h) \cdot l_2.$$

Für den Luftdruck p_a ergibt sich hieraus

$$p_a = p_h \cdot \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}.$$

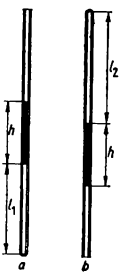


Abb. 2.2.5./1
Meßstellungen der Meldeschen Röhre:
a) Öffnung nach oben,
b) Öffnung nach unten

Da der Gewichtsdruck einer Quecksilbersäule von 1 mm Höhe 133,322 Pa beträgt, kann der herrschende atmosphärische Luftdruck nach der Gleichung

$$p_a = 133{,}322 \frac{\text{Pa}}{\text{mm}} \cdot h \cdot \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}$$

berechnet werden. Die Höhe der Quecksilbersäule ist in Millimeter einzusetzen.

Bemerkung

Durch Temperaturschwankungen während des Meßvorganges können Meßfehler entstehen. Man sollte deshalb die Glasröhre während des Experiments nicht mit der Hand berühren und sie vor Sonneneinstrahlung schützen.

2.2.6. Nachweis der Abhängigkeit des Luftdrucks von der Höhe mit Hilfe eines Variometers

1. Flasche (1 l bis 3 l)
2. Glasröhrchen, zu einer sehr feinen Kapillare ausgezogen
3. rechtwinklig gebogenes Glasrohr (lichte Weite 2 mm bis 3 mm, langer Schenkel 15 cm, kurzer Schenkel 5 cm) B
4. zweifach durchbohrter Gummistopfen
5. dünner weißer Karton
6. Petroleum, Benzol oder Toluol
7. Tiegelzange

Methodischer Hinweis

Variometer dienen zur Anzeige von Druckänderungen. Der Vorzug dieses Experiments ist die Empfindlichkeit der Versuchsanordnung. Schon kleinste Druckunterschiede werden angezeigt, obwohl das Experiment weder an den Geräteaufwand noch an das Experimentiergeschick Anforderungen stellt.
Das Experiment eignet sich sehr gut dazu, die Schüler zum exakten Beobachten zu erziehen und sie die Beschreibung ihrer Beobachtung üben zu lassen. Dabei kann man fordern, daß sie die physikalischen Zusammenhänge zur Erklärung des Vorganges selbst finden.

Versuchsanordnung

Eine Flasche mit einem Inhalt von etwa 1 l bis 3 l wird mit einem doppelt durchbohrten Stopfen verschlossen. In die Bohrungen steckt man ein annähernd rechtwinklig gebogenes Glasrohr mit einer lichten Weite von 3 mm sowie ein zu einer sehr engen Kapillare ausgezogenes kurzes Glasrohr. Der frei stehende Schenkel des gewinkelten Rohres wird vorher über einer Flamme erwärmt und entsprechend Abb. 2.2.6./1 leicht gebogen. In dieses Rohr bringt man einen Tropfen Petroleum, der langsam die tiefste Stelle des Rohres einnimmt. Ein in der Flasche vorhandener Über- oder Unterdruck gleicht sich langsam durch das Kapillarrohr mit dem Außendruck aus.
Zur Bestimmung einer eintretenden Lageveränderung des Tropfens wird hinter dem Glasrohrschenkel ein Kartonstreifen angebracht. Durch vier Einschnitte im

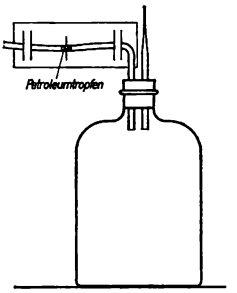


Abb. 2.2.6./1
Variometer

Streifen werden zwei Laschen gebildet, durch die man den Glasrohrschenkel hindurchschiebt.

Versuch 1: Nachweis der Druckänderung bei Höhenänderung

Man stellt die Flasche zunächst auf einen Tisch und wartet, bis der Petroleumtropfen die tiefste Stelle des Rohres eingenommen hat. Dann markiert man diese Stellung auf dem Kartonstreifen. Mit Hilfe einer Tiegelzange hebt man die Flasche etwa einen Meter hoch. Der Tropfen bewegt sich dabei nach dem äußeren Rohrende, da der äußere Luftdruck geringer ist als der Innendruck in der Flasche. Durch das Kapillarrohr erfolgt nur sehr allmählich der Druckausgleich zwischen dem Innendruck und dem äußeren Luftdruck.
Der Tropfen geht langsam in seine Ausgangslage zurück. Nun wird die Flasche auf den Fußboden gestellt. Der Tropfen bewegt sich jetzt auf die Flasche zu. Der äußere Luftdruck ist größer als der Druck in der Flasche.

Versuch 2: Nachweis von Druckwellen

Mit Hilfe des Variometers kann man Druckunterschiede nachweisen, die durch Öffnen oder Schließen einer Tür entstehen und sich als Druckwellen ausbreiten. Besonders eindrucksvoll wird der Versuch, wenn man eine Tür in einem Nebenraum öffnet. Erfolgt das Öffnen oder Schließen dieser für den Schüler unsichtbaren Tür geräuschlos, so kann der Schüler nur aus der Druckanzeige des Variometers auf eine druckändernde Ursache schließen.

Bemerkungen

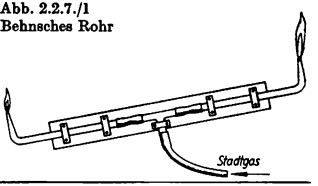
1. Will man Temperatureinflüsse vermeiden, so umwickelt man die Flasche mit Tüchern oder stellt sie in eine passende Kiste, die mit Sägespänen oder Kieselgur angefüllt ist. An Stelle einer gewöhnlichen Flasche kann man auch eine größere Thermosflasche verwenden.
2. Der Tropfen soll möglichst klein sein und sich im Rohr über nicht mehr als 4 mm bis 5 mm erstrecken. Die Empfindlichkeit gegen Druckänderungen wird dadurch gesteigert.
3. Das Kapillarrohr darf nicht zu weit sein, damit der Druckausgleich nicht zu schnell erfolgt.

4. An Stelle des Kapillarrohres kann das Rohr auch mit einem Hahn verschlossen werden. Die Niveauänderungen werden dann bei geschlossenem Hahn durchgeführt. Zum Druckausgleich wird der Hahn vorübergehend geöffnet.
5. Statt Petroleum kann auch Benzol oder Toluol verwendet werden. Man färbt zweckmäßigerweise die Flüssigkeit mit *Drachenblut*, damit auch aus größerer Entfernung die Lageänderung des Tropfens erkannt werden kann.
6. Das Variometer in Flugzeugen arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Die Anzeige erfolgt dort durch eine Membrandose mit Zeigerübertragung. Das Gerät zeigt an, ob das Flugzeug steigt oder sinkt.
7. Einem Höhenunterschied von 1 m entspricht in Erdbodennähe eine Druckdifferenz von etwa 12 Pa.

2.2.7. Nachweis unterschiedlicher Druckdifferenz zwischen Luft und Stadtgas mit dem Behnschen Rohr

1. Behnsches Rohr ⑧,
   dazu erforderliches Material:
   Glasrohr (⌀ 8 mm, Länge 80 cm)
   Gummischlauch, T-Stück
   Holzleiste (60 cm × 4 cm × 5 mm)
   dünnes Blech (zur Herstellung von Schellen)
   kleine Holzschrauben
2. Schlauch für die Gaszufuhr

Abb. 2.2.7./1
Behnsches Rohr



Methodischer Hinweis

Während das Variometer (V 2.2.6.) geringe Druckänderungen anzeigt, kann man mit dem Behnschen Rohr geringe Druckunterschiede nachweisen. Die gleiche Erscheinung kann man auch in mehrstöckigen Wohnhäusern beobachten. Der Druck des Stadtgases scheint in den oberen Stockwerken größer zu sein als in den unteren. Die Erklärungen für diese Erscheinungen können die Schüler selbst finden.

Herstellen des Behnschen Rohres

Die Enden eines etwa 80 cm langen und 8 mm weiten Glasrohres werden über einem Bunsenbrenner erwärmt und zu kurzen spitzen Öffnungen ausgezogen (lichte Weite der Öffnungen etwa 2 mm). Man biegt danach die Enden rechtwinklig um. Das Glasrohr wird in der Mitte durchgeschnitten; zwischen beide Rohrteile wird ein T-Stück eingesetzt, so daß die gewinkelten Rohrenden parallel zueinander stehen (Abb. 2.2.7./1). Das so vorbereitete Rohr wird mit Schellen an einer Holzleiste befestigt. Den frei herausragenden Rohrstutzen des T-Stückes verbindet man durch einen Gasschlauch mit der Stadtgasleitung. Die Gaszufuhr wird am Leitungshahn oder durch einen Quetschhahn geregelt.

Versuch

Bei waagerechter Lage des Rohres strömt das Gas aus beiden Öffnungen gleichmäßig aus. Entzündet man das Gas, so bilden sich an den Ausströmungsstellen zwei

gleich große Flammen. Hebt man das eine Rohrende ein wenig, so wird die höher liegende Flamme größer, während die tiefer liegende Flamme kleiner wird. Das gleiche ist auch zu beobachten, wenn man das eine Rohrende in der gleichen Höhe beläßt und das andere Ende senkt.

Bemerkungen

1. Es ist darauf hinzuweisen, daß durch diesen Versuch nicht unmittelbar die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe nachgewiesen wird; auch der Gasdruck nimmt ab. Da aber Stadtgas eine geringere Dichte hat als Luft, vermindert sich sein Schweredruck nicht in demselben Maße wie der der Luft. Der Überdruck des Stadtgases wird mit zunehmender Höhe größer, und diese Änderung der Druckdifferenz wird beim Versuch wirksam.
2. Damit man bestimmte Druckverhältnisse einstellen kann, klemmt man das Rohr mittels einer Muffe und einer Klemme drehbar an ein Stativ.

2.2.8. Höhenmessungen mit einem Dosenbarometer [SE]

1. Dosenbarometer
2. technisches Meßband (25 m)

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist besonders wirkungsvoll, wenn man größere Höhenunterschiede, wie die Höhe eines Kirchturmes oder Aussichtsturmes, messen kann. Es ist deshalb zweckmäßig, bei Klassenwanderungen, Besichtigung eines Fernsehturmes usw. ein Dosenbarometer mitzunehmen.

Versuch

Man stellt mit Hilfe eines Dosenbarometers den Luftdruck im Keller eines Gebäudes und anschließend auf dem Dachboden des Hauses fest. Man erkennt an den Meßergebnissen die Abnahme des Luftdrucks mit zunehmender Höhe. Da die Luftdruckänderung bei einem Höhenunterschied von 10 m etwa 120 Pa = 12 mbar beträgt, kann man aus dem festgestellten Luftdruckunterschied den Höhenunterschied zwischen den Meßstellen berechnen. Zur Kontrolle des Ergebnisses wird dieser Höhenunterschied mit einem Meßband nachgeprüft.

Bemerkungen

1. Bei der Durchführung des Versuches ist das Barometer während des Ablesens lotrecht zu halten.
2. Infolge der elastischen Nachwirkung des Instruments muß man jedesmal nach Erreichen der Meßstellen einige Minuten mit dem Ablesen warten.
3. Vor dem Ablesen des Meßwertes klopfe man zur Überwindung der Haftreibung leicht an das Glas.
4. Dem Dosen- oder Aneroidbarometer ähneln in ihrer Funktion die Membranmanometer. Man sollte die Schüler auch mit diesen technisch so wichtigen Geräten sowie mit den auf der Bourdonschen Röhre beruhenden Ausführungsformen technischer Manometer vertraut machen. Ein zum Aufsetzen auf den

einer Versuchsdauer von 20 s werden die in den einzelnen Höhenbereichen ausgeworfenen Kugeln ausgezählt. Die Auswertung erfolgt wie in der Variante a.

Bemerkungen

1. Man kann das Experiment auch mit anderen Erregerfrequenzen wiederholen.
2. Zum Entleeren der Kammer benutzt man die Fangmulde (vgl. MB 3.0.1.).



2.2.10. Messen niedriger Drücke mit Hilfe eines verkürzten Barometers

1. Manometerrohr mit Hahn
2. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
3. Meßstab oder Lineal mit Millimeterteilung
4. Vakuumschlauch
5. Luftpumpe
6. Glasschliffstück mit Schlauchansatz für die Luftpumpe

Methodische Hinweise

1. Bei der Ausführung dieses Experiments kann man mit den Schülern über die zweckmäßige Auswahl von Meßgeräten in bezug auf Meßverfahren, Meßbereich und geforderte oder zu erwartende Meßgenauigkeit sprechen.
2. Als Anwendungsbeispiel vergleiche V 2.5.3.!

Vorbereiten des Gerätes

Man verwendet zu diesem Versuch ein U-förmig gebogenes Glasrohr, dessen Schenkellänge etwa 30 cm beträgt und bei dem das eine Schenkelende durch einen Hahn verschlossen ist. Damit das Rohr gegen Beschädigungen unempfindlich wird, klemmt man einen an beiden Enden ausgekehlten Holzklotz zwischen die Rohrschenkel und umwindet die Rohrschenkel an dieser Stelle mehrfach mit Bindfaden oder befestigt das Manometerrohr mit Schellen auf einem Grundbrett.

Man füllt das U-Rohr bei geöffnetem Hahn über dem Quecksilberbrett in lotrechter Lage bis wenig über die Hälfte mit Quecksilber und neigt das Rohr so weit zur Seite, daß etwas Quecksilber durch den Hahn tritt. In dieser Stellung wird der Hahn geschlossen und das Rohr in lotrechter Lage an ein Stativ geklemmt (Abb. 2.2.10./1).

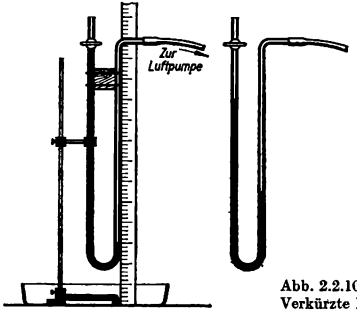


Abb. 2.2.10./1
Verkürzte Barometer

Versuch

Verbindet man den offenen Schenkel mit Hilfe eines Vakuumschlauches mit einer Luftpumpe und evakuiert, so senkt sich das Quecksilber in dem geschlossenen Schenkel, sobald der Druck unter den Gewichtsdruck des Quecksilbers sinkt. In dem anderen Schenkel steigt das Quecksilber entsprechend. Mit Hilfe eines dahinter gestellten Meßstabes kann man den Niveauunterschied des Quecksilbers in beiden Schenkeln wie bei einem Heberbarometer bestimmen. Der Druck einer Quecksilbersäule von 1 mm Höhe beträgt 133,322 Pa.

Bemerkungen

1. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisungen zum Experimentieren mit Quecksilber!
2. Nach Beendigung der Messung vermeide man ein zu plötzliches Einströmen der Luft in das Manometer. Das Quecksilber schnellt sonst in dem leeren Schenkel empor. Dabei kann der Glashahn zerbrechen und das Quecksilber herausspritzen. Der Versuch ist über einem Quecksilberbrett auszuführen.
3. Eine Abart des verkürzten Barometers ist die sogenannte Barometerprobe, die man unter den Rezipienten stellt und zum Messen des Druckes in diesem verwendet.
4. Als Luftpumpe eignet sich auch eine Wasserstrahlpumpe.
5. Zur Messung des Druckes unter einem Rezipienten verbindet man das Manometer durch einen Druckschlauch mit einem Tubus, der oben an Stelle des Knaufes am Rezipienten angebracht ist.

2.2.11. Das geschlossene Manometer — Bestimmung des Druckes in einer Wasserleitung

1. Geschlossenes Manometer ®,
   dazu erforderliches Material:
   dickwandiges Glasrohr (∅ 8 mm, Länge 75 cm)
2. Druckschlauch
3. Millimeterpapier, dicker Bindfaden

Methodischer Hinweis

Da es sich bei diesem Experiment um das Messen eines hohen Druckes handelt, bietet sich die Gelegenheit, auf den Vorteil einzugehen, den technische Manometer gegenüber Glasmanometern besitzen. Neben der größeren Betriebssicherheit wird man auf den Vorzug der linearen Skale hinweisen. Vgl. V 2.2.8., Bemerkung 4!

Versuchsanordnung

An das eine Ende eines etwa 75 cm langen Glasrohres, mit einem Durchmesser von etwa 8 mm, bläst man zwei Schlaucholiven an und schmilzt das andere Ende zu. Das Rohr wird über einem Schlitzbrenner U-förmig so gebogen, daß die Länge des geschlossenen Schenkels etwa 40 cm beträgt. Den offenen Schenkel biegt man in der Hälfte seiner Länge im rechten Winkel nach außen. Man füllt so viel Wasser in das U-Rohr, bis im geschlossenen Schenkel eine Luftsäule mit einer Länge von etwa 30 cm eingeschlossen ist. Über den olivenförmigen Ansatz des offenen Schenkels

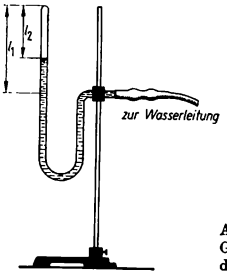


Abb. 2.2.11./1
Geschlossenes Manometer zum Messen des Druckes einer Wasserleitung

schiebt man das eine Ende eines zur Wasserleitung führenden Druckschlauches. In das andere Ende des Schlauches steckt man einen Schraubansatz, der auf einen mit Gewinde versehenen Wasserhahn paßt. Beide Schlauchenden werden fest mit Bindfaden umwickelt. Der Schraubansatz wird an den Leitungshahn geschraubt und das als Manometer wirkende U-förmig gebogene Glasrohr so an ein Stativ geklemmt, daß der Wasserspiegel im geschlossenen Schenkel annähernd in der Höhe des Wasserhahns liegt (Abb. 2.2.11./1).

Versuch

Nachdem man zunächst noch einmal vorübergehend den Schraubansatz gelockert hat, um einen etwa vorhandenen Überdruck auszugleichen, mißt man die Länge l_1 der eingeschlossenen Luftsäule und schraubt dann den Ansatz fest. Der Wasserhahn wird sehr vorsichtig geöffnet. Man mißt die Länge l_2 der zusammengepreßten Luftsäule, schließt den Hahn und mißt nach der Trennung des Schraubansatzes zur Kontrolle die Länge l_1 noch einmal.

Auswertung

Bei geschlossenem Leitungshahn steht die eingeschlossene Luftsäule, deren Volumen V_1 sei, unter dem Luftdruck p_1. Bei geöffnetem Hahn wirkt zusätzlich der Wasserdruck p auf die eingeschlossene Luftsäule und verringert ihr Volumen auf das Volumen V_2. Nach dem Boyleschen Gesetz ist

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad \text{oder} \quad p_1 \cdot A \cdot l_1 = p_2 \cdot A \cdot l_2,$$

worin A den Querschnitt des Rohres bedeutet. Es folgt daraus

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{l_1}{l_2}.$$

Vernachlässigt man die atmosphärischen Luftdruckschwankungen, dann kann man $p_1 = 10^5$ Pa setzen. Dadurch erhält man für den Druck des Wassers die vereinfachte Gleichung

$$p_2 = 10^5 \text{ Pa} \cdot \frac{l_1}{l_2}.$$

2.2.12. Das offene Manometer — Messen des Druckes in einer Stadtgasleitung [SE]

Zu Variante a

1. Offenes Manometer mit Wasserfüllung
2. T-Stück
3. Quetschhahn
4. Schlauch

Zu Variante b

Gerät 4., außerdem
5. Glasrohr (⌀ 8 mm, Länge 15 cm)
6. kleiner Gummiring
7. Becherglas

Methodische Hinweise

1. Bei der Ausführung dieses Versuches wird man darauf hinweisen, daß man mit einem offenen Manometer mit Wasserfüllung nur geringe Drücke messen kann.
2. Bei der Erklärung der Wirkungsweise des offenen Manometers ist zu beachten, daß es die Differenz zwischen dem zu messenden Druck und dem Luftdruck anzeigt.

Variante a: Messung mit einem offenen U-Rohr-Manometer

Das U-Rohr-Manometer wird zur Hälfte bzw. bis zur Nullmarke mit Wasser gefüllt. Man schließt es über ein T-Stück an die Stadtgasleitung an. Der freie Schenkel des T-Stücks wird mit einem Schlauchstück und einem Quetschhahn verschlossen. Öffnet man den Quetschhahn, dann erfolgt Druckausgleich, das Wasser steht in beiden Schenkeln des U-Rohres gleich hoch. Öffnet man bei geschlossenem Quetschhahn die Gaszufuhr, dann kann man aus dem Höhenunterschied der Wasserober-

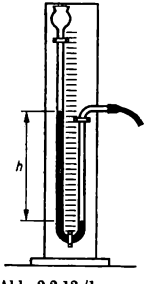


Abb. 2.2.12./1
Offenes U-Rohr-Manometer

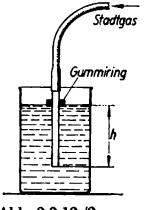


Abb. 2.2.12./2
Messen des Überdruckes in der Stadtgasleitung mit einem in Wasser getauchten Glasröhrchen

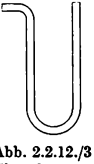


Abb. 2.2.12./3
Glasrohr, als U-Rohr-Manometer gebogen

flächen (Abb. 2.2.12./1) den Überdruck in der Stadtgasleitung berechnen. Einer Wassersäule von 1 mm Höhe entspricht ein Druck von 9,81 Pa.
Der Höhenunterschied der Wasseroberflächen beträgt gewöhnlich etwa 40 mm bis 70 mm. Somit ergibt sich ein Gasdruck von etwa 400 Pa bis 700 Pa.

Variante b: Verwendung eines geraden Glasrohres als Manometer

Man schiebt über das eine Ende eines etwa 15 cm langen Glasrohres einen mit der Gasleitung verbundenen Gummischlauch. Über das andere Ende streift man einen schmalen Gummiring. Das Rohr wird lotrecht in ein mit Wasser gefülltes Becherglas getaucht und so weit gesenkt oder gehoben, daß das im Rohr befindliche Gas das eingedrungene Wasser gerade bis zum unteren Rand des Rohres drückt (Abb. 2.2.12./2). Den auf dem Glasrohr befindlichen Gummiring verschiebt man, bis er den äußeren Wasserspiegel berührt. Nachdem man das Rohr aus dem Wasser gezogen hat, mißt man die Entfernung zwischen dem Gummiring und dem freien Rohrende. Die Rohrlänge gibt den Höhenunterschied der Wasseroberflächen an. Den Überdruck in der Gasleitung berechnet man wie in der Variante a.

Bemerkung

Ein offenes U-Rohr-Manometer kann man auch selbst herstellen, indem man ein etwa 75 cm langes Glasrohr mit einer lichten Weite von etwa 8 mm nach der Abbildung 2.2.12./3 biegt.

2.2.13. Messen sehr geringer Drücke mit einem Mikromanometer

1. Mikromanometer ⑧,
   dazu erforderliches Material:
   Flasche mit seitlichem Tubus
   Glasrohr (lichte Weite 2 mm, Länge 40 cm)
   Brettchen (40 cm × 6 cm × 1 cm)
   Sperrholzbrettchen (35 cm × 5 cm × 3 mm)
   Holzklotz (4 cm × 4 cm × 8 cm)
   Schraube mit Flügelmutter
   prismatischer Holzklotz
   zwei durchbohrte Gummistopfen
   zwei kurze Glasröhrchen
   Verbindungsschlauch
   Millimeterpapier
   dünnes Blech zur Herstellung der Schellen
2. Verbindungsschlauch

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 2.2.11.!
2. Diese Beschreibung dient nur der Erklärung der Wirkungsweise des Mikromanometers. Man benutzt es zur Messung sehr geringer Drücke (vgl. Bemerkung 1.!).

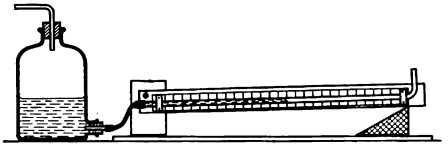


Abb. 2.2.13./1
Mikromanometer mit verstellbarer Meßempfindlichkeit

Herstellen des Gerätes

Auf ein etwa 40 cm langes Brettchen leimt und nagelt man an einem Ende einen aufrecht stehenden Vierkantklotz und befestigt an diesem drehbar ein Sperrholzbrettchen an einem seiner Enden. Das freie Ende dieses Brettchens ruht auf einem Holzdreikant.

Auf dem Sperrholzbrettchen wird parallel zu seinen Längsseiten eine etwa 40 cm lange Glasröhre mit einer lichten Weite von 2 mm mit zwei Rohrschellen befestigt, nachdem man vorher einen 20 mm breiten Streifen aus Millimeterpapier auf das Brettchen geklebt hat. Verschiebt man den Holzdreikant, so ändert sich die Steigung der Röhre und damit die Empfindlichkeit des Manometers (Abb. 2.2.13./1). Der obere und der seitliche Tubus einer Flasche werden mit durchbohrten Gummistopfen verschlossen, in die kurze Glasröhrchen luftdicht eingepaßt sind. Das Rohr des seitlichen Tubus wird mit Hilfe eines weichen Gummischlauchs mit dem am Drehpunkt der Brettchen liegenden Ende des Manometerrohres verbunden.

Man füllt die Flasche so hoch mit Wasser, daß bei sehr geringer Neigung des Rohres etwa ein Viertel der Glasröhre mit Wasser gefüllt ist. Wirkt durch den Tubus der Flasche auf den Wasserspiegel in der Flasche ein auch nur wenig erhöhter Druck, so wird ein Teil des Wassers entsprechend dem Druck in der Flasche in das Manometerrohr gedrückt. Die Längenänderung der Wassersäule ist der Druckänderung proportional.

Bemerkungen

1. Anwendungsmöglichkeiten des Mikromanometers sind u. a. Druckmessungen am Tragflügelprofil in der Aerodynamik, Druckmessungen an der Venturidüse und am Prandtlschen Staurohr, Messung des Unterdrucks am Zerstäuber, Messung des Druckes in einer Seifenblase.
2. Sollen Druckdifferenzen gemessen werden (z. B. an der Venturidüse), dann steckt man den einen Anschlußschlauch an das Röhrchen am Flaschenhals und den anderen an das freie Ende des Manometerrohres.
3. Man kann ein behelfsmäßiges Mikromanometer so herstellen, daß man das Manometerrohr rechtwinklig biegt und direkt in den Gummistopfen des seitlichen Tubus steckt. Die Skale, ein Streifen Millimeterpapier, wird so befestigt wie die dünne Pappe in V 2.2.6.
4. Um Messungen durchzuführen, muß man den Neigungswinkel α des Manometerrohres bestimmen. Bezeichnet man die Längenzunahme der Flüssigkeitssäule im Manometerrohr mit Δl, so ist die Höhenzunahme

   $$\Delta h = \Delta l \cdot \sin\alpha.$$

   Verwendet man als Manometerflüssigkeit Wasser, dann entspricht einer Höhenzunahme Δh von 1 mm eine Zunahme des Druckes um etwa 10 Pa.

Giftige Dämpfe

2.3. Das Boylesche Gesetz

2.3.1. Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines ungleichschenkligen U-Rohres

1. Gerät zur Herleitung des Boyleschen Gesetzes
2. Quecksilber, Quecksilberbrett, Quecksilberzange, Quecksilbertropfer, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
3. Quecksilberbarometer

Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment zur Herleitung des Boyleschen Gesetzes ist wohl das bekannteste. Die Versuchsanordnung ist leicht zu übersehen und liefert Meßwerte, die mit hinreichender Genauigkeit das Gesetz erkennen lassen. Der Nachteil der Versuchsanordnung ist der Gebrauch von Quecksilber, das hier unter einem relativ hohen Druck steht. Beim Entleeren des Rohres besteht deshalb die Gefahr, daß Quecksilber verspritzt.
2. Bei der Auswertung des Experiments ist besonderer Wert darauf zu legen, daß die Schüler die funktionale Abhängigkeit des Drucks vom Volumen erkennen. Neben der Tabelle kann dazu auch ein p-V-Diagramm dienen.

Versuch

Das Experiment wird über einem Quecksilberbrett ausgeführt. Der Quecksilberablaßhahn wird geschlossen. Bei geöffnetem Hahn am kurzen U-Rohr-Schenkel wird zunächst so viel Quecksilber eingegossen, daß in beiden Schenkeln Niveaugleichheit im Nullpunkt herrscht. Dann wird der Hahn geschlssen.
Der Druck in der eingeschlossenen Luftsäule ist zunächst gleichodem äußeren Luftdruck, den man mit einem Barometer mißt.
Die Länge l der eingeschlossenen Luftsäule wird an der Millimeterskale abgelesen.
Der auf die eingeschlossene Luftsäule wirkende Druck p wird durch Zugießen von Quecksilber nach und nach vergrößert, so daß die Länge der Luftsäule stufenweise abnimmt (Abb. 2.3.1./1).
Der Gesamtdruck p ist dabei gleich der Summe aus dem atmosphärischen Druck p_1 und dem Schweredruck p_2 der Quecksilbersäule.
Sämtliche Meßwerte werden in einer Tabelle zusammengefaßt. Eine Quecksilbersäule von 1 mm Höhe übt einen Druck von 0,1333 kPa aus.

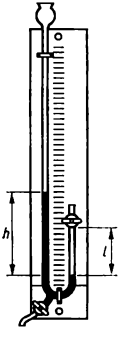


Abb. 2.3.1./1
Ungleichschenkliges U-Rohr zum Nachweis des Boyleschen Gesetzes

Beispiel für die bei einer Meßreihe ermittelten Meßwerte

Luftdruck $p_1 = 100$ kPa

Quecksilbersäule		Gesamtdruck $p = p_1 + p_2$	Länge der eingeschlossenen Luftsäule l	$p \cdot l$
Höhe h in mm	Schweredruck p_2 in kPa	in kPa	in cm	in kPa · cm
0,0	0,0	100	20,0	$2{,}00 \cdot 10^3$
67,0	8,9	109	18,2	$1{,}98 \cdot 10^3$
153,0	20,4	120	16,5	$1{,}98 \cdot 10^3$
258,0	34,4	134	14,8	$1{,}98 \cdot 10^3$
451,0	60,1	160	12,4	$1{,}98 \cdot 10^3$

Es zeigt sich, daß das Produkt aus dem Gesamtdruck und der Länge der eingeschlossenen Luftsäule annähernd konstant ist. Da bei konstantem Rohrquerschnitt

$$V \sim l$$

ist, ergibt sich aus dem Versuch, daß

$$p \cdot V = \text{konst.}$$

ist.

Bemerkungen

1. In ähnlicher Weise verläuft der Versuch, wenn statt des starren U-Rohres zwei lotrecht in zwei Stative geklemmte Röhren verwendet werden, deren untere Enden durch einen Druckschlauch miteinander verbunden und deren obere Enden mit einem Trichter bzw. einem Hahn versehen sind. Der Schlauch muß so lang sein, daß er ein Heben und Senken der einen Röhre in einem ausreichenden Maße zuläßt. Nachdem man den Schlauch und die Röhren so weit mit Quecksilber gefüllt hat, daß das Quecksilber in beiden Röhren auf einem gleich tiefen Niveau steht, ändert man bei geschlossenem Hahn den Druck durch Heben der oben offenen Röhre. Im übrigen verläuft der Versuch wie der oben beschriebene.
2. Beachte MB 1.0.6., Anweisungen zum Experimentieren mit Quecksilber! Besondere Vorsicht muß man beim Entleeren der Röhre walten lassen. Auf keinen Fall darf zuerst der Hahn am kurzen U-Rohr-Schenkel geöffnet werden. Man hält ein kleines Becherglas unter das Abflußrohr und öffnet behutsam den Ablaßhahn ein wenig, so daß das Quecksilber nur ganz allmählich ausfließen kann. Erst wenn der lange Schenkel völlig entleert ist, öffnet man den Hahn am kurzen Schenkel, damit auch der Quecksilberrest ausfließen kann.

2.3.2. Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines technischen Manometers [SE]

1. Gerät zur Demonstration des Boyleschen Gesetzes

Methodischer Hinweis

1. Das Experimentiergerät ist übersichtlich und groß. Dadurch können die Meßwerte auch aus größerer Entfernung noch gut abgelesen werden. Da keine umfangreichen Vorbereitungsarbeiten und keine längeren Erläuterungen zum Verständnis erforderlich sind, genügen schon wenige Minuten zur Herleitung des Gesetzes.
2. Vergleiche MH Nr. 2 V 2.3.1.!

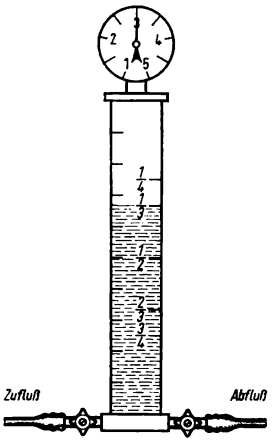


Abb. 2.3.2./1
Gerät zur Demonstration des Boyleschen Gesetzes

Aufbau des Gerätes

Das Gerät ist in der Abbildung 2.3.2./1 dargestellt. Der dickwandige Glaszylinder ist an seinem unteren Ende mit zwei Schraubventilen versehen. Am Einlaßventil ist ein Druckschlauch angeschlossen, der mit der Wasserleitung verbunden und dort mit einer Schelle gesichert wird. Das Ende des zweiten Schlauches, der am Ablaßventil befestigt ist, legt man in den Ausguß der Wasserleitung. Am oberen Abschluß des Glaszylinders ist ein technisches Manometer angebracht, das den Druck im Zylinder anzeigt. Auf dem Glaszylinder sind zwei Skalen abgetragen. Die eine teilt das Volumen in 10 gleiche Teile, die andere gibt einige für die Messung günstige Bruchteile an.

Versuch

Um exakte Meßwerte zu erlangen, muß der Zuleitungsschlauch mit Wasser gefüllt werden. Man öffnet dazu beide Schraubventile am Gerät und schließlich auch den Wasserhahn, bis aus dem Abflußschlauch Wasser in den Ausguß fließt. Dann schließt man das Einlaßventil und danach das Ablaßventil.
Das Gefäß ist jetzt mit Luft gefüllt, die unter demselben Druck steht wie die Außenluft. Das Manometer zeigt diesen Druck $p = 1 \text{ bar} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ an. Öffnet man nun das Einlaßventil für kurze Zeit, dann strömt Wasser ein und komprimiert die Luft im Zylinder. Die Druckerhöhung wird vom Manometer angezeigt. Um die Berechnung zu erleichtern, ist es zweckmäßig, das Volumen nach und nach auf $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ und $\frac{1}{4}$ zu komprimieren. Diese Volumina und die zugehörigen Drücke werden jeweils in eine Tabelle eingetragen.

Abhängigkeit des Druckes der eingeschlossenen Luft von der Volumenverminderung

Volumen der eingeschlossenen Luft (Gesamtvolumen $V = 1$ Einheit)	Druck p in bar	$p \cdot V$
1	1	1
$\frac{3}{4}$	1,33	1
$\frac{2}{3}$	1,50	1
$\frac{1}{2}$	2,00	1
$\frac{1}{3}$	3,00	1
$\frac{1}{4}$	4,00	1

Man erkennt:

Das Produkt aus Druck und Volumen ist konstant.
Öffnet man das Ablaßventil, dann fließt das Wasser aus, und man kann dabei die festgestellten Werte noch einmal kontrollieren.
Nachdem man den Wasserleitungshahn wieder geschlossen hat, öffnet man das Einlaßventil, um eine Druckentlastung des Anschlußschlauches herbeizuführen, und kann dann das Gerät wieder von der Wasserleitung trennen.

Bemerkung

Dieses Experiment kann auch ohne Wasserleitung ausgeführt werden, wenn ein Druckkessel zur Verfügung steht. Man verbindet das Experimentiergerät durch einen Druckschlauch mit dem Ventil zur Wasserentnahme und verfährt ebenso wie bei der Benutzung der Wasserleitung (vgl. MB 2.0.3.).

2.3.3. Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines Kolbenprobers [SE]

1. Kolbenprober mit Hahnverschluß (50 ml)
2. quadratisches oder kreisförmiges Tellerchen zum Auflegen auf den Kolbenprober
3. Wägesatz
4. Vaseline oder Maschinenöl
5. Kraftmesser
6. Meßschieber
7. Barometer

Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment ist sowohl zur Herleitung wie auch zur Bestätigung des Boyleschen Gesetzes geeignet. Die Versuchsanordnung und ihre Wirkungsweise sind leicht zu übersehen, so daß dieses Experiment auch für untere Klassen gut geeignet ist.
2. Vergleiche MH Nr. 2 V 2.3.1.!

Versuch

Ein mit Hahnverschluß versehener Kolbenprober mit aufgelegtem Teller wird mit einer Rohrklemme so an einem Stativ befestigt, daß der Hahnverschluß lotrecht nach unten zeigt (Abb. 2.3.3./1). Man ermittelt vorher die Gewichtskraft des Kolbens und des Tellers mit Hilfe eines Kraftmessers und den Durchmesser des Kolbens mit einem Meßschieber. Bei abgenommenem Tellerchen und bei geöffnetem Hahn wird der Kolben auf den Strich 50 cm³ eingestellt. Nachdem der Hahn wieder geschlossen und der Teller aufgelegt ist, belastet man den Kolben durch Auflegen von Wägestücken und liest jedesmal das Volumen der komprimierten Luft ab. Die gemessenen Werte werden in eine Tabelle eingetragen. Dabei muß man berücksichtigen, daß sich die Druckkraft aus der Gewichtskraft des Kolbens, des Tellers und der Wägestücke zusammensetzt. Den auf die eingeschlossene Luft wirkenden Druck erhält man aus dem Quotienten aus Druckkraft und Kolbenfläche, vermehrt um den äußeren Luftdruck, den man mit einem Barometer bestimmt. Die wiedergegebene Tabelle enthält als Beispiel die Ergebnisse einer Meßreihe. Man erkennt mit hinreichender Deutlichkeit, daß das Produkt aus Druck und Volumen bei jeder Messung konstant ist. Es ergibt sich das Boylesche Gesetz

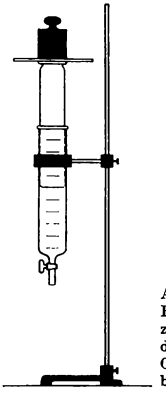


Abb. 2.3.3./1
Kolbenprober zum Nachweis des Boyleschen Gesetzes bei Druckerhöhung

$$p \cdot V = \text{konst.}$$

Eine entsprechende Meßreihe läßt sich auch bei einer Druckerniedrigung aufstellen. Man klemmt dazu den Kolbenprober mit dem Kolben nach unten an das Stativ und belastet den Kolben, indem man die Wägestücke mit einer Schnur an den Kolben bindet, und beginnt mit einem Anfangsvolumen von 10 cm³.

Meßreihe zum Boyleschen Gesetz

Luftdruck $p_1 = 1{,}02$ bar $= 10{,}2$ N/cm², Gewichtskraft des Kolbens und des Tellers $F_G = 3{,}6$ N, Flächeninhalt der Kolbenfläche $A = 4{,}9$ cm²

Belastung des Kolbens F_1 in N	Druckkraft $F = F_1 + F_G$ in N	Kolbendruck $p_2 = \frac{F}{A}$ in $\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$	Gesamtdruck $p = p_1 + p_2$ in $\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$	Volumen V in cm³	$p \cdot V$ in N · cm
0	3,6	0,7	10,9	50	545
5	8,6	1,8	12,0	45	540
10	13,6	2,8	13,0	41	533
15	18,6	3,8	14,0	39	546
20	23,6	4,8	15,0	36	540

Bemerkungen

1. Durch die Druckerhöhung wird die Luft im Kolbenprober adiabatisch erwärmt. Es ist notwendig, nach der Belastung des Kolbens mit der Ablesung des Luftvolumens eine Weile zu warten, damit die eingeschlossene Luft wieder die Außentemperatur annehmen kann.
2. Vor dem Ablesen erschüttere man das Stativ durch einige kurze Schläge mit einem Holzstab, damit die zwischen Kolben und Zylinder bestehende Haftreibung überwunden wird.
3. Schließt der Kolben nicht luftdicht, so feuchtet man ihn mit Wasser an oder fettet ihn etwas mit Vaseline oder Maschinenöl ein.

Giftige Dämpfe

2.3.4. Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe einer Meldeschen Röhre [SE]



Abb. 2.3.4./1
Meldesche Röhre

1. Meldesche Röhre ⑨,
   dazu erforderliches Material:
   Glasröhre (lichte Weite 2 mm, Länge 80 cm)
   Holzleiste (1 m × 6 cm × 1 cm)
   Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange,
   Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
   Millimeterpapier
   dünnes Blech zur Herstellung von Schellen, Holzschräubchen
2. Tafelwinkelmesser
3. Barometer

Methodische Hinweise

1. Die Herleitung des Boyleschen Gesetzes mit der Meldeschen Röhre hat den Vorteil, daß man das Gesetz mit einem geringen Zeit- und Geräteaufwand und ohne besonderes experimentelles Geschick herleiten kann. Das Gerät ist, nachdem man es einmal hergestellt hat, viele Jahre hindurch ohne Vorbereitung jederzeit einsatzbereit. Ein wesentlicher Vorteil ist es, daß man das Gerät nicht jedesmal mit Quecksilber füllen und entleeren muß.
   Dieses Experiment stellt an die Schüler gewisse Anforderungen bezüglich der mathematischen Kenntnisse und bezüglich des Abstraktionsvermögens. Die Versuchsanordnungen nach V 2.3.1. bis V 2.3.3. sind leichter zu übersehen und deshalb für Schüler unterer Klassen besser geeignet.
2. Vergleiche MH Nr. 2 V 2.3.1.!

Beschreibung des Gerätes

Das Kernstück des Gerätes ist eine etwa 80 cm lange Kapillarröhre mit einer lichten Weite von 2 mm. Das eine Ende ist zugeschmolzen, das andere ist offen. Im mittleren Teil der Röhre befindet sich ein etwa 20 cm langer Quecksilberfaden. Die Röhre ist auf einer Holzleiste befestigt und mit einer Millimeterskale unterlegt (Abb. 2.3.4./1). In der Nähe der beiden Enden sind in der Leiste Bohrungen angebracht, die dazu dienen, die Röhre wahlweise mit der Öffnung nach oben oder nach unten aufzuhängen.

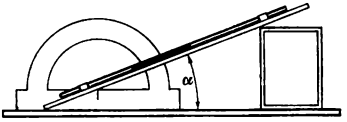


Abb. 2.3.4./2
Meldesche Röhre in schräger Lage

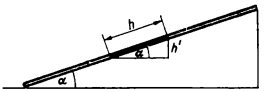


Abb. 2.3.4./3
Schemazeichnung zur Schräglage der Meldeschen Röhre

Versuch

Man legt zunächst die Röhre flach auf die horizontale Tischfläche. Die eingeschlossene Luftmenge steht dann unter dem äußeren Luftdruck, man liest die Länge des Luftfadens ab. Hängt man die Röhre mit der Öffnung nach oben auf, so vermehrt sich der auf dem Luftfaden lastende Druck um den Schweredruck des Quecksilberfadens. Der Luftfaden verkürzt sich dadurch etwas. Hängt man die Röhre mit der Öffnung nach unten auf, so tritt das Umgekehrte ein. Der Luftfaden verlängert sich ein wenig, da der äußere Luftdruck jetzt um den Schweredruck des Quecksilberfadens vermindert wird.

Zusätzlich zu diesen extremen Lagen nimmt man noch Messungen in beliebigen schrägen Lagen der Meldeschen Röhre vor. Man lehnt sie zu diesem Zweck schräg gegen einen Unterstellkasten (Abb. 2.3.4./2). Den Neigungswinkel α gegen die Tischfläche, den man durch Verschieben des Unterstellkastens ändern kann, mißt man mit Hilfe eines Tafelwinkelmessers. Für jede Stellung liest man die Länge des Luftfadens ab. Die Länge des Quecksilberfadens bleibt unverändert. Da es aber nur auf die lotrechte Quecksilberhöhe ankommt, muß man die Länge des Quecksilberfadens jedesmal mit $\sin\alpha$ multiplizieren (Abb. 2.3.4./3). Einer Höhe h' des Quecksilberfadens von 1 mm entspricht ein Schweredruck von 133,3 Pa. Befindet sich dabei die Öffnung der Röhre oben, so wird der Winkel positiv, im anderen Falle negativ gerechnet. Sämtliche Meßwerte werden in einer Tabelle zusammengefaßt. Die Tabelle gibt ein Beispiel für die bei einer Meßreihe gewonnenen Meßwerte. Der äußere Luftdruck wird mit einem Quecksilberbarometer bestimmt.

Abhängigkeit der Länge der eingeschlossenen Luftsäule vom Gesamtdruck

Äußerer Luftdruck $p_0 = 1007$ mbar $= 100{,}7$ kPa

Neigungswinkel α in Grad	$\sin\alpha$	Länge des Quecksilberfadens h in mm	Schweredruck des Quecksilberfadens p_1 in kPa	Länge der eingeschlossenen Luftsäule l in mm	Gesamtdruck $p = p_0 + p_1$ in kPa	$p \cdot l$ in kPa · mm
90	1,00	182	24,26	230	125,0	$28{,}75 \cdot 10^3$
42	0,67	182	16,25	246	117,0	$28{,}78 \cdot 10^3$
0	0,00	182	0	285	100,7	$28{,}70 \cdot 10^3$
−39	−0,63	182	−15,28	336	85,4	$28{,}69 \cdot 10^3$
−90	−1,00	182	−24,26	377	76,4	$28{,}80 \cdot 10^3$

Man erkennt aus der Tabelle, daß das Produkt aus der Länge der eingeschlossenen Luftsäule und dem darauf lastenden Druck, von geringfügigen Abweichungen abgesehen, konstant ist. Da der Röhrenquerschnitt überall gleich groß ist, ergibt sich das gleiche für das Produkt aus dem Volumen der Luftsäule und dem darauf lastenden Druck. Damit ist das Boylesche Gesetz bestätigt:

$$p \cdot V = \text{konst.}$$

Bemerkungen

1. Bei der Durchführung des Versuches darf die Röhre nicht mit der Hand berührt werden, da sonst die Länge des Luftfadens durch die Handwärme geändert wird.
2. Beachte MB 1.0.6., Anweisungen zum Experimentieren mit Quecksilber!

2.3.5. Bestätigung des Boyleschen Gesetzes mit Hilfe eines Manometers und einer Gasmeßglocke [SE]

1. Flasche (2 l)
2. offenes U-Rohr-Manometer mit Quecksilberfüllung
3. Müllersche Gasmeßglocke (250 ml) mit zwei Hahnrohren
4. breiter Standzylinder
5. zweifach durchbohrter Gummistopfen
6. Hahnrohr
7. T-Stück
8. kurzes Glasröhrchen als Mundstück
9. Verbindungsschlauch
10. Meßzylinder
11. Quecksilberbarometer

Methodische Hinweise

1. Das Experiment liefert sehr brauchbare Werte. Es ist in erster Linie für Schülerexperimente in höheren Klassen gedacht. In unteren Klassen sind zur Herleitung des Gesetzes die Experimente V 2.3.1. bis 2.3.3. zu bevorzugen, weil dort die physikalischen Zusammenhänge leichter zu übersehen sind.
2. Vergleiche MH Nr. 2 V 2.3.1.!

Versuchsanordnung

Eine Flasche mit einem Inhalt von etwa 2 l, deren Volumen V_1 man durch Ausfüllen mit Wasser genau feststellt, wird mit einem zweifach durchbohrten Gummistopfen verschlossen. Durch die eine Bohrung des Gummistopfens steckt man ein Hahnrohr, an das man mittels eines Schlauchstückes noch ein kurzes Glasrohr anschließt. Durch die andere Bohrung schiebt man den Querschenkel eines T-Stückes. Die eine Seite des Rohres wird mit einem offenen Manometer, die andere Seite über ein Hahnrohr mit einer Meßglocke verbunden, die noch mit einem zweiten Hahnrohr versehen ist (Abb. 2.3.5./1).

Versuch

Die Gasmeßglocke wird bei geöffneten Hähnen der Versuchseinrichtung bis zur Nullmarke in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder getaucht. Man schließt die Hähne 2 und 3 der Gasmeßglocke und bläst durch das Glasrohr 1 zusätzlich Luft in die Flasche. Dadurch entsteht in der Flasche ein Überdruck, den man am ange-

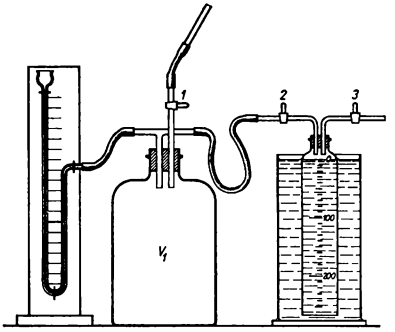
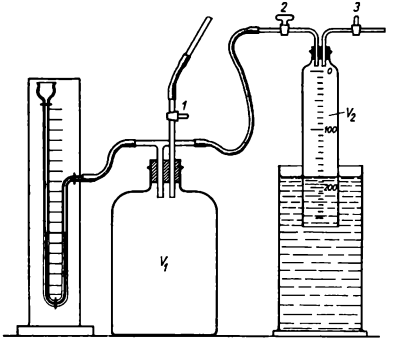


Abb. 2.3.5./1
Versuchsanordnung:
a) Die Gasmeßglocke ist gesenkt und mit Wasser gefüllt. Das Manometer zeigt einen Überdruck an.



b) Die Gasmeßglocke ist gehoben und mit Luft gefüllt. Das Manometer zeigt Druckgleichheit an.
1, 2, 3 Glashähne

schlossenen Manometer abliest (Abb. 2.3.5./1a). Einer Höhendifferenz Δh der Quecksilbersäule von 1 mm entspricht ein Druckunterschied p_2 von 133,3 Pa. Öffnet man den Hahn 2, so strömt Luft aus der Flasche in die Meßglocke über. Der Wasserspiegel in der Gasmeßglocke sinkt. Hebt man die Meßglocke so weit an, bis wieder Niveaugleichheit zwischen dem Wasser außerhalb und innerhalb der Glocke besteht, so ist der Innendruck in den Gefäßen gleich dem äußeren Luftdruck (Abb. 2.3.5./1b). Das Quecksilber im Manometer steht in beiden Schenkeln gleich hoch. Man liest das Volumen V_2 der Luft in der Meßglocke ab.
Der Versuch wird mehrmals wiederholt. Dabei kann man auch Luft aus der Flasche saugen, so daß in der Flasche ein Unterdruck entsteht. Durch Öffnen des Hahnes 3 und Heben der Meßglocke läßt man in diesem Falle etwa 200 cm³ Luft in die Meßglocke strömen und schließt den Hahn wieder. Beim Öffnen des Hahnes 2 strömt Luft aus der Meßglocke in die Flasche. Durch Senken der Meßglocke bewirkt man

den Druckausgleich. Der Unterdruck p_2 und die Volumenabnahme in der Meßglocke V_2 erscheinen in der Auswertung als negative Werte.
Der atmosphärische Luftdruck wird mit Hilfe eines Quecksilberbarometers festgestellt.

Meßwerte dreier Versuchspaare

Luftdruck $p_1 = 1007$ mbar $= 100{,}7$ kPa, Volumen der Flasche $V_1 = 2020$ cm³

Versuch Nr.	Höhenunterschied der Quecksilbersäule Δh in mm	Druckunterschied p_2 in kPa	Gesamtdruck $p = p_1 + p_2$ in kPa	Volumen der Luft in der Meßglocke V_2 in cm³	Gesamtvolumen $V = V_1 + V_2$ in cm³	$p \cdot V$ in kPa · cm³
1a	79	10,5	111,2	—	2020	$22{,}5 \cdot 10^4$
1b	—	—	100,7	215	2235	$22{,}5 \cdot 10^4$
2a	68	9,1	109,8	—	2020	$22{,}2 \cdot 10^4$
2b	—	—	100,7	180	2200	$22{,}2 \cdot 10^4$
3a	56	7,5	93,2	—	2020	$18{,}8 \cdot 10^4$
3b	—	—	100,7	−150	1870	$18{,}8 \cdot 10^4$

Die Tabelle zeigt, daß die Produkte $p \cdot V$ für jedes Versuchspaar den gleichen Wert haben. Daraus folgt, daß das Produkt aus Druck p und Volumen V konstant ist:

$$p \cdot V = \text{konst.}$$

Bemerkung

An Stelle der Glashähne können auch Quetschhähne verwendet werden. Das Volumen der Glasröhren und Schlauchverbindungen ist im Verhältnis zum Volumen der Flasche sehr klein und kann vernachlässigt werden.

2.4. Der Auftrieb in Gasen

2.4.1. Auftrieb eines Körpers in Kohlendioxid

1. In der Höhe verstellbare Balkenwaage oder Hornschalenwaage
2. Tarierbecher, Schrot
3. Wägesatz
4. kleine Flasche (250 ml) mit Gummistopfen
5. Becherglas (2 l)
6. Kartonscheibe zum Abdecken des Becherglases
7. Kohlendioxidentwickler
8. Verbindungsschlauch
9. rechtwinklig gebogenes Glasrohr

Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment erweckt erfahrungsgemäß das Interesse aller Schüler. Man kann es als Einführungsversuch zum Thema „Auftrieb in Gasen" verwenden. In höheren Klassen kann man damit die Wichte eines Gases bestimmen.

2. Die Waage wird hier zum Vergleich von Kräften benutzt (vgl. MB 1.0.4.!).
3. Zur Erklärung des physikalischen Zusammenhangs kann die Erscheinung mit dem Auftrieb in Flüssigkeiten verglichen werden.

Versuch

Man hängt eine mit einem Gummistopfen verschlossene Flasche mit Hilfe einer dünnen Schnur so an die eine Schale einer verstellbaren Waage, daß die Flasche frei hängend in ein daruntergestelltes Becherglas ganz eintaucht (Abb. 2.4.1./1). Die Waage wird austariert. Auf das Becherglas wird eine Kartonscheibe gelegt, die mit

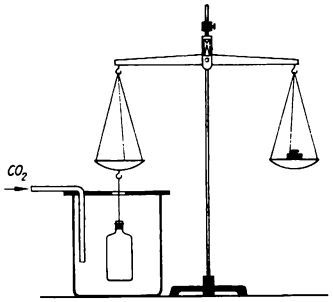


Abb. 2.4.1./1
Nachweis des Auftriebs einer Flasche in Kohlendioxid

einem vom Rande bis zur Mitte reichenden, etwa 2 cm breiten Schlitz versehen ist. Über ein rechtwinklig gebogenes Glasrohr, das durch einen Schlauch mit einem Kohlendioxidentwickler verbunden ist, leitet man dem Becherglas Kohlendioxid zu. Die Waage zeigt deutlich einen scheinbaren Verlust der Gewichtskraft an, der dadurch verursacht wird, daß die Auftriebskraft in Kohlendioxid wegen der größeren Dichte dieses Gases größer ist als in Luft.
Man kann den Versuch in einfacher Weise zu einem quantitativen Versuch ausgestalten, indem man die Flasche erst in Luft und dann in Kohlendioxid wägt. Man ermittelt dann die Differenz der gemessenen Auftriebskraft ΔF_A und dividiert durch das Volumen der Flasche.
Das äußere Volumen V der Flasche ermittelt man durch Wasserverdrängung.

Beispiel

Um das Gleichgewicht herzustellen, wurden Wägestücke mit einer Masse von 0,21 g aufgelegt. Die Differenz der Auftriebskräfte beträgt somit $2{,}06 \cdot 10^{-3}$ N. Äußeres Volumen der Flasche: 315 cm³.

$$\frac{\Delta F_A}{V} = \frac{2{,}06 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{N}}{315\,\mathrm{cm}^3} = 6{,}54 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{cm}^3}.$$

Die Wichte des Kohlendioxids ist somit um $6{,}54 \cdot 10^{-6} \frac{N}{cm^3}$ größer als die Wichte der Luft.

$$\gamma_{2CO_2} = (12{,}65 \cdot 10^{-6} + 6{,}54 \cdot 10^{-6}) \frac{N}{cm^3}$$

$$\gamma_{CO_2} = 19{,}2 \cdot 10^{-6} \frac{N}{cm^3}.$$

2.4.2. Bestimmung der Auftriebskraft eines Kinderluftballons

Zu Variante a

1. Kinderluftballon
2. Wägestück (5 g)
3. Druckball mit Saug- und Druckventil
4. Schlauch
5. Faden
6. Kraftmesser (Meßbereich 0,1 N)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 5., außerdem
6. Neigungswaage (Briefwaage)

Methodische Hinweise

1. Bei der Ausführung dieses Experiments kann man auf Ballonaufstiege mit Radiosonden zur Wettererkundung eingehen und auf die Bedeutung der Wettervorhersage für die Landwirtschaft, den Verkehr und das Bauwesen hinweisen.
2. Vergleiche MH Nr. 3 V 2.4.1.!

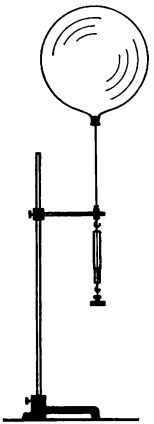


Abb. 2.4.2./1
Ein an einem Kraftmesser befestigter, mit Gas gefüllter Kinderballon zur Bestimmung seiner Auftriebskraft

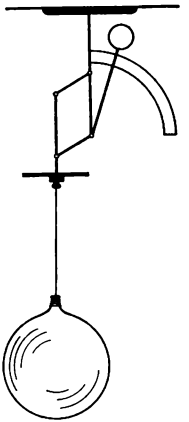


Abb. 2.4.2./2
Bestimmung der Auftriebskraft eines mit Gas gefüllten Kinderballons mit Hilfe einer Briefwaage

Variante a: Benutzung eines Kraftmessers

Ein leerer Kinderluftballon wird mit einer dünnen Schnur an ein 5-g-Stück gebunden. Beides hängt man an einen Kraftmesser und bestimmt die gemeinsame Gewichtskraft F_{G_1}. Dann füllt man den Ballon mit Stadtgas oder Wasserstoff. Der Ballon steigt empor, der Kraftmesser zeigt eine geringere Gewichtskraft F_{G_2} an (Abb. 2.4.2./1).
Die Verminderung der Gewichtskraft wird durch den Auftrieb des Ballons in der Luft hervorgerufen. Die Auftriebskraft ist gleich der Differenz aus F_{G_1} und F_{G_2}.

Variante b: Benutzung einer Briefwaage

Die Versuchsdurchführung ist ähnlich wie in der Variante a. Statt eines Kraftmessers verwendet man eine Briefwaage (Abb. 2.4.2./2). Der Umstand, daß die Briefwaage nicht mit einer Teilung in Newton, sondern mit einer Teilung in Gramm ausgestattet ist, ist in diesem Falle belanglos. Will man die Auftriebskraft ermitteln, rechnet man für die Gewichtskraft einer Masse von 100 g näherungsweise 1 N.

Bemerkung

Das Füllen des Ballons wird wie in V 2.4.4. durchgeführt.

2.4.3. Bestimmung der Auftriebskraft eines mit Stadtgas gefüllten Ballons [SE]

1. Kinderluftballon
2. dünne Schnur (Länge etwa 2 m)
3. Balkenwaage
4. Wägesatz
5. Meßstab
6. Druckball mit Saug- und Druckventil (vgl. V 2.4.4., Variante b!)

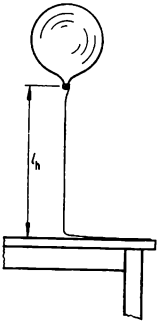


Abb. 2.4.3./1
Mit Stadtgas gefüllter Ballon. Die Auftriebskraft des Ballons ist gleich der Gewichtskraft der gehobenen Schnur.

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.4.2.!

Versuch

Man wägt einen leeren Ballon sowie eine 200 cm lange Halteschnur. Der Ballon wird, wie in V 2.4.4. angegeben, mit Stadtgas gefüllt und mit einem Ende der Schnur zugebunden.
Man läßt den Ballon über den Tisch steigen. Dabei hebt er so viel von der Länge der Halteschnur, bis die Summe der Gewichtskräfte des gehobenen Schnurstückes und der Ballonhülle gleich der Auftriebskraft des Ballons ist (Abb. 2.4.3./1). Die Länge der gehobenen Schnur wird gemessen und ihre Gewichtskraft berechnet.

Beispiel

Masse der Ballonhülle	$m_b = 1{,}57\ g$
Gewichtskraft der Ballonhülle	$F_{Gb} = 15{,}4 \cdot 10^{-3}\ N$
Masse der Halteschnur	$m_s = 1{,}02\ g$
Gewichtskraft der Halteschnur	$F_{Gs} = 10{,}0 \cdot 10^{-3}\ N$
Länge der Halteschnur	$l = 200\ cm$
Länge der gehobenen Schnur	$l_h = 111\ cm$
Gewichtskraft der gehobenen Schnur	$F_{Gh} : F_{Gs} = l_h : l$

$$F_{Gh} = \frac{F_{Gs} \cdot l_h}{l} = \frac{10{,}0 \cdot 10^{-3}\ N \cdot 111\ cm}{200\ cm} = 5{,}6 \cdot 10^{-3}\ N$$

Auftriebskraft des Ballons $F_A = F_{Gh} + F_{Gb} = (5{,}6 \cdot 10^{-3} + 15{,}4 \cdot 10^{-3})\,N = 21 \cdot 10^{-3}\,N$.
Die Auftriebskraft des Ballons beträgt $21 \cdot 10^{-3}$ N.

2.4.4. Füllen eines Luftballons mit Stadtgas

Zu Variante a

1. Flasche mit seitlichem Tubus
2. zwei durchbohrte Gummistopfen
3. drei Glasröhrchen (Ø etwa 8 mm, Länge etwa 10 cm)
4. Schlauch
5. zwei Gummiluftballons
6. Faden

Zu Variante b

Geräte 4., 5. und 6., außerdem
7. Druckball mit Saug- und Druckventil (gebräuchlich bei Parfüm- und Haarlackzerstäubern)

Methodischer Hinweis

Diese Beschreibung ist nicht als Experiment im eigentlichen Sinne aufzufassen. Es ist eine Anleitung zu einer Arbeitstechnik, die im Zusammenhang mit anderen Experimenten gebraucht wird.

Variante a

Man verwendet zum Füllen eines Gummiballons mit Stadtgas die in V 2.1.8. angegebene Versuchsanordnung. Das Glasrohr des oberen Tubus wird mit Hilfe eines Gummischlauchs mit der Stadtgasleitung verbunden.
Saugt man wie in V 2.1.8. an dem seitlichen Tubus die Luft aus der Flasche, so füllt sich der Ballon mit Gas. Nachdem man den Quetschhahn und den Gasleitungshahn geschlossen hat, zieht man den Schlauch vom Glasrohr, ohne daß man Luft in dieses gelangen läßt, und verbindet das Rohr mit dem zu füllenden Ballon.
Öffnet man den Quetschhahn und bläst in die Saugleitung, so schrumpft der in der Flasche befindliche Ballon zusammen. Der außerhalb der Flasche am Rohr befestigte Ballon bläht sich auf und füllt sich mit Gas (Abb. 2.4.4./1). Man schließt den Quetschhahn, bindet den Schlauchansatz des Ballons zu und löst den Ballon vom Glasrohr. Der Ballon schwebt langsam empor.

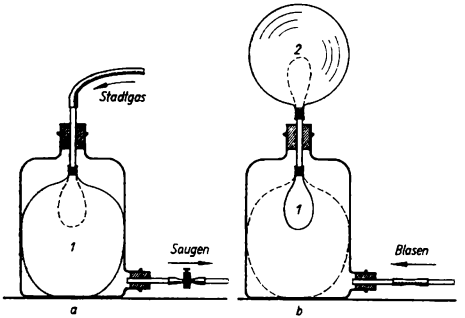


Abb. 2.4.4./1
Füllen einer Gummiblase mit Stadtgas mit Hilfe einer Flasche mit seitlichem Tubus:
a) Einsaugen des Gases in den Ballon 1,
b) Aufblasen des Ballons 2 durch Einblasen von Luft in die Flasche

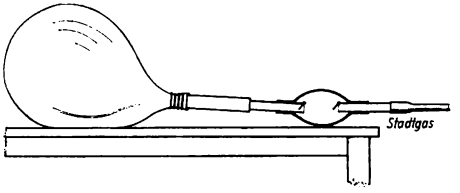


Abb. 2.4.4./2
Füllen einer Gummiblase mit Stadtgas mit Hilfe eines Druckballons

Variante b

Steht ein Druckball zur Verfügung, dann vereinfacht sich der Vorgang erheblich (Abb. 2.4.4./2). Beim Zusammendrücken des Balls wird sein Inhalt in den Ballon gepreßt, bei seiner Expansion füllt sich der Ball mit Stadtgas. Durch wiederholtes Pumpen füllt sich der Ballon.

2.4.5. Vergrößerung der Auftriebskraft einer Gummiblase durch Dampffüllung

1. Hornschalenwaage
2. Tarierbecher, Schrot
3. Reagenzglas
4. Kinderluftballon
5. Bindfaden
6. Bunsenbrenner
7. Kartonstreifen

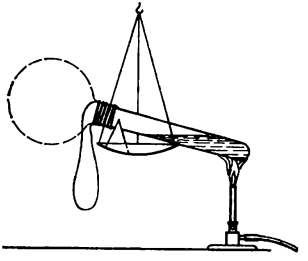


Abb. 2.4.5./1
Versuchsanordnung zum Nachweis des Auftriebs in Luft

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment stellt eine interessante Variante der Demonstration des Auftriebs in Gasen dar. Es eignet sich zur Aufgabenstellung für die Wiederholung und Leistungskontrolle.

Versuch

Man füllt ein Reagenzglas etwa zu einem Drittel mit Wasser und zieht über die Öffnung des Glases den Schlauchansatz eines Kinderluftballons. Beide Teile werden durch Umwickeln mit dünner Schnur luftdicht miteinander verbunden. Man legt das Reagenzglas auf die Waagschale einer Hornschalenwaage und stellt es durch Unterlegen eines gekniffenen Kartonstreifens etwas schräg, damit das Wasser nicht in den Ballon fließen kann (Abb. 2.4.5./1). In dieser Lage bindet man das Glas an der Waagschale fest. Das Reagenzglas ragt etwa zu einem Viertel über die Waagschale hinaus. Die Waage wird austariert.
Mit der Flamme eines Bunsenbrenners wärmt man vorsichtig den herausragenden Teil des Reagenzglases, bis das Wasser verdampft und der Ballon sich aufbläht. Da die Vorrichtung jetzt einen größeren Raum einnimmt, ohne daß sich ihre Gewichtskraft vergrößert, erhöht sich ihre Auftriebskraft. Das Gleichgewicht der Waage wird gestört.

2.4.6. Der Auftrieb mit Stadtgas gefüllter Seifenblasen in Luft [SE]

1. Glasrohr (∅ etwa 5 mm, Länge etwa 15 cm), an einem Ende schwach trichterförmig erweitert
2. Schale mit Seifenlösung
3. Quetschhahn
4. Schlauch

Methodischer Hinweis

Das Experiment zeigt das Steigen, das Schweben und das Sinken von Körpern in der Luft. Zur Erklärung der physikalischen Zusammenhänge kann man die entsprechenden Vorgänge in einer Flüssigkeit (vgl. V 1.4.15.!) heranziehen.

Versuch

Ein dünnes Glasrohr wird an einem Ende über einer Flamme trichterförmig erweitert. Über das Ende schiebt man einen passenden Gummischlauch und verbindet ihn über ein Zwischenstück mit der Stadtgasleitung. Man taucht das Glasrohrende in eine Schale mit Seifenlösung und regelt mit Hilfe eines um den Schlauch gelegten Schraubquetschhahnes die für die Seifenblasenbildung günstigste Strömungsgeschwindigkeit ein (Abb. 2.4.6./1). Bei kurzzeitigem Öffnen des Gashahns bilden sich, entsprechend der Ausströmungsdauer des Gases, Seifenblasen verschiedener Größe. Zieht man die Glasröhre ruckartig zurück, so lösen sich die Blasen vom Rohr.
Dabei kann man folgende Feststellung machen:

1. Kleine Seifenblasen sinken schnell zu Boden. Ihr Gasinhalt ist klein und ihre Hülle dick, deshalb ist ihre Auftriebskraft kleiner als ihre Gewichtskraft.

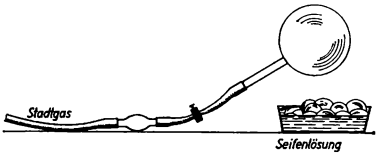


Abb. 2.4.6./1
Füllen von Seifenblasen mit Stadtgas

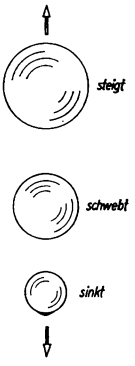


Abb. 2.4.6./2
Steigfähigkeit von Seifenblasen verschiedener Größe

2. Mittelgroße Seifenblasen sinken oder steigen in ruhiger Luft nur ganz langsam, oder sie schweben. Ihre Auftriebskraft ist annähernd gleich ihrer Gewichtskraft.
3. Große Seifenblasen steigen rasch. Ihre Auftriebskraft ist größer als ihre Gewichtskraft (Abb. 2.4.6./2).

Bemerkungen

1. Nach dem Ablösen einer Seifenblase bilden sich meist ohne vorheriges Eintauchen noch weitere Blasen am Glasrohrende. Sie haben eine dünne Hülle. Ihre Auftriebskraft ist immer größer als ihre Gewichtskraft. Bläst man von der Seite her in die entstehenden Seifenblasen, so lösen sich zahlreiche kleine Seifenblasen rasch nacheinander ab. Die zuerst entstehenden sinken, die folgenden schweben, und die letzten steigen.
2. Die Herstellung der Seifenlösung ist in MB 2.0.6. beschrieben.



2.4.7. Auftrieb einer mit Kohlendioxid gefüllten Seifenblase in verschiedenen Gasen

Geräte wie in V 2.4.6., außerdem
5. Gasentwickler für Kohlendioxid
6. Glastrog (Aquarienglas)
7. Brom, Äther

Versuch

Man stellt Seifenblasen nach V 2.4.6. her. Zum Füllen der Blasen verwendet man Kohlendioxid, das in einem Kippschen Apparat erzeugt wird. Die Seifenblase wird bis zu einem Durchmesser von etwa 5 cm bis 6 cm aufgeblasen. Löst man die Seifenblase mit einem kurzen Ruck vom Blasrohr, so fällt sie sofort zu Boden. Läßt man dagegen die Seifenblase in eine Wanne fallen, die zum Teil mit Bromdämpfen gefüllt ist, so bleibt sie auf der Grenzfläche zwischen Luft und Brom liegen. Sie

schwimmt auf dem Bromdampf. Die gleiche Erscheinung beobachtet man, wenn man einige Tropfen Äther innerhalb der Wanne verdampfen läßt.

Bemerkungen

1. Da das Brom chemisch auf die Seifenhaut einwirkt, werden die Blasen verhältnismäßig schnell zerstört.
2. Mit dem bei der Gasentwicklung erzeugten Druck lassen sich Seifenblasen bis zu einem Durchmesser von etwa 6 cm aufblasen.
3. Beim Umgang mit Brom sind die entsprechenden Arbeitsschutzbestimmungen zu beachten.

2.4.8. Nachweis des Auftriebs eines Körpers in Luft — Benutzung eines Dasymeters

1. Dasymeter
2. Luftpumpe mit Luftpumpenteller
3. Rezipient

Versuch

Man stellt ein Dasymeter unter den Rezipienten einer Luftpumpe und pumpt die Luft aus. Die Glaskugel des Dasymeters senkt sich. Läßt man die Luft wieder in den Rezipienten einströmen, so geht der Waagebalken des Dasymeters wieder auf die Ausgangsstellung zurück.

Bemerkung

Man lasse die Luft vorsichtig in den Rezipienten einströmen, da sonst das Dasymeter beschädigt werden kann.

2.4.9. Bestimmung der Wichte von Stadtgas mit Hilfe eines Dasymeters

1. Dasymeter mit einer in Einheiten der Kraft geteilten Skale
2. Luftpumpe mit Luftpumpenteller
3. Rezipient
4. Schlauch
5. Luftpumpenfett (Ramsayfett)

Methodischer Hinweis

Der Versuch veranschaulicht die Wirkungsweise der Gaswaage, eines Meßgerätes, das in der chemischen Industrie verwendet wird.

Versuch

Das für diesen Versuch zu verwendende Dasymeter muß mit einer Anzeigevorrichtung ausgestattet sein, die es ermöglicht, die beim Evakuieren auftretende Verminderung der Auftriebskraft zu messen. Man stellt das Dasymetermodell unter den Rezipienten einer Luftpumpe und liest die Stellung a_0 des Zeigers ab. Dann

pumpt man die Luft aus dem Rezipienten und stellt den Zeigerausschlag a_1 fest. Man verbindet den evakuierten Rezipienten über den Dreiwegehahn mit der Stadtgasleitung und läßt vorsichtig Stadtgas in den Rezipienten strömen. Man wartet den Temperaturausgleich ab und liest den Ausschlag a_2 ab.
Die Differenz zwischen den Ausschlägen a_2 und a_1 ist ein Maß für die Auftriebskraft, die auf die Dasymeterkugel im Stadtgas wirkt. Die Differenz a_1 und a_0 gibt die Auftriebskraft der Kugel in Luft an.
Nach dem Archimedischen Gesetz verhalten sich die Wichten der Luft und des Stadtgases zueinander wie die Auftriebskräfte, die auf den Körper in diesen Gasen wirken.

Bemerkung

In den Unterrichtsmittelsammlungen sind vereinzelt noch Dasymeter anzutreffen, die mit einer in Millipond geteilten Skale versehen sind. Einem Millipond entsprechen $9{,}81 \cdot 10^{-6}$ N.

2.4.10. Nachweis des Auftriebs erwärmter Luft [SE]

1. Aus dünnem Papier hergestellter Quader ⑧,
   dazu erforderliches Material:
   dünnes Papier
   dünner Karton (Zeichenkarton)
   Klebstoff
2. Holzspeiler
3. Knetmasse
4. Faden
5. Kerze oder Spiritusbrenner

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment veranschaulicht die Wirkungsweise der Montgolfiere, die zu den ersten Flugkörpern „leichter als Luft" in der Geschichte der Luftfahrt zählt. An diesem Beispiel kann man in einem historischen Rückblick zeigen, daß der Mensch seine Umwelt immer besser erkennt und die in ihr geltenden Gesetzmäßigkeiten immer besser in seinen Dienst stellt.

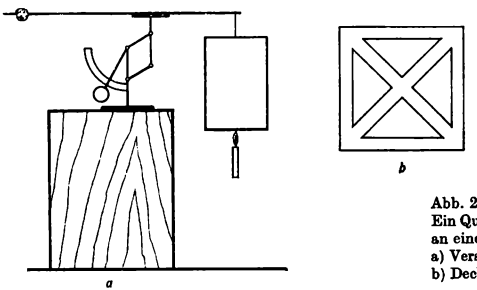


Abb. 2.4.10./1
Ein Quader aus dünnem Papier, an einer Briefwaage hängend:
a) Versuchsanordnung,
b) Deckfläche

Versuch

Man fertigt aus dünnem Papier einen Quader mit quadratischer Grund- und Deckfläche. Seine Seitenkanten macht man 30 cm, seine Grundkanten 20 cm lang. Zur Versteifung des Quaders wird unter die Deckfläche ein Kreuzgerüst aus dünnem Karton aufgeklebt, wie Abb. 2.4.10./1 zeigt.
In die Grundfläche schneidet man eine quadratische Öffnung mit einer Seitenlänge von 8 cm. Mit einem Faden hängt man den Quader an das eine Ende eines Speilers, an das andere Ende klebt man als Gewichtsausgleich ein Stückchen Knetmasse. Der Speiler wird auf eine am Rande eines Unterstellkastens stehende Briefwaage gelegt und ausbalanciert. Bringt man eine brennende Kerze oder eine Spiritusflamme unter die Quaderöffnung, so geht der Ausschlag der Briefwaage zurück.

2.5. Pumpenmodelle — Wirkungsweise der Pumpen

2.5.1. Glasmodell einer Handspritze

1. Glasmodell einer Handspritze

Versuch

Das Glasmodell einer Handspritze ist in der Abb. 2.5.1./1 dargestellt. Sein Aufbau und seine Wirkungsweise sind leicht zu übersehen. Deshalb benutzt man es in unteren Klassenstufen meist für einen Vorversuch zur Erklärung der Wirkungsweise von Luft- und Wasserpumpen.

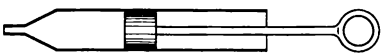


Abb. 2.5.1./1
Glasmodell einer Handspritze

Beim Vorführen des Modells wird man erläutern, daß beim Füllen der Spritze der äußere Luftdruck das Wasser in den Zylinder drückt. Beim Hineindrücken des Kolbens wirken verschiedene Gesetzmäßigkeiten, wie

a) das Gesetz von der gleichmäßigen Druckausbreitung (vgl. V 1.2.2.!),
b) Gesetzmäßigkeit über die Verschiebung einer Flüssigkeitssäule in Röhren mit unterschiedlichen Querschnitten (vgl. V 1.2.7.!),
c) die Kontinuitätsgleichung:
Das Produkt aus dem Querschnitt und der Strömungsgeschwindigkeit im weiten Rohrteil ist gleich dem Produkt dieser Größen im engen Rohrteil. $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$ (vgl. V 1.5.3.!).

2.5.2. Glasmodelle von Wasserpumpen

Zu Versuch 1

1. Glasmodell einer Saugpumpe

Zu Versuch 2

2. Glasmodell einer Saug-Druck-Pumpe

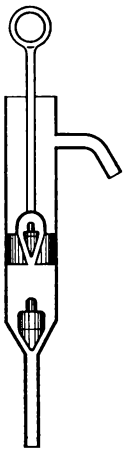


Abb. 2.5.2./1
Glasmodell einer Saugpumpe

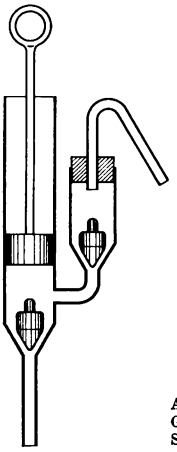


Abb. 2.5.2./2
Glasmodell einer
Saug-Druck-Pumpe

Versuch 1

Das Modell einer Saugpumpe zeigt Abb. 2.5.2./1. Bei seiner Betätigung ist das Spiel der Ventile deutlich zu erkennen.

Versuch 2

Das Modell ist in der Abb. 2.5.2./2 dargestellt. Der Kolben hat hier kein Ventil. Das Ventil sitzt am Boden eines kleinen Windkessels, der seitlich vom Pumpenstiefel angebracht ist. Von dort geht das Steigrohr ab, das bei derartigen Modellen gewöhnlich gebogen und mit einer Spritzdüse versehen ist. Die Wirkungsweise des Modells ist an der Bewegung der Ventile sehr gut zu erkennen. Als Vorteil der Saug-Druck-Pumpe arbeitet man heraus, daß sie das Wasser beliebig hoch drücken kann, während die Saugpumpe das Wasser nur aus einer Tiefe bis zu etwa 8 m fördern kann.



2.5.3. Abhängigkeit des Luftdrucks in einer Flasche von der Saugzeit der Luftpumpe

1. Ölluftpumpe mit Antriebsmotor oder Wasserstrahlpumpe
2. große Flasche (4 l)
3. zweifach durchbohrter Gummistopfen
4. rechtwinklig gebogenes Glasrohr (⌀3 mm)
5. U-förmig gebogenes Glasrohr (⌀3 mm, langer Schenkel 90 cm)
6. Quecksilber, Quecksilberzange, Quecksilbertropfer, Quecksilberbrett, Quecksilberwanne, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
7. Glasschliffstück zur Luftpumpe mit Schlauchansatz
8. Vakuumschlauch
9. Meßstab oder Vertikalmeßstab
10. dünne Schnur
11. Barometer

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment bietet eine günstige Gelegenheit, fachliche Querverbindungen zwischen Mathematik und Physik zu ziehen. Man sollte es deshalb nicht versäumen, die hier wirkende physikalische Gesetzmäßigkeit mathematisch herzuleiten. Man geht dabei vom Boyleschen Gesetz aus:

$$p_0 \cdot V_0 = p_1 \cdot V_1.$$

Nimmt man zur Vereinfachung an, es handle sich um eine Kolbenpumpe, und bezeichnet man den Ausgangsdruck in der Flasche mit p_0 und das Ausgangsvolumen der eingeschlossenen Luft, das Volumen der Flasche, mit V_0, dann sind p_1 und V_1 die Größen nach dem ersten Pumpenhub. Dabei vergrößerte sich das Volumen um den Betrag V_h,

$$V_1 = V_0 + V_h.$$

Es ist also

$$p_0 \cdot V_0 = p_1 \cdot (V_0 + V_h)$$

oder

$$p_1 = p_0 \cdot \frac{V_0}{V_0 + V_h}.$$

Für den 2. Pumpenhub gilt dann

$$p_1 \cdot V_0 = p_2 \cdot V_2$$

und für p_1 eingesetzt

$$p_0 \cdot \frac{V_0}{V_0 + V_h} \cdot V_0 = p_2 \cdot (V_0 + V_h).$$

Der Druck p_2 ist somit

$$p_2 = p_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 + V_h}\right)^2.$$

Für den n-ten Pumpenhub gilt dann

$$p_n = p_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 + V_h}\right)^n.$$

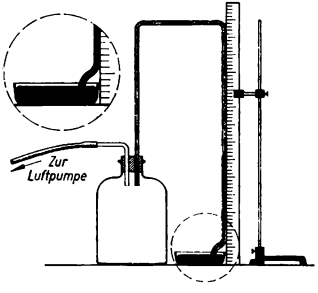


Abb. 2.5.3./1
Flasche mit offenem Manometer zum Nachweis der Abhängigkeit des Luftdrucks von der Saugzeit der Luftpumpe

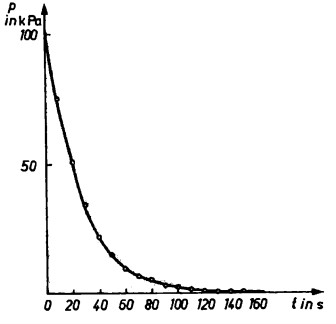


Abb. 2.5.3./2
p-t-Diagramm für das Evakuieren einer Flasche

Der Druck in der Flasche ist demnach eine Funktion der Anzahl der Pumpenhübe oder bei gleichmäßigem kontinuierlichem Ablauf eine Funktion der Zeit.

$$p_t = f(t);$$

$$p_t = p_0 \cdot a^t; \; (0 < a < 1) .$$

Die grafische Darstellung dieser Exponentialfunktion muß eine Hyperbel ergeben.

Versuchsanordnung

Man verschließt eine große Flasche mit einem doppelt durchbohrten Gummistopfen. Durch diesen steckt man ein kurzes gewinkeltes Rohr, das mit einer kontinuierlich wirkenden Luftpumpe verbunden wird. Ferner schließt man an die Flasche ein U-förmig gebogenes Rohr an, dessen langer Schenkel in ein Schälchen mit Quecksilber taucht (Abb. 2.5.3./1). Damit man dicht neben den langen Schenkel einen Meßstab stellen kann, ist das Rohr nahe seinem unteren Ende etwas gekrümmt.

Versuch

Nach dem Einschalten der Luftpumpe wird in Zwischenräumen von je 10 s der Stand der Quecksilbersäule festgestellt. Der Druck p der in der Flasche befindlichen Luft ist gleich der Differenz aus dem atmosphärischen Luftdruck p_1 und dem vom Manometer angezeigten Druck p_2. Beide Werte werden in kPa angegeben. Die beigefügte Tabelle und das dazugehörige Diagramm (Abb. 2.5.3./2) geben ein Beispiel für eine solche Versuchsreihe.

Abhängigkeit des Druckes in einer Flasche von der Saugzeit

(Beispiel für eine Meßreihe)
Atmosphärischer Luftdruck $p_1 = 1010$ mbar $= 101{,}06$ kPa

Saugzeit t in s	Höhe der Quecksilbersäule h in mm	Gewichtsdruck der Quecksilbersäule p_2 in kPa	Druck in der Flasche $p = p_1 - p_2$ in kPa
0	0	0,00	101,06
10	195	26,00	75,06
20	376	50,13	50,93
30	505	67,33	33,73
40	597	79,59	21,47
50	646	86,13	14,93
60	684	91,19	9,87
70	707	94,26	6,80
80	722	96,26	4,80
90	736	98,13	2,93
100	741	98,79	2,27
110	745	99,33	1,73
120	748	99,73	1,33
130	750	99,99	1,07
140	752	100,26	0,80
150	752	100,26	0,80
160	752	100,26	0,80

Nach etwa 140 s ist kein weiteres Absinken des Luftdruckes in der Flasche zu beobachten, obwohl die Pumpe ein viel tieferes Vakuum erzeugen kann. Daß das Grenzvakuum so hoch liegt, ist auf undichte Stellen der Versuchsanordnung zurückzuführen.

Bemerkungen

1. Statt mit einer Ölluftpumpe kann der Versuch auch mit einer Wasserstrahlpumpe durchgeführt werden. Dabei empfiehlt es sich, eine Pumpe mit Rückschlagventil zu verwenden oder eine Sicherheitsflasche zwischen Pumpe und Rezipient einzufügen. Dadurch wird ein Einströmen des Wassers in die zu evakuierende Flasche vermieden.
2. Führt man den Versuch mit einer Kolbenluftpumpe durch, so mißt man nicht die beim Pumpen verfließende Zeit, sondern die Anzahl der Kolbenhübe.
3. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!
4. Statt des langen Manometerrohres kann auch ein verkürztes Barometer nach V 2.2.9. verwendet werden. Man beginnt mit der Messung, wenn die Quecksilbersäule zu sinken beginnt.

3. Die molekularen Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase

3.0. Methodische Bemerkungen

3.0.0. Durch die Beweglichkeit der Moleküle in Flüssigkeiten und Gasen kann man in zahlreichen Versuchen überzeugend Erkenntnisse über die Teilbarkeit der Körper und das Vorhandensein der Moleküle gewinnen. Die meisten dieser Experimente zeigen in überzeugender Weise, daß die Welt und ihre Gesetzmäßigkeiten erkennbar sind.
Die meisten Versuche können mit einer Reihe von selbstgefertigten Hilfsmitteln und einfachen Glasgeräten durchgeführt werden. Um rationell zu arbeiten, ist es zweckmäßig, in der Physiksammlung einen Platz zu schaffen, wo diese Geräte zusammen griffbereit aufbewahrt werden. Da die gleichen Glasgeräte teilweise auch zu Versuchen in der Mechanik, der Wärmelehre und der Optik benötigt werden, sollte man einen Schrank so einrichten, daß hier die Glasgeräte zusammengestellt sind, die in verschiedenen Teilgebieten der Physik benötigt werden, und in einem Fach die Hilfsmittel für die Untersuchung der molekularen Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase aufbewahrt werden.
Für die Schülerexperimente ist ein Glasgerätesatz lieferbar, der eine Grundausstattung enthält.
Anleitungen für die Herstellung einfacher Hilfsgeräte sind bei den einzelnen Versuchsbeschreibungen gegeben. Da gefärbte Flüssigkeiten, Seifenlösungen, Quecksilber und einfache Glasarbeiten für viele Versuche notwendig sind, ist darüber in 1.0.5. Näheres ausgeführt.
Eine Reihe von Versuchsanordnungen, die für Demonstrationszwecke vorgesehen sind, haben so kleine Abmessungen, daß sie von den Schülerplätzen her nur schlecht zu sehen sind. In diesen Fällen sollte man möglichst eine Projektion vornehmen. Zur Projektion eignen sich in den meisten Fällen die unter 4.0.2. beschriebenen Geräte: das WSP 220 oder der Tageslichtschreibprojektor „Polylux 1".

3.0.1. Die in 3.1. zusammengestellten Versuche sind besonders dazu geeignet, aus mikroskopischen Beobachtungen Rückschlüsse auf die Existenz der Moleküle zu ziehen und den Schülern Verständnis für den Aufbau der Stoffe zu vermitteln. Sie sind nicht unbedingt in einem Stoffkomplex im Unterricht zu behandeln, sondern werden bei der Betrachtung entsprechender Probleme in den verschiedenen Klassen durchgeführt werden.
Eine besondere Bedeutung kommt auf diesem Gebiet den Modellexperimenten zu. Sie erleichtern die makrophysikalische Erklärung mikrophysikalischer Vorgänge. Mit dem Gerät für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie (Abb. 3.0.1./1) kann eine Reihe von molekularen Vorgängen der Flüssigkeiten und Gase mit Hilfe von

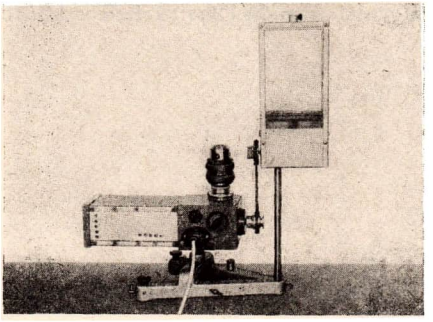


Abb. 3.0.1./1
Gerät für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie mit Experimentiermotor

Kugeln als Modelle für die Moleküle veranschaulicht und gedeutet werden. Die Auswertung dieser Experimente ermöglicht sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen über bestimmte Erscheinungen und Eigenschaften bei der Behandlung der entsprechenden Stoffabschnitte auf den verschiedenen Stufen des Physiklehrganges. In den Abschnitten 3.1., 3.4. und 2.2. sind einige ausgewählte Beispiele für den Einsatz dieses Gerätes beschrieben.
Zum Betrieb des Gerätes wird ein Experimentiermotor benötigt. Der Aufbau ist aus der Abbildung 3.0.1./1 zu ersehen. Diese Anordnung stellt nur eine Aufbauvariante dar. Es können auch andere Typen von Experimentiermotoren verwendet werden. Gegebenenfalls muß die Drehzahl über einen einstellbaren Widerstand geregelt werden.
Um unerwünschte Schwingungen zu vermeiden und Geräusche zu dämpfen, empfiehlt es sich, eine Filz- oder Schaumgummiunterlage unter die Anordnung zu legen.
Außer der Direktbeobachtung der Vorgänge in der Kammer kann man durch seitliche Beleuchtung des Kammerraumes die Sichtbarkeit des Versuchsablaufes infolge der Reflexion des Lichtes durch die Kugeln erhöhen. Eine weitere Möglichkeit bietet die Projektion des Kammerraumes durch den Schreibprojektor „Polylux 1" mit Kippeinrichtung.
Je nach den vorgesehenen Experimenten werden entsprechende Mengen und Sorten von Kugeln in den Kammerraum eingefüllt. Für die in diesem Buche beschriebenen Modellexperimente kommen als Richtwerte in Betracht:

Modellflüssigkeit	etwa 1000 bis 2000 Kugeln
Modellgas	etwa 200 bis 400 Kugeln

Den Kugeln wird durch die Schwingung der Bodenplatte kinetische Energie zugeführt. Bei der Übertragung der Energie spielt die Frequenz der Bodenplatte die ausschlaggebende Rolle. Sie kann durch Verändern der Drehzahl des Motors eingestellt werden.
Das Entleeren der Kammer erfolgt mit einer Fangmulde. Dazu stellt man eine niedrige Frequenz der Bodenplatte ein. Die Kugeln werden von der Mulde aufgefangen, ohne daß man dazu das Gerät kippen muß.

3.0.2. Einen für die Wissenschaft wie für die Technik sehr wichtigen Bereich umfassen die Erscheinungen der Oberflächenspannung und der Kapillarität bzw. die auf ihnen beruhenden Vorgänge. Versuche dazu sind im Abschnitt 3.2. angegeben. Sie haben das Ziel, den Schülern die Erkenntnis zu vermitteln, daß die Oberflächenspannung tangentiale Kräfte hervorruft, die auf die Oberfläche verkleinernd einwirken. Das Verständnis für diese Vorgänge wird bei den Schülern dadurch unterstützt, daß sie bereits eine Reihe von Chemikalien kennen, die im Haushalt das Geschirrwaschen und Abtrocknen erleichtern oder als Waschmittel dienen. Sie beruhen in ihrer Wirkung vorwiegend auf der Verminderung der Oberflächenspannung des Wassers. Für die Behandlung der Oberflächenspannung gibt es eine Reihe quantitativer Versuche, die als Schülerexperimente geeignet sind.

3.0.3. Lösungsvorgänge sind anschauliche Beispiele für die Teilbarkeit der Körper. Man kann die Löslichkeit der Stoffe zum Ausgangspunkt nehmen, von dem aus man zur Vorstellung von der *Zusammensetzung der Körper aus Teilchen* gelangt. Es gehört keine große Abstraktion zu der Schlußfolgerung, daß beim Lösen eines festen Körpers in einer Flüssigkeit, aber auch beim Mischen zweier Flüssigkeiten miteinander eine innige Vermischung der Teilchen beider Körper eintritt. Im Anfangsunterricht muß dabei die beim Auflösen von Salzen erfolgende Aufspaltung der Moleküle in Ionen unberücksichtigt bleiben. Dabei ist es für die Schüler eine wertvolle Ergänzung ihres Wissens, zu erkennen, daß beim Mischen zweier Flüssigkeiten das Volumen der Mischung nicht in jedem Fall gleich der Summe der Volumina der gemischten Flüssigkeiten sein muß.
Die Vorgänge der *Adsorption* und der *Absorption* werden im allgemeinen im Chemieunterricht behandelt, weil die technische Anwendung dieser Vorgänge vorwiegend in das Gebiet der chemischen Technologie fällt. Es handelt sich jedoch bei der Adsorption wie bei der Absorption um physikalische Prozesse. Auf jeden Fall muß klar zwischen der Adsorption und der Absorption unterschieden werden. Bei der Adsorption handelt es sich um eine Verdichtung der Moleküle eines Stoffes an der Grenzfläche zweier Stoffe von unterschiedlichem Aggregatzustand, mit anderen Worten um die Konzentrationserhöhung eines Stoffes in unmittelbarer Nähe eines anderen. So wirken bestimmte feste Körper adsorbierend auf Lösungen und auf Gase. Ein Eindringen der Moleküle des adsorbierten Stoffes in den adsorbierenden Stoff findet dabei nicht statt. Kommt es zu einer Vermischung der Moleküle beider Stoffe, so handelt es sich um eine Absorption. Meist ist der absorbierte Stoff ein Gas, der absorbierende eine Flüssigkeit oder ein fester Körper.

3.0.4. Den letzten Abschnitt dieses Kapitels füllen Versuche zur *Diffusion* und *Osmose*. Um diese Vorgänge verstehen zu können, benötigen die Schüler bereits eine Reihe von Kenntnissen über den molekularen Aufbau der Flüssigkeiten und Gase und über die kinetische Gastheorie.
Um das Verständnis zu erleichtern, sollten bei der Behandlung dieses Stoffgebietes neben den Experimenten zur Diffusion und Osmose unbedingt auch die entsprechenden Modellexperimente V 3.4.3. und V 3.4.6. vorgeführt werden.

3.1. Der molekulare Aufbau der Flüssigkeiten und Gase — Die Verschiebbarkeit der Moleküle

3.1.1. Bestimmung der Größenordnung des Durchmessers eines Ölmoleküls [SE]

1. Öl
2. Platindraht
3. Bunsenbrenner
4. Präzisionswaage mit Wägesatz
5. kleines Uhrglas
6. Lykopodium oder Korkmehl
7. Entwicklerschale (40 cm × 40 cm)
8. Lineal mit Meßteilung

Methodische Hinweise

1. Der Versuch kann auch schon im Anfangsunterricht gezeigt werden, wenn man auf die quantitative Auswertung verzichtet. Es ist für die Schüler dieser Altersstufe wichtig, sie nicht nur gedanklich mit der molekularen Teilbarkeitsgrenze vertraut zu machen, sondern ihnen diese auch unmittelbar zu zeigen.
2. Man geht bei diesem Versuch von der Voraussetzung aus, daß ein auf einer Wasseroberfläche vorhandener Ölfleck, der durch die Ausbreitung eines Öltropfens entstanden ist, etwa die Dicke einer Molekülschicht hat. Zur Ermittlung der Dicke dieser Schicht ist es notwendig, das Volumen des Tropfens und seine Ausbreitungsfläche zu bestimmen.

Vorarbeiten

Das Volumen des Öltropfens wird aus der Masse und der Dichte des Tropfens berechnet. Die Masse des Tropfens wird durch Wägen auf einer Präzisionswaage festgestellt. Man stellt ein mit etwas Öl gefülltes kleines Uhrglas auf die Waage und tariert aus. Ein Platindraht wird mehrmals hintereinander etwa 2 mm tief in das Öl getaucht. Das am Platindraht haftende Öl wird vor jedem neuen Eintauchen des Drahtes in einer Bunsenflamme vollständig verbrannt. Die Eintauchtiefe muß bei allen Versuchen gleich groß sein, damit die Tropfen immer wieder annähernd das gleiche Volumen haben. Man entnimmt so dem Uhrglas eine bestimmte Anzahl Tropfen und stellt die Massenverminderung des Öls fest.
Unter der Voraussetzung, daß stets gleich viel Öl mit dem Draht entfernt wird, ergibt sich aus der Massenänderung Δm und der entnommenen Tropfenzahl n die Masse eines Tropfens:

$$m = \frac{\Delta m}{n}.$$

Das Volumen V des Tropfens berechnet man aus seiner Masse und seiner Dichte:

$$V = \frac{m}{\varrho} = \frac{\Delta m}{n \cdot \varrho}.$$

Die Dichte kann man nach einem der im 1. Teil beschriebenen Verfahren bestimmen, oder man entnimmt sie einer Tabelle. Dabei ist die Temperatur zu berücksichtigen.
Eine Entwicklerschale aus Glas oder Plast mit einer Seitenlänge von etwa 40 cm wird sehr sorgfältig gereinigt. Sie wird zuerst mit stark verdünnter Salzsäure und dann mit Natronlauge ausgespült. Anschließend wischt man die Schale mit einem mit Alkohol getränkten Läppchen aus und spült mit destilliertem Wasser nach.

Versuchsdurchführung

Die sorgfältig gereinigte Schale füllt man zur Hälfte mit destilliertem Wasser und bestreut die Oberfläche des Wassers ganz gleichmäßig und sehr dünn mit Lykopodium oder Korkmehl. Der Platindraht wird so weit wie beim Ermitteln der Masse des Öltropfens in das Öl getaucht. Den anhaftenden Tropfen bringt man durch Eintauchen des Drahtes in das Wasser auf die Wasseroberfläche. Der Öltropfen breitet sich auf der Oberfläche nach allen Seiten annähernd gleichmäßig aus und verdrängt das aufgestreute Lykopodium. Es entsteht eine kreisförmige Ölfläche. Man mißt den Durchmesser der Fläche und berechnet ihren Flächeninhalt. Sollte die Ölfläche von der Form einer Kreisfläche stark abweichen, so mißt man mehrere Durchmesser in verschiedenen Richtungen und errechnet ihren Mittelwert. Der Quotient aus dem Volumen des Tropfens und dem Flächeninhalt A der Ölschicht ergibt die Dicke h der Ölschicht:

$$h = \frac{V}{A}.$$

Beispiel

Die Dichte des Öls wird zu $\varrho = 0{,}90\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ bestimmt. Es werden 100 Tropfen Speiseöl mit Hilfe des Platindrahtes aus dem Uhrglas entfernt. Die Abnahme der Masse beträgt $\Delta m = 2{,}2$ mg. Die durch den Öltropfen auf der Wasseroberfläche entstehende Ölschicht hat einen Durchmesser von $d = 27$ cm.

In dem angegebenen Beispiel ist

$$V = \frac{\Delta m}{n \cdot \varrho} \qquad \text{und} \qquad A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}. \qquad \text{Demnach ist } h = \frac{V}{A}.$$

$$V \approx 2{,}44 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{cm^3} \qquad A \approx 5{,}7 \cdot 10^{2}\ \mathrm{cm^2} \qquad h \approx 4{,}3 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{cm}.$$

Bemerkungen

1. Die berechnete Dicke gibt nicht genau den Durchmesser eines Ölmoleküls an, sondern läßt nur die Größenordnung des Moleküls erkennen. Erreicht die Dicke der Ölschicht die monomolekulare Grenze, so zerfällt die Ölschicht.
2. Der Versuch kann einer größeren Anzahl von Beobachtern vorgeführt werden, wenn man eine Schale mit Glasboden verwendet und mit dem Tageslichtschreibprojektor projiziert.
3. Für den Versuch eignet sich jede Ölart.
4. Um nachzuweisen, daß die Ölschicht nahezu monomolekular ist, bringt man auf die Wasseroberflächen in vier Schalen oder Tellern jeweils 1, 2, 3 und 4 Tropfen Öl. Die Flächen der Ölschichten verhalten sich angenähert wie 1:2:3:4.
5. Vergleiche 11. Teil, V 3.1.1. und V 3.1.2.!

3.1.2. Die Brownsche Bewegung im Wasser

1. Mikroskop (etwa 500fache Vergrößerung)
2. Objektträger und Deckgläser
3. Aquarelltusche und Pinsel
4. Glasstäbchen
5. Filterpapier

Methodische Hinweise

1. Die Versuche zur Brownschen Bewegung zeigen, wenn man vom Feldelektronenmikroskop absieht, die Existenz und die Bewegung der Moleküle am deutlichsten. Das ist schon im Anfangsunterricht des Faches Physik zum Nachweis der molekularen Struktur der Stoffe, aber auch zur Einführung in die kinetische Gas- und Wärmetheorie von Bedeutung, so daß man bei verschiedener Gelegenheit der gleichen Klasse beide Versuche zeigen sollte. Im Anfangsunterricht ist es sinnvoll, die Versuche mit einem Modellversuch zu verbinden, der zeigt, wie größere Körper durch Stöße kleinerer Körper in Bewegung geraten (vgl. V 3.1.4.).
2. Wenn die Schüler die Brownsche Bewegung zum ersten Mal zu sehen bekommen, ist es angebracht, den Versuch zu zeigen und die Überraschung der Schüler bei der Beobachtung auszunutzen, um ihr Interesse an der Klärung des Sachverhaltes zu wecken.
   Bei einer späteren erneuten Demonstration kann der Versuch dann den Charakter eines Bestätigungsversuchs haben.
3. Methodisch günstig ist die Projektion mit einem leistungsfähigen Mikroprojektor. Eine Projektion mit einem einfachen Mikroskop und Beobachtung durch Schülergruppen ist aber immer noch günstiger als eine Arbeit in gleicher Front mit den Mikroskopen aus der Biologiesammlung, da die Einstellung doch schwierig ist und dem Lehrer bei einer Einzelbeobachtung die Kontrolle fehlt, ob alle Schüler wirklich die Bewegung sehen.

Versuch

Man bringt einen Tropfen Wasser mit einem Glasstäbchen auf einen Objektträger. Mit einem Pinsel wird etwas Aquarelltusche aufgenommen und in den Wassertropfen übertragen, aber nur so viel, daß eine geringe Färbung des Tropfens bemerkbar ist. Auf den Objektträger legt man ein Deckglas. Damit zwischen dem Deckglas und dem Objektträger keine Luftblasen eingeschlossen werden, bringt man das Deckglas in schräger Stellung so auf den Tropfen, daß er eine der Kanten benetzt. Man läßt dann das Deckglas vorsichtig auf den Objektträger absinken. Zwischen Deckglas und Objektträger darf sich nur so viel Wasser befinden, daß das Deckglas bei jeder Lage des Objektträgers fest haftet. Überflüssiges Wasser saugt man mit Filterpapier an den Rändern des Deckglases ab. Der Versuch gelingt um so besser, je dünner die zwischen den Gläsern befindliche Wasserschicht ist.
Das fertige Präparat wird auf den Objekttisch des Mikroskops gelegt. Nähert man das Objektiv dem Präparat, so sieht man zunächst die gröberen Tuschestückchen scharf. Es sind dies die am Deckglas haftenden Körperchen, sie zeigen keine Bewegung. Dicht unterhalb dieser erblickt man wieder grobe, aber auch feine Körperchen; die feinsten sind in rascher Bewegung. Sie erhalten ihren Bewegungsimpuls durch die Bewegung der Wassermoleküle.

Bemerkungen

1. Für die Betrachtung der Brownschen Bewegung ist eine etwa 500fache optische Vergrößerung am geeignetsten. Bei geringerer Vergrößerung erscheint die Amplitude der Bewegung zu klein, bei stärkerer Vergrößerung ist die Lichtstärke des Objektes zu gering. Steht ein Mikroskop mit Mikroskopierleuchte zur Verfügung, dann kann auch eine stärkere Vergrößerung gewählt werden.

2. Zum Anfärben des Wassertropfens eignen sich alle Farben. Gute Wirkung erzielt man mit schwarzen oder weißen Pigmenten. Als geeignet hat sich auch chinesische Tusche erwiesen. Ebenso ist pulverisiertes Rutil (Titandioxid) zu empfehlen. Außer diesen Suspensionen eignen sich zur Beobachtung der Brownschen Bewegung auch Emulsionen sehr gut, z. B. stark verdünnte Milch. Bei der Verwendung eines Objektträgers mit Hohlschliff und Deckglas hält sich dieses Präparat mehrere Stunden.
3. Eine Projektion ist auch mit jedem Mikroskop möglich, indem man als Mikroskopierleuchte einen lichtstarken Bildwerfer einsetzt, dessen Licht man mit einem Kondensor über den Mikroskopierspiegel auf das Objekt konzentriert. Auf das Okular wird ein totalreflektierendes Prisma gesetzt, über das die Projektion auf einen in einer Entfernung von etwa 500 mm vertikal aufgestellten Bildschirm erfolgt. Am besten ist eine Mattglasscheibe geeignet, die in der Durchsicht betrachtet wird. Die Abbildung ist dann so groß, daß man sie jeweils mit einer Gruppe von Schülern betrachten und ihnen die Bewegungen zeigen kann.

3.1.3. Die Brownsche Bewegung in der Luft

1. Rauchkammer
2. Mikroskop (etwa 50fache Vergrößerung)
3. Physikleuchte mit Transformator

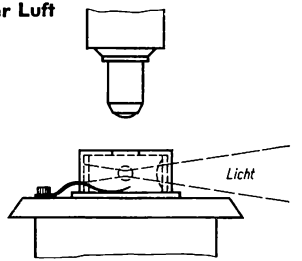


Abb. 3.1.3./1
Rauchkammer unter dem Mikroskop

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1 und 2 V 3.1.2.!
2. Die Bewegung von Rauch in Luft ist zwar besser zu beobachten, aber eine Projektion ist bei diesem Versuch nicht möglich.
3. Aus dem Vergleich der Bewegung in Wasser (V 3.1.2.) und in Luft kann man analog auf die Bewegung von Flüssigkeits- und Gasmolekülen schließen, so daß es zweckmäßig ist, den Schülern beide Versuche zu zeigen.

Versuch (Abb. 3.1.3./1)

Man dreht das Oberteil der Rauchkammer so, daß die Einblaseöffnung im Unterteil frei ist, und klemmt sie mit ihrer überstehenden Bodenplatte durch die Objekthalter auf dem Objekttisch des Mikroskops fest. Nachdem man etwas Tabakrauch in die Kammer geblasen hat, wird das Oberteil der Kammer so gedreht, daß seine seitliche Öffnung vor der Sammellinse steht, die in das Unterteil eingesetzt ist. Durch sie läßt man das Licht der Physikleuchte in die Kammer fallen. Im Mikroskop sind die unregelmäßigen Bewegungen infolge der Molekülstöße deutlich zu beobachten. Die Körperchen sind als helle Lichtpunkte zu sehen. Die Einstellung des Mikroskops ist wenig kritisch, und man findet leicht die günstigste Beobach-

tungsmöglichkeit. Infolge der Erwärmung durch das Lichtbündel stellt sich im Rauch leicht eine Strömung ein. Das ist zu vermeiden, indem man als Wärmefilter eine wassergefüllte Küvette vor die Physikleuchte stellt.

Bemerkung

Behelfsmäßige Rauchkammern kann man in verschiedener Weise herstellen.

a) Eine runde Pillenschachtel aus Plast ist etwa wie die industriell gefertigte Rauchkammer zu gestalten. In den Deckel bohrt man ein Loch (∅ 10 mm) und verschließt es durch Einkleben einer glasklaren Plastfolie. Die Seitenflächen des Deckels schneidet man in einer Breite von etwa 10 mm weg. Aus dem oberen Abschnitt der Seitenfläche des Unterteils der Schachtel schneidet man um 90° versetzt zwei entsprechende Stücke heraus. Einen dieser Ausschnitte verschließt man durch eine durchsichtige Folie als Lichteintrittsöffnung. Den Boden der Schachtel legt man mit mattschwarzem Papier aus. Bei der Versuchsdurchführung ist zwischen Leuchte und Rauchkammer eine Sammellinse zu stellen, so daß der Konvergenzpunkt unter der Beobachtungsöffnung liegt.
b) Auch andere kleine, quaderförmige Schachteln kann man in entsprechender Weise mit Beobachtungs- und Lichteintrittsöffnungen versehen. Da ein Drehen des Deckels nicht möglich ist, bohrt man in die Schachtel eine Einblaseöffnung, die man mit einem Bohrkern aus einem durchbohrten Gummistopfen verschließen kann (∅ 5 mm).

3.1.4. Modellversuch zur Brownschen Bewegung

1. Gerät für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie
   1 Kammer mit Antrieb
   1 leichter Stempel mit Stempelhalter
   400 Stahl- oder Glaskugeln ∅4 mm
   1 oder 2 Holz-, Glas- oder Stanniolkugeln ∅12 mm
2. Experimentiermotor

Methodische Hinweise

1. Die in die Kammer eingeschütteten Kugeln sind Modelle der Moleküle einer Flüssigkeit oder eines Gases. Die größere Holz-, Glas- oder Stanniolkugel vertritt die Stelle eines größeren Körperchens, das bei der Brownschen Bewegung durch Molekülstöße in Bewegung versetzt wird.
2. Um den Einfluß der Temperatur auf die Brownsche Bewegung zu veranschaulichen, kann man die Schwingungsfrequenz der Bodenplatte während des Experiments variieren.
3. Auf den Modellcharakter des Experiments ist unbedingt hinzuweisen.
4. Vergleiche MB 3.0.1.!

Versuch

In die Kammer werden etwa 400 Stahl- oder Glaskugeln vom Durchmesser 4 mm eingefüllt. Als Modell eines größeren Körperchens gibt man ein oder zwei größere Holz-, Glas- oder Stanniolkugeln dazu. Die Anzahl der Kugeln ist ohne Einfluß auf

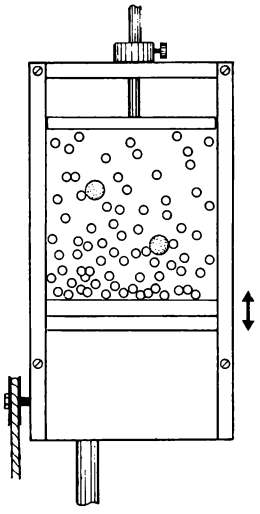


Abb. 3.1.4./1
Darstellung der Brownschen Bewegung
mit Hilfe des Gerätes
für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie

das Ergebnis. Das Kammervolumen kann mit Hilfe des leichten Stempels beliebig eingeschränkt werden. Man wählt eine Schwingungsfrequenz der Bodenplatte von etwa 800 min^{-1} bis 1000 min^{-1}.
Durch die Schwingungen der Bodenplatte werden die Stahlkugeln in heftige Bewegung versetzt. Sie bringen ihrerseits die größeren Kugeln durch Stöße in unregelmäßige Bewegungen (Abb. 3.1.4./1).

Bemerkungen

1. Zur besseren Sichtbarkeit kann die Kammer mit Hilfe eines Tageslichtschreibprojektors mit Kippeinrichtung projiziert werden.
2. Zum Entleeren der Kammer benutzt man die Fangmulde (vgl. MB 3.0.1.!).

3.1.5. Vorversuch zum Vergleich der Viskosität von Flüssigkeiten mit Hilfe der Sinkzeiten von Kugeln [SE]

1. Reagenzgläser
2. Holzleiste (200 mm × 40 mm × 5 mm) mit Bohrungen zur Aufnahme von Reagenzgläsern
3. Holzleiste wie 2., ohne Bohrungen
4. Stahlkugeln (Fahrradwälzlagerkugeln)
5. verschiedene Ölsorten
6. Gummistopfen für die Reagenzgläser

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist hier angebracht, um qualitativ nachzuweisen, daß die Viskosität eine Auswirkung der Verschiebbarkeit der Moleküle gegeneinander ist. In V 3.1.6. wird er quantitativ fortgeführt.

Versuch

Das Verfahren besteht darin, daß man Kugeln gleichen Volumens und gleicher Masse in gleichartigen Gefäßen, die mit verschiedenen Flüssigkeiten gefüllt sind, gleichzeitig sinken läßt. Die Zeiten, die sich dabei für die einzelnen Kugeln ergeben, lassen auf die Viskosität der verschiedenen Flüssigkeiten schließen. Man füllt mehrere Reagenzgläser mit verschiedenen Ölsorten und ein Glas mit Wasser, läßt in jedes Glas eine Kugel hineingleiten und verschließt die Gläser durch Gummistopfen. Dabei ist darauf zu achten, daß die Stopfen alle gleich tief in die Reagenzgläser hineinragen und keine Luft mit einschließen. Die Reagenzgläser steckt man durch eine Holzleiste, die mit Bohrungen zur Aufnahme der Gläser versehen ist. Damit die Reagenzgläser beim Experimentieren nicht herausrutschen, legt man auf die Gummistopfen eine zweite, nicht durchbohrte Leiste und verbindet beide Leisten durch Schnüre (Abb. 3.1.5./1a). Zu Beginn des Versuchs hält man die Leiste so, daß die Reagenzgläser lotrecht nach unten zeigen. Man kehrt die Gläser durch Drehen der Holzleiste gleichzeitig um. Man beobachtet bei den einzelnen Ölsorten je nach der Viskosität eine verschiedene Sinkzeit der Kugeln (Abb. 3.1.5./1b). Sie ist um so kürzer, je kleiner die Viskosität der Flüssigkeit ist.

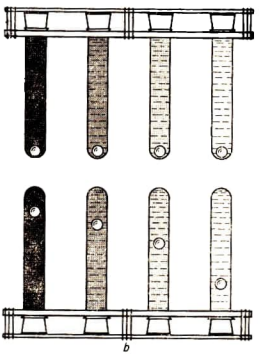


Abb. 3.1.5./1
Holzleiste mit eingesetzten Reagenzgläsern:
a) Ausgangsstellung,
b) Vergleich der Viskosität.
Die Sinkgeschwindigkeit der Kugel ist von der Viskosität abhängig.

3.1.6. Messung der Viskosität von Flüssigkeiten [SE]

1. Glasrohr (⌀ 4 cm, Länge 75 cm)
2. Glaskugeln (⌀ etwa 2 mm)
3. Glyzerin oder Öl
4. Stoppuhr
5. Präzisions-Feinmeßschraube
6. Thermometer

Methodischer Hinweis

Die Viskosität und ihre Temperaturabhängigkeit sind in der Technik für die Schmiermittel wichtig. Im Physikunterricht werden diese Zusammenhänge nur

gestreift. Dieser Versuch ist aber noch in anderer Hinsicht bedeutungsvoll, da man ihn zur Erzeugung von gleichförmigen Bewegungen heranziehen kann. Er kann auch als Modellversuch für den Fall aus großer Höhe im lufterfüllten Raum dienen.

Versuch

Ein etwa 75 cm langes, 4 cm weites Glasrohr wird an einem Ende mit einem Gummistopfen verschlossen, vertikal an einem Stativ befestigt und mit der Versuchsflüssigkeit gefüllt (Abb. 3.1.6./1). Durch zwei an das Glasrohr geklebte Papier-

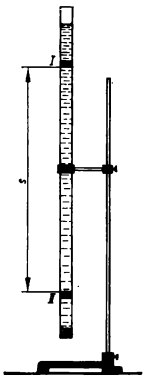


Abb. 3.1.6./1
Versuchsanordnung zur Messung der Viskosität von Flüssigkeiten

streifen I und II wird eine etwa 10 cm unter dem Flüssigkeitsspiegel beginnende Strecke s markiert. Je tiefer sie liegt, um so größer ist die Gewähr, daß die zur Versuchsdurchführung erforderliche konstante Fallgeschwindigkeit einer die Flüssigkeit durchfallenden Kugel erreicht ist. Die Zeit t, in der die Kugel die Meßstrecke zurücklegt, wird mit einer Stoppuhr gemessen und dient zur Berechnung der Geschwindigkeit. Der Kugeldurchmesser wird wiederholt mit der Feinmeßschraube bestimmt, aus den Einzelmessungen wird der Mittelwert gebildet. Zur Vervollständigung der Messung ist auch die Temperatur festzustellen.

Auswertung

Fällt eine Kugel (Dichte ϱ_1) in einer Flüssigkeit (Dichte ϱ_2), so erfährt sie eine Reibungskraft F_R, die proportional ihrer Geschwindigkeit v und ihrem Radius r ist. Nach dem Gesetz von Stokes gilt $F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot v \cdot r$, wobei η der Koeffizient der inneren Reibung ist und die Viskosität (Zähigkeit) der Flüssigkeit angibt.
Die Kraft F, mit der die Kugel nach unten gezogen wird, ist gleich der Differenz aus der Gewichtskraft F_G der Kugel und der Auftriebskraft F_A, die sie in der Flüssigkeit erfährt. Unter dem Einfluß von F erfährt die Kugel so lange eine Beschleunigung, bis die Reibungskraft F_R gleich F geworden ist. Von diesem Augen-

blick an bewegt sich die Kugel mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Es gelten folgende mathematische Beziehungen:
Die Gewichtskraft der Kugel ist

$$F_G = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \varrho_1 \cdot g ,$$

ihre Auftriebskraft in der Versuchsflüssigkeit

$$F_A = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \varrho_2 \cdot g ,$$

worin ϱ_1 die Dichte der Kugel, ϱ_2 die Dichte der Flüssigkeit, g die Fallbeschleunigung sind. Für die Zugkraft ergibt sich hieraus

$$F = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot (\varrho_1 - \varrho_2) \cdot g .$$

$$\text{Aus } F_R = F \text{ folgt } \eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2}{v} \cdot (\varrho_1 - \varrho_2) \cdot g .$$

Bemerkung

Die innere Reibung einer Flüssigkeit ist sehr stark von der Temperatur abhängig. Den Temperatureinfluß erkennt man leicht durch mehrmaliges Wiederholen des Versuchs bei verschiedenen Temperaturen und grafische Darstellung der Zeiten in Abhängigkeit von der Temperatur in einem Zeit-Temperatur-Diagramm. Die Temperaturmessung wird sofort nach dem Versuch vorgenommen.

3.1.7. Bestimmung der Viskosität dünnflüssigen Öls [SE]

1. Zylindrischer Scheidetrichter mit Hahn
2. Meßzylinder
3. dünnflüssiges Öl
4. Stoppuhr

Methodischer Hinweis

Die Versuche 3.1.7. und 3.1.8. arbeiten nach dem Ausflußprinzip. Die unterschiedliche Art der Gefäße wird durch die Viskosität der untersuchten Flüssigkeit bestimmt. Auch hier gilt, daß das technische Problem der Viskosität im Physikunterricht der allgemeinbildenden Schulen nur gestreift wird. Die Versuche können aber auch im Stoffgebiet Mechanik der Flüssigkeiten zur Untersuchung des Ausströmens einer Flüssigkeit ausgewertet werden.

Versuch

Die Viskosität einer Flüssigkeit kann mit Hilfe der Ausflußzeit einer festgelegten Flüssigkeitsmenge ermittelt werden. Ein mit Wasser von 20 °C gefüllter, mit einem Hahn versehener Scheidetrichter wird zu diesem Zweck über einem Meßglas mittels einer Rohrklemme an einem Stativ befestigt (Abb. 3.1.7./1). Man öffnet den Hahn und mißt mit einer Stoppuhr die Zeit, in der 100 cm³ in das Meßglas geflossen sind. Nachdem man die Gefäße sorgfältig getrocknet hat, wiederholt man den Versuch mit dünnflüssigem Öl. Der Quotient aus der Auslaufzeit des Öls und des Wassers gibt die Viskosität des Öls in Engler-Graden an.

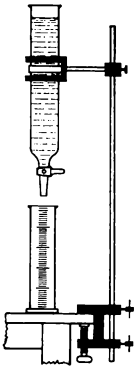


Abb. 3.1.7./1
Scheidetrichter mit Meßglas zur Bestimmung der Viskosität dünnflüssigen Öls

Bemerkungen

1. Diese Art der Viskositätsmessung wurde durch den Chemiker Karl Engler (1842 bis 1925) angegeben. Sie beschränkt sich auf die Feststellung der Viskosität relativ zur Viskosität des Wassers. Ein Öl besitzt beispielsweise die Viskosität von 7 Engler-Graden, wenn es bei 20 °C die 7fache Auslaufzeit des Wassers hat.
2. Vergleiche Bemerkung zu V 3.1.6.!

3.1.8. Bestimmung der Viskosität des Glyzerins [SE]

1. Bürette
2. Becherglas
3. Stoppuhr
4. Thermometer
5. Glyzerin

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH 3.1.7.!

Versuch

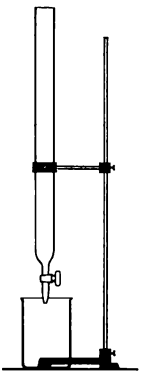


Abb. 3.1.8./1
Bürette zur Bestimmung der Viskosität von Glyzerin

Die Bürette wird an ein Stativ geklemmt und bei geschlossenem Hahn bis zu einer bestimmten Höhe h_1 mit Wasser gefüllt (Abb. 3.1.8./1). Ein Becherglas wird daruntergestellt. Der Hahn wird geöffnet und gleichzeitig eine Stoppuhr eingeschaltet. Es wird die Zeit t_1 gemessen, in der die Flüssigkeit auf die Höhe h_2 abgesunken ist. Der Versuch wird mit Glyzerin oder Öl wiederholt und die für die gleiche Ausflußmenge (gleiche Höhendifferenz $h_1 - h_2$) erforderliche Zeit t_2 mit dem ersten Meßwert t_1 verglichen. Infolge der größeren Viskosität des Glyzerins verringert sich die Ausflußgeschwindigkeit erheblich, das heißt, t_2 ist größer als t_1. Wie bei V 3.1.7. ergibt der Quotient $\frac{t_2}{t_1}$ die Viskosität des Glyzerins in Engler-Graden.

3.1.9. Verformung plastischer Körper durch ihr Eigengewicht

1. Paraffin, Siegellack, Pech
2. Glasrohr (∅ etwa 2 cm, Länge etwa 50 cm)
3. Zellglasfolie (50 cm × 2 cm × 0,2 mm)
4. Blumendraht
5. mit Sand gefüllte Blechbüchse
6. 2 Holz- oder Eisen-Dreikantstücke Ⓢ
7. Bunsenbrenner

Methodischer Hinweis

Die Versuche 3.1.9. und 3.1.10. zeigen, daß es feste Körper gibt, die noch in geringem Maße die Eigenschaften einer Flüssigkeit haben. Bei den Darlegungen im Unterricht muß herausgearbeitet werden, daß hier die Bindungskräfte zwischen den Molekülen denen in einer Flüssigkeit entsprechen im Gegensatz zu Körpern mit kristalliner Struktur.

Herstellung der Versuchskörper

Als Versuchskörper werden etwa 40 cm lange Paraffin-, Siegellack- und Pechstäbe mit einem Durchmesser von etwa 2 cm verwendet. Man stellt diese Stäbe auf folgende Weise her:
Ein etwa 50 cm langes Glasrohr mit einem Durchmesser von etwa 2 cm wird mit einer 0,2 mm starken Zellglasfolie dreifach umwickelt; außerdem wird es mit Blumendraht schraubenförmig umwunden. Man schiebt die Zellglashülle von dem Rohr herunter und stellt sie lotrecht in eine mit Sand gefüllte Blechbüchse. Das obere Ende wird mittels einer Stielklemme und einer Muffe an einem Stativ befestigt. In diese Gießform wird das in einer Büchse geschmolzene Paraffin gegossen. Da sich das Paraffin beim Erkalten zusammenzieht, ist es notwendig, vor seinem Erstarren noch Paraffin nachzugießen.
Nach dem Erstarren des Paraffins wird der Zellglasmantel abgewickelt. Beim Herstellen der Siegellack- und Pechstäbe wird ebenso verfahren.

Versuch

Die Paraffin-, Siegellack- und Pechstäbe werden an beiden Enden waagerecht nebeneinander auf zwei Dreikantstücke gelegt, so daß die Enden etwa 10 mm bis 20 mm überstehen. Nach 1 bis 2 Wochen kann man eine starke Durchbiegung der Stäbe infolge ihres Eigengewichtes und ihrer Plastizität feststellen. Die Durchbiegung ist von der Zeit und der Temperatur stark abhängig.

Bemerkung

Die Verformung plastischer und dabei gleichzeitig spröder Körper kann man bei Straßenarbeiten an geöffneten Pechtonnen beobachten, aus denen das scheinbar feste Pech langsam ausfließt, und zwar auch in der kalten Jahreszeit.

3.1.10. Verformung eines Glasstabes durch Belastung mit einem Wägestück

1. Glasstab (∅ 6 mm, Länge 75 cm)
2. 2 Holz- oder Metall-Dreikantstücke Ⓢ
3. 2 Unterstellkästen
4. 1-kg-Wägestück mit Haken

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.1.9.1

Versuch

Die Versuchsanordnung ist ähnlich der in V 3.1.9. Statt der plastischen Stäbe verwendet man einen etwa 75 cm langen Glasstab mit einem Durchmesser von 6 mm. Die beiden Dreikantstücke werden auf Unterstellkästen gelegt. In der Mitte zwischen den beiden Auflagepunkten des Glasstabes wird ein mit einem Haken versehenes Wägestück von 1 kg an den Stab gehängt. Nach etwa 6 Monaten kann man feststellen, daß sich der Stab um etwa 3 mm bis 4 mm durchgebogen hat. Die Durchbiegung bleibt auch nach Entfernen des Wägestückes bestehen.

Bemerkungen

1. Da sich dieser Versuch über eine längere Zeit erstreckt, ist es zweckmäßig, die Versuchsanordnung an einer ungestörten Stelle des Lehrmittelkabinetts aufzustellen.
2. Bei diesem Versuch kann man darauf hinweisen, daß der Größe der Refraktorlinsen durch die infolge ihres Eigengewichtes eintretende Verformung eine Grenze gesetzt ist.

3.2. Oberflächenspannung und Kapillarität

3.2.1. Vorversuch zum Nachweis der Oberflächenspannung des Wassers

1. Becherglas
2. Tuschpinsel

Methodischer Hinweis

Die mit diesem Versuch gezeigten Vorgänge sind den Schülern durchaus bekannt, können aber von ihnen meist nicht erklärt werden. So ist er dazu geeignet, den Schülern eine Problemstellung zu geben. Zur Lösung des Problems sind die Versuche 3.2.10., 3.2.13. bis 15. heranzuziehen.

Versuch

Man taucht einen Tuschpinsel in ein Glas mit Wasser und beobachtet, daß sich die Haare struppig auseinander spreizen. Zieht man ihn aus dem Wasser heraus, so nimmt er die bekannte spitzverlaufende Form an. Die einzelnen Haare werden durch die Oberflächenspannung des im Pinsel haftenbleibenden Wassers zusammengehalten.

3.2.2. Nachweis der Oberflächenspannung des Wassers mit Hilfe einer Nähnadel oder einer Rasierklinge [SE]

1. Glasschale
2. Nähnadel
3. Rasierklinge
4. Pinzette
5. Bruchgramm-Wägestücke

Methodischer Hinweis

Das Schwimmen voller Metallkörper auf einer Wasseroberfläche ist für die Schüler überraschend. Dieser Versuch ist wie V 3.2.1. zur Einführung in die Problematik der Oberflächenspannung geeignet.

Variante a: Benutzung einer Nähnadel

Eine Glasschale wird mit Wasser gefüllt. Man legt eine Nähnadel mit Hilfe einer Pinzette behutsam auf die Wasseroberfläche. Die Nadel schwimmt auf der Oberfläche des Wassers. Sollte sich die Nadel langsam verschieben und sich dabei dem Rande der Glasschale nähern, so schiebt man sie mit Hilfe einer anderen Nadel oder eines Hölzchens wieder zur Mitte der Oberfläche.

Variante b: Benutzung einer Rasierklinge

Statt der Nähnadel kann man auch eine Rasierklinge verwenden. Mit einer Pinzette legt man mehrere Bruchgramm-Wägestücke nacheinander auf die Mitte der Rasierklinge. Die Rasierklinge besitzt infolge der Oberflächenspannung des Wassers eine Tragfähigkeit von etwa 25 mN. Das entspricht der Gewichtskraft von Wägestücken mit einer Masse von 2,5 g.

Bemerkungen

1. In der gleichen Weise kann man auch eine Münze (10 Pf) auf der Wasseroberfläche schwimmen lassen.
2. Verwendet man bei Variante a eine magnetisierte Nähnadel, so stellt sie sich wie eine Magnetnadel in Nord-Süd-Richtung ein.
3. Der Versuch kann dadurch vielen Schülern gleichzeitig sichtbar gemacht werden, daß man die Wasseroberfläche mit einer Physikleuchte beleuchtet und mit Hilfe eines Spiegels und einer Linse auf einen Schirm oder auf die Wand projiziert. Bewegungen der Nadel bzw. der Rasierklinge unter der Einwirkung eines Magnetfeldes kann man gut erkennen.
4. Der Versuch gelingt besonders leicht, wenn man die Nähnadel bzw. Rasierklinge leicht einfettet. Entfettet man die Nadel oder Rasierklinge und setzt dem Wasser in der Schale eine nicht zu kleine Menge eines Geschirrspülmittels (z. B. Fit) zu, so gelingt es nicht, die Nadel oder Klinge auf der Oberfläche schwimmen zu lassen, weil die Oberflächenspannung vermindert wurde.

3.2.3. Nachweis der Oberflächenspannung des Wassers mit Hilfe eines U-förmig gebogenen Glasrohrs

1. U-förmig gebogenes Glasrohr (lichte Weite etwa 2 mm)
2. spitz ausgezogene Spritzpipette
3. Projektionseinrichtung

Methodischer Hinweis

Nach den Einführungsversuchen ist mit diesem Versuch ein erster genauerer Einblick in das Wesen der Oberflächenspannung zu geben. Die gewölbte Flüssigkeitsoberfläche führt zu dem Schluß, daß Kräfte radial zur Wölbung wirksam sind. Diese Folgerung ist mit den Versuchen V 3.2.4. bis 3.2.6: zu vertiefen.

Versuch

Ein U-förmig gebogenes Glasrohr mit einem langen und einem kurzen Schenkel und einer lichten Weite von etwa 2 mm wird mit gefärbtem Wasser gefüllt. Die Flüssigkeitsoberflächen sind in beiden Schenkeln nach innen gewölbt. Mit Hilfe einer Spritzpipette tropft man Wasser in den langen Schenkel. Dabei steigt die Flüssigkeit in beiden Schenkeln gleich hoch. Hat die Flüssigkeit im kurzen Schenkel das Rohrende erreicht, so wölbt sich die Flüssigkeitsoberfläche in diesem Schenkel bei weiterer Wasserzugabe nach außen.
Das Wasser steigt im langen Schenkel über die Öffnung des kurzen Schenkels empor, ohne aus dieser auszulaufen. Es wird daran durch die Oberflächenspannung gehindert (Abb. 3.2.3./1).
Tropft man weiterhin Wasser in den langen Schenkel, so steigt die Flüssigkeit in diesem so weit an, bis der von ihr erzeugte Druck die Oberflächenspannung des Wassers überwindet. Das Wasser fließt aus.

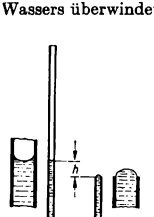


Abb. 3.2.3./1
Wasserstand in einem ungleichschenkligen U-Rohr

Bemerkungen

1. Der Versuch gelingt nur, wenn die Glasröhre sorgfältig gereinigt wurde und das Wasser die Röhre innen allseitig benetzt.
2. Verwendet man Alkohol statt Wasser, so gelingt der Versuch auch bei wenig sorgfältiger Reinigung des Glasrohres, jedoch sind die Wölbung der Flüssigkeit über den Rand des kurzen Schenkels und die erreichte Grenzhöhe im langen Schenkel nicht so hoch wie bei Wasser.
3. Es empfiehlt sich, diesen Versuch zu projizieren.

3.2.4. Tropfenbildung des Anilins beim Eintropfen in Wasser

1. Glasküvette (12 cm × 14 cm × 2 cm)
2. Bürette mit Hahn
3. Anilin
4. Fuchsin
5. Projektionseinrichtung, z. B. Tageslichtschreibprojektor mit Kippeinrichtung

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch knüpft einerseits an V 3.2.2. an, indem geringe Mengen Anilin zunächst an der Oberfläche schwimmen, dann wird aber an der etwa kugelförmigen Gestalt der Anilintropfen auch die Oberflächenspannung im Anilin erkennbar, so daß die Gedanken aus V 3.2.3. aufgegriffen werden können.

Versuch

Vor einem Projektionsapparat wird eine Bürette mit Hahn über einer Glasküvette an einem Stativ befestigt. Man füllt die Bürette zur Hälfte mit Anilin, das durch einige Tropfen Fuchsin gefärbt worden ist. Die Glasküvette wird bis etwa 25 mm unterhalb des oberen Randes mit Wasser gefüllt. Man senkt die Bürette, bis ihre Mündung die Wasseroberfläche berührt. Der Hahn der Bürette wird so weit geöffnet, daß das Anilin nur langsam ausfließt. Es bildet sich dabei ein kreisförmiger Anilinfleck auf der Wasseroberfläche (Abb. 3.2.4./1a). Bei weiterem Ausfließen des Anilins wölbt sich der Anilinfleck sackförmig nach unten (Abb. 3.2.4./1b), schnürt sich taillenförmig ein (Abb. 3.2.4./1c) und nimmt Tropfenform an. Durch das Anwachsen des Tropfens vergrößert sich seine Gewichtskraft. Überschreitet sie einen bestimmten Wert, dann überwindet sie die Oberflächenspannung des Wassers, der Tropfen reißt ab und sinkt schwingend zu Boden (Abb. 3.2.4./1d, e).



Abb. 3.2.4./1
Bildung eines Anilintropfens in Wasser

3.2.5. Erzeugen großer Anilintropfen durch Erhitzen

1. Becherglas (250 ml, hohe Form)
2. Anilin
3. Meßglas
4. Bunsenbrenner oder Stativheizplatte
5. Meßzylinder

Methodischer Hinweis

Hier wird in besonders eindrucksvoller Weise das gleiche wie in V 3.2.4. gezeigt.

Versuch

Der folgende von C. R. Darling angegebene Versuch ermöglicht in eindrucksvoller Weise die Bildung großer Tropfen mit einem Durchmesser von mehr als 2 cm. Man gießt in ein Becherglas von hoher, schlanker Form mit einem Fassungsvermögen von 250 ml etwa 150 ml Wasser und fügt 70 ml Anilin hinzu, das sich wegen seiner größeren Dichte am Boden sammelt.
Man erwärmt das Glas auf einem Drahtnetz über einer kleinen Gasflamme, so daß das Anilin sich erwärmt und an die Wasseroberfläche steigt. Dort kühlt es sich wieder ab und sinkt erneut zu Boden. Dabei bildet sich ein großer Tropfen, der sich schließlich von dem an der Oberfläche schwimmenden Anilin löst und absinkt. Da sich der Vorgang sehr langsam vollzieht, kann man bequem alle Phasen der Tropfenbildung verfolgen.

3.2.6. Kugelförmige Tropfen „schwerelos" gemachter Flüssigkeiten

1. Hahntrichter mit langem, gerade abgeschnittenem Rohr
2. Becherglas oder Küvette
3. Äthanol (Spiritus)
4. Olivenöl
5. Drachenblut
   (Harz des ostindischen Drachenbaumes)

Methodische Hinweise

1. Aus der Kugelgestalt des schwebenden Tropfens kann man schließen, daß radiale Kräfte den Tropfen zusammenhalten.
   Der Versuch ergänzt somit V 3.2.3.
2. Wichtig ist der Hinweis auf das entsprechende Verhalten von Flüssigkeiten im Zustand der Schwerelosigkeit an Bord von Raumschiffen auf einer Satellitenbahn.

Versuch

Man versetzt etwa 60 Raumteile Wasser mit 40 Raumteilen Brennspiritus, so daß die entstehende Mischung die gleiche Dichte hat wie Olivenöl. Man erkennt dies daran, daß ein in die Mischung gebrachtes Olivenöltröpfchen in ihr schwebt. Ist dies erreicht, so füllt man einen mit einem langen Rohr versehenen Tropftrichter mit Olivenöl, das man mit ein wenig Drachenblut rot gefärbt hat, und klemmt ihn über einer Küvette an ein Stativ. Diese füllt man mit dem Wasser-Spiritus-Gemisch und senkt den Trichter so weit, daß die Rohröffnung etwa 1 cm tief eintaucht. Man öffnet den Hahn sehr behutsam, so daß das Öl langsam abfließt. Es bildet sich an der Rohröffnung ein großer Öltropfen von kugelförmiger Gestalt, der sich schließlich ablöst und im Wasser schwebt.

Bemerkungen

1. Es empfiehlt sich, den Hahn vor dem Einführen des Trichters in das Wasser kurzzeitig zu öffnen, damit das Rohr zu Beginn des Versuchs bereits mit Öl gefüllt ist.

2. Man gieße das zum Versuch gebrauchte Wasser-Spiritus-Gemisch nicht fort, sondern bewahre es in einer besonderen Flasche für den nächsten Versuch auf.
3. Der Versuch kann durch Projektion einem großen Kreis von Schülern gezeigt werden.

3.2.7. Abhängigkeit der Tropfgeschwindigkeit des Wassers von der Oberflächenspannung [SE]

1. Scheidetrichter (Inhalt 25 ml bis 50 ml)
2. 2 kleine Bechergläser
3. Äthoxyäthan (Diäthyläther)
4. Stoppuhr oder Taschenuhr mit Sekundenzeiger

Methodischer Hinweis

Hier soll qualitativ gezeigt werden, daß die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit durch Zusätze verändert werden kann. Das gleiche wird in anderer Weise in V 3.2.8. und 3.2.9. erreicht.

Versuch

Die Versuchsanordnung ist ähnlich der in V 3.1.8. Statt des Meßglases stellt man ein kleines Becherglas unter den Hahn des Scheidetrichters. Man öffnet den Hahn so weit, daß das Wasser langsam in das Becherglas tropft, und zählt die während einer Minute herabfallenden Tropfen.
In ein zweites Becherglas wird etwas Äther gegossen und in diesem geschwenkt. Dadurch wird der sich bildende Ätherdampf im Glas annähernd gleichmäßig verteilt. Stellt man das mit Ätherdampf gefüllte Glas dicht unter den Scheidetrichter, so wird die Tropfgeschwindigkeit des Wassers etwa verdoppelt. Der Ätherdampf wird von dem sich bildenden Wassertropfen adsorbiert. Dadurch verringert sich die Oberflächenspannung des Wassers, der Tropfen reißt rascher ab.

Bemerkung

Die Vergrößerung der Tropfgeschwindigkeit wird außer durch Äther auch durch andere organische Verbindungen bewirkt, z. B. durch Chloroform oder Pentanol.

3.2.8. Veränderung der Oberflächenspannung des Wassers durch Berühren mit Kampfer [SE]

1. Glasschale (möglichst eine runde Schale mit senkrechter Wandung)
2. Figuren aus Glimmer oder dünnem Karton ®
3. Kampferstückchen
4. Pinzette

Methodischer Hinweis

In den Versuchen 3.2.8. und 9. wird in einem Teilgebiet die Oberflächenspannung herabgesetzt, so daß Strömungen zwischen den Gebieten verschiedener Ober-

flächenspannungen Körper bewegen. Daraus kann man herleiten, daß die Moleküle der Flüssigkeitsoberfläche durch die Oberflächenspannung potentielle Energie besitzen. In V 3.2.11. werden die Strömungsvorgänge besonders eindrucksvoll sichtbar.

Versuch

Man schneidet aus dünnem Glimmer zwei Figuren entsprechend Abb. 3.2.8./1 aus Die schmalen Spalten werden nach innen zu ein wenig breiter geschnitten.
Eine gut entfettete Glasschale wird halb mit Wasser gefüllt. Das ein Boot darstellende Glimmerblättchen wird auf die Wasseroberfläche gelegt. In den schmalen

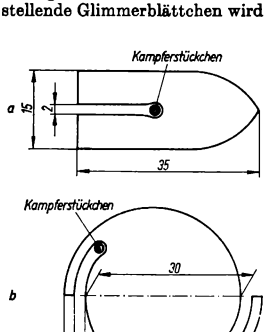


Abb. 3.2.8./1
Glimmerblättchen in Form
a) eines Bootes,
b) einer Drehscheibe (Maßstab 1:1)

Spalt bringt man an seine breiteste Stelle mit Hilfe einer Pinzette ein kleines Stückchen Kampfer. Sofort setzt sich das Glimmerboot in Bewegung und kreist auf dem Wasser herum. Die Bewegung dauert sehr lange Zeit, unter günstigen Umständen stundenlang an.
Verwendet man statt der Bootsform die runde Glimmerscheibe, so legt man erst die Kampferstückchen auf die eingeschnittenen Spalten und setzt dann die Scheibe vorsichtig auf die Wasseroberfläche. Bei Berührung des Kampfers mit der Wasseroberfläche beginnt die Scheibe, sich sofort rasch längere Zeit am gleichen Ort zu drehen.

Bemerkungen

1. Die Ursache für diese Vorgänge ist darin zu sehen, daß sich die Oberflächenspannung des Wassers durch das Auflösen von Kampfer vermindert. Es entsteht eine Wasserströmung von den Stellen geringerer Oberflächenspannung fort, so daß durch Rückstoß die Glimmerblättchen in Bewegung geraten.
2. Statt des Glimmers kann auch dünner Karton verwendet werden.
3. Für ein gutes Gelingen der Versuche ist es notwendig, die Glasschale ganz von anhaftendem Fett oder Öl zu befreien. Man verwendet hierzu Spiritus, Soda

oder Seifenpulver. Bei starker Verunreinigung behandelt man die Schale erst mit Natriumhydroxidlösung.
4. Ist die Schale gut entfettet, so führt ein auf die Wasseroberfläche geworfenes Kampferstückchen schnelle, kreisende Bewegungen aus.

3.2.9. Wirkung der Oberflächenspannung verschiedener Stoffe auf zwei eng nebeneinander befindliche bewegliche Körper [SE]

1. Glasschale
2. Streichhölzer, Nähnadeln
3. Äthanol, Äther
4. Tropfpipette

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.2.8.!

Versuch

Man legt 2 Streichhölzer dicht nebeneinander auf die Wasseroberfläche einer mit Wasser gefüllten Glasschale und bringt zwischen die beiden Streichhölzer einen Tropfen Äthanol oder Äther. Beide Hölzchen werden rasch auseinander, unter Umständen bis an den Rand der Schale getrieben. Statt der Streichhölzer kann man auch zwei Nähnadeln verwenden.

Bemerkung

Die Bewegung der Streichhölzer wird durch die Verminderung der Oberflächenspannung verursacht, die man durch das Auftropfen von Äthanol oder Äther herbeiführt. Die Versuchskörper folgen wieder der Strömung, die vom Gebiet einer niedrigeren zu den Gebieten höherer Oberflächenspannung hin gerichtet ist (vgl. V 3.2.8.).

3.2.10. Modellversuche zur Flotation [SE]

Zu Versuch 1

1. Kohlepulver
2. Quarzpulver
3. Terpentinöl
4. Pentanol
5. Reagenzgläser

Zu Versuch 2

Geräte 1. und 5., außerdem
6. Benzol oder Tetrachlormethan
7. Kaolin

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch soll in anschaulicher Weise die Bedeutung der Oberflächenspannung in einer technischen Anwendung zeigen.

Versuch 1

In einem Reagenzglas wird eine Mischung von feingemahlenem Kohle- und Quarzpulver mit Wasser aufgeschlämmt und kräftig geschüttelt. Nach kurzer Zeit

setzen sich beide Stoffe am Boden ab. Man gibt dem Wasser nunmehr einen Tropfen Terpentinöl oder Teeröl als Sammler und einige Tropfen Pentanol als Schäumer bei. Nach erneutem kräftigem Durchschütteln der Flüssigkeit steigen die Kohlekörperchen, getragen von den sich durch den Schäumer bildenden Luftbläschen, zur Wasseroberfläche empor; das Quarzpulver sinkt zu Boden.

Versuch 2

Man verreibt Ton oder Kaolin mit 10 Masseprozent Kohlepulver und schlämmt beides auf. Nach Zusatz einiger Tropfen Rohbenzol oder Tetrachlormethan und kräftigem Schütteln ist eine gut sichtbare Anreicherung der Kohle im Schaum festzustellen.

Bemerkungen

1. Flotation bedeutet Schwimmaufbereitung und wird zur Trennung von Erz- und Gangartanteilen verwendet. Man benutzt das Verfahren bei Erzen, die stark mit Gangart durchsetzt sind. Die Erze werden beim Versuch modellartig durch Kohle dargestellt.
2. Die Kohlekörperchen umgeben sich durch Zusatz des in der Technik als Sammler bezeichneten Stoffes mit einer molekularen Schicht dieser Substanz und werden dadurch wasserabstoßend. Die Trennwirkung beruht auf der durch das zugesetzte Pentanol bewirkten Verminderung der Oberflächenspannung des Wassers und der dadurch bewirkten Schaumbildung.
3. Statt Kohlepulver kann auch Graphitpulver und an Stelle von Quarz auch Kalkpulver verwendet werden.
4. Sollte die Flotation mißlingen, so ist die Korngröße des verwendeten Pulvers zu groß.

3.2.11. Verdrängung von Wasser durch Äthanol oder Äther

Zu Variante a

1. Flacher weißer Teller oder Untertasse mit flachem Rand
2. Farbstoff zum Anfärben des Wassers, z. B. Malachitgrün, Fuchsin oder Tinte
3. Äthanol (Brennspiritus)
4. Glasstäbchen

Zu Variante b

Geräte 1. und 2., außerdem
5. Äther

Methodischer Hinweis

Durch diesen Versuch können eindrucksvoll die Vorgänge in V 3.2.8. und 3.2.9. erklärt werden, die dort nur mittelbar zu erkennen sind.

Variante a: Verwendung von Wasser und Äthanol

Man färbt Wasser mit Malachitgrün oder einem anderen Farbstoff und gießt davon ein wenig auf einen Teller. Die Wasserschicht soll nicht mehr als 1 mm hoch sein.

Bringt man mit Hilfe eines Glasstabes einen Tropfen Äthanol in die Mitte der Wasseroberfläche, so zieht sich das gefärbte Wasser bis zum Tellerrand zurück und bildet dort einen farbigen Ring. Benutzt man statt des Tellers eine Untertasse mit flach ansteigendem Rand, so steigt das Wasser am Rand der Untertasse hoch.

Variante b: Verwendung von Wasser und Äther

Die Öffnung einer mit Äther gefüllten Flasche wird handhoch über den Teller gehalten. Der ausströmende Ätherdampf drängt das Wasser zum Tellerrand.

3.2.12. Nachweis der Oberflächenspannung einer Seifenhaut in einem Drahtring [SE]

1. Drahtring mit Griff ®, dazu erforderliches Material: Messing- oder Aluminiumdraht (∅ etwa 1,5 mm; Länge etwa 40 cm) Seidenfaden
2. Glasschale
3. Seifenlösung (vgl. MB 2.0.6.) oder Lösung eines Waschmittels
4. Bunsenbrenner
5. Drahtstück

Methodische Hinweise

1. In allen folgenden Versuchen bis V 3.2.20. wird mit Seifenhäutchen gearbeitet. Sie scheinen sich bei einer oberflächlichen Betrachtung wie eine elastische Gummihaut zu verhalten. Man muß aber schon beim ersten Versuch dieser Art darauf achten, daß die Schüler keine falsche Vorstellung vom Wesen der Vorgänge in einer Seifenhaut bekommen. In V 3.2.3. bis 6. wird deutlich, wie auf die Oberflächenmoleküle senkrecht zur Oberfläche Kräfte wirken. V 3.2.8., 9. und 11. zeigen, daß die Moleküle Energie besitzen. Jede Oberflächenvergrößerung kann also nur durch Energiezufuhr erfolgen, und jede Oberfläche verkleinert sich bis zum Zustand geringster Energie auf eine minimale Fläche.
   In elastischen Häuten hingegen treten Spannungskräfte auf, deren Wirkungslinien unmittelbar in der Fläche liegen.
2. Durch V 3.2.12. wird zunächst demonstriert, daß eine Seifenhaut sich immer auf die kleinste Fläche einstellt.

Herstellen des Drahtringes

Man biegt einen etwa 1,5 mm dicken Messing- oder Aluminiumdraht durch Herumlegen um eine Flasche zu einem Kreis. Die Drahtlänge ist so zu wählen, daß die Länge der nach dem Biegen überstehenden Drahtenden etwa 8 cm beträgt. Die Enden werden zu einem Griff verdrillt. An zwei einander gegenüberliegenden Stellen des Rahmens knüpft man einen locker hängenden Seidenfaden. In seiner Mitte befindet sich eine kleine Schlinge (Abb. 3.2.12./1).

Variante a

In eine flache Glasschale wird Seifenlösung gegossen. Der Drahtrahmen wird in diese eingetaucht. Man bewegt ihn in der Seifenlauge etwas hin und her und hebt ihn dann heraus. Dabei hebt man zunächst die eine Seite des Rahmens und dann die andere Seite etwa 20 cm über die Seifenlösung empor und richtet den Rahmen dann

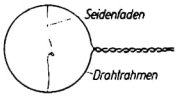


Abb. 3.2.12./1
Drahtrahmen mit darin befindlichem Seidenfaden für Seifenhautversuche

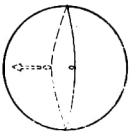


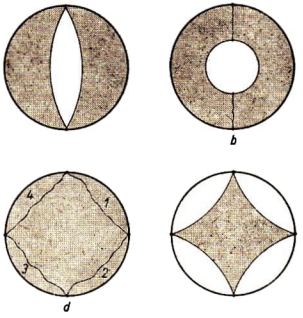
Abb. 3.2.12./2
Wirkung der Oberflächenspannung einer Seifenhaut auf einen Faden

langsam bis zur senkrechten Lage auf. Über den gesamten Rahmen hat sich eine Seifenhaut gespannt. Der Seidenfaden hängt locker in der Haut und teilt diese in zwei Teile. Berührt man mit einem heißen Draht den Teil der Seifenhaut, in der die Fadenschlinge liegt, so wird er zerstört. Die nun einseitig auf den Faden wirkende Oberflächenspannung der Seifenhaut strafft den Faden (Abb. 3.2.12./2). Faßt man die kleine Schlinge mit Daumen und Zeigefinger, so kann man die Seifenhaut weit in die andere Hälfte des Kreisrahmens hineinziehen. Läßt man die Schlinge los, so schnellt sie wieder zurück.

Variante b

Man kann den Versuch auch dadurch abändern, daß man ein Fadenpaar oder verschiedene Arten von Fadenschlingen verwendet. Man spannt locker zwei Seidenfäden parallel zueinander und durchsticht, nach Eintauchen in die Seifenlösung, die entstandene Seifenhaut im Bereich zwischen den Fäden. Die Fäden werden zu einem gekrümmten Spalt auseinandergezogen (Abb. 3.2.12./3a). Eine aus dem

Abb. 3.2.12./3
Verhalten verschiedener Arten von Fadenschlingen in einer Seifenhaut:
a) zwei nebeneinander gespannte Fäden,
b) eine kreisförmige Schlinge,
c) zwei kreisförmige Schlingen
d) und e) eine quadratische Schlinge



Seidenfaden geknüpfte Schlinge wird mit zwei Seidenfäden zentrisch am Rahmen befestigt. Man durchsticht die Seifenhaut innerhalb der Schlinge. Die Oberflächenspannung der Seifenhaut zieht die Schlinge zu einem Kreisring auseinander (Abb. 3.2.12./3b). Man kann auch zwei Schlingen übereinander anordnen (Abb. 3.2.12./3c).

Knüpft man aus Seidenfäden ein Quadrat (Abb. 3.2.12./3d), dessen Eckpunkte mit dem Rahmen verbunden werden, so entsteht nach Beseitigung der zwischen dem Rahmen und den Fäden befindlichen Teile der Seifenhaut eine kissenförmige Fläche (Abb. 3.2.12./3e).

3.2.13. Nachweis der Oberflächenspannung einer Seifenhaut mit Hilfe eines aus Fäden gebildeten Rahmens

1. Rähmchen für Seifenhautversuche Ⓢ, dazu erforderliches Material: Aluminiumdraht (⌀ 1,5 mm, Länge etwa 30 cm) Zwirnfaden
2. Seifenlösung (vgl. MB 2.0.6.)
3. Glasschale

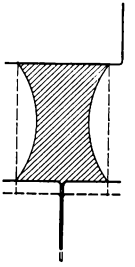


Abb. 3.2.13./1
Vorrichtung zum Nachweis der Oberflächenspannung einer Seifenhaut

Methodische Hinweise

1. Mit diesem Versuch ist der Übergang von einer qualitativen zu einer quantitativen Betrachtung der Oberflächenspannungskräfte herzustellen.
2. Vergleiche MH V 3.2.12.

Versuch

Man biegt zwei etwa 1,5 mm dicke, 15 cm lange Aluminiumdrähte nach Abb. 3.2.13./1 L- bzw. T-förmig. An den einen Schenkel des L-förmig gebogenen Drahtes knüpft man im Abstand von 45 mm zwei etwa 6 cm lange Zwirnfäden und bindet an ihre Enden parallel zu dem Schenkel des L-förmigen Drahtstückes das T-förmige Drahtstück.
Man taucht diese Vorrichtung in eine mit Seifenlösung gefüllte Schale. Sind Drähte und Fäden allseitig mit Seifenlösung benetzt, so klemmt man den freien Schenkel des L-förmig gebogenen Drahtstückes lotrecht an ein Stativ.
Unter dem Einfluß des Gewichts des T-Stückes und der Oberflächenspannung der Seifenlösung bildet sich zwischen den Drähten und den Fäden die in Abb. 3.2.13./1 schraffiert wiedergegebene Form einer Seifenmembran. Die von den Zwirnfäden begrenzten Seiten sind nach innen gebogen. Zieht man das T-Stück nach unten, so wird die Seifenhaut zu einem Rechteck auseinandergezogen. Hebt man dagegen das T-Stück etwas an, so berühren die beiden Fäden einander fast in der Mitte und bilden Halbkreise.

3.2.14. Bestimmen der Oberflächenspannung einer Seifenhaut durch Messen der Zugkraft [SE]

1. Drahtbügel mit beweglichem Steg Ⓢ, dazu erforderliches Material: Messingdraht (⌀ 1 mm, Länge 20 cm; ⌀ 0,4 mm, Länge 35 mm)
2. Hakenkörper Ⓢ, dazu erforderliches Material: Eisendraht (⌀ 1 mm)
3. Glasschale
4. Seifenlösung (vgl. MB 2.0.6.)
5. Haarpinsel
6. Meßstab (Lineal mit Millimeterteilung)

Methodische Hinweise

1. Dieser Versuch schließt sich an V 3.2.13. an und ermöglicht die quantitative Behandlung der Oberflächenspannung.
2. Vergleiche MH V 3.2.12. und V 3.2.15.

Herstellen des Drahtbügels

Ein etwa 1 mm dicker, 20 cm langer Messingdraht wird U-förmig zu einem Bügel gebogen, so daß der Abstand der beiden Schenkel etwa 3 cm beträgt. Als Griff wird ein etwa 2 mm dicker, 8 cm langer Draht in der Mitte des Bügels angelötet. Aus einem etwa 0,4 mm dicken, 35 mm langen Draht fertigt man einen Querbügel an, dessen Enden man im Schenkelabstand des Bügels ösenförmig umbiegt. Der Durchmesser der Ösen wird dem Durchmesser der Drahtschenkel so angepaßt, daß der Draht als Steg auf den Schenkeln des Bügels annähernd reibungslos verschoben werden kann. In der Mitte des Steges wird ein kleines Drahthäkchen zum Anhängen von Hakenkörpern angelötet. Um ein Herabfallen des Steges vom Drahtbügel zu verhindern, biegt man die Enden der Schenkel hakenförmig nach außen (Abb. 3.2.14./1). Vorher ermittelt man noch die Gewichtskraft des Steges. Man fertigt Hakenkörper mit Massen von 10 mg, 20 mg, 30 mg, 50 mg und 100 mg an.



Abb. 3.2.14./1
Drahtbügel mit beweglichem Steg zur Bestimmung der Oberflächenspannung einer Seifenhaut

Versuch

Der Drahtbügel wird vor dem Versuch mit Äthanol und Äther gereinigt. Dann hält man die Schenkel des Bügels waagerecht und schiebt den Steg bis dicht an das Mittelstück des Bügels. Mit einem Haarpinsel streicht man Seifenlösung über das Mittelstück und den Steg. Sind beide Teile gut benetzt, so hält man den Bügel lotrecht mit nach unten gerichteten Schenkeln. Zieht man das Häkchen des Steges nach unten, so bildet sich bei vollständiger Benetzung eine Seifenhaut über dem vom Bügel und vom Steg eingeschlossenen Flächenstück. Läßt man das Häkchen los, so schnellt der Steg infolge der Oberflächenspannung der Seifenlamelle in seine alte Lage zurück.
Man kann die Dehnung der Seifenhaut dadurch bewirken, daß man Hakenkörper an den Steg hängt. So kann die Oberflächenspannung σ der Seifenhaut nach der Gleichung

$$\sigma = \frac{F}{2 \cdot l}$$

berechnet werden. F bedeutet die Gewichtskraft des Steges, vermehrt um die Gewichtskraft der angehängten Hakenkörper, und l die Länge des Steges. Das Auftreten des Faktors 2 ist dadurch zu erklären, daß die Seifenlamelle zwei Oberflächen hat und daß die Oberflächenspannung auf beiden Seiten der Seifenlamelle wirksam ist. Die Gleichung läßt erkennen, daß die die Oberflächenspannung aus-

gleichende Kraft nicht von der Größe der Seifenlamelle abhängig ist. Darin zeigt sich deutlich, daß eine Seifenlamelle andere Eigenschaften hat als eine elastische Gummihaut.

Beispiel

Gewichtskraft des Steges 0,51 mN, Hakenkörper 1,50 mN; Gesamtgewicht $F = 2{,}01$ mN. Länge der Seifenlamelle am Steg 32 mm. Oberflächenspannung der Seifenlösung

$$\sigma = \frac{2{,}01\ \text{mN}}{64\ \text{mm}} \approx 3{,}14 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mN}}{\text{mm}} \approx 3{,}14 \cdot 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}.$$

Bemerkungen

1. Eisen- oder Aluminiumdraht eignet sich zur Herstellung der Versuchsvorrichtung nicht, da die Oberflächen dieser Drähte stark oxydieren.
2. Herleitung der Gleichung für die Oberflächenspannung:
   angenommene Dehnung der Seifenhaut Δs,
   Zunahme der Oberfläche bei der Dehnung:

$$\Delta A = 2 \cdot l \cdot \Delta s\,,$$

durch die Dehnung aufgespeicherte Oberflächenenergie:

$$\Delta A \cdot \sigma = 2 \cdot l \cdot \Delta s \cdot \sigma\,,$$

beim Dehnen von der Kraft F verrichtete Arbeit:

$$W = F \cdot \Delta s\,.$$

Es folgt

$$2 \cdot l \cdot \Delta s \cdot \sigma = F \cdot \Delta s\,,$$

$$\sigma = \frac{F}{2 \cdot l}.$$

3.2.15. Bestimmen der Oberflächenspannung einer Seifenlösung nach dem Abreißverfahren [SE]

1. Bügel mit Meßdraht ⑧,
   dazu erforderliches Material:
   Messingdraht (⌀1 mm, Länge 12 cm) für den Bügel
   Messingdraht (⌀0,3 mm, Länge 3 cm) für den Meßdraht
2. Präzisionswaage mit Wägesatz
3. Glasschale
4. Seifenlösung (vgl. MB 2.0.6.)
5. Brücke zum Überbrücken einer Waagschale ⑨,
   dazu erforderliches Material:
   3 Brettchen (Maße nach der Größe der Waagschale)

Methodische Hinweise

1. Hier wird gegenüber V 3.2.14. ein zweites Verfahren zur Messung der Oberflächenspannung beschrieben, das eine größere Präzision gewährleistet.
2. Vergleiche MH V 3.2.12.!
3. Vergleiche MB 1.0.4.!

Versuch

Ein etwa 12 cm langer Messingdraht wird nach Abb. 3.2.15./1 zu einem rechteckigen Bügel gebogen. An die beiden Drahtschenkel wird 20 mm über den unteren Querstab und parallel zu ihm ein etwa 0,3 mm dicker Messingdraht als Meßdraht angelötet. Die Lötstellen müssen sehr klein gehalten und möglichst glatt ausgeführt werden, damit ungleichmäßige Spannungen in der sich bildenden Seifenhaut verhindert werden. Man hängt den Bügel an eine Präzisionswaage und stellt darunter auf eine Brücke eine Schale mit Seifenlösung. Man läßt den Bügel so weit in die

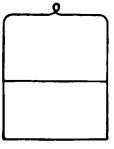


Abb. 3.2.15./1
Bügel mit Meßdraht

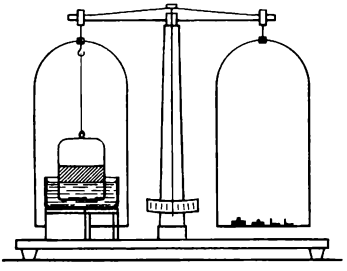


Abb. 3.2.15./2
Versuchsanordnung zur Bestimmung der Oberflächenspannung nach dem Abreißverfahren

Seifenlösung tauchen, daß der Meßdraht bei gelöster Waage an seiner Unterseite von der Seifenlösung benetzt wird, und tariert aus. Man zieht dann den Bügel dadurch aus der Seifenlösung heraus, daß man die andere Waagschale mit Bruchgrammstücken belastet. Es bildet sich zwischen dem Meßdraht und der Oberfläche der Seifenlösung eine Flüssigkeitshaut (Abb. 3.2.15./2). Man ermittelt die Oberflächenspannung aus der Abreißkraft F durch Auswägen und bezieht die Kraft auf die Länge l des Meßdrahtes. Wie aus V 3.2.14. ersichtlich, erhält man so die doppelte Oberflächenspannung σ der Seifenhaut.

$$\frac{F}{l} = 2 \cdot \sigma .$$

Die Oberflächenspannung selbst ist $\sigma = \frac{F}{2 \cdot l}$.

Beispiel

Für eine schwache Seifenlösung wurde bei Zimmertemperatur eine Abreißkraft von 1,63 mN gemessen. Die Länge des Meßdrahtes betrug 26,2 mm. Es ergab sich

$$\sigma = \frac{1{,}63}{2 \cdot 26{,}2} \frac{\text{mN}}{\text{mm}} \approx 3{,}11 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mN}}{\text{mm}} \approx 3{,}11 \cdot 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}} .$$

Bemerkungen

1. Es empfiehlt sich, den Versuch mit verschiedenartigen Seifenlösungen durchzuführen, um die Abhängigkeit der Oberflächenspannung von der Konzentration zu untersuchen.
2. Die Versuchsanordnung kann vereinfacht werden, wenn eine Waage mit kurzer Waagschale (hydrostatische Waage) zur Verfügung steht.

3.2.16. Aufsteigen einer Seifenhaut in einem Trichter

1. Glastrichter 2. Glasschale 3. Seifenlösung (vgl. MB 2.0.6.)

Methodischer Hinweis

In diesem Versuch wird qualitativ, wie in V 3.2.12., das Verhalten von Seifenhäutchen und Seifenblasen betrachtet.

Versuch

Man reinigt einen Trichter gut und taucht den Trichterkegel zur Benetzung der Innenwand ganz unter Wasser. Man verschließt sodann die nach oben gehaltene Rohröffnung mit dem feuchten Daumen und taucht die Trichteröffnung in Seifenlösung. Beim Herausheben bildet sich an der Öffnung eine Seifenhaut (Abb. 3.2.16./1). Gibt man die Rohröffnung frei, so schiebt sich die Seifenhaut im Innern des Trichters infolge der Oberflächenspannung immer weiter nach oben, wobei sie sich zusammenzieht.

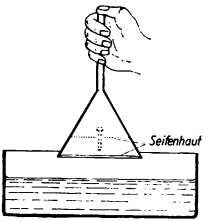


Abb. 3.2.16./1
Zusammenziehen einer Seifenhaut in einem Trichter

3.2.17. Abhängigkeit des Druckes in einer Seifenblase vom Durchmesser der Blase

1. Mikromanometer (vgl. V 2.2.12.)
2. T-Stück
3. Blasrohr aus Glas, rechtwinklig gebogen Ⓢ
4. Gummischlauch
5. kurzes Glasrohr als Mundstück
6. Spiegelmeßstab
7. Schale mit Seifenlösung (vgl. MB 2.0.6.)
8. Quetschhahn

Methodische Hinweise

1. Eine anschauliche Bestätigung der Meßergebnisse wird in V 3.2.18. beschrieben.
2. Zur Berechnung des Druckes vgl. Bemerkung 4 zu V 2.2.12.!

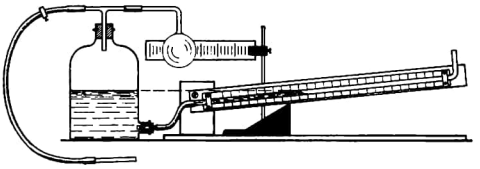


Abb. 3.2.17./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Abhängigkeit des in einer Seifenblase herrschenden Druckes vom Durchmesser der Blase

Versuch

Man verwendet zu diesem Versuch ein Mikromanometer. In den Gummistopfen des oberen Tubus wird ein T-Stück gesteckt. Über das eine Ende des T-Stückes wird ein mit einem Quetschhahn und mit einem Mundstück versehener Gummischlauch geschoben, das andere Ende wird durch ein kurzes Schlauchstück mit einem Blasrohr für Seifenblasen verbunden (Abb. 3.2.17./1). Als Blasrohr verwendet man ein rechtwinklig gebogenes Glasrohr, dessen eines Ende man möglichst etwas erweitert. Zum Messen des Seifenblasendurchmessers wird ein Spiegelmeßstab hinter das Blasrohr gestellt.
Man taucht das Blasrohr in Seifenlösung und bläst vorsichtig eine kleine Seifenblase auf. Man unterbricht das Blasen und verschließt den Gummischlauch durch einen Quetschhahn. Der Überdruck Δp in der Seifenblase wird von dem Mikromanometer angezeigt. Der Durchmesser d der Seifenblase wird am Spiegelmeßstab abgelesen. Man bläst die Seifenblase weiter auf und mißt jedesmal die zusammengehörigen Werte des in der Seifenblase herrschenden Druckes und des Durchmessers der Seifenblase. Die beigefügte Tabelle zeigt die Ergebnisse einer Meßreihe.
Stellt man p als Funktion von d grafisch dar, so erkennt man, daß alle Punkte in grober Annäherung auf einer Hyperbel liegen (Abb. 3.2.17./2). Es folgt daraus, daß der in einer Seifenblase herrschende Druck dem Durchmesser der Blase umgekehrt proportional ist.

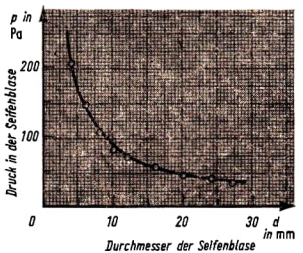


Abb. 3.2.17./2
Abhängigkeit des Druckes einer Seifenblase von ihrem Durchmesser, dargestellt durch das p-d-Diagramm

Abhängigkeit des Druckes in einer Seifenblase vom Durchmesser

Durchmesser d der Seifenblase in mm	Druck p in Pa	$p \cdot d$ in Pa · mm
4	206	824
6	143	858
8	103	824
10	79	790
12	72	864
16	55	880
20	43	860
24	36	864
27	31	837

3.2.18. Wirkung des Druckes in zwei miteinander verbundenen Seifenblasen verschiedenen Durchmessers

1. Blasvorrichtung für kommunizierende Seifenblasen ⑧,
   dazu erforderliches Material:
   2 rechtwinklig gebogene Blasrohre (vgl. V 3.2.17.)
   T-Stück mit Hahn
   kurzes Glasrohr als Mundstück
   Gummischlauch
   Holzleiste (26 cm × 4 cm × 5 mm)
   dünnes Blech, Drahtstifte
   2 Federklammern
2. Schale mit Seifenlösung (vgl. MB 2.0.6.)

Methodische Hinweise

1. Dieser Versuch bestätigt die Meßergebnisse aus V 3.2.17.
2. Es ist durchaus möglich, diesen Versuch zuerst vorzuführen und das paradox erscheinende Verhalten der Seifenblasen zur Problemstellung zu machen, die mit V 3.2.17. gelöst werden kann.

Herstellen einer Blasvorrichtung für kommunizierende Seifenblasen

Man fertigt nach V 3.2.17. zwei Blasrohre an. Die beiden Rohre werden mit zwei etwa 60 mm langen Gummischlauchstücken mit dem Querschenkel eines T-Stückes verbunden. Über den mit einem Glashahn versehenen Mittelschenkel des T-Stückes wird das eine Ende eines etwa 50 cm langen Gummischlauchs geschoben, der am anderen Ende mit einem Mundstück versehen ist.
Die aus zwei Blasrohren mit einem T-Rohr bestehende Rohrverbindung wird mit Hilfe von Rohrschellen aus Blech auf einer Holzleiste befestigt (Abb. 3.2.18./1). Die Leiste klemmt man waagerecht mit den Blasrohröffnungen nach unten an ein Stativ.

Versuch

Die in Abbildung 3.2.18./1 mit B_1 und B_2 bezeichneten Rohre werden nacheinander in eine mit Seifenlösung gefüllte Schale getaucht. Man verschließt das Schlauchverbindungsstück S_2 luftdicht, indem man es mit einer Federklammer fest gegen die

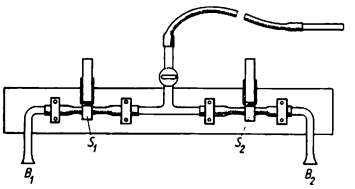


Abb. 3.2.18./1
Vorrichtung zum Herstellen zweier kommunizierender Seifenblasen

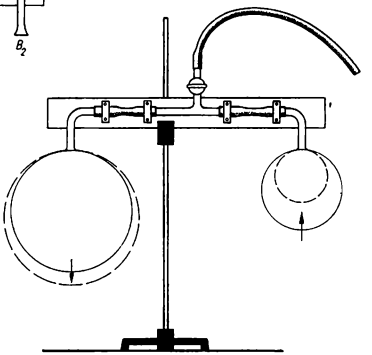


Abb. 3.2.18./2
Druckausgleich zwischen zwei Seifenblasen verschiedenen Durchmessers

Leiste drückt. Bläst man in den Schlauch, so bildet sich bei B_1 eine Seifenblase. Daraufhin drückt man mit einer Federklammer das Schlauchverbindungsstück S_1 luftdicht zusammen und entfernt die Federklammer bei S_2. Die Seifenblase behält dabei unverändert ihr Volumen. Man bläst nunmehr auch bei B_2 eine Seifenblase auf, die sich in ihrem Volumen wesentlich von der Seifenblase in B_1 unterscheidet, und schließt den Glashahn. Entfernt man dann auch die Federklammer bei S_1, so wird dadurch zwischen den Seifenblasen eine Verbindung hergestellt. Es tritt zwischen beiden Seifenblasen ein Druckausgleich ein. Dabei schrumpft die kleine Seifenblase noch weiter zusammen, bis sie sich ganz zurückgebildet hat. Das Volumen der großen Blase dagegen nimmt zu (Abb. 3.2.18./2).

Bemerkungen

1. Der Vorgang vollzieht sich immer wieder in der gleichen Weise, unabhängig davon, an welcher der beiden Öffnungen sich die kleine Blase befindet.
2. Der Vorgang ist dadurch zu erklären, daß der Druck in der Seifenblase dem Durchmesser der Blase umgekehrt proportional ist. Es findet somit stets ein Druckausgleich von der kleinen zur großen Blase statt.
3. Man kann die Erscheinung dadurch noch deutlicher sichtbar machen, daß man einmal die kleine, ein andermal die große Seifenblase mit Zigarettenrauch aufbläst. Beim Druckausgleich tritt Rauch nur von der kleinen in die größere Seifenblase über, niemals von der großen in die kleine.
4. An Stelle der Gummischlauchverbindungen kann auch ein zusammenhängendes Glasgerät mit Glashähnen oder einem Dreiwegehahn verwendet werden.

3.2.19. Minimalflächenbildung bei Seifenhäutchen [SE]

1. Drahtgestelle zum Erzeugen von Seifenhäutchen ®, dazu erforderliches Material: Messing- oder Kupferdraht (⌀ 1 mm)
2. Becherglas mit Seifenlösung (vgl. MB 2.0.6.)

Methodische Hinweise

1. Hier wird noch einmal an komplizierteren Flächen das Problem der Minimalflächenbildung infolge der Oberflächenspannung aufgegriffen und qualitativ demonstriert.
2. Es sollte darauf hingewiesen werden, daß Minimalflächen bei der Konstruktion moderner Spannbetondecken wegen ihrer maximalen Festigkeit bedeutungsvoll sind.

Anfertigen der Drahtgestelle

Man biegt mit Hilfe einer Flachzange mehrere etwa 1 mm bis 1,5 mm dicke Drahtstücke nach Abb. 3.2.19./1 zu einem Würfel, einem Tetraeder und einer Schraubenlinie. Die Reihenfolge des Biegevorgangs beim Würfel ist in der Abbildung ange-

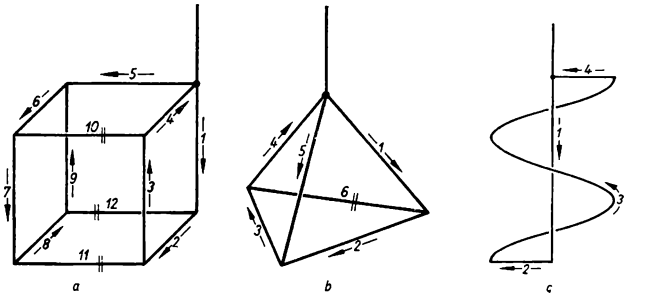


Abb. 3.2.19./1
Drahtgestelle zum Erzeugen von Seifenhäutchen: a) Würfel, b) Tetraeder, c) Schraubenlinie

geben. Die doppelt gestrichelten Drahtstücke werden nachträglich eingelötet. Auch sämtliche anderen Ecken des Würfels und des Tetraeders werden verlötet. Das Drahtgestell der Schraubenlinie wird aus einem Stück hergestellt. Es wird nur das nach innen zeigende Ende des oberen Quersteges angelötet. Das überstehende Drahtstück dient als Griff beim Eintauchen des Drahtgestells in die Seifenlösung.

Versuch

Man taucht jeweils eines der Drahtgestelle in ein mit Seifenlösung gefülltes Becherglas. Ist die Flüssigkeitsoberfläche frei von Schaumbläschen, so zieht man die

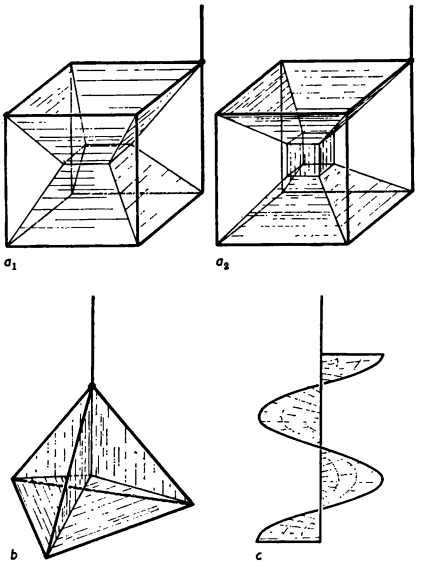


Abb. 3.2.19./2
Minimalflächenbildung an
a_1, a_2) einem Würfel,
b) einem Tetraeder,
c) einer Schraubenlinie

Gestelle vorsichtig aus der Seifenlösung heraus. Infolge der Oberflächenspannung der Seifenlösung bilden sich keine Seifenhäutchen innerhalb der äußeren Grenzflächen der Drahtgestelle. Die Seifenhäutchen ziehen sich nach innen und sind stets so angeordnet, daß die gesamten Flächen der Seifenhäutchen in den einzelnen Gestellen ein Flächenminimum ergeben. Die Flächenanordnung in einem Drahtwürfel und Tetraeder zeigt Abb. 3.2.19./2a_1, a_2 und b.
Das sich an dem schraubenförmig gebogenen Draht bildende Seifenhäutchen ist ebenfalls so geformt, daß es die kleinstmögliche Fläche einnimmt, nämlich eine Schraubenfläche (Abb. 3.2.19./2c).

3.2.20. Steigfähigkeit des Wassers in Röhren verschiedenen Durchmessers

1. Gerät zur Demonstration der Kapillarwirkung in Glasröhren
2. Fluoreszein oder anderer Farbstoff

Methodische Hinweise

1. Dieser Versuch ist zur Einführung der Kapillarwirkung zu benutzen.

2. V 3.2.21. zeigt als Gegenstück das Verhalten einer nichtbenetzenden Flüssigkeit.
3. Auf die Bedeutung der Kapillarität für viele biologische Vorgänge im Pflanzen- und Tierreich ist hinzuweisen.

Versuch

Füllt man in das Gerät gefärbtes Wasser, dann steigt dieses durch die Kapillarwirkung in den Röhren hoch. Je enger die Röhren sind, desto höher steigt das Wasser. Man kann feststellen, daß bei einer lichten Weite von 0,5 mm die Steighöhe des Wassers etwa 5 cm beträgt.

Bemerkungen

1. Ein einwandfreier Versuchsablauf ist nur möglich, wenn das Wasser die innere Rohrwandung gut benetzt. Man erreicht dies, indem man Wasser vor der Durchführung des Versuchs mit einem kräftigen Strahl durch die Kapillarröhre drückt. Dadurch werden kleine Verunreinigungen an den Rohrwangungen weggespült.
2. Es empfiehlt sich, die Versuchsanordnung zu projizieren.
3. Steht kein industriell gefertigtes Gerät zur Verfügung, kann der Versuch auch mit einer Reihe Glasröhren von verschiedener lichter Weite (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm) ausgeführt werden. Man klemmt sie zwischen zwei Holzleisten, in die man flache Kerben eingeschnitten hat, und stellt sie in ein Gefäß mit Wasser (Abb. 3.2.20./1).

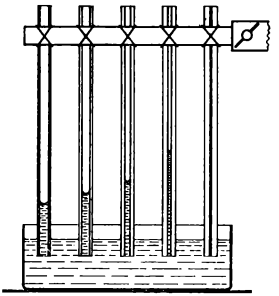


Abb. 3.2.20./1
An einer Holzleiste befestigte Glasröhren mit verschiedenen inneren Durchmessern

Giftige Dämpfe

3.2.21. Kapillare Depression des Quecksilbers

1. Gerät zur Demonstration der Kapillarwirkung in Glasröhren
2. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers

Methodischer Hinweis

Hier wird im Gegensatz zu V 3.2.20. die Kapillarwirkung einer nichtbenetzenden Flüssigkeit gezeigt. Erst durch die Gegenüberstellung ist deutlich zu machen, wie die Kapillarwirkung durch Oberflächenspannung und Adhäsion bestimmt wird.

Versuch

Man füllt das weite Rohr des Gerätes etwa zur Hälfte mit Quecksilber. Durch seine Kapillardepression steigt das Quecksilber in den engen Röhren nicht so hoch wie im weiten Rohr.
Der Höhenunterschied ist von der lichten Weite abhängig (Abb. 3.2.21./1.).



Abb. 3.2.21./1
Mit Quecksilber gefülltes U-Rohr

Bemerkungen

1. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!
2. Der Versuch ist für Projektion zu empfehlen.

3.2.22. Kapillarwirkung zwischen zwei Glasplatten

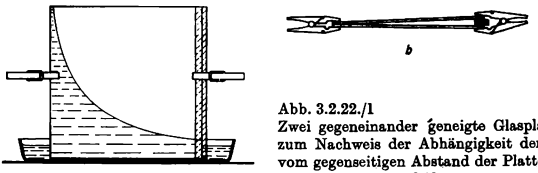
1. 2 Glasscheiben (möglichst Spiegelglas, etwa 8 cm × 8 cm)
2. Streifen aus PVC-hart (5 mm breit, 1 mm dick)
3. 2 Federklammern
4. flache Glasschale
5. Fluoreszein oder anderer Farbstoff

Methodischer Hinweis

Die folgende Versuchsanordnung ermöglicht es, näherungsweise eine quantitative Aussage über die Kapillarkräfte zu machen. Sie sollte die Einführungsversuche V 3.2.20. und 3.2.21. im Unterricht möglichst ergänzen.

Versuch

Zwei sorgfältig entfettete gleich große Glasplatten werden so aufeinander gelegt, daß sie einander längs einer Seitenkante berühren. Entlang der gegenüberliegenden Kante legt man zwischen die Glasplatten einen etwa 1 mm dicken und 5 mm breiten Streifen aus PVC-hart. Die Glasscheiben werden an den beiden Kanten mit Hilfe zweier Federklammern oder mit zwei Paketgummiringen zusammengehalten. Es entsteht auf diese Weise zwischen den Platten ein schmaler prismatischer Hohlraum (Abb. 3.2.22./1b). Man stellt die Glasscheiben senkrecht in eine flache, mit gefärbtem Wasser gefüllte Glasschale (Abb. 3.2.22./1a). Infolge der Kapillar-



a b

Abb. 3.2.22./1
Zwei gegeneinander geneigte Glasplatten zum Nachweis der Abhängigkeit der Kapillarität vom gegenseitigen Abstand der Platten
a) Aufriß, b) Grundriß

wirkung steigt die Flüssigkeit zwischen den beiden Glasplatten hoch. Die Luft-Flüssigkeit-Grenze bildet eine Hyperbel.
Nimmt man die zusammengeklemmten Scheiben aus der Flüssigkeit, so bleibt die Flüssigkeit zwischen den Scheiben unverändert haften.

Bemerkungen

1. Das Gelingen des Versuches hat zur Voraussetzung, daß die Scheiben sorgfältig gereinigt und entfettet sind. Siehe dazu V 3.2.8., Bem. 3!
2. Der Versuch eignet sich besonders für Projektion.

3.2.23. Kapillarwirkung an Filterpapier [SE]

Zu Versuch 1

1. Filterpapier
2. 4 kleine Glasschalen
3. Holzleiste (etwa 50 cm × 2 cm × 5 mm)
   wasserlösliche Farbstoffe (Methylenblau oder Ketonblau, Tinte, Dreifarbengemisch nach
4. Biondi-Ehrlich-Haidenhain)

Zu Versuch 2

Geräte 1. und 4., außerdem
5. Standzylinder (Höhe etwa 80 cm)
6. langes Trichterrohr
7. Holzstäbchen

Methodischer Hinweis

Diese Versuche sind für die Schüler nur dann verständlich, wenn die Kapillarität mit den vorangehenden Versuchen erklärt wurde. Es ist natürlich möglich, sie im Unterricht zur Problemstellung an den Anfang zu stellen.

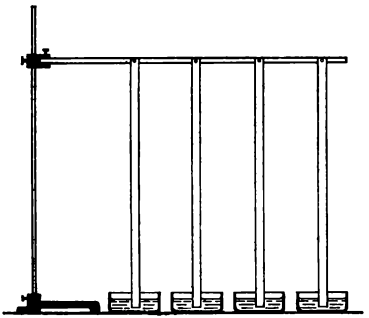


Abb. 3.2.23./1
An einer Holzleiste befestigte Filterpapierstreifen zum Nachweis der Kapillarwirkung an Filterpapier

Versuch 1: Kapillarwirkung bei trockener Luft

Eine etwa 50 cm lange Holzleiste wird waagerecht etwa 50 cm über der Tischebene an ein Stativ geklemmt. Man schneidet aus einem Bogen Filterpapier parallel zur Papierfaser vier etwa 50 cm lange Streifen mit einer Breite von etwa 2 cm. Die Streifen werden, lotrecht hängend, in gleichem Abstand voneinander mittels Reißzwecken an die Holzleiste geheftet (Abb. 3.2.23./1). Unter jeden Streifen stellt man eine kleine Glasschale, in die man eine der wäßrigen Farblösungen gießt. Man füllt die Schalen so weit, daß die unteren Enden der Streifen etwa 2 mm in die Flüssigkeiten tauchen. Je nach dem verwendeten Farbstoff zeigen sich in kurzer Zeit verschiedenfarbige Zonen auf dem Filterpapier. Beim Dreifarbengemisch bilden sich in der Reihenfolge von unten nach oben die in der beigefügten Tabelle angegebenen Farbzonen.

Anordnung und Länge der Farbzonen bei Verwendung eines Dreifarbengemischs

Anordnung	Farbe	Länge der Zonen in mm
oben	hellviolett	etwa 40
	dunkelviolett	etwa 40
	hellrot	etwa 260
	gelb	etwa 6 bis 9
unten	grün	etwa 150

Versuch 2: Kapillarwirkung bei feuchter Luft

Ein etwa 80 cm hoher Standzylinder wird zur Hälfte mit einem etwa 70 cm hineinreichenden angefeuchteten Filterpapierblatt ausgekleidet. Mit Hilfe eines langen Trichterrohres gießt man eine Farbstofflösung (Dreifarbengemisch) bis zu einer Höhe von etwa 5 mm in den Zylinder, so daß sie den Wandbelag nicht benetzt. Ein 80 cm langer und 2,5 cm breiter trockener Filterpapierstreifen wird in der Mitte längsgeknifft. Man steckt durch den Streifen an seinem einen Ende ein Holzstäbchen und senkt ihn so weit in den Zylinder ein, daß er etwa 3 mm in die Farbstoff-

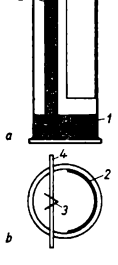


Abb. 3.2.23./2
Standzylinder, versehen mit einem zur Hälfte herumreichenden feuchten Wandbelag, zur Untersuchung der Kapillarwirkung in feuchter Luft
a) Aufriß
b) Grundriß
1 Farbflüssigkeit
2 feuchter Wandbelag aus Filterpapier
3 Filterpapierstreifen
4 Holzstäbchen

lösung taucht. Das durch den Papierstreifen gesteckte Stäbchen wird dabei quer über die Zylinderöffnung gelegt (Abb. 3.2.23./2). Um die Luftfeuchtigkeit im Zylinder annähernd konstant zu halten, deckt man den Zylinder mit feuchtem Filterpapier ab. Der Versuch zeigt, daß die Steighöhe einer Farbstofflösung in feuchter Luft wesentlich größer ist als in trockener. Die einzelnen unterscheidbaren Farbzonen sind weit auseinandergezogen. Die Flüssigkeit erreicht eine Steighöhe bis zu 70 cm.

Bemerkungen

Die Kapillarwirkung des Filterpapiers wird besonders bei der Kapillaranalyse und in der Papierchromatographie verwendet.

3.2.24. Kapillarwirkung in Löß und Sand [SE]

Zu Versuch 1

1. Glasrohr (⌀15 mm bis 20 mm, Länge etwa 2 m)
2. ein Stück Battist oder Leinwand
3. dünne, feste Schnur
4. Becherglas
5. Löß

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4., außerdem
6. Sand
7. wasserlöslicher Farbstoff

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 3.2.23.!
2. Bei diesen Versuchen ist besonders auf die Bedeutung der Kapillarität für die landwirtschaftliche Bodenkultur und das Bauwesen hinzuweisen.

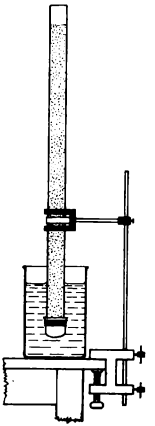


Abb. 3.2.24./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Kapillarwirkung in Löß und Sand

Versuch 1: Kapillarwirkung in Löß

Über das eine Ende eines 2 m langen Glasrohrs mit einem Durchmesser von 15 mm bis 20 mm wird ein Stück Battist oder Leinwand gebunden. Unter dauerndem Beklopfen mit einem Holzstück füllt man das Rohr portionsweise mit feingesiebtem Löß. Das gefüllte Rohr wird lotrecht mit Hilfe einer Rohrklemme und einer Muffe an einem Stativ befestigt. Das mit Leinwand verschlossene Ende wird in ein mit Wasser gefülltes Becherglas etwa 2 cm tief eingetaucht (Abb. 3.2.24./1). Infolge der Kapillarwirkung steigt das Wasser bis an die freie Oberfläche der Lößfüllung empor.

Versuch 2: Kapillarwirkung in Sand

Der Versuch wird statt mit Löß mit einer Sandfüllung durchgeführt. Da das aufsteigende Wasser in Sand schwer zu erkennen ist, mischt man den Sand vor dem

Einfüllen in das Glas auf einem Bogen Papier mit einem wasserlöslichen Farbstoff. Das aufsteigende Wasser löst den Farbstoff und färbt sich. Vergleicht man die Versuchsergebnisse des Versuchs 1 mit 2, so erkennt man, daß die Steighöhe des Wassers bei einer Lößfüllung größer ist als bei Sand. Die Kapillarwirkung ist demzufolge in Lößböden größer als in Sandböden.

Bemerkung

Um recht feinen Löß zu erhalten, zerdrückt man den Löß mit einem Rundholz auf einem Bogen Papier und siebt ihn durch ein Haarsieb.

3.3. Lösen, Mischen, Adsorption, Absorption

3.3.1. Lösen fester Körper in Wasser — Herstellung einer gesättigten Zucker- und Salzlösung

Zu Versuch 1

1. 3 Bechergläser (250 ml)
2. Meßzylinder
3. Kochsalz, Zucker, Kaliumpermanganat
4. Glasstäbchen

Zu Versuch 2

5. hoher Standzylinder
6. Glasrohr (⌀10 mm, Länge etwa 15 cm)
7. Mull, Zwirnfaden
8. Kaliumpermanganat

Methodischer Hinweis

Lösungsvorgänge sind den Schülern zwar bekannt, der Wert dieser Versuche ist aber darin zu sehen, daß die Schüler es lernen, alltägliche Vorgänge genau und kritisch aus naturwissenschaftlicher Sicht zu betrachten.

Versuch 1

Drei Bechergläser mit gleichem Volumen von etwa 250 ml werden mit je 150 ml Wasser von Zimmertemperatur gefüllt. In das erste Glas schüttet man einen Löffel Kochsalz, in das zweite einen Löffel Zucker und in das dritte einen Löffel Kaliumpermanganat. Läßt man die Gläser einige Zeit stehen, so kann man besonders im dritten Glas beobachten, wie sich um die Kristalle der eingebrachten festen Körper Lösungen bilden.
Rührt man das Wasser mit einem Glasstab um, so wird Lösung geringerer Konzentration an die festen Körper herangeführt. Dadurch wird das Lösen der Kristalle beschleunigt. Die verschieden große Löslichkeit der Stoffe in Wasser zeigt man, indem man in die mit 150 ml Wasser gefüllten Gläser nach und nach gleiche Mengen Kochsalz oder Zucker löffelweise zusetzt. Nach jedem Zusatz wird mit einem Glasstab umgerührt, bis die Kristalle ganz aufgelöst sind. Man beobachtet, daß sich nach einer bestimmten Zugabe kein Kochsalz mehr löst. Die Lösung ist jetzt gesättigt. Bei der Zuckerlösung tritt die Sättigung erst nach Zugabe einer größeren Zuckermenge ein.

Versuch 2

Man füllt einen engen, hohen Standzylinder mit Wasser. Ein kurzes Glasrohr mit einem Durchmesser von etwa 10 mm wird an einem Ende mit einem Stück darüber

gebundenem Mull verschlossen. In das Rohr füllt man einige Kristalle Kaliumpermanganat und taucht das verschlossene Rohrende etwa 2 mm bis 3 mm tief in das Wasser.
Damit der Lösungsvorgang ungestört verlaufen kann, klemmt man das Glasrohr an ein Stativ.
In dem durch den Mullboden in das Rohr eindringenden Wasser löst sich das Kaliumpermanganat. Infolge der größeren Dichte des gelösten Kaliumpermanganats sinkt dieses unter Schlierenbildung langsam zu Boden. Die Schlieren der Lösung heben sich gut von dem farblosen Wasser ab.

Bemerkungen

1. Besonders eindrucksvoll sind die Versuche, wenn man die Vorgänge projiziert. Man stellt statt des Zylinders eine mit Wasser gefüllte Küvette mit parallelen Wänden vor einen Projektionsapparat. Statt des Glasrohrs verwendet man einen Glasstab, an dessen unterem Ende ein kleines Stückchen Kaliumpermanganat mit Wachs befestigt wird.
2. Deutliche Schlierenbildungen erhält man auch bei Verwendung von Anilinfarben.

3.3.2. Abhängigkeit der Löslichkeit fester Stoffe von der Oberfläche und von der Temperatur [SE]

Zu Versuch 1

1. 2 kleine Bechergläser
2. Meßzylinder
3. Alaun
4. Glasstäbchen als Rührer

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4., außerdem
5. Stativheizplatte

Zu Versuch 3

Alaun, außerdem
6. Reagenzglas
7. Reagenzglashalter
8. Bunsenbrenner

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.1.!

Versuch 1

Man füllt in zwei kleine Bechergläser je 50 ml Wasser und schüttet in jedes Glas 5 g Alaun, und zwar in das eine in Stückchen, in das andere gepulvert. Man erkennt, daß sich das Alaunpulver schneller löst als die Alaunstückchen, besonders wenn man die Flüssigkeit im Glase umrührt oder schwenkt. Die Lösungsgeschwindigkeit wird durch die Vergrößerung der Oberfläche begünstigt.

Versuch 2

Noch schneller vollzieht sich der Lösungsvorgang, wenn man das Alaun-Wasser-Gemenge erwärmt. Erwärmen wirkt sich im allgemeinen günstig auf einen Lösungsvorgang aus, doch gibt es dabei auch Ausnahmen.

Versuch 3

In ein halb mit Wasser gefülltes Reagenzglas gibt man so viel Alaunpulver, daß trotz mehrfachen Schüttelns noch ein geringer Bodensatz verbleibt. Erwärmt man

die Flüssigkeit, so verschwindet nicht nur der Bodensatz, sondern man kann darüber hinaus noch beträchtliche Mengen Alaun bis zum Erreichen der Sättigung hinzufügen.
Taucht man das Reagenzglas mit der hochgesättigten warmen Alaunlösung in ein Becherglas mit kaltem Wasser, so scheidet sich der Alaun beim Abkühlen wieder in Kristallen aus.

Bemerkungen

1. Für die Versuche 1 und 2 eignet sich wegen seiner Farbe auch vorzüglich Kupfersulfat. Für den Versuch 3 ist auch Kaliumnitrat geeignet. Seine Löslichkeit ist ebenfalls stark temperaturabhängig.
2. Es empfiehlt sich, ähnliche Versuche mit anderen Salzen und anderen löslichen Stoffen, beispielsweise mit Zucker oder mit Oxalsäure, vorzunehmen.
3. Man zeige, daß die Löslichkeit des Kochsalzes durch eine Temperaturerhöhung kaum beeinflußt wird.

3.3.3. Volumenzunahme beim Auflösen fester Körper in Wasser [SE]

1. Meßzylinder (200 ml, mit Feinteilung)
2. Hebelwaage
3. Wägesatz
4. leicht lösliche Salze, z. B. Natriumchlorid, Ammoniumchlorid, Natriumnitrat, Aluminiumsulfat oder Alaun
5. Glasstäbchen als Rührer

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 3.3.1.!
2. Die Volumenänderungen können zur Erklärung der molekularen Struktur der Stoffe herangezogen werden.

Versuch

In einem Meßzylinder mißt man 100 ml Wasser ab und schüttet eine vorher abgewogene Menge eines der oben angegebenen Salze hinein, die um 10% bis 15% kleiner ist als die Sättigungsmenge des betreffenden Salzes, über die die nebenstehende Tabelle für einige Salze Auskunft gibt.

Sättigungsmenge einiger Salzlösungen

Salz	100 ml Wasser lösen	
	bei 15 °C	bei 20 °C
Natriumchlorid	36 g	37 g
Ammoniumchlorid	34 g	37 g
Natriumnitrat	82 g	87 g
Aluminiumsulfat	100 g	107 g
Alaun	12 g	15 g

Man mißt das Volumen unmittelbar nach dem Einschütten des Salzes und dann nach seiner vollständigen Auflösung. Das zunächst vergrößerte Volumen nimmt beim Lösungsvorgang wieder ab, bleibt aber größer als 100 ml.

3.3.4. Lösen von Äther in Wasser

1. Reagenzglas
2. Gummistopfen zum Verschließen des Reagenzglases
3. Pipette
4. Äther

Methodische Hinweise

1. Die Versuche V 3.3.4., V 3.3.5. und V 3.3.6. sind im Zusammenhang zu betrachten. Sie zeigen die verschiedenen Mischungs- und Lösungsmöglichkeiten zweier Flüssigkeiten.
2. Die Volumenverminderung kann zur Erklärung der molekularen Struktur der Flüssigkeiten genutzt werden.

Versuch

Man füllt ein Reagenzglas zur Hälfte mit gefärbtem Wasser und tropft mittels einer Pipette Äther auf das Wasser. Nach jeder Ätherzugabe verschließt man das Glas mit einem Gummistopfen und schüttelt die Flüssigkeit kräftig. Der Äther löst sich im Wasser. Nach einer bestimmten Tropfenzahl ist die Sättigungsgrenze des Wassers erreicht. Bei weiterer Zugabe von Äther wird kein Äther mehr gelöst. Trotz kräftigen Schüttelns zeigen die beiden Flüssigkeiten dann eine scharfe Trennfläche.

Bemerkungen

1. Der Versuch kann auch in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt werden, indem man Wasser auf Äther tropfen läßt.
2. Den Äther kann man durch Schütteln mit Gras oder Laub grün färben.

3.3.5. Volumenverminderung beim Mischen von Wasser und Äthanol [SE]

1. Reagenzglas
2. Glasrohr (Ø 10 mm, Länge 110 cm)
3. 2 Gummistopfen, zum Glasrohr passend
4. Äthanol (Brennspiritus)
5. Fuchsin oder ein anderer wasserlöslicher Farbstoff
6. Meßstab

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.4.!

Vorversuch

Man gießt in ein Reagenzglas etwas gefärbtes Wasser und füllt das Glas durch vorsichtiges Hinzugießen von Äthanol bis zu voller Höhe auf. Sodann ergreift man das Glas mit der Hand, verschließt es mit dem Daumen und kehrt es mehrere Male um. Beide Flüssigkeiten mischen sich vollständig. Man wiederholt den Versuch mit ganz verschiedenen Mischungsverhältnissen und erkennt, daß sich Wasser und Äthanol in beliebigen Verhältnissen mischen lassen.

Hauptversuch

Zum Nachweis der beim Mischen von Wasser und Äthanol eintretenden Volumenverminderung verwendet man ein 10 mm weites, etwas mehr als 1 m langes Glasrohr, das man an einem Ende fest mit einem Gummistopfen verschließt. Man füllt es etwa zu einem reichlichen Drittel mit gefärbtem Wasser und füllt dann mit Äthanol auf. Dabei muß man vermeiden, daß sich das Äthanol schon beim Zugießen mit dem Wasser mischt. Man hält deshalb das Rohr schräg und läßt das Äthanol recht langsam an der inneren Rohrwand herabfließen, so daß es sich über dem Wasser schichtet. Auf diese Weise füllt man das Rohr bis zur Höhe von 1 m und markiert den oberen Flüssigkeitsstand durch einen Streifen Klebepapier.
Sodann verschließt man auch das andere Ende des Glasrohres mit einem Gummistopfen und kehrt das Rohr mehrere Male um, so daß sich das Wasser und das Äthanol gut miteinander mischen. Man erkennt, daß das Gesamtvolumen dabei etwas abgenommen hat. Da das Flüssigkeitsvolumen der Rohrlänge proportional ist, kann man durch Ausmessen der Längen der übereinandergeschichteten Flüssigkeitssäulen die prozentuale Volumenverminderung ermitteln. Stehen beispielsweise 66 cm Äthanol über 34 cm Wasser, so schrumpft die Flüssigkeitssäule durch das Mischen auf etwa 96,5 cm zusammen. Die Volumenverminderung beträgt demnach etwa 3,5%.

Bemerkung

Bei Arbeiten mit brennbaren Flüssigkeiten sind die Brandschutzbestimmungen zu beachten.

3.3.6. Herstellen und Entmischen einer Emulsion verschiedener nicht mischbarer Flüssigkeiten

1. Dickwandiges Glasrohr (⌀20 mm, Länge etwa 30 cm)
2. 2 Gummistopfen, zum Glasrohr passend
3. gesättigte Kaliumkarbonatlösung
4. Brennspiritus oder Terpentinöl oder Petroleum
5. einige Jodflitter

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.4.!

Versuch

Ein dickwandiges Glasrohr verschließt man an einem Ende fest mit einem Gummistopfen und gießt etwas gesättigte Kaliumkarbonatlösung hinein. Darüber schichtet man Spiritus oder Terpentinöl oder Petroleum. Zur besseren Unterscheidung der Flüssigkeiten läßt man einige Jodflitterchen hineinfallen. Durch diese werden der Spiritus dunkelviolett, die wäßrige Salzlösung schwach gelb gefärbt. Da sich die Flüssigkeiten nicht mischen, entstehen scharf voneinander getrennte Schichten.
Man verschließt auch das andere Ende der Röhre fest mit einem Gummistopfen und schüttelt den Inhalt längere Zeit kräftig durcheinander. Dabei faßt man die beiden Verschlußstopfen fest mit den Händen, um so eine Lockerung der Stopfen zu verhindern. Durch das Schütteln werden die einzelnen Flüssigkeiten tropfenförmig

untereinander gemischt. Es entsteht eine Emulsion. Klemmt man das Rohr lotrecht an ein Stativ und läßt es längere Zeit ruhig stehen, so tritt allmählich wieder eine vollständige Entmischung der Flüssigkeiten ein.

3.3.7. Adsorption von Farbstoffen durch Aktivkohle

1. 4 Erlenmeyerkolben (Inhalt etwa 50 ml)
2. Aktivkohle (gemahlen)
3. wäßrige Lösungen von Brilliantgrün, Berliner Blau, Fuchsin, Rotwein – stark verdünnt
4. Trichter
5. Papierfilter

Methodische Hinweise

1. Die folgenden Versuche bis V 3.3.10. zeigen die Adsorption von Stoffen durch Aktivkohle in Flüssigkeiten und Gasen. Für den Unterricht ist eine Auswahl zu treffen.
2. Die Begriffe Adsorption und Absorption müssen klar unterschieden werden, s. MB 3.0.3.
3. Auf die Bedeutung der Adsorption durch Aktivkohle in der chemischen Industrie, beim Keimfreimachen von Wasser und in der Gasschutzmaske ist hinzuweisen.

Versuch

Man füllt vier Erlenmeyerkolben gleicher Größe mit verschieden gefärbten Flüssigkeiten. Nachdem man jeder Lösung einen Teelöffel Kohle hinzugegeben hat, schüttelt man die einzelnen Kolben kräftig. Filtriert man daraufhin die entstehenden schwarzen Suspensionen einzeln, so erhält man ganz farblose Filtrate. Die Entfärbung ist auf die Adsorption des Farbstoffes durch die Kohle zurückzuführen.

Bemerkung

Zum Nachweis, daß die Farbstoffe durch Adsorption und nicht durch chemische Umsetzung aus der Lösung entfernt worden sind, legt man einen Teil der beim Versuch verwendeten Kohle in ein mit Äthanol gefülltes Kolbenglas. Hatte beispielsweise die Kohle Brilliantgrün adsorbiert, so zeigt sich eine grüne Färbung des Äthanols.



3.3.8. Adsorption von Bromdampf durch Aktivkohle

1. Rundkolben (1000 ml)
2. Gummistopfen, zum Rundkolben passend
3. Brom
4. Aktivkohle

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.7.1

Versuch

In einen Rundkolben werden einige Tropfen Brom gegeben. Das Brom verdampft und füllt den Kolben mit braunen Dämpfen. Man verschließt die Flasche mit einem Stopfen und schüttelt sie kräftig, damit sich die Dämpfe gleichmäßig verteilen. Darauf öffnet man die Flasche vorsichtig, schüttet etwa einen Eßlöffel Aktivkohle hinein und verschließt die Flasche sofort wieder. Schüttelt man die Flasche abermals gut durch, so zeigt sich, daß der Flascheninhalt farblos geworden ist. Die Kohle hat die Bromdämpfe adsorbiert.

Bemerkungen

1. Vorsicht beim Umgang mit Bromdämpfen! Einatmen vermeiden! Brom ist stark giftig und wirkt ätzend auf die Schleimhäute. Die Arbeiten mit Brom sind unter dem Abzug oder am geöffneten Fenster vorzunehmen.
2. Die adsorbierten Bromdämpfe können durch Erhitzen der Kohle in einem Glaskolben frei gemacht werden. Das Kolbeninnere färbt sich braun. Die Kohle wird dadurch regeneriert und kann zu weiteren Versuchen verwendet werden.

3.3.9. Adsorption von Benzoldampf durch Aktivkohle

Zum Vorversuch

1. Zur Spitze ausgezogenes, rechtwinklig gebogenes Glasrohr
2. kurzes, weites Glasrohr
3. 2 durchbohrte Gummistopfen, zum Glasrohr passend
4. 2 kurze Glasrohre
5. Gummischlauch
6. Watte
7. Benzol

Zum Hauptversuch

Geräte 1., 5., 6. und 7., außerdem

8. kleine Weithalsflasche mit zweifach durchbohrtem Korken
9. T-Stück
10. 2 rechtwinklig gebogene Glasrohre
11. an einem Ende spitz ausgezogenes Glasrohr
12. U-Rohr mit durchbohrten Gummistopfen
13. 2 Quetschhähne
14. Aktivkohle

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.7.!

Vorversuch

Schließt man an die Stadtgasleitung eine zu einer Spitze ausgezogene Glasröhre an und entzündet das austretende Gas, wobei man die Flammenhöhe auf 2 cm bis 3 cm einregelt, so verbrennt das Gas nur mit geringer Leuchtkraft. Fügt man dagegen in die Schlauchleitung eine kurze weite Glasröhre ein, in der sich ein Stück mit Benzol getränkter Watte befindet, so nimmt die Leuchtkraft infolge der mitgerissenen Benzoldämpfe erheblich zu (Karburierung).

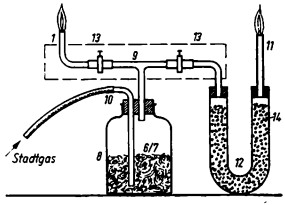


Abb. 3.3.9./1
Versuchsanordnung zur Adsorption von Benzoldämpfen durch Aktivkohle

Hauptversuch

Es wird aus den obengenannten Geräten die in Abb. 3.3.9./1 wiedergegebene Versuchsanordnung zusammengestellt. Das bei 1 und 11 ausströmende Gas wird nach Verdrängen der gesamten Luft aus dem Gerät entzündet. Die Flammen werden mit Hilfe der Schraubquetschhähne auf eine Höhe von 2 cm bis 3 cm eingestellt. Während die eine Flamme infolge der Karburierung hell leuchtend brennt, leuchtet die zweite Flamme nur schwach, da die Benzoldämpfe von der Aktivkohle adsorbiert werden.

Bemerkungen

1. Die Versuchsanordnung kann entsprechend den vorhandenen Glasteilen mannigfaltig abgeändert werden. So können an Stelle des T-Stückes zwei einfach gewinkelte Rohre und an Stelle der beiden Schraubquetschhähne zwei Glashähne treten.
2. Man kann der Versuchsanordnung dadurch einen größeren Halt geben, daß man hinter das T-Stück ein Brettchen an die Glasteile bindet.

Giftige Dämpfe

3.3.10. Adsorption von Ammoniak durch Aktivkohle

1. Dickwandiges Reagenzglas
2. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
3. Quecksilberwanne
4. Aktivkohle (granuliert)
5. Tiegelzange
6. Ammoniak

Geräte zur Ammoniakherstellung

7. Rundkolben (1000 ml) mit durchbohrtem Stopfen
8. U-Rohr mit durchbohrtem Stopfen
9. 2 Glas-Verbindungsrohre
10. wäßrige Ammoniaklösung (Salmiakgeist)
11. Calciumchlorid
12. Stativheizplatte oder Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtnetz

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.7.1

Versuch

Ein dickwandiges Reagenzglas wird mit Hilfe eines Quecksilbertropfgefäßes bis zum Rand mit Quecksilber gefüllt und mit der Öffnung nach unten in eine mit Queck-

silber gefüllte Wanne getaucht, die auf einem Quecksilberbrett steht. Man befestigt das Reagenzglas mittels einer Rohrklemme an einem kurzen Stativ. Dann leitet man pneumatisch trockenes Ammoniak, dessen Herstellung unten beschrieben wird, in das Glas und bringt mit Hilfe einer kleinen Tiegelzange ein Stückchen Aktivkohle durch das Quecksilber in das Rohr (Abb. 3.3.10./1). Man kann beobachten, daß das Ammoniak von der Kohle in beträchtlichem Maße adsorbiert wird.

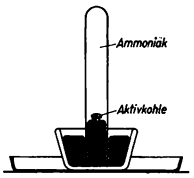


Abb. 3.3.10./1
Pneumatisch mit Ammoniak gefülltes Reagenzglas

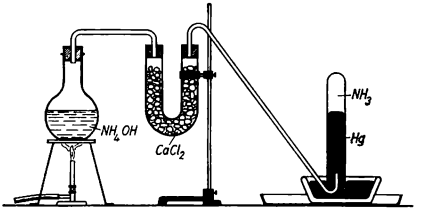


Abb. 3.3.10./2
Versuchsanordnung zum Füllen eines Reagenzglases mit Ammoniak

Herstellung des trockenen Ammoniaks (Abb. 3.3.10./2)

Ein Rundkolben wird zu einem Viertel bis drei Viertel seines Volumens mit wäßriger Ammoniaklösung angefüllt und mit einem durchbohrten Stopfen verschlossen. Mittels eines U-förmig gebogenen Rohres verbindet man die Flasche mit einem Calciumchloridtrockenrohr. Vom Trockenrohr führt ein Glasrohr mit gebogenem Ende unter die Öffnung des Reagenzglases. Die Ammoniaklösung wird vorsichtig erhitzt. Es entweicht gasförmiges Ammoniak. Im Trockenrohr wird es von Wasserdämpfen befreit.

Bemerkungen

1. Damit der Versuchsablauf nicht durch die Anwesenheit von Luft im Reagenzglas gestört wird, ist es notwendig, mit dem Einleiten des Ammoniaks in das Glas so lange zu warten, bis das entstehende Ammoniak die Luft aus den Gefäßen der Versuchsanordnung vollständig verdrängt hat.
2. Wegen des stechenden Geruches des Ammoniaks empfiehlt es sich, die Entwicklung des Ammoniaks und die Füllung des Reagenzglases möglichst unter dem Abzug vorzunehmen.
3. An Stelle von Ammoniak kann auch trockenes Kohlendioxid oder Schwefeldioxid adsorbiert werden.
4. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!

3.3.11. Adsorption von Stadtgas durch Platin

1. Platinblech oder Platindraht oder Platinmohr
2. Tiegelzange
3. Bunsenbrenner

Methodische Hinweise

1. In diesem Versuch ist eindrucksvoll zu zeigen, wie bei der Adsorption relativ große Kräfte zwischen den Molekülen auftreten.
2. Auf Gasanzünder, die nach diesem Prinzip arbeiten, und auf die Bedeutung des Platins als Katalysator ist hinzuweisen.

Versuch

In einer nicht leuchtenden Bunsenflamme wird ein kleines Stück Platinblech ausgeglüht. Man unterbricht vorübergehend die Gaszufuhr und läßt das Gas nach dem Erkalten des Platinbleches erneut dagegenströmen. Das Gas wird vom Platin so stark adsorbiert, daß das Blech zu glühen anfängt, so daß sich das Gas daran entzündet. Der Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden.

Bemerkung

An Stelle von Platinblech sind Platindraht oder Platinmohr ebensogut verwendbar.



3.3.12. Absorption von Ammoniak durch Wasser

Geräte zur Ammoniakentwicklung wie in V 3.3.10., außerdem

Zu Variante a

1. Dickwandiges Reagenzglas
2. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
3. Quecksilberwanne
4. Saugpipette

Zu Variante b

5. Standzylinder (⌀40 mm, Höhe 250 mm)
6. Pappe
7. Federklammer
8. einfach durchbohrter Verschlußkorken, zum Standzylinder passend
9. kurzes Glasrohr, an einem Ende zur Spitze ausgezogen
10. Glastrog
11. Lackmustinktur
12. Salzsäure
13. Glasstab
14. gewinkeltes Glasrohr
15. Verbindungsschlauch

Methodische Hinweise

1. In verschiedenen Varianten kann nachgewiesen werden, daß Wasser große Mengen eines Gases absorbieren kann.
2. Vergleiche MB 3.0.3.!
3. Die Vorgänge können zur Erklärung der molekularen Struktur der Stoffe herangezogen werden.

Variante a

Man erzeugt nach dem in V 3.3.10. angegebenen Verfahren mittels der in Abb. 3.3.10./2 wiedergegebenen Versuchsanordnung Ammoniak und leitet es in ein mit

Quecksilber gefülltes, umgekehrt in einer Quecksilberwanne stehendes dickwandiges Reagenzglas. Man saugt etwas Wasser in eine Pipette, führt deren Spitze von der Seite her unter die Öffnung des Reagenzglases und drückt durch Blasen etwas Wasser in das Reagenzglas (Abb. 3.3.12./1). Sobald das emporsteigende Wasser das über dem Quecksilber befindliche Ammoniak erreicht, wird dieses sofort absorbiert. Das Quecksilber steigt im Reagenzglas empor und füllt es ganz aus.

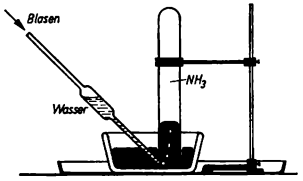


Abb. 3.3.12./1
Absorption von Ammoniak durch Wasser im Reagenzglas

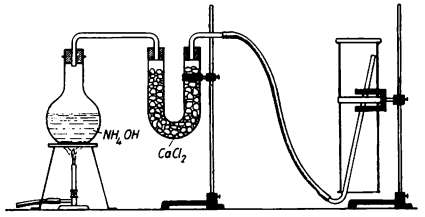


Abb. 3.3.12./2
Füllen eines Standzylinders mit Ammoniak

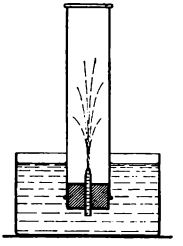


Abb. 3.3.12./3
Eindringen von Wasser in einen mit Ammoniakgas gefüllten Zylinder durch Absorption des Ammoniaks

Variante b

Statt des Reagenzglases füllt man einen Standzylinder mit Ammoniak. Man entfernt zu diesem Zweck das vom Ammoniakentwickler zur Quecksilberwanne führende Glasrohr und ersetzt es durch ein kurzes gewinkeltes Rohr, einen Schlauch und ein daran angeschlossenes, 300 mm langes gewinkeltes Rohr. Dieses führt man in einen mit der Öffnung nach unten an ein Stativ geklemmten Standzylinder ein, in den es bis zum Boden hineinreicht. Die Öffnung verschließt man durch einen dagegen gehaltenen Pappdeckel, den man mit einer Federklammer am Randwulst festklemmt (Abb. 3.3.12./2). Da die Dichte des Ammoniaks geringer ist als die der Luft, füllt das Gas den Zylinder von oben her und verdrängt die Luft aus ihm. Die Beendigung der Füllung des Zylinders mit Ammoniak erkennt man außer am Geruch am Auftreten weißer Ammoniumchloridnebel, die sich bilden, wenn man einen mit Salzsäure befeuchteten Glasstab an die Zylinderöffnung hält. Man hebt dann den Zylinder langsam an, ohne den Deckel von seiner Öffnung zu entfernen. Dabei zieht man das Gaszuleitungsrohr vorsichtig aus dem Zylinder heraus und

verschließt danach sofort die Öffnung mit einem dazu vorbereiteten Korken. Durch seine Bohrung ist ein etwa 6 cm langes, an einem Ende zugespitztes Glasrohr so hindurchgesteckt, daß seine Spitze in den Zylinder ragt.
Taucht man den Zylinder bis in die Höhe der Glasspitze in eine mit Wasser gefüllte Wanne, so kommt das Wasser an der Glasspitze mit dem Ammoniak in Berührung. Das Ammoniak löst sich sofort im Wasser; es entsteht ein Unterdruck im Zylinder. Der äußere Luftdruck drückt das Wasser in den Zylinder (Abb. 3.3.12./3). Dabei löst sich das noch vorhandene Ammoniak im Wasser. Der anfangs mit Ammoniak gefüllte Zylinder füllt sich vollständig mit Wasser.

Bemerkungen

1. Besonders eindrucksvoll verläuft der Versuch, wenn man das in der Wanne befindliche Wasser durch Lackmustinktur rot färbt. Der in den Zylinder eintretende Wasserstrahl färbt sich dann beim Absorbieren des Ammoniaks blau. Es entsteht bei der Lösung des Ammoniaks im Wasser Ammoniumhydroxid.
2. An Stelle von Ammoniak kann man auch trockenes Chlorwasserstoffgas verwenden. Man stellt es aus Kochsalz und Schwefelsäure in einem Erlenmeyerkolben her. Die Schwefelsäure läßt man langsam durch einen Tropftrichter zufließen. Will man beim Absorbieren des Chlorwasserstoffs den Farbumschlag zeigen, so bringt man etwas mit Lauge blaugefärbte Lackmuslösung in das Wasser. Der Farbumschlag erfolgt von blau nach rot.
3. Zu beachten ist V 3.3.10., Bemerkung 2.
4. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!

3.3.13. Absorption von Kohlendioxid durch Gummi

1. Kippscher Apparat für Kohlendioxid
2. mit Calciumchlorid gefülltes Trockenrohr
3. Glasrohr mit Hahn
4. Gummischlauch (Länge etwa 2 m)
5. Gaswaschflasche
6. Benzol oder Petroleum
7. Farbstoff zum Anfärben des Benzols

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt, daß auch Gummi Gase absorbieren kann.
2. Vergleiche MB 3.0.3.!

Versuch

In einem Kippschen Apparat wird mit Hilfe von Marmorstückchen und Salzsäure Kohlendioxid erzeugt. Das Gas wird durch ein mit Calciumchlorid gefülltes Trockenrohr geleitet und getrocknet. An das Trockenrohr schließt man einen Glashahn an, über dessen anderes Ende ein etwa 2 m langer Gummischlauch geschoben wird. Das freie Ende des Schlauches verbindet man mit einer Gaswaschflasche, die etwa zu einem Drittel mit gefärbtem Benzol oder Petroleum gefüllt ist (Abb. 3.3.13./1). Nachdem die gesamte Versuchseinrichtung mit Kohlendioxid angefüllt und die Luft daraus restlos verdrängt worden ist, schließt man den Hahn vor dem Schlauch. Da der Gummischlauch das Kohlendioxid absorbiert, tritt in ihm ein Unterdruck auf. Infolgedessen steigt die Sperrflüssigkeit in dem Glasrohr der Gaswaschflasche beträchtlich über das Flüssigkeitsniveau in der Flasche.

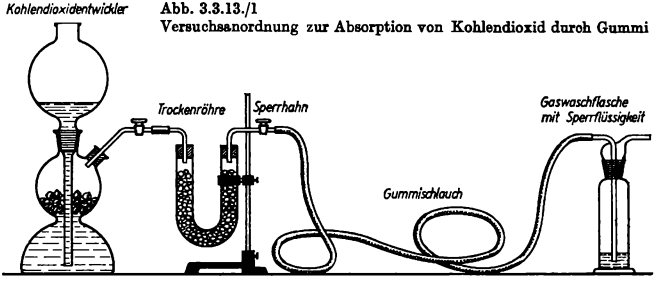


Abb. 3.3.13./1
Versuchsanordnung zur Absorption von Kohlendioxid durch Gummi

Bemerkungen

1. An Stelle des Kippschen Apparates kann auch ein Gasentwickler nach Wunderlich (Abb. 3.3.13./2) oder ein behelfsmäßig zusammengestellter Gasentwickler verwendet werden.
2. Einfacher gestaltet sich der Versuch bei Verwendung einer mit Kohlendioxid gefüllten Stahlflasche.

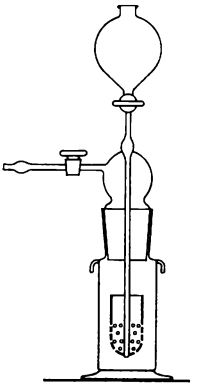


Abb. 3.3.13./2
Gasentwickler nach Wunderlich

3.4. Diffusion und Osmose

3.4.1. Diffusion von Kupfersulfat in Wasser

1. Kupfersulfatkristalle, außerdem

Zu Variante a

2. hoher Standzylinder
3. Spritzflasche
4. Glasplatte zum Abdecken des Standzylinders

Zu Variante b

5. hoher Standzylinder
6. dünnes Brettchen (Furnier) oder Pappe
7. Trichter mit langem Rohr

Zu Variante c

8. Mullsäckchen

Methodische Hinweise

1. Die Diffusionsvorgänge in Flüssigkeiten können entweder zur Vorbereitung oder zur Auswertung der Versuche zu den Brownschen Bewegungen (V 3.1.2.) gebracht werden. Sie geben einen Einblick in die Auswirkungen der ungeordneten thermischen Bewegung der Moleküle.
2. Für die betrachteten Vorgänge ist es unwesentlich, daß das Kupfersulfat dissoziiert.
3. Es ist zu beachten, daß die Varianten a und b erst nach einigen Tagen auswertbare Ergebnisse liefern.
4. Die im folgenden angegebenen Versuche vermitteln die Erkenntnis, daß die Diffusion langsamer abläuft, wenn sie gegen den Einfluß der Schwerkraft erfolgt, als umgekehrt.

Variante a

In einen hohen Standzylinder legt man einige Kupfersulfatkristalle und schichtet vorsichtig Wasser darüber. Zu diesem Zweck verwendet man eine mit Wasser gefüllte Spritzflasche, aus der man das Wasser gegen die innere Gefäßwand des Zylinders, nicht aber gegen die Kristalle spritzt (Abb. 3.4.1./1). Das an der Zylinderwand herabfließende Wasser füllt den Zylinder gleichmäßig ohne Wirbelbildung.
Die sich am Boden des Zylinders bildende konzentrierte Kupfersulfatlösung diffundiert sehr langsam durch das Wasser des Zylinders. Damit der Diffusionsvorgang durch nichts beeinflußt wird, stellt man den Standzylinder auf einen erschütterungsfreien Platz. Man bedeckt den Zylinder zum Schutz gegen Staub mit einer Glasplatte. Es vergehen mehrere Tage, bis die Blaufärbung die Flüssigkeitsoberfläche erreicht hat.

Variante b

Die Variante a kann dahingehend abgeändert werden, daß man den Standzylinder von vornherein zur Hälfte mit einer konzentrierten Kupfersulfatlösung füllt, auf die man reines Wasser schichtet. Man vermeidet eine Mischung an der Trennfläche, indem man auf der Kupfersulfatlösung eine kleine kreisförmige Holzscheibe schwim-

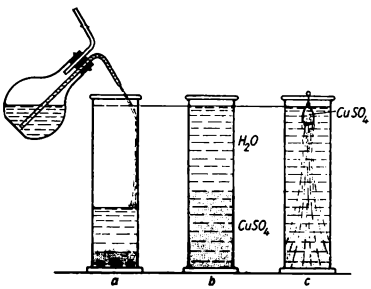


Abb. 3.4.1./1
Diffusion von Kupfersulfat in Wasser — Bei a) und b) erfolgt die Diffusion entgegengesetzt, bei c in Richtung der Schwerkraft.
a) Kupfersulfatkristalle am Boden einer Wassersäule,
b) Wasser über Kupfersulfatlösung geschichtet,
c) Kupfersulfatlösung in Wasser absinkend.

men läßt, deren Durchmesser etwas kleiner ist als der innere Durchmesser des Zylinders. Auf die Holzscheibe läßt man durch einen langen Trichter sehr behutsam Wasser zufließen, das sich auf diese Weise über dem Kupfersulfat mit einer klaren Trennfläche schichtet. Ist der Zylinder bis oben hin mit Wasser gefüllt, so nimmt man die Holzscheibe heraus und deckt ihn mit einer Glasscheibe zu (Abb. 3.4.1./1b). Die Weiterführung des Versuches erfolgt wie bei a.

Variante c

Man bindet die Kupfersulfatkristalle in ein Mullsäckchen und hängt dieses mittels eines Zwirnfadens an ein über die Zylinderöffnung gelegtes Holzstäbchen. Der Standzylinder wird so weit mit Wasser gefüllt, daß die Kupfersulfatkristalle ganz von Wasser umgeben sind (Abb. 3.4.1./1c). Bei diesem Versuch verläuft die Diffusion in Richtung der Schwerkraft, während sie bei den Varianten a und b dazu entgegengesetzt gerichtet ist. Schon nach etwa zwei Stunden sind die Kupfersulfatkristalle gelöst. Die Flüssigkeit zeigt überall eine gleichmäßige blaue Färbung.

Bemerkung

Es ist zu empfehlen, die Versuchsanordnungen a bzw. b und c nebeneinander zu stellen. Man kann den Einfluß der Schwerkraft auf den Diffusionsvorgang deutlich beobachten. Es ist darauf zu achten, daß die nebeneinander stehenden Zylinder gleich hoch mit Wasser gefüllt sind.

3.4.2. Nachweis der Diffusion von Flüssigkeiten unter Benutzung einer Projektionseinrichtung

1. Physikleuchte mit Transformator
2. Doppelkondensor
3. Blende mit schrägem Spalt ⑧, dazu erforderliches Material: Pappe
4. Linse ($f = 100$ mm)
5. schmale Glasküvette (Bodenfläche etwa 4 cm × 1 cm, Höhe etwa 6 cm)
6. Transparentschirm oder Projektionsfläche
7. Kochsalz
8. optische Bank mit Reitern
9. Becherglas
10. Bürette
11. dünnes Holz (Furnier)

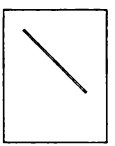


Abb. 3.4.2./1
Blende mit schrägem Spalt

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt in kurzer Zeit die Auswirkung der Diffusionsvorgänge. Er ist aber nur zu zeigen, wenn die Schüler die optischen Brechungsvorgänge kennen.

Versuch

Man stellt vor den Kondensor einer Projektionslampe eine aus Karton gefertigte Spaltblende, in die man einen etwa 1 mm breiten, unter 45° ansteigenden Spalt ge-

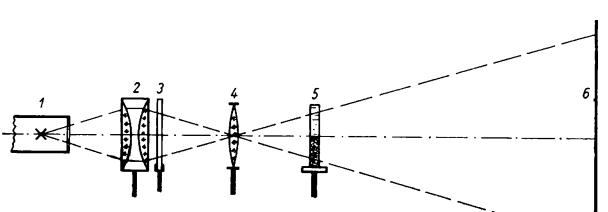


Abb. 3.4.2./2
Versuchsanordnung zum Nachweis der Diffusion von Kochsalz in Wasser

schnitten hat (Abb. 3.4.2./1). Mit Hilfe einer Linse mit einer Brennweite von 10 cm wird der Spalt auf einem Bildschirm abgebildet. Zwischen die Linse und den Bildschirm stellt man, 15 cm von der Linse entfernt, eine zur Hälfte mit konzentrierter Kochsalzlösung gefüllte Glasküvette in den Strahlengang der Lampe (Abb. 3.4.2./2). Auf die Kochsalzlösung wird vorher vorsichtig reines Wasser so aufgeschichtet, daß sich zwischen der Kochsalzlösung und dem Wasser eine scharfe Begrenzungsfläche bildet.
In der Mitte des Spaltbildes erblickt man eine scharfe Ausbuchtung nach unten. Läßt man die Versuchsanordnung unverändert und betrachtet in Zeitabständen von etwa 10 Minuten das Spaltbild, so beobachtet man eine ständige Verbreiterung und gleichzeitig eine Abflachung der Ausbuchtung (Abb. 3.4.2./3). Die Projektionslampe wird zwischendurch ausgeschaltet.
Auf Grund der verschieden starken Brechung des Lichtes in optisch verschieden dichten Medien kann man aus dem Spaltbild auf folgenden Vorgang schließen:
Zwischen der Kochsalzlösung und dem reinen Wasser bildet sich durch Diffusion eine dünne Grenzschicht aus, in der die Konzentration von der Lösung zum Wasser hin in einem kleinen Bereich stark abnimmt. In dieser Schicht wird das Licht stark abgelenkt. Dem entspricht auf dem Bildschirm eine eng begrenzte, tiefe Ausbuchtung des Spaltbildes. Je länger das Wasser und die Salzlösung ineinander

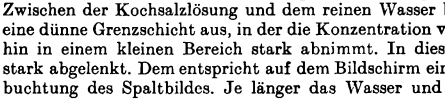


Abb. 3.4.2./3
Projizierte Spaltbilder
a) starke, eng begrenzte Ausbuchtung — sehr starke Abnahme der Lösungskonzentration in einer sehr dünnen Grenzschicht (d_1)
b) weniger starke, verbreiterte Ausbuchtung — allmähliche Abnahme der Lösungskonzentration in einer dickeren Zwischenschicht (d_2)
c) schwach ausgeprägte, breite Ausbuchtung — starke Vermischung von Wasser und Salzlösung in einem ausgedehnten Bereich (d_3)

diffundieren, um so dicker wird die Diffusionsschicht. Die optische Dichte nimmt in dieser Schicht vom reinen Wasser zur Kochsalzlösung hin mit der Konzentration allmählich zu; die Einbuchtung des Spaltbildes wird flacher.

Bemerkungen

1. Die Kochsalzlösung wird in einem Becherglas zubereitet und dann in die Küvette gefüllt.
2. Das reine Wasser wird in ähnlicher Weise auf die Kochsalzlösung geschichtet wie bei V 3.4.1. auf die Kupfersulfatlösung. Als Auflage auf die Salzlösung verwendet man einen aus Holz geschnittenen rechteckigen Streifen, der in die Küvettenform hineinpaßt; man läßt ihn auf der Salzlösung schwimmen. Man läßt aus einer Bürette vorsichtig Wasser mit geringer Ausflußgeschwindigkeit auf den Holzstreifen fließen (Abb. 3.4.2./4). Mit dem Steigen des Wasserspiegels hebt sich der Streifen. Er kann während des Versuchs in der Küvette bleiben.

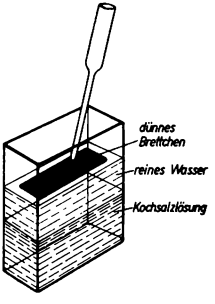


Abb. 3.4.2./4
Überschichten der in der Küvette befindlichen Salzlösung mit Wasser

3. Die Temperatur des Wassers wählt man zweckmäßigerweise etwas höher als die der Salzlösung. Dadurch wird die Diffusionsgeschwindigkeit gesteigert, die Vorgänge vollziehen sich schneller.
4. Hinweis auf die Bedeutung der Diffusion in Flüssigkeiten bei der Verdauung und bei der Aufnahme der Nährstoffe ins Blut.
5. Statt der optischen Bank kann auch der Tageslichtschreibprojektor mit Kippeinrichtung eingesetzt werden.

3.4.3. Modellversuch zur Diffusion

1. Gerät für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie
   1 Kammer mit Antrieb
   1 leichter Stempel mit Stempelhalter
   300 Stahlkugeln, ∅4 mm
   300 Glaskugeln, ∅4 mm
2. Experimentiermotor

Methodische Hinweise

1. Die in die Kammer eingeschütteten Kugelsorten stehen stellvertretend für die Moleküle zweier verschiedener, mischbarer Flüssigkeiten oder Gase unterschiedlicher Dichte.
2. Um den Einfluß der Temperatur auf den Diffusionsvorgang zu veranschaulichen, kann man das Experiment bei unterschiedlichen Schwingungsfrequenzen der Bodenplatte ausführen.
3. Vergleiche MB 3.0.1.!
4. Auf den Modellcharakter des Experiments ist unbedingt hinzuweisen.

Versuch

Man schüttet zuerst etwa 300 Stahlkugeln und danach etwa 300 Glaskugeln gleichen Durchmessers in die Kammer. Die Glaskugeln lagern sich in einer Schicht über die Stahlkugeln (Abb. 3.4.3./1a). Das Kammervolumen wird mit Hilfe des Stempels etwa auf die Hälfte reduziert. Bei geringer Schwingungsfrequenz der Bodenplatte

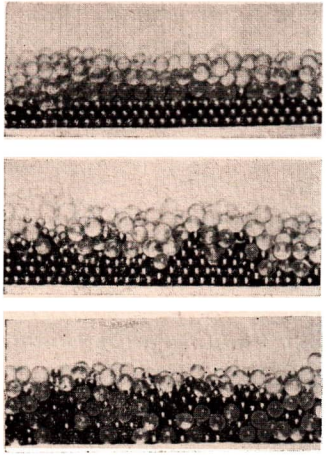


Abb. 3.4.3./1
Durchmischung zweier Modellflüssigkeiten mit unterschiedlicher Dichte
a) bei Versuchsbeginn,
b) nach kurzer Versuchsdauer,
c) Endzustand

durchmischen sich die beiden Kugelsorten allmählich und bilden schon nach relativ kurzer Versuchsdauer eine angenähert homogene Mischung (Abb. 3.4.3./1c).

Bemerkungen

1. Zum Entleeren der Kammer benutzt man die Fangmulde (vgl. MB 3.0.1.!).
2. Mit Hilfe eines Magneten kann man die Stahlkugeln von den Glaskugeln trennen.

3.4.4. Trennung kolloidaler Bestandteile einer Flüssigkeit von kristallisierenden Stoffen nach Graham

1. Ring aus Glas mit Randwulst (⌀8 cm, Höhe etwa 2 cm)
2. Pergamentpapier oder tierische Blase
3. Gummiring eines Einweckglases
4. Bindfaden
5. Glasschale
6. Gummilösung und Kochsalz oder Eiweiß eines Hühnereies und Zucker oder Pikrinsäure

Methodische Hinweise

1. Mit dem Versuch wird gezeigt, daß eine Diffusion durch eine entsprechende Trennwand hindurch erfolgen kann.
2. Gleichzeitig ist darzustellen, wie dabei eine Trennung von Stoffen möglich ist.
3. Auf die Bedeutung für biologische Vorgänge ist hinzuweisen.
4. Weitere Untersuchungen ähnlicher Vorgänge folgen in V 3.4.5. und 3.4.7.

Versuch

Ein Ring aus Glas wird auf der einen Seite mit Pergamentpapier oder einer tierischen Blase bespannt. Man legt zu diesem Zweck den Ring mit der Wulstseite auf das Pergamentpapier. Der überstehende Teil des Papiers wird an der Seitenfläche des Ringes hochgebogen und durch den übergestreiften Gummiring festgehalten. Die überstehenden Teile schneidet man ab. Durch einen mehrfach herumgewundenen Bindfaden wird das der Ringwand anliegende Papier fest an den Ring gepreßt. Den auf diese Weise mit der Membran versehenen Ring läßt man als Dialysator in einem mit Wasser gefüllten Gefäß schwimmen, wobei man die zu trennende Flüssigkeit in den Ring gießt (Abb. 3.4.4./1).



Abb. 3.4.4./1
Ein mit Pergamentpapier überzogener Glasring als Dialysator

Als Flüssigkeiten eignen sich für diesen Versuch mit Kochsalz versetzte Gummilösung oder eine Mischung von Eiweiß mit Zucker.
Besonders wirkungsvoll läßt sich der Versuch auf folgende Weise durchführen: Durch Auflösen von ein wenig Pikrinsäure in Wasser färbt man dieses gelb und mischt es im Verhältnis 3:1 mit dem Eiweiß eines Hühnereies. Zum schnellen Lösen der Pikrinsäure empfiehlt es sich, das Wasser zu erwärmen. Man muß es aber vor dem Zusetzen des Eiweißes wieder erkalten lassen, da das Eiweiß sonst gerinnt. Die Flüssigkeit wird filtriert und in den Dialysator gebracht. Bereits nach wenigen Minuten färbt sich das den Dialysator tragende Wasser gelb. Man prüft das Wasser durch Erhitzen auf Eiweißgehalt. Beim Vorhandensein von Eiweiß würde das Wasser trüb werden. Eiweiß läßt sich aber selbst nach längerer Dauer des Versuchs im Wasser nicht nachweisen.

Bemerkungen

1. Statt des Ringes kann man auch einen Erlenmeyerkolben mit abgesprengtem Boden verwenden. Man hängt den mit einer Membran versehenen Kolben in ein

großes Becherglas, über dessen Öffnung zwei Holzstäbe liegen. An diese befestigt man den Erlenmeyerkolben mittels einer dünnen Schnur. Durch zwei in das Becherglas tauchende Gummischläuche läßt man das Wasser zu- bzw. abfließen. Der Dialysator schwimmt somit in fließendem Wasser. Dadurch wird das Kolloid sorgfältig von dem kristallinen Stoff getrennt.

2. Kaliumchromat an Stelle von Pikrinsäure zu verwenden ist nicht zu empfehlen, da durch die alkalische Reaktion des Kaliumchromats das Gerinnen des Eiweißes beim Erhitzen verhindert wird. Ein Nachprüfen des Wassers auf Eiweißgehalt durch Erhitzen ist dadurch nicht möglich.

3.4.5. Nachweis des osmotischen Druckes einer Zuckerlösung — Benutzung eines Glastrichters [SE]

1. Glastrichter (⌀ etwa 50 mm)
2. dickes Pergamentpapier
3. Glasrohr (lichte Weite 1,5 mm bis 2 mm, Länge 1 m)
4. Becherglas (1000 ml)
5. Becherglas (250 ml)
6. Gummischlauchstück, passend zum Trichterrohr
7. durchbohrter Gummistopfen, passend zum Gummischlauch
8. Alleskleber
9. Pipette
10. Zucker

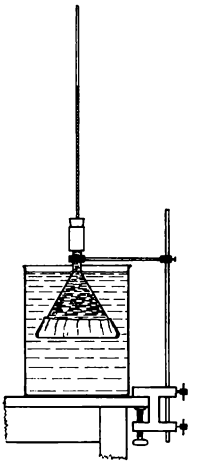


Abb. 3.4.5./1
Versuchsanordnung zum Nachweis des osmotischen Druckes

Methodische Hinweise

1. Der Versuch soll zeigen, wie sich aus den molekularen Bewegungen ein makroskopisch nachweisbarer Druck ergibt.
2. Auf die Bedeutung der Osmose für den Transport von Nährstoffen bei Pflanzen und Tieren ist hinzuweisen.

Vorbereiten des Geräts

Ein Glastrichter wird auf einer Breite von etwa 30 mm vom Trichterrand außen und innen durch Reiben mit einem Schleifmittel angerauht. Man stellt den Glastrichter

mit der Öffnung auf ein Stück dickes Pergamentpapier und umzieht den äußeren Trichterrand mit einem Bleistift. Im Abstand von 20 mm schneidet man parallel zur gezeichneten Kreislinie eine Kreisfläche aus. Längs dieser Kreislinie trägt man ein nichtwasserlösliches Klebemittel zu einem dicken Wulst auf das Pergamentpapier auf. Man drückt den Trichter auf diesen Wulst und bestreicht den angerauhten Trichterrandstreifen ebenfalls mit Klebstoff. Das Pergamentpapier wird um den Trichterrand gebogen und am Trichter festgeklebt. Nach etwa 24 Stunden Trockenzeit ist das Versuchsgerät gebrauchsfertig.

Versuchsdurchführung (*Abb. 3.4.5./1*)

Der Trichter wird an einem an den Tisch geklemmtes Stativ befestigt. Über das Trichterrohr wird ein kurzes, dickwandiges Schlauchstück, straff anliegend, geschoben. Mittels einer Pipette füllt man den großen Trichter bis an den oberen Rand des Schlauchstückes mit konzentrierter Zuckerlösung, die man in einem Becherglas vorbereitet hat. In das kurze Schlauchstück drückt man einen durchbohrten Gummistopfen, in den ein etwa 1 m langes Glasrohr als Steigröhre gesteckt wird.
Man taucht den Trichter mit der Membran nach unten gerichtet bis zum Trichterrohransatz in ein mit Wasser gefülltes Becherglas. Bereits nach kurzer Zeit steigt die Flüssigkeit in dem Rohr hoch und erreicht eine Höhe von 80 cm bis 1 m.

Bemerkungen

1. Das durchfeuchtete Pergamentpapier dehnt sich während der ersten 10 min bis 15 min des Versuchsablaufs infolge des osmotischen Druckes etwas aus. Die eingegossene Zuckerlösung sinkt infolge dessen etwas im Trichterrohr. Man füllt so viel Lösung nach, bis diese das aufgesetzte Gummischlauchstück wieder bis zum Rand füllt.
2. Zur besseren Beobachtung der Steighöhe wird die Zuckerlösung gefärbt.
3. Das Schlauchstück muß unbedingt fest am Trichterrohr und am Gummistopfen ansitzen. Gegebenenfalls muß man um die Schlauchstücke Drahtschlingen legen und diese verdrillen.
4. Der Trichter kann nach gründlichem Ausspülen und sorgfältigem Trocknen öfter verwendet werden.
5. Den Durchmesser der Trichteröffnung wählt man zweckmäßigerweise nicht größer als 8 cm, da sonst infolge des starken Druckes das Pergamentpapier reißen würde.

3.4.6. Modellversuch zur Osmose

1. Gerät für Modellversuche zur kinetischen Gastheorie
   1 Kammer mit Antrieb
   1 semipermeabler Stempel mit Stempelhalter
   200 Stahlkugeln, ∅4 mm
   200 Stahlkugeln, ∅2,5 mm
   1 Sortiersieb
2. Experimentiermotor

Methodische Hinweise

1. Mit Hilfe der zwei Kugelsorten werden stellvertretend die Moleküle des Lösungsmittels (∅ 2,5 mm) und des gelösten Stoffes (∅ 4 mm) dargestellt.
2. Der semipermeable Stempel dient als Modell einer porösen Trennwand.
3. In diesem Experiment wird modellmäßig eine einseitig gerichtete Diffusion (Osmose) dargestellt.

Versuch

Die zwei unterschiedlichen Kugelsorten werden in die Kammer geschüttet und durch einen kurzzeitigen Betrieb des Gerätes durchmischt. Danach wird mit Hilfe des semipermeablen Stempels auf etwa die Hälfte reduziert. Setzt man das Gerät in Betrieb, dann führen die Kugeln ungeordnete Bewegungen aus. Dabei treten die kleineren Kugeln durch die Öffnungen des Stempels, während die größeren Kugeln im unteren Teil der Kammer verbleiben (Abb. 3.4.6./1).

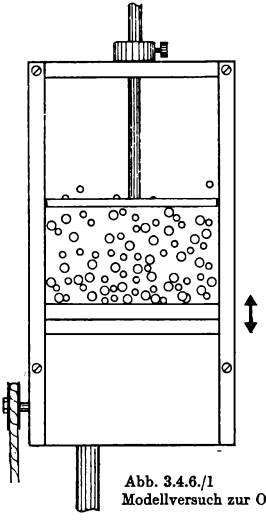


Abb. 3.4.6./1
Modellversuch zur Osmose

Bemerkung

Damit die kleinen Kugeln nicht wieder in den unteren Teil der Kammer fallen können, sind die Löcher im Stempel aufgebördelt.

3.4.7. Diffusionserscheinungen von Metallsalzen in Wasserglaslösungen

1. Becherglas (250 ml)
2. 15%ige Wasserglaslösung
3. Kupfersulfatkristalle
   oder Eisensulfat- oder Mangansulfatkristalle

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch findet bei den Schülern großes Interesse, weil hier ein äußerlich dem Wachstum ähnlicher Vorgang auftritt. Darum ist besonders wichtig, daß eine genaue Erklärung durch die osmotischen Vorgänge an den sich selbst bildenden semipermeablen Häutchen gegeben wird. Das organische Wachstum verläuft nach grundsätzlich anderen Prinzipien.

Versuch

Ein Becherglas wird mit Wasserglaslösung gefüllt; in dieser läßt man einige mittelgroße Kristalle von Kupfersulfat zu Boden sinken. Nach kurzer Zeit beobachtet

man das Entstehen eigenartig geformter Gebilde, die sich nach oben zu immer mehr verlängern. Es entsteht um den Kristall zunächst eine Abscheidung des Kupfersilikats in Form eines dünnen Häutchens. Innerhalb des Häutchens befindet sich gleichzeitig entstandene Natriumsulfatlösung. Durch das Häutchen hindurch diffundiert Wasser nach innen zur Natriumsulfatlösung. Infolge des dadurch entstehenden erhöhten Druckes platzt das Häutchen, und ein Tropfen des Inhalts quillt heraus. Es bildet sich sofort eine neue Haut; der Vorgang wiederholt sich.
Statt Kupfersulfat kann man auch die Sulfate des Eisens und Mangans und noch einige andere Schwermetallsalze verwenden. Die Form der entstehenden Gebilde ist für die einzelnen Salze typisch.
Gießt man die Wasserglaslösung nach einiger Zeit vorsichtig ab, so bleiben die entstandenen Gebilde erhalten.

Bemerkungen

1. Der Versuch ist für die Projektion sehr gut geeignet.
2. Statt Wasserglaslösung und Kupfersulfat kann man auch eine Lösung von gelbem Blutlaugensalz (30 g in 1 l Wasser — Vorsicht! Gift!) und Eisen(II)-chloridkristallen oder eine Lösung von Berliner Blau und Kupfersulfatkristallen oder Kupfersulfatlösung starker Konzentration und Kristallen des gelben Blutlaugensalzes verwenden.

3.4.8. Nachweis der Diffusion von Kohlendioxid und Luft mit Hilfe einer Präzisionswaage

1. Präzisionswaage
2. Wägesatz
3. Becherglas (250 ml, hohe Form)
4. Kohlendioxidentwickler (vgl. V 3.3.13.)
5. Schlauch
6. gewinkeltes Glasrohr, Holzspan

Methodische Hinweise

1. Die folgenden Versuche 3.4.9. bis 3.4.14. zeigen mit der Diffusion in Gasen die thermischen Bewegungsvorgänge der Gasmoleküle. Sie sind mit dem Versuch zur Brownschen Bewegung zu verbinden (V 3.1.3.). Im Unterricht ist eine Auswahl zu treffen.
2. Es ist zu erklären, warum die Diffusion in Gasen erheblich schneller als in Flüssigkeiten abläuft.
3. V 3.4.8. erfordert ein höheres Abstraktionsvermögen.

Versuch

Auf die Schale einer Präzisionswaage stellt man ein möglichst hohes, schlankes Becherglas und tariert aus. Man leitet von einem Kohlendioxidentwickler her mit Hilfe eines Schlauches und eines daran angeschlossenen gewinkelten Glasrohres Kohlendioxid auf den Boden des Glases. Da die Dichte des Kohlendioxids größer ist als die der Luft, sinkt die mit dem Glas besetzte Waagschale. Die Füllung des

Glases mit Kohlendioxid weist man mittels eines brennenden Holzspans nach. Er erlischt am oberen Rand des Glases. Dann entfernt man den Schlauch. Nach etwa 10 min hat sich die Schale mit dem Glas wieder gehoben. Ein in das Glas geatuchter brennender Span erlischt nicht. Er zeigt damit an, daß sich im Glas Sauerstoff befindet. Man kann daraus folgern, daß Kohlendioxid und Luft ineinander diffundieren.

3.4.9. Nachweis der Diffusion von Stadtgas und Brom in Luft



Zu Versuch 1

1. 2 Standzylinder mit gleichem Durchmesser
2. 2 Glasplatten zum Verschließen der Standzylinder
3. Stadtgas
4. Holzspan

Zu Versuch 2

Gerät 1., außerdem
5. Brom

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 3.4.8.!

2. Am anschaulichsten ist der Versuch 2, weil die Bromdämpfe sichtbar sind. Bei entsprechender Vorsicht ist er für den Anfangsunterricht am besten geeignet.

Versuch 1: Diffusion von Luft und Stadtgas

Man füllt einen Standzylinder mit Stadtgas, indem man ihn mit der Öffnung nach unten hält und Stadtgas durch einen Schlauch einströmen läßt. Man verlängert zu diesem Zweck den Schlauch durch ein gewinkeltes Glasrohr, das bis zum Boden des Zylinders reicht. Danach verschließt man die Öffnung des Zylinders durch eine Glasscheibe. Dann stellt man den Zylinder auf einen zweiten von gleicher Größe, so daß Öffnung gegen Öffnung steht. Obwohl das Stadtgas eine weit geringere Dichte hat als Luft, enthalten nach etwa 15 min beide Zylinder ein explosives Stadtgas-Luft-Gemisch. Man kann sich davon überzeugen, indem man zwei Glasscheiben zwischen die Zylinder schiebt, diese mit verschlossenen Öffnungen voneinander trennt und das darin befindliche Gas durch Heranbringen eines brennenden Spans entzündet. Es verbrennt explosionsartig. Vorsicht!

Versuch 2: Diffusion von Luft und Bromdampf

Man läßt Bromdampf aus einer Flasche in einen aufrecht stehenden Zylinder absinken, bis dieser ganz mit Bromdampf gefüllt ist. Sollte der Versuchsraum kühl sein, so stellt man die mit Brom gefüllte Flasche vorher an einen warmen Ort. Oft genügt es schon, die Flasche einige Minuten mit der Hand fest zu umschließen, um genügend Brom zu verdampfen. Auf den mit Bromdampf gefüllten Zylinder stellt man einen mit Luft gefüllten Zylinder von gleicher Größe. Nach etwa fünf Minuten kann man eine braune Färbung in beiden Zylindern beobachten.

Bemerkungen

1. Es empfiehlt sich bei Versuch 1, die Zylinder vor dem Entzünden des Gases mit einem Tuch zu umwickeln, damit die Hand gegen Verletzung bei einem unter Umständen eintretenden Zerspringen des Zylinders geschützt ist.
2. Vorsicht beim Umgang mit Bromdämpfen (vgl. V 3.3.8., Bemerkung 1.)!



3.4.10. Vergleich der Diffusionsgeschwindigkeit von Brom in verschiedenen Gasen

1. 2 Reagenzgläser
2. Halter für die Reagenzgläser ⑤, dazu erforderliches Material: zwei dünne Holzleisten (etwa 20 cm × 1 cm × 5 mm bzw. 15 cm × 1 cm × 5 mm) mit je zwei Querrinnen für die Reagenzgläser Bindfaden
3. Glasplatte (etwa 10 cm × 5 cm)
4. 4 gleiche Gummistopfen
5. Wasserstoffentwickler (Kippscher Apparat)
6. Brom
7. Pipette
8. Klebestreifen

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 3.4.8.!
2. Die Versuche V 3.4.11. bis V 3.4.14. beruhen auf der unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeit verschiedener Gase, auf die dort nur indirekt aus den Ergebnissen geschlossen werden kann. Darum ist es günstig, V 3.4.10. als Vorversuch zu zeigen, obwohl die Verhältnisse hier etwas anders liegen und die Trennwand fehlt.

Versuch

Zwei Reagenzgläser werden zwischen zwei mit aufeinander passenden Querrinnen versehene Holzleisten gebunden und mit der Öffnung nach unten an ein Stativ geklemmt. Eine Glasplatte wird auf vier quadratisch angeordnete gleich große Gummistopfen gelegt. Man senkt die Reagenzgläser so weit, daß beide Öffnungen leicht gegen die Glasplatte drücken und mit dieser gut abschließen (Abb. 3.4.10./1). Nach dieser Vorbereitung hebt man das Stativ mitsamt den Reagenzgläsern noch einmal von der Glasplatte ab und füllt das eine Reagenzglas mit Wasserstoff, den

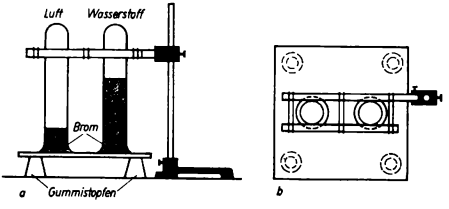


Abb. 3.4.10./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Verschiedenheit der Diffusionsgeschwindigkeit von Brom in Luft und in Wasserstoff

man einem Wasserstoffentwickler entnimmt. Man verschließt die Öffnung dieses Glases behelfsmäßig mit einem angefeuchteten Stück Klebepapier. Im Abstand der Mittelpunkte der Öffnungen beider Reagenzgläser bringt man einige Tropfen Brom auf die Glasplatte und stellt die Reagenzgläser wieder darüber, nachdem man kurz vorher das Klebepapier behutsam fortgenommen hat. Die Bromtropfen verdampfen bei Zimmertemperatur und diffundieren in den Wasserstoff rascher als in die Luft. In dem mit Wasserstoff gefüllten Reagenzglas ist deshalb ein schnelleres Aufsteigen der Braunfärbung zu beobachten als in dem mit Luft gefüllten.

Bemerkung

Die Reagenzgläser müssen ganz trocken sein, da andernfalls eine Absorption des Bromdampfes eintreten könnte.

3.4.11. Druckerhöhung durch Diffusion von Stadtgas durch eine Tonzelle

1. Tonzelle
2. durchbohrter Gummistopfen, zur Tonzelle passend
3. Glasrohr (Länge etwa 10 cm)
4. offenes Flüssigkeitsmanometer, mit gefärbtem Äthanol oder gefärbtem Wasser gefüllt
5. Verbindungsschlauch
6. Becherglas (500 ml)
7. Gasschlauch
8. Stadtgas oder Wasserstoff

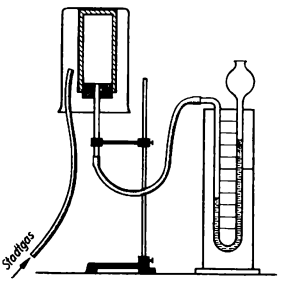


Abb. 3.4.11./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Diffusion von Stadtgas durch eine Tonzelle

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 3.4.10.!
2. In eindrucksvoller Weise werden durch die folgenden Versuche die Ergebnisse der kinetischen Gas- und Wärmetheorie qualitativ bestätigt, daß bei gleicher Temperatur die Moleküle mit geringerer Masse eine größere Geschwindigkeit haben.
3. In V 3.4.14. wird eine interessante technische Anwendungsmöglichkeit beschrieben.

Versuch

Eine Tonzelle wird durch einen großen Gummistopfen verschlossen, in den ein Glasrohr luftdicht eingepaßt ist. Das Glasrohr wird mit Hilfe eines Gummischlauches mit einem Flüssigkeitsmanometer verbunden. Man klemmt das Glasrohr lotrecht mit nach oben gerichteter Tonzelle an ein Stativ. Ein Becherglas mit einem Vo-

lumen von etwa 500 ml wird mit der Öffnung nach unten über die Tonzelle gestülpt. Es wird ihm von unten her durch einen Schlauch für kurze Zeit etwas Stadtgas zugeführt. Das angeschlossene Manometer zeigt alsbald einen Überdruck an (Abb. 3.4.11./1). Nach einiger Zeit gleichen sich Innen- und Außendruck wieder aus. Hebt man das Becherglas von der Tonzelle ab, so kann man am Manometer einen Druckabfall in der Zelle feststellen.

Bemerkungen

1. Da die Gasmoleküle rascher durch die poröse Wand der Zelle diffundieren als die in der Zelle befindlichen Moleküle der Luft, entsteht in der Zelle ein Überdruck. Nach kurzer Zeit diffundiert aber so viel Luft aus der Zelle, bis innerhalb und außerhalb der Zelle ein Gas-Luft-Gemisch gleicher Konzentration vorhanden ist. Außen- und Innendruck sind dann gleich groß. Entfernt man das Becherglas, so diffundiert Stadtgas aus der Tonzelle, das Manometer zeigt einen Unterdruck in der Zelle an.
2. Statt des Stadtgases kann der Versuch auch mit Wasserstoff ausgeführt werden. Hierbei ist die Diffusionsgeschwindigkeit größer.
3. Besonders eindrucksvoll ist es, wenn man das Becherglas von der Tonzelle abhebt, mit der Öffnung nach unten mit Stadtgas oder Wasserstoff füllt und das gefüllte Glas über die Tonzelle stülpt. Das Manometer zeigt einen plötzlichen Druckanstieg an.
4. Als Manometer eignet sich sehr gut das zum Looserschen Doppelthermoskop gehörende Manometer.

3.4.12. Druckverminderung bei Diffusion von Kohlendioxid durch eine Tonzelle

1. Tonzelle
2. durchbohrter Gummistopfen
3. Glasrohr (Länge etwa 10 cm)
4. Becherglas (500 ml)
5. Rundkolben (500 ml)
6. zweifach durchbohrter Gummistopfen, zum Rundkolben passend
7. U-förmig gebogenes Glasrohr
8. Standzylinder oder Becherglas
9. Verbindungsschlauch
10. Kohlendioxidentwickler (vgl. V 3.3.13.)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.4.10. und V 3.4.11.!

Versuch

Eine Tonzelle wird wie bei V 3.4.11. durch einen mit einem Glasrohr versehenen Stopfen verschlossen und in ein Becherglas gestellt. Durch einen Schlauch wird es mit einem Rundkolben verbunden, durch dessen Verschlußstopfen ein kurzes Glasrohr und der bis zum Boden reichende Schenkel eines U-förmig gebogenen Glasrohrs hindurchführen. Der andere Schenkel des U-förmigen Rohrs taucht in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder (Abb. 3.4.12./1). Leitet man in das Becherglas Kohlendioxid ein, so tritt in der Tonzelle ein Unterdruck auf, da die Diffusionsgeschwindigkeit beim Kohlendioxid geringer ist als bei der Luft. Infolgedessen fließt Wasser aus dem Standzylinder in die Kochflasche über.

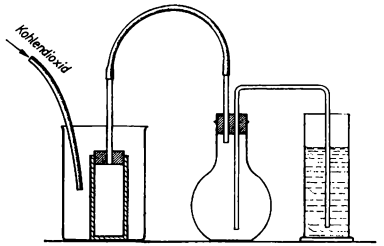


Abb. 3.4.12./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Druckverminderung durch Diffusion von Kohlendioxid in Luft

Nimmt man die Tonzelle aus dem Becherglas heraus, so spielt sich der umgekehrte Vorgang ab; das Wasser fließt in den Standzylinder zurück.

Bemerkung

Man kann den Versuch auch wie V 3.4.11. durchführen, indem man die Tonzelle mit einem Manometer verbindet.

3.4.13. Betrieb einer Spritzflasche durch Diffusion eines Gases durch eine Tonzelle

1. Tonzelle
2. durchbohrter Gummistopfen
3. Glasrohr (Länge etwa 20 cm)
4. Spritzflasche
5. Stadtgas

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.4.10. und V 3.4.11.!

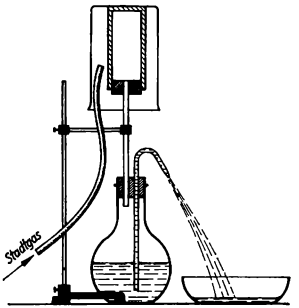


Abb. 3.4.13./1
Betrieb einer Spritzflasche durch Diffusion eines Gases durch eine Tonzelle

Versuch

Aus einer Spritzflasche wird das Blasrohr entfernt und durch ein gerades Glasrohr ersetzt. Auf das obere Ende des Rohres steckt man die Tonzelle und stülpt ein Becherglas darüber. Führt man von unten her für kurze Zeit Stadtgas in das Becherglas, so entsteht in der Tonzelle ein Überdruck, und die Spritzflasche tritt in Tätigkeit (Abb. 3.4.13./1).

Bemerkungen

1. Statt des Stadtgases kann bei diesem Versuch auch Wasserstoff verwendet werden. Man kann an Stelle des geraden Glasrohres das Blasrohr der Spritzflasche auch durch einen Gummischlauch mit der Tonzelle verbinden.
2. Unterbricht man die Stadtgaszufuhr und entfernt das Becherglas von der Tonzelle, so diffundiert das in die Tonzelle gelangte Stadtgas wieder nach außen. Es entsteht in der Zelle und in der Flasche ein Unterdruck, so daß Luft durch das Spritzrohr in die Flasche eindringt.

Giftige Dämpfe

3.4.14. Modellversuch zur Wirkungsweise eines Schlagwetteranzeigers

1. Tonzelle
2. durchbohrter Gummistopfen
3. Glasrohr (Länge etwa 10 cm)
4. U-Rohr, mit zwei seitlichen Ansätzen
5. 2 Gummistopfen zum U-Rohr
6. Verbindungsschlauch
7. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter
8. 2 dicke Messingdrähte
9. 2 Verbindungsklemmen
10. Akkumulator oder Stromversorgungsgerät (4 V—)
11. elektrische Klingel
12. Stadtgas

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.4.10. und V 3.4.11.!

Versuch

Eine Tonzelle wird wie bei V 3.4.11. vorbereitet und in derselben Weise wie dort an ein Stativ geklemmt. Das Anschlußrohr der Tonzelle wird durch einen Schlauch mit dem einen Ansatzstutzen des U-Rohrs verbunden, das man über einem Quecksilberbrett an demselben Stativ befestigt. Der andere Ansatzstutzen des U-Rohres bleibt offen. Das U-Rohr füllt man knapp zur Hälfte mit Quecksilber. Seine Schenkel verschließt man mit zwei Gummistopfen, durch die man luftdicht zwei Messingdrähte als Kontakte einführt.

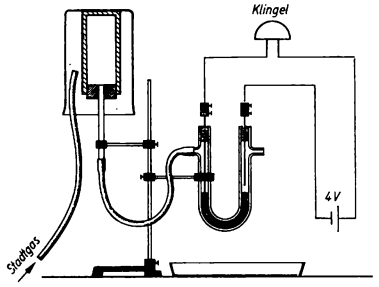


Abb. 3.4.14./1
Modell eines Schlagwetteranzeigers

Man verschiebt die Kontaktdrähte so weit in den Korken, bis der Draht, der sich in dem an die Tonzelle angeschlossenen Schenkel befindet, etwa 1 cm in das Quecksilber taucht und der in den anderen Schenkel eingeführte Draht dicht über dem Quecksilberspiegel steht. Die Drähte werden mit einer Spannungsquelle und einer elektrischen Klingel in Reihe geschaltet. Über die Tonzelle stülpt man ein Becherglas (Abb. 3.4.14./1).
Läßt man durch einen Schlauch Stadtgas in das Becherglas strömen, so diffundiert das Gas in die Tonzelle und erhöht dadurch den Druck im angeschlossenen U-Rohr-Schenkel. Infolgedessen steigt das Quecksilber im offenen Schenkel und schließt durch Berühren des Drahtes den Stromkreis. Die Klingel ertönt.

Bemerkungen

1. Durch Verändern des Abstandes des im offenen Schenkel befindlichen Kontaktdrahtes von der Oberfläche des Quecksilbers läßt sich die Empfindlichkeit des Modells einstellen.
2. Vergleiche MB 1.0.6., Anweisung zum Experimentieren mit Quecksilber!

4. Allgemeine Strömungslehre

4.0. Methodische Bemerkungen

4.0.1. Die einfachste Form einer Strömung ist die *laminare* oder *schlichte Strömung.* Man versteht darunter eine Strömung, bei der die einzelnen Flüssigkeits- oder Gasschichten aneinander entlanggleiten, ohne sich zu vermischen. Sie bilden sich vorwiegend bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten aus. Laminare Strömungen sind durch das Auftreten geschlossener Stromfäden zu erkennen. Man veranschaulicht Stromfäden dadurch, daß man Wasser oder Luft in einem Gefäß ganz langsam strömen läßt und der Strömung an einzelnen Stellen gefärbte Flüssigkeit, Rauch, Ölnebel oder andere Schwebekörper zufügt. Zur Demonstration von Stromfäden in Flüssigkeiten haben sich besonders das bekannte *Stromfädengerät nach Pohl* (Abb. 4.1.1./1) und die Strömungswanne (Abb. 4.2.15./1) bewährt.
Die Herausbildung einer *Grenzschicht* zwischen ruhenden und bewegten Teilen einer Flüssigkeit kann man in einem einfachen Freihandversuch (V 4.1.3.) zeigen. Die innere Reibung der Flüssigkeit in der Grenzschicht bedingt ein Geschwindigkeitsgefälle, das in den Experimenten V 4.1.4., V 4.1.5. und V 4.1.6. nachgewiesen wird. Es sollte darauf hingewiesen werden, daß rein laminare Strömungen mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten nur sehr selten zustande kommen. Sie treten in der Regel nur in Flüssigkeiten von großer Zähigkeit auf, wenn die einzelnen Schichtströmungen ohne störende Hindernisse und ohne gegenseitige Beeinflussung und Durchmischung nebeneinander herlaufen. Bei weniger zähen Flüssigkeiten und bei störenden Hindernissen, wie Brückenpfeilern und Buhnen in Flüssen, bei Unebenheiten oder Stufen in der Rohrwand, kommt es in den Grenzschichten leicht zu Störungen, die sich in Verwirbelungen äußern. Die Strömung wird *turbulent.* Dieselben Erscheinungen kann man auch in Gasen beobachten (vgl. V 4.2.1., V 4.2.4., V 4.2.5. und V 4.2.11.).

4.0.2. Viel häufiger als laminare Strömungen treten *turbulente Strömungen* auf. Sie nehmen deshalb im Unterricht auch einen wesentlich breiteren Raum ein als die laminaren Strömungen. Die unterrichtliche Behandlung der turbulenten Strömungen beschränkt sich meist auf das phänomenologische Erfassen der Vorgänge und auf die qualitative Darstellung der Zusammenhänge. Auf alle Fälle sollte man nachweisen, daß der Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung gesetzmäßig erfolgt. Den Nachweis, daß man diesen Qualitätsumschlag von der Laminarität zur Turbulenz zahlenmäßig erfassen bzw. vorausberechnen kann, liefert V 4.2.2., die Bestimmung der *Reynoldsschen Zahl.* Auf ihre Bedeutung für die wissenschaftliche Forschung und die Fahrzeugindustrie sollte hingewiesen werden.

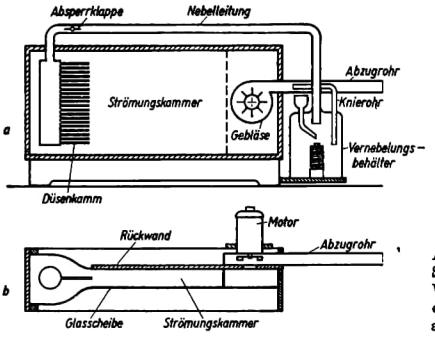


Abb. 4.0.2./1
Stark schematisierte Wiedergabe des Nebelströmungsgerätes
a) Aufriß, b) Grundriß

Zur experimentellen Untersuchung von Wirbelfeldern in Gasen bieten die Experimente V 4.2.1. und V 4.2.3. bis V 4.2.11. mannigfache Anregungen. Meist sind dazu nur ganz einfache, leicht zu beschaffende Hilfsmittel erforderlich. Besonders anschaulich und damit natürlich auch wirkungsvoll und überzeugend sind die Experimente mit dem *Nebelströmungsgerät* (Abb. 4.0.2./1). Dort werden Ölnebel dazu benutzt, Stromfäden in bewegter Luft sichtbar zu machen. Der Hauptteil des Gerätes ist eine etwa 35 cm hohe, 50 cm breite und nur 3 cm tiefe Strömungskammer, die nach vorn durch eine Glasscheibe abgeschlossen ist. Am rechten Ende der Kammer wird die Luft durch ein Gebläse abgesaugt und in ein Ableitrohr gedrückt. Gleichzeitig wird dadurch Luft in eine Nebelentwicklungsflasche geleitet, in der Öl auf eine elektrisch beheizte Drahtwendel tropft und in Nebel verwandelt wird. Die Ölnebel gelangen mit der zugeführten Luft an die linke Seite der Strömungskammer. Dort entströmen sie einem Rohr, das mit einem aus regelmäßig angeordneten seitlichen Röhrchen bestehenden Düsenkamm versehen ist.
Der Nebel bewegt sich in dünnen Fäden mit der angesaugten Luft durch die Kam-

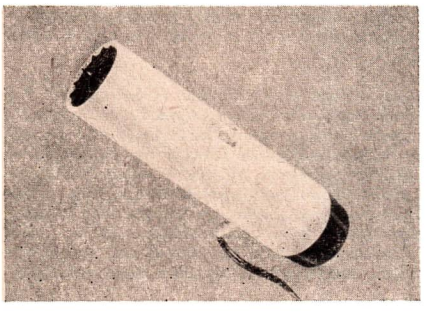


Abb. 4.0.2./2
Heißluftdusche, axialsymmetrische Form

mer. Die Nebelfäden werden von oben und unten beleuchtet und heben sich deutlich von der dunklen Rückwand ab. Bei länger dauernden Versuchen ist es ratsam, die durch das Ableitrohr entweichenden Ölnebel in einen Abzug oder ins Freie zu leiten. Durch Verändern des zum Gebläsemotor gehörenden Vorwiderstandes können verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten eingestellt werden. Die Geschwindigkeit des Nebels wird durch Regeln der Nebelzufuhr jeweils der Luftgeschwindigkeit angeglichen, damit die Strömung laminar bleibt und die Fäden in der ganzen Kammerbreite deutlich sichtbar sind. Beim Auswechseln der Versuchskörper wird durch Verstellen eines Dreiwegehahnes der Nebel vorübergehend unmittelbar dem Gebläse zugeführt, so daß die Kammer nebelfrei bleibt. Bei wiederholtem kurzzeitigem Öffnen der Nebelzufuhr entstehen eine Reihe kurzer Parallelstreifen, die durch die Kammer wandern und die Strömungsgeschwindigkeit an verschiedenen Stellen erkennen lassen. Zur Durchführung von Versuchen können durch eine in der Rückwand der Kammer befindliche Klappe plattenförmige Versuchskörper mit verschieden geformten Profilen in die Nebelkammer eingesetzt werden. Die Entstehung, Ablösung und Bewegung von Wirbeln ist deutlich zu beobachten. Von Zeit zu Zeit müssen die Düsen gereinigt werden, da sie sich gelegentlich verstopfen.

Das Nebelströmungsgerät ist zwar zur Erarbeitung von Gesetzen der Strömungslehre und Flugphysik sehr wünschenswert, ein *Luftstromerzeuger* muß aber dafür als unentbehrliches Lehrmittel bezeichnet werden. Für viele Versuche, besonders wenn es nicht auf einen Luftstrom mit großem Querschnitt ankommt, genügt eine Heißluftdusche, im folgenden kurz als Luftdusche bezeichnet. In ihrem Strahlrohr ist ein Keramikkörper mit einer Heizwendel eingebaut, den man allerdings für die Experimente zur Strömungslehre entfernen muß. Aber nicht jede Luftdusche ist als Luftstromerzeuger geeignet. Erforderlich ist, daß sie einen drallfreien Luftstrom liefert. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn der Luftstrom durch ein Flügelrad erzeugt wird, das sich in der Strömungsrichtung dreht und die Luft in das Strahlrohr „hineinschaufelt" (vgl. Abb. 4.2.4./1!). Eine axialsymmetrisch gebaute Heißluftdusche, in der die Luft durch einen Propeller angetrieben wird, ist für Strömungsversuche weniger geeignet. Bei ihr müßte an Stelle des Heizkörpers in das Strahlrohr ein Bündel dünnwandiger Röhrchen eingesetzt werden, um den starken Drall des Luftstromes zu beseitigen. Als Notbehelf eignet sich dazu ein Bündel Trinkröhrchen.

Braucht man einen Luftstrom mit größerem Durchmesser, dann verwendet man einen Luftstromerzeuger, wie er von der Lehrmittelindustrie produziert wird. In den Lehrmittelsammlungen der Schulen sind in der Hauptsache zwei Ausführungsformen anzutreffen.

Der *große Luftstromerzeuger* (Abb. 4.0.2./3) ist ein leistungsfähiges Gerät, das in erster Linie für Hoch- und Fachschulen entwickelt wurde. Für die allgemeinbildenden Schulen reicht der *kleine Luftstromerzeuger* (Abb. 4.0.2./5) in der Regel aus. Benötigt man für ein Experiment einmal einen Luftstrom mit größerem Durchmesser, dann entfernt man hierfür die Düsenkappe.

Die neue Ausführungsform des kleinen Luftstromerzeugers (Abb. 4.0.2./4) weist gegenüber der älteren eine Reihe von Verbesserungen auf. Sie hat einen eingebauten Netzschalter, einen Drehwiderstand zur Regelung der Strömungsgeschwindigkeit, eine kürzere und gefälligere Form und zweifache Befestigungsmöglichkeit. Dadurch gestalten sich die Versuchsaufbauten einfacher, in der Durchführung ergeben sich Erweiterungsmöglichkeiten und Varianten.

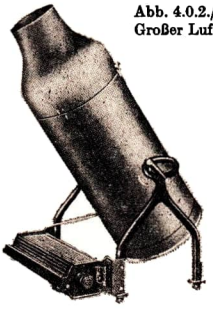


Abb. 4.0.2./3
Großer Luftstromerzeuger

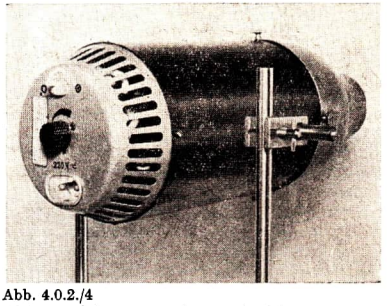


Abb. 4.0.2./4
Kleiner Luftstromerzeuger, neue Ausführung

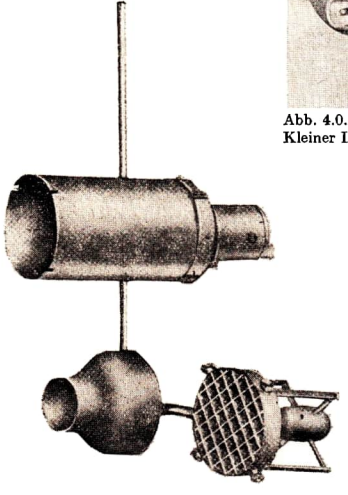


Abb. 4.0.2./5
Kleiner Luftstromerzeuger,
Düse und Gleichrichter sind abgenommen

Bei Luftstromerzeugern, in denen die Luft durch eine Luftschraube bewegt wird, dienen wabenartige Leitbleche als Gleichrichter, um den Luftstrom drallfrei zu machen. In V 4.2.3. wird aber gezeigt, daß dies nicht immer voll erreicht wird. Bei aufgesetzter Düse ist meist von dem Drall nichts mehr nachzuweisen. Da den Luftstromerzeugern verdichtete Luft entströmt, treten kurz hinter der Düsenöffnung leicht Störungen auf, die zu Fehlern in der Versuchsdurchführung führen können. Deshalb sollten Versuchskörper der Düse höchstens bis auf 20 cm genähert werden. Interessant sind die Experimente V 4.2.12. und V 4.2.13., bei denen ge-



Abb. 4.0.2./6
Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät WSP 220

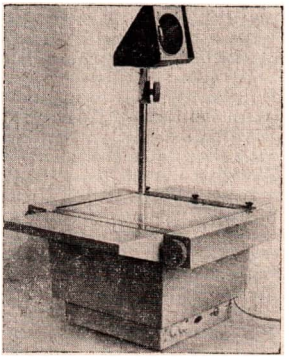


Abb. 4.0.2./7
Tageslichtschreibprojektor „Polylux 1"

schlossene „Anfahrwirbel" in Luft bzw. in Wasser veranschaulicht werden. Es überrascht, daß ein solcher Wirbel mehrere Sekunden bestehenbleibt. In V 4.2.12. wird außerdem nachgewiesen, daß durch Wirbel Energie übertragen wird. Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie kann man daraus auch folgern, daß zur Entstehung von Wirbeln Energie erforderlich ist. Das wiederum ist eine wichtige Erkenntnis für die Flugphysik.

Zur Demonstration von Flüssigkeitsströmungen benutzt man Strömungswannen. In älteren Lehrmittelsammlungen bestehen meist noch Strömungswannen mit Projektionseinrichtungen, die aus einer Reihe von Einzelteilen zusammengebaut werden müssen. Die Einzelteile für die Projektion können zwar für die verschiedensten Zwecke benutzt werden, aber der Zeitaufwand für die Vorbereitung der Versuchsanordnung ist immer relativ groß. Trotz der Vorzüge der Aufbauphysik hat sich ein Kompaktgerät, das „Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät", kurz als „WSP 220" bezeichnet (Abb. 4.0.2./6), durchgesetzt. Das Wasser wird in der Strömungswanne, die zu diesem Gerät gehört, mit einer kleinen Kreiselpumpe angetrieben, deren Förderleistung verändert werden kann. So ist auch die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in gewissen Grenzen regelbar. Das Gerät kann außerdem, wie der Name sagt, zur Untersuchung von Wasserwellen und für die unterschiedlichsten Projektionen benutzt werden. Ganz besonders empfehlenswert ist der Tageslichtschreibprojektor „Polylux 1" (Abb. 4.0.2./7). Er ist mit einem Fresnelkondensor und einer Halogen-Quarzlampe ausgerüstet und deshalb so lichtstark, daß er ohne Verdunklung benutzt werden kann.

Bei der Benutzung von Luftstromerzeugern, Strömungswannen und Stromfädengeräten, auch bei der Benutzung des Nebelströmungsgerätes beobachtet man das

Strömungsbild in einem bewegten Mittel hinter feststehenden Hindernissen. Bei Fahrzeugen, bei Kraftfahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt. Sie bewegen sich meist in einem ruhenden Medium. Dem entsprechen die Vorgänge in der *Schleppwanne* (V 4.2.17.). Diese Methode stellt aber für den Unterricht nur einen Behelf dar, weil man das Strömungsfeld jeweils nur wenige Sekunden beobachten kann und weil es sich dabei außerdem noch bewegt. Auf jeden Fall sollte man aber die Schüler auf die *Relativität der Bewegungen* hinweisen, die hier eine Rolle spielt. Man wird nachweisen, daß stets dieselben Erscheinungen beobachtet werden können, gleichgültig, ob der Widerstandskörper durch eine ruhende Flüssigkeit oder ein ruhendes Gas bewegt wird oder ob sich die Flüssigkeit oder das Gas am ruhenden Körper vorbei bewegt. In beiden Fällen entstehen die gleichen Wirbel, Wirbelstraßen oder Wirbelschleppen.
Schließlich sei noch erwähnt, daß man auch mit primitivsten Mitteln Strömungserscheinungen zeigen kann. So braucht man z. B. nur einen Löffel mit der Wölbung nach vorn durch einen mit Grießsuppe gefüllten Teller zu ziehen, um eine Wirbelstraße zu erzeugen.
Die Grießkörner geben die Stromlinien gut wieder.

4.0.3. In engster Beziehung zur Wirbelbildung steht der *Strömungswiderstand.* Aufschlußreich ist die Untersuchung des Einflusses der Körperform auf den Strömungswiderstand. Soweit nur ein Größenvergleich der Widerstände beabsichtigt ist, ist V 4.3.1., der sich als Hilfsmittel einer Luftdusche und einer Briefwaage bedient, sehr zweckmäßig. Der Versuch liefert hinreichend genaue Werte, ist sehr einfach durchzuführen und wirkt gerade deswegen überzeugend. Will man dagegen den Widerstand quantitativ ermitteln, so findet man in V 4.3.2. und V 4.3.3. zwei sehr brauchbare Anordnungen. Beide liefern Werte mit ausreichender Genauigkeit. Bei V 4.3.3. muß jedoch besonders darauf hingewiesen werden, daß hier ausnahmsweise eine Balkenwaage zur Kraftmessung benutzt wird.
Sehr gut hat sich als Einkomponentenwaage zur Messung der Winddruckkraft und der aerodynamischen Auftriebskraft die Drehmomentenwaage (Abb. 4.3.1./1) bewährt. Zu diesem Gerät, das zu Messungen auf verschiedenen Gebieten der Physik eingesetzt werden kann, steht im Unterrichtsmittelangebot auch ein Sortiment von Widerstandskörpern zur Verfügung.
Im übrigen ist es im Interesse einer klaren Begriffsbildung notwendig, die Schüler auf folgendes hinzuweisen: Man hat das Wort Widerstand eigentlich für die Kraftwirkung geprägt, die ein bewegter Körper im ruhenden Mittel erfährt. Die Kraft, mit der dagegen ein strömendes Medium auf einen ruhenden Körper einwirkt, nennt man dynamische Druckkraft oder, wenn es sich um Luft handelt, Luftkraft oder Winddruckkraft. Da beide Kräfte, der Strömungswiderstand und die dynamische Druckkraft, gleich groß sind, spricht man ganz allgemein meist nur vom Widerstand.
Die im Lehrmittelhandel übliche Bezeichnung „Winddruckmeßgerät" für die Einkomponentenwaage ist nicht richtig. Es wird nicht der Winddruck, sondern die *Winddruckkraft* gemessen.

4.0.4. Die Grundlage für das Verständnis der Strömungserscheinungen bilden die Kontinuitätsgleichung und die aus ihr entwickelte *Bernoullische Gleichung.* Wenn es auch in der Schule nicht leicht ist, die Bernoullische Gleichung experimentell herzuleiten, so liegt doch schon in der experimentellen Bestätigung der Kontinuitätsgleichung nach V 4.4.1. und V 4.4.2. ein großer Gewinn, auf den man nicht

verzichten sollte. Leicht ist es dagegen, die durch die Bernoullische Gleichung wiedergegebenen Zusammenhänge am Druckgefälle einer durch ein Rohr verlaufenden Strömung zu erläutern. Dazu geben V 4.4.3. bis V 4.4.5. die erforderlichen Anregungen.
Die Behandlung der Bernoullischen Gleichung führt zur Unterscheidung des dynamischen Druckes oder des Staudruckes in der Strömungsrichtung und des statischen Druckes auf die Gefäßwand quer zur Strömungsrichtung. Hinzu kommt noch der Schweredruck, den man dadurch konstant halten und somit ausschalten kann, daß man die Rohrleitung horizontal führt. Unter diesen Umständen ist die Summe aus dem Staudruck und dem statischen Druck konstant.
Bei der Anwendung der Bernoullischen Gleichung sollte man darauf achten, daß die gemessenen Größen in solchen Einheiten angegeben werden, die das Rechnen vereinfachen. Die in diesem Abschnitt benutzten Einheiten sind (nach der TGL 31548 „Einheiten physikalischer Größen")

für den Druck	Pascal
(Gesamtdruck p_o, statischer Druck p)	$(1\ \mathrm{Pa} = 1\ \mathrm{N/m^2} = 1\ \mathrm{m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}})$
für die Dichte	Kilogramm/Kubikmeter
	$(1\ \mathrm{kg/m^3} = 1\ \mathrm{m^{-3} \cdot kg})$
für die Geschwindigkeit	Meter/Sekunde $(1\ \mathrm{m/s} = 1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}})$

Mit dem statischen und dynamischen Druck eng verbunden ist die Strömungsgeschwindigkeit. Ihre Messung erfolgt nach V 4.4.6. bis 4.4.9. mit Hilfe eines Pitotrohres, einer Drucksonde, eines Prandtlschen Staurohres oder einer Venturidüse und eines Manometers. Da es sich bei den Manometern durchweg um offene Manometer handelt, verschmutzen sie leicht, wenn man sie längere Zeit gefüllt stehenläßt. Man reinige sie daher stets nach Gebrauch gründlich und fülle sie vor jedem Versuch mit einer frisch zubereiteten Flüssigkeit. Als solche eignet sich besonders gefärbtes Wasser, dem man etwas Fit zugesetzt hat. Dadurch wird die Oberflächenspannung verringert und die Kapillarwirkung erheblich herabgesetzt, die andernfalls leicht zu Meßfehlern Anlaß geben kann.
Das Prandtlsche Staurohr wird zur Geschwindigkeitsmessung bei Flugzeugen angewandt. Bei Segelflugzeugen benutzt man für diesen Zweck auch die Venturidüse. In der Industrie kommt der Verwendung einer Ringblende mit einem Manometer als Durchflußmengenmesser erhöhte Bedeutung zu. V 4.4.12. gibt Anregungen, wie man mit einfachen Mitteln im Schulversuch die prinzipielle Wirkungsweise dieses Gerätes zeigen kann.

4.0.5. Der Abschnitt 4.5. enthält 12 Versuchsvorschläge zur experimentellen Gestaltung des *aerodynamischen Paradoxons*. Wie auf kaum einem anderen Gebiet der Strömungslehre kann man die meisten dieser Versuche mit einfachsten Mitteln durchführen. Für viele Versuche braucht man nicht einmal einen Luftstromerzeuger; es genügt ein einfaches Anblasen mit dem Munde. Die Erscheinungen regen immer wieder zum Nachdenken und zum selbständigen Experimentieren an und sind deshalb besonders wertvoll.
Die Ursache dieser scheinbar paradoxen Erscheinung ist leicht anzugeben. Man weist darauf hin, daß nach der Kontinuitätsgleichung eine Flüssigkeit oder ein Gas schneller strömt, wenn der Rohrquerschnitt verkleinert wird. Damit erhöht sich der Staudruck und vermindert sich nach dem Bernoullischen Gesetz der statische Druck. Dieser kann dann geringer sein als der Druck, der von außen auf die Rohr- oder Gefäßwand einwirkt.

4.1. Laminare Strömungen

4.1.1. Veranschaulichung der Stromfäden durch das Stromfädengerät nach Pohl

1. Stromfädengerät nach Pohl
2. Farbflüssigkeit
3. Becherglas

Methodischer Hinweis

Bei Versuchen mit Stromfädengeräten ist unbedingt herauszuarbeiten, daß die Stromfäden oder Stromlinien den Weg veranschaulichen, den einzelne Teilchen der strömenden Flüssigkeit oder des strömenden Gases durchlaufen.

Versuch

Die beiden Kammern des Stromfädengerätes werden mit Wasser bzw. Farbflüssigkeit gefüllt. Am unteren Ende des Gerätes befindet sich ein Schlauchstutzen mit einem kurzen Schlauchstück. Der zunächst mit einem Quetschhahn verschlossene Schlauch wird nach dem Füllen ein wenig geöffnet. Das ausfließende Wasser wird in einem Becherglas aufgefangen. Im Gerät bildet sich eine zeitlich konstante Strömung aus, die man als stationäre Strömung bezeichnet. Die Stromfäden können direkt oder durch Projektion an einer Wand beobachtet werden (Abb. 4.1.1./1).

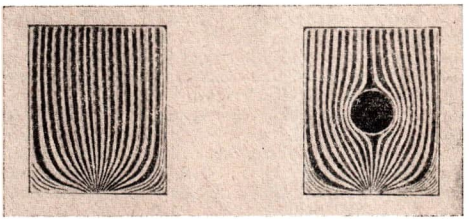


Abb. 4.1.1./1
Stromfädengerät nach Pohl zur Demonstration von Stromfäden in ebenen Strömungsfeldern:
a) ungestörte Strömung,
b) Umströmen eines Hindernisses

Zum Stromfädengerät gehören verschiedene flache Versuchskörper, die in die Kammer eingesetzt werden können. Sie stellen Querschnitte verschiedener Körper (Platte, Kugel, Halbkugel, Stromlinienkörper, Tragflügel, Düse) dar und dienen der Veranschaulichung der Strömung um diese Körper bei geringer Strömungsgeschwindigkeit.

Bemerkung

Die Versuchsanordnung kann zur Verbesserung der Sichtbarkeit mit dem Tageslichtschreibprojektor mit Kippeinrichtung projiziert werden.

4.1.2. Veranschaulichung der Stromfäden in Gasen mit Hilfe einer behelfsmäßigen Strömungskammer [SE]

1. Behelfsmäßige Strömungskammer ⑧,
   dazu erforderliches Material:

Brett (42 cm × 20 cm × 1 cm)	2 Flaschen (200 ml)
Leiste (1 m × 1 cm × 5 mm)	2 zweifach durchbohrte Stopfen
Glasscheibe	2 rechtwinklig gebogene Glasröhrchen
3 Sperrholzstreifen (20 cm × 3 cm × 3 mm)	U-förmig gebogene Glasröhre
2 Sperrholzplatten (30 mm × 24 mm × 3 mm)	Gummischlauch
2 durchbohrte Korken oder Gummistopfen	Wasserstrahlpumpe
2 kurze Glasröhrchen	Ammoniaklösung, Salzsäure
6 Winkelschellen aus Blech	Brettchen (3 mm dick)
2 Bretter (25 cm × 16 cm × 2 cm)	dicker Draht, Wollstoff

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH zu V 4.1.1. !

Herstellen des Gerätes

Aus einem 1 cm dicken Brett schneidet man ein rechteckiges Stück von der Größe 30 cm × 20 cm aus, das nach unten zu durch eine dreieckige, 12 cm lange Spitze verlängert ist. Längs der Langseiten und der schräg nach unten führenden Schmalseiten leimt und nagelt man schmale, 5 mm dicke Leisten auf das Brett und beklebt sie zur Dichtung mit dicken Streifen aus Wollstoff (Abb. 4.1.2./1). Etwa

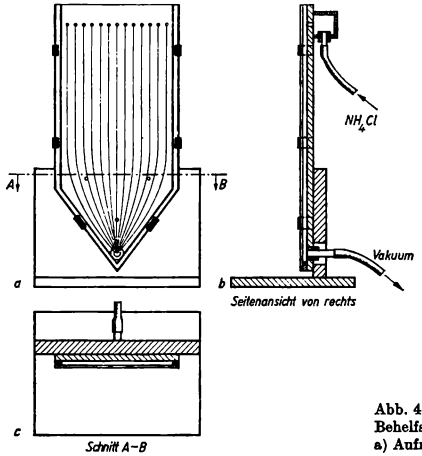


Abb. 4.1.2./1
Behelfsmäßige Strömungskammer
a) Aufriß, b) Seitenriß, c) Schnitt A—B

4 cm vom oberen Rand entfernt bringt man eine Reihe von Bohrungen an (∅ etwa 3 mm), die man auf der Rückseite des Brettes mit einem aus Sperrholz gefertigten Kästchen verkleidet. In dieses wird von unten her mittels eines durchbohrten Stopfens ein Rohr eingeführt. In der Nähe der Spitze bringt man in dem Brett ein Bohrloch an, das ebenfalls zur Aufnahme eines in einem Stopfen steckenden Rohres dient.
Man befestigt das Brett mit der Spitze nach unten nach Art von Abb. 4.1.2./1 an einem aus zwei dicken Brettern hergestellten Fuß und bedeckt es mit einer dazu passenden Glasscheibe, die man mit 6 Winkelschellen am Brett befestigt. Vorher streicht man die dem Innern der Kammer zugekehrte Seite des Brettes schwarz an, um die beim Versuch in der Kammer entstehenden Nebelfäden besser erkennbar zu machen.

Versuch

Zur Durchführung des Versuchs verwendet man Salmiaknebel, den man durch Zusammentritt von Chlorwasserstoff mit Ammoniak gewinnt. Man stellt zu diesem Zweck nach Art von Abb. 4.1.2./2 aus zwei Flaschen und mehreren gewinkelten

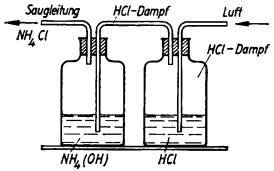


Abb. 4.1.2./2
Vorrichtung zum Erzeugen von Salmiaknebel

Glasröhren einen Salmiaknebelerzeuger zusammen, den man an das Zuführungsrohr zur Lochreihe anschließt. Verbindet man das unten an der Spitze befindliche Rohr mit einer Wasserstrahlpumpe, so wird Salmiaknebel angesaugt, der aus dem Kasten durch die Bohrlöcher in die Kammer eintritt. Der Nebel senkt sich in scharf begrenzten Fäden von den Löchern aus nach unten und kennzeichnet deutlich die laminare Strömung in der Kammer.
Aus einem 3 mm dicken Brett sägt man verschiedene Körperprofile aus, die man als Versuchskörper zwischen die Wände der Kammer klemmt. Um den Versuchskörpern einen sicheren Halt zu geben, beklebt man sie auf der der Glasscheibe zugewandten Seite mit Wollstoff. Bringt man beispielsweise eine Kreisscheibe in die Kammer, so weichen die Stromfäden seitlich aus, wobei sie sich etwas zusammendrängen. Nach dem Umfließen des Versuchskörpers nehmen die Stromlinien wieder die ursprüngliche Verteilung ein.
Zum Einsetzen und Herausnehmen der Versuchskörper benutzt man einen Draht, den man an einem Ende zu einem Haken umgebogen hat.

4.1.3. Veranschaulichung der Grenzschicht zwischen ruhenden und bewegten Flüssigkeitsteilchen [SE]

1. Becherglas 2. Glasstab (∅8 mm) 3. Paraffinöl

Methodischer Hinweis

Zur Erklärung der Vorgänge an Grenzschichten zwischen Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten kann man die Wirkung der Molekularkräfte (Kohäsion und Adhäsion) heranziehen. Weiterhin sei auf die Wirkung der Viskosität (vgl. V 3.1.4. bis V 3.1.7.) hingewiesen.

Versuch

Man füllt ein Becherglas mit Wasser und überschichtet dieses etwa 1 cm dick mit Öl. Nun taucht man einen Glasstab recht schnell lotrecht in die Flüssigkeit ein. Man beobachtet von der Seite her die Grenzfläche zwischen Wasser und Öl. Das beim Eintauchen am Glasstab haftende Öl wird in die Wasserschicht mit hineingerissen (Abb. 4.1.3./1). In einer Entfernung von einigen Millimetern vom Stabe bleibt die Grenzfläche zwischen Wasser und Öl in Ruhe.

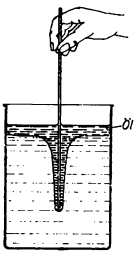


Abb. 4.1.3./1
Grenzschicht zwischen schnell bewegten und ruhenden Flüssigkeitsschichten

Bemerkungen

1. Die koaxialen Schichten um den Glasstab herum haben verschiedene Geschwindigkeiten. Die am Stab haftende Flüssigkeit hat die Geschwindigkeit des Stabes; nach außen zu nimmt die Geschwindigkeit stark ab. Die Dicke der bewegten Flüssigkeitsschicht hat eine endliche Breite. Man bezeichnet sie als Grenzschicht.
2. Man kann die Erkennbarkeit der Erscheinungen dadurch beträchtlich verbessern, daß man eine schmale Küvette mit planparallelen Wänden verwendet und die Vorgänge mit Hilfe des Tageslichtschreibprojektors mit Kippeinrichtung projiziert.
3. Die Grenzschicht zwischen ruhenden und bewegten Teilen kann man auch beim Herausziehen eines Messers aus Sirup beobachten.

4.1.4. Nachweis des Geschwindigkeitsgefälles bei einer Flüssigkeit innerhalb eines Rohres [SE]

1. Hohes Becherglas (Höhe etwa 20 cm)
2. Rohr mit Hahn (⌀ etwa 8 mm, Länge 25 cm)
3. gefärbtes Wasser

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.1.3. !

Versuch

Man taucht das Rohr mit geöffnetem Hahn lotrecht etwa 5 cm tief in ein mit Wasser gefülltes Becherglas. Man saugt so hoch Wasser in das Rohr, daß der

Flüssigkeitsspiegel etwa 5 mm über dem Hahn liegt. Daraufhin schließt man den Hahn und füllt den oberen Teil mit gefärbtem Wasser. Das Rohr wird lotrecht an einem Stativ befestigt. Öffnet man den Hahn langsam, dann gleichen sich die Flüssigkeitsoberflächen aus. Dabei dringt die Farbflüssigkeit in Form eines spitzen Kegels in den mit klarem Wasser gefüllten unteren Teil des Rohres ein (Abb. 4.1.4./1).

Bemerkung

Von der Wand des Rohres zur Mitte hin hat sich ein Reibungsgefälle ausgebildet. Die Flüssigkeit haftet an der Wand, in der Achse ist die Geschwindigkeit am größten. Die Trennungsfläche der gefärbten Flüssigkeit und des Wassers nimmt die Form eines Paraboloids an.

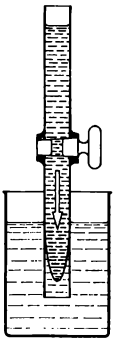


Abb. 4.1.4./1
Geschwindigkeitsprofil innerhalb eines Rohres

4.1.5. Geschwindigkeitsverteilung in einer laminaren Strömung [SE]

1. Gerät zum Nachweis der Geschwindigkeitsverteilung in einer laminaren Rohrströmung ®, dazu erforderliches Material:
   Glasrohr (∅5 cm, Länge 50 cm)
   Glasrohr (∅5 cm, Länge 50 cm) mit Verjüngung und Hahn
   Gummimuffe zur Verbindung der beiden Rohre (Länge etwa 6 cm)
   rechtwinklig gebogenes Trichterrohr (Länge etwa 50 cm)
   Glasrohr (∅3 mm, Länge 65 mm) mit 5 Kapillaröffnungen, an einem Ende zugeschmolzen
2. Glasschale oder Becherglas
3. mit Tinte gefärbtes Wasser

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 4.1.3.!
2. Die Geschwindigkeitsverteilung in der Rohrströmung kann an den Stromfäden nur kurze Zeit nach dem Öffnen des Hahnes beobachtet werden. Es ist deshalb ratsam, bereits vor der Ausführung des Experiments mit den Schülern herauszuarbeiten, welche Beobachtung zu erwarten ist. Außerdem sollte der Hahn nur wenig geöffnet werden, damit der Versuch nicht zu schnell abläuft.

Versuch

Man versieht die Gummimuffe mit zwei Bohrungen zur Aufnahme des Farbverteilungsrohres, stellt das Gerät nach Abb. 4.1.5./1 zusammen und befestigt es an

einem Stativ. Zum Versuch füllt man das Gerät mit Wasser und läßt es einige Zeit ruhig stehen. Danach füllt man den Trichter mit gefärbtem Wasser und öffnet den Hahn ein wenig. Dabei dringt das gefärbte Wasser mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus den Kapillaröffnungen. Die unterschiedliche Länge der Farbfäden gibt die Geschwindigkeitsverteilung an.

Bemerkung

Steht kein Glasrohr mit Verjüngung und Hahn zur Verfügung, so kann man auch ein Rohr verwenden, das man am unteren Ende mit einem durchbohrten Gummistopfen verschließt und als Abfluß ein Hahnrohr oder ein Glasrohr mit Schlauch und Quetschhahn durch die Bohrung steckt.

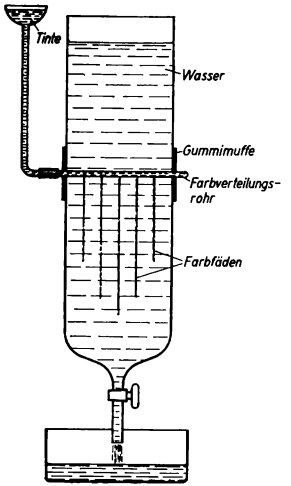


Abb. 4.1.5./1
Gerät zum Nachweis
der Geschwindigkeitsverteilung
in einer laminaren Rohrströmung

4.1.6. Messung der Geschwindigkeitsverteilung in bewegter Luft [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Papprohr (Länge 50 cm, ∅ zur Düse des Luftstromerzeugers passend)
3. Prandtlsches Staurohr (siehe V 4.4.8.)
4. Mikromanometer (vgl. V 4.4.8. und Abb. 2.2.13./1)
5. Meßstab

Methodischer Hinweis

Die bei diesem Experiment gewonnenen Erkenntnisse über die Geschwindigkeitsverteilung in einem Luftstrom sind für die Kenntnis der Versuchsbedingungen bei vielen Versuchen mit Luftstromerzeugern von Bedeutung. Häufig sind Ungenauigkeiten und Fehlmessungen darauf zurückzuführen, daß diese unterschiedlichen Geschwindigkeiten an verschiedenen Stellen in der Strömung nicht berücksichtigt wurden.

Versuch

Auf die Düse eines kleinen Luftstromerzeugers steckt man ein etwa 50 cm langes Papprohr. Ein Pradtlsches Staurohr wird so aufgestellt, daß die Geschwindigkeitsverteilung am Ende des Rohres längs eines Durchmessers gemessen werden kann. Zur Fixierung der Meßstelle dient ein außerhalb des Luftstromes an den Staurohr-

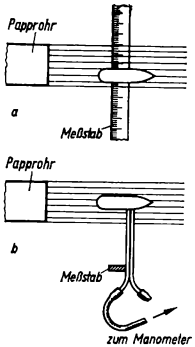


Abb. 4.1.6./1
Versuchsanordnung zum Messen der Geschwindigkeitsverteilung in einem Luftstrom
a) Grundriß, b) Aufriß

schaft gelegter Meßstab. Das Staurohr wird an ein Mikromanometer angeschlossen (Abb. 4.1.6./1). Die Drehzahl des Motors ist möglichst klein zu halten.
Aus den Manometeranzeigen werden nach V 4.4.9. die Geschwindigkeiten berechnet und die Ergebnisse grafisch dargestellt. Durch die Meßpunkte wird eine Kurve gezeichnet, die sich ihnen möglichst gut anpaßt. Sie erweist sich mit guter Annäherung als Parabel.

Bemerkungen

1. Man kann die Auswertung des Experiments vereinfachen, indem man auf die Errechnung der Geschwindigkeiten verzichtet und die Manometeranzeige grafisch darstellt.
2. Der Versuch kann dahingehend erweitert werden, daß man die Messungen in größeren Abständen von der Rohröffnung wiederholt. Außer der Abnahme der Geschwindigkeit stellt man auch eine Divergenz des Luftstromes fest.

4.1.7. Parabolische Form einer in Wasser aufsteigenden Luftblase

1. Glasrohr (∅ etwa 20 mm, Länge etwa 25 cm) 2. Glastrog

Methodischer Hinweis

Die bei diesem Experiment zu beobachtende Erscheinung hat viel Ähnlichkeit mit den Beobachtungen der Versuche 4.1.3. bis 4.1.6., die physikalischen Zusammenhänge sind hier jedoch etwas komplizierter. Auch hier bildet sich beim Beginn der Bewegung infolge der unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten eine parabolische Form der Luftblase heraus, aber bereits nach einem Weg von wenigen Millimetern hat sie ihre endgültige Form erreicht und bewegt sich gleichförmig weiter. Man kann dieses Experiment deshalb auch zur Veranschaulichung einer gleichförmigen Bewegung benutzen (vgl. MH zu V 3.1.5. !).

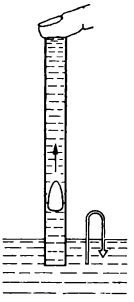


Abb. 4.1.7./1
Form einer aufsteigenden Luftblase

Versuch

In einen mit Wasser gefüllten Glastrog legt man ein Glasrohr. Unter Wasser verschließt man die eine Öffnung durch den Daumen oder durch die Handfläche. Dann richtet man das Rohr lotrecht so auf, daß die untere Öffnung innerhalb des Wassers liegt. Das Rohr ist vollständig mit Wasser gefüllt. Hebt man seine untere Öffnung für einen kurzen Augenblick aus dem Wasser heraus, so steigt eine Luftblase langsam empor (Abb. 4.1.7./1).
Ihre Kuppe hat die Form eines Paraboloids.

4.2. Turbulente Strömungen

4.2.1. Turbulenz am aufsteigenden Rauch

1. Räucherkerze

Methodischer Hinweis

Man kann an diesem Experiment die Begriffe *laminar* und *turbulent* und die Ursachen für den Qualitätsumschlag erläutern.

Versuch

Man entzündet eine Räucherkerze. In ruhiger Luft steigt ihr Rauch zunächst in einem schmalen, glatten Rauchfaden lotrecht empor. In einer Höhe von etwa 10 cm bis 20 cm beginnt er unruhig zu werden, verdreht und verwirbelt sich, er wird *turbulent*. Klatscht man in die Hände, so beginnt die Wirbelbildung für kurze Zeit weiter unten.
Das Aufsteigen der Rauchgase ist auf ihre höhere Temperatur und damit geringere Dichte gegenüber der umgebenden Luft zurückzuführen. Dicht über der Räucherkerze ist die Geschwindigkeit der aufsteigenden Gase nahezu gleich, die Strömung ist *laminar*. Mit der Ausbildung eines Geschwindigkeitsgefälles im Strömungsquerschnitt (vgl. V 4.1.6.) wächst die Neigung zur Turbulenz, bis schließlich die laminare Strömung in eine turbulente umschlägt.

Bemerkungen

1. Da der aufsteigende Rauchfaden gegen Lufterschütterungen sehr empfindlich ist, muß man ihn vor jeder störenden Luftbewegung schützen. Es empfiehlt sich daher, mit den Händen unter dem Tisch zu klatschen, damit es wirklich nur der Schall ist, der die Verwirbelung hervorruft.
2. Es sei darauf hingewiesen, daß man in der Akustik die Schallempfindlichkeit sensitiver Flammen anwendet, um die Schallübertragung durch Luftwellen nachzuweisen.

4.2.2. Laminarität und Turbulenz eines Flüssigkeitsfadens — Die Bestimmung der Reynoldsschen Zahl [SE]

1. Glasrohr (Ø4 cm, Länge 30 cm), an einem Ende verjüngt
2. Meßpipette mit 0,1 ml-Teilung (10 ml)
3. Schlauchstück
4. Quetschhahn
5. Becherglas
6. Aräometer
7. Stoppuhr
8. Meßschieber
9. wasserlöslicher Farbstoff (Tinte)

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment zeigt, daß der Übergang von der *laminaren* zur *turbulenten* Strömung gesetzmäßig erfolgt. Die Behauptung ist bestätigt, wenn der experimentell bestimmte Wert für *Re* in der Größenordnung dem in der Literatur für diese Versuchsanordnung angegebenen Richtwert entspricht.
In der Auswertung des Versuches kann man auf die Bedeutung der Reynoldsschen Zahl eingehen. Für strömende Flüssigkeiten und Gase gilt:

Bei geometrisch ähnlichen Widerstandskörpern sind Strömungen als einander ähnlich anzusehen, wenn sie zu gleichen Reynoldsschen Zahlen gehören.

Das heißt, man kann an einem verkleinerten, geometrisch ähnlichen Modell eines Schiffes, Flugzeuges oder Kraftfahrzeuges die Strömungsverhältnisse untersuchen. Sie entsprechen denen am Original, wenn dort die gleiche Reynoldssche Zahl gilt wie beim Experiment mit dem Modell. Diese Übereinstimmung erreicht man, wenn man z. B. die Dichte des strömenden Mediums, seine Zähigkeit (durch Veränderung der Temperatur) oder die Strömungsgeschwindigkeit entsprechend variiert. So wird erkennbar, welche Bedeutung der Reynoldsschen Zahl in der Forschung des Schiffs-, Flugzeug- und Kraftfahrzeugbaues zukommt.

Versuch

Zuerst bestimmt man mit einem Meßschieber möglichst genau die lichte Weite des Ausflußrohres der Meßpipette. Man färbt Wasser und bestimmt mit einem Aräometer die Dichte der Farblösung.
Über das verjüngte Ende eines etwa 4 cm weiten Glasrohres schiebt man ein Schlauchstück und verschließt es durch einen Quetschhahn. Das Rohr wird lotrecht an einem Stativ befestigt und ein Becherglas daruntergestellt. Man füllt das Rohr mit Wasser. In eine Pipette saugt man etwa 10 ml gefärbtes Wasser und befestigt sie mit einer weiteren Klemme so über dem Rohr, daß der Farbspiegel mit der Wasseroberfläche in einer Ebene liegt; es kann keine Farbflüssigkeit ausfließen.

Erst wenn man den Quetschhahn ein wenig öffnet, läuft das gefärbte Wasser in Form eines laminaren Strahles in die Flüssigkeit ein (Abb. 4.2.2./1). Öffnet man den Hahn etwas mehr, so verwirbelt der Faden, bis er bei weiterer Öffnung des Hahnes ganz turbulent wird.

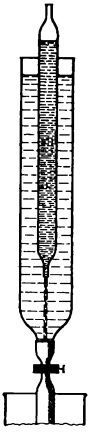


Abb. 4.2.2./1
Aufbau zum Reynoldsschen Versuch

Bestimmung der Reynoldsschen Zahl

Der Versuch kann zur angenäherten Bestimmung der Reynoldsschen Zahl nach der Gleichung

$$Re = \frac{v \cdot \varrho \cdot d}{\eta}$$

quantitativ ausgewertet werden.
Hierin ist d der Durchmesser des Ausflußrohres, v die Strömungsgeschwindigkeit, ϱ die Dichte des strömenden Mediums und η seine Zähigkeit. Dabei ist durch vorsichtiges Öffnen des Quetschhahnes genau die Stellung zu suchen, bei der der ausfließende Farbstrahl nicht mehr ganz glatt verläuft. Mit der Stoppuhr wird die Zeit Δt bestimmt, in der ein bestimmtes Volumen ΔV der Farbflüssigkeit ausfließt. Aus diesen Meßwerten und dem Inhalt der Querschnittsfläche des Ausflußrohres der Pipette kann man die Ausflußgeschwindigkeit der Farbflüssigkeit berechnen.
Bezeichnet man den Flächeninhalt des Querschnitts des Ausflußrohres mit A und die Länge des laminaren Strahles der Farbflüssigkeit mit Δs, so gilt:

$$\Delta V = A \cdot \Delta s$$

oder

$$\Delta s = \frac{\Delta V}{A}.$$

Somit ergibt sich für die Ausströmungsgeschwindigkeit:

$$v = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}.$$

Bei einem Versuch wurden folgende Werte ermittelt:

Durchmesser des Ausflußrohres	$d = 0{,}18$ cm
Volumen der ausgeflossenen Farbflüssigkeit	$\Delta V = 3\ \mathrm{cm}^3$
Zeit	$\Delta t = 1$ s

Die Austrittsgeschwindigkeit betrug somit

$$v = \frac{4 \cdot 3\ \mathrm{cm}^3}{(0{,}18\ \mathrm{cm})^2 \cdot \pi \cdot 1\ \mathrm{s}} = 118\ \mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}^{-1}.$$

Mit Hilfe eines Aräometers wurde die Dichte der Farbflüssigkeit mit großer Annäherung zu $1\ g \cdot cm^{-3}$ bestimmt. Die Zähigkeit des Wassers wurde einer Tabelle entnommen. Bei einer Temperatur von 18 °C ist sie $0{,}0105\ g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$.
Die Berechnung der Reynoldsschen Zahl ergab

$$Re = \frac{v \cdot \varrho \cdot d}{\eta}$$

$$Re \approx \frac{118\ cm \cdot s^{-1} \cdot 1\ g \cdot cm^{-3} \cdot 0{,}18\ cm}{0{,}0105\ g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}}$$

$$Re \approx 2023\,.$$

Dieser Wert zeigt mit guter Annäherung eine größenordnungsmäßige Übereinstimmung mit dem Wert 2320, der für diese Versuchsanordnung als Richtwert der Reynoldsschen Zahl gilt. Die Abweichung der Zahlenwerte voneinander ist u. a. dadurch zu erklären, daß bei der Berechnung von v die Randwirkung und die Strahlkontraktion nicht berücksichtigt wurden.

4.2.3. Untersuchung des Luftstroms eines Luftstromerzeugers mit einem Drallprüfer

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Drallprüfer ⑧, dazu erforderliches Material:
   Pappe (25 mm × 40 mm)
   Glasrohr (⌀2 mm, Länge 30 mm)
   steifer Draht, 2 Glasperlen
3. Fadensonde

Methodischer Hinweis

Bei den meisten Experimenten mit Luftstromerzeugern ist eine möglichst laminare und drallfreie Strömung Voraussetzung zum Gelingen der Experimente. Hierbei dient der Drallprüfer als Indikator. Er ist außerdem auch zum Nachweis von Wirbelzöpfen, z. B. von Tragflügelrandwirbeln (vgl. V 5.1.7.), geeignet. Die Untersuchung eines Luftstromes mit einem Drallprüfer wird in der Regel nur als Vorversuch zu anderen Experimenten der Strömungslehre ausgeführt, z. B. zu V 4.2.4., V 4.2.8. und V 4.2.9.

Versuch

Man stellt einen Drallprüfer auf einfache Weise aus Pappe und einer dünnen Glasröhre her. Ein rechteckiges Stück Pappe von etwa 25 mm × 40 mm wird nach Abb. 4.2.3./1 geschlitzt, über ein etwa 30 mm langes Glasrohr von etwa 2 mm lichter Weite geschoben und auf einen rechtwinklig gebogenen Drahtbügel gesteckt. Zur Begrenzung der Verschiebbarkeit und zur Verminderung der Reibung schiebt man zwei Glasperlen über den Drahtbügel und kittet sie an ihm fest.
Von einem Luftstromerzeuger entfernt man die Düse und die Leitbleche mit dem Leitkörper. Man hält den Drallprüfer in den Luftstrom, so daß seine Achse in die Strahlrichtung zeigt (Abb. 4.2.3./2). Die rasche Rotation der Platte beweist, daß der Luftstrom einen starken Drall hat.

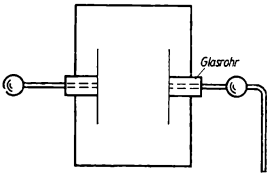


Abb. 4.2.3./1
Selbstgefertigter Drallprüfer

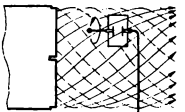


Abb. 4.2.3./2
Drallprüfer im Luftstrom, Düse und Leitbleche des Luftstromerzeugers sind entfernt

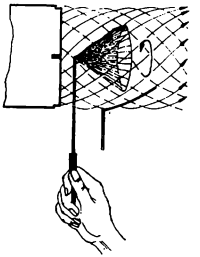


Abb. 4.2.3./3
Nachweis des Dralls mit Hilfe einer Fadensonde

Statt des Drallprüfers wird eine Fadensonde an verschiedenen Stellen des Strömungsquerschnitts gebracht. In den Randzonen stellt sich der Faden in Richtung einer Schraubenlinie ein und zeigt somit, daß neben der Komponente in der Strahlrichtung eine Umfangskomponente besteht, die Strömung demnach einen Drall besitzt (Abb. 4.2.3./3). In der Mitte des Luftstroms nimmt der Faden keine bestimmte Richtung an, sondern rotiert infolge des Dralls im Luftstrom, wobei er einen Kegelmantel beschreibt.
Die Wirkungsweise der Leitbleche erkennt man, wenn man sie wieder in den Luftstromerzeuger einsetzt. Die Platte des Drallprüfers rotiert dann bedeutend langsamer oder steht sogar still, ein Zeichen dafür, daß die Leitbleche den Drall zum größten Teil bzw. ganz beseitigen. Das kann auch mit der Fadensonde nachgewiesen werden. Durch Aufsetzen der Düse wird der Luftstrom in dieser Hinsicht kaum beeinflußt.

Bemerkungen

1. Mit einem Drallprüfer oder einer Fadensonde kann man nachweisen, daß der Luftstrom einer Luftdusche drallfrei ist, wenn in ihr die Luft durch ein Flügelrad beschleunigt wird.
2. Auch eine Fadensonde kann man selbst herstellen. Dazu befestigt man einen möglichst weichen Wollfaden an einem Draht.

4.2.4. Veranschaulichung des Stromlinienverlaufs um verschiedene Widerstandskörper mit Hilfe einer Fadensonde

1. Luftdusche oder kleiner Luftstromerzeuger
2. verschiedene Widerstandskörper an Stielen
3. Einfadensonde
4. Mehrfadensonde

Methodischer Hinweis

Bei Versuchen zur Strömungslehre ist es oftmals erforderlich, den Verlauf der Stromlinien zu veranschaulichen. Als einfaches Hilfsmittel hierfür können Fadensonden verwandt werden. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß die Fadensonden nur in laminaren Strömungen angenähert den Verlauf der Stromlinien veranschaulichen. In turbulenten Strömungen zeigen sie durch unregelmäßige Bewegungen die Verwirbelung an.

Versuch 1

Eine Luftdusche wird an einem Stativ so befestigt, daß ihr Strahlrohr horizontal steht. Bringt man eine Einfadensonde in ihren Luftstrom, so wird ihr Faden in Richtung des Luftstroms gestrafft und zeigt den Verlauf einer Stromlinie an (Abb. 4.2.4./1). Die gleiche Erscheinung beobachtet man auch, wenn man die Sonde innerhalb des Luftstroms quer zu ihm beliebig verschiebt. Man erkennt, daß die Stromfäden parallel verlaufen, und kann daraus auf eine annähernd laminare Strömung schließen.

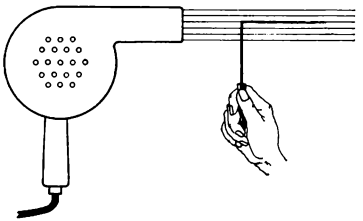


Abb. 4.2.4./1
Einfadensonde im Luftstrom einer Luftdusche

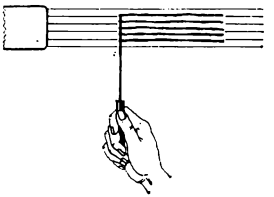


Abb. 4.2.4./2
Mehrfadensonde
im Luftstrom einer Luftdusche

Zu demselben Ergebnis kommt man, wenn man den Versuch mit einer Mehrfadensonde ausführt. Die Fäden verlaufen innerhalb des Luftstroms parallel (Abb. 4.2.4./2).

Versuch 2

Eine kreisförmige Platte wird mit ihrem Stiel an einem Stativ befestigt und senkrecht zu den Stromlinien etwa 150 mm vor der Strahlrohröffnung in den Luftstrom gebracht. Nähert man der Platte von vorn die Einfadensonde, so weicht diese bereits vor dem Hindernis nach der Seite aus. Hinter der Platte führt das Fadenende in Richtung auf die Platte unregelmäßige Bewegungen aus und zeigt damit die Verwirbelung in diesem Gebiet an. Durch Verschieben der Sonde kann die Form des Wirbelgebietes ermittelt werden (Abb. 4.2.4./3). Die Reichweite der Wirbel wird durch eine Mehrfadensonde angezeigt. Zu diesem Zwecke hält man die Sonde so hinter die Kreisplatte, daß der Stab, an dem die Fäden befestigt sind, entgegen der Richtung des Luftstroms auf die Platte zeigt. Ein Teil der Fäden führt dann auf die Platte zu wirbelnde Bewegungen aus, während man an

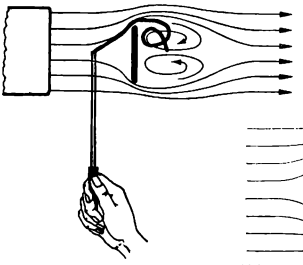


Abb. 4.2.4./3
Untersuchung des Strömungsverlaufs an einer Platte mit der Einfadensonde

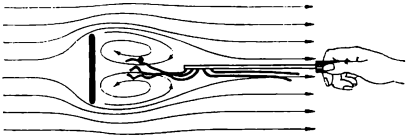


Abb. 4.2.4./4
Mehrfadensonde im Luftstrom hinter einer Kreisscheibe

den weiter entfernten Fäden erkennen kann, daß sie außerhalb des Wirbelgebietes in einer laminaren Strömung liegen (Abb. 4.2.4./4). Auf ähnliche Weise werden die Strömungsverhältnisse an anderen Widerstandskörpern, etwa einer Halbkugel, einer Vollkugel usw., untersucht. Beim Verwenden des Stromlinienkörpers zeigen die Fäden durch ihre ruhige Lage im Luftstrom, daß keine Wirbel entstehen.

Bemerkungen

1. An Stelle der Luftdusche kann auch ein anderer Luftstromerzeuger benutzt werden, doch ist vorher zu untersuchen, ob seine Strömung drallfrei ist (siehe V 4.2.3.).
2. Die Fadensonden können leicht selbst hergestellt werden. Als Fäden eignen sich besonders gut weiche Wollfäden. Sie werden an einen Draht geknüpft und außerdem mit Klebstoff befestigt.

4.2.5. Strömungen an verschiedenen Widerstandskörpern — Untersuchung mit dem Nebelströmungsgerät

1. Nebelströmungsgerät mit Zubehör
2. Profilmodelle verschiedener Widerstandskörper

Methodische Hinweise

1. Experimente mit dem Nebelströmungsgerät sind besonders anschaulich. Da man die Strömungsgeschwindigkeit in weiten Grenzen beliebig ändern kann, ist es möglich, an verschiedenen Widerstandskörpern das Umschlagen von der laminaren in die turbulente Strömung zu zeigen.
2. Um den Schülern einen Eindruck von der Strömungsgeschwindigkeit zu geben, ist es zweckmäßig, die Nebelzufuhr mit der Absperrklappe (Abb. 4.0.2./1) mehrfach kurzzeitig zu unterbrechen, so daß kurze Stromfädenstücke entstehen, die durch die Kammer ziehen und unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Stellen des Strömungsfeldes erkennen lassen.

Versuch

Man erzeugt zunächst Nebelfäden, ohne einen Widerstandskörper in die Kammer einzusetzen. Es entsteht eine laminare Strömung. Dann untersucht man die Strömungen um folgende Profilmodelle von Widerstandskörpern: Platte, Kugel, Halbkugel, hohle Halbkugel, Kegel, Stromlinienkörper (Abb. 4.2.5./1). Man beobachtet die Strömungen bei verschiedenen Stellungen der Körper. Ein Vergleich der



Abb. 4.2.5./1
Profile der Einsatzkörper
für das Nebelströmungsgerät

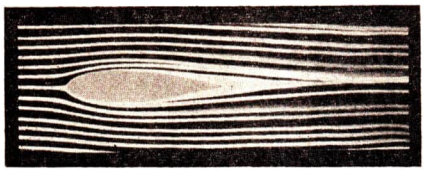


Abb. 4.2.5./2
Wirbelfreie Strömung
um einen Stromlinienkörper



Abb. 4.2.5./3
Wirbelstraße
hinter einer Platte

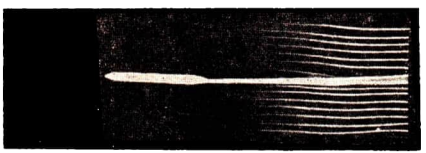


Abb. 4.2.5./4
Nachweis der Grenzschicht
an einer Platte

Wirbelgebiete der einzelnen Körper läßt erkennen, daß die Stärke der Verwirbelung von der Körperform abhängt. Am geringsten ist die Wirbelbildung bei dem am stumpfen Ende angeblasenen Stromlinienkörper (Abb. 4.2.5./2). Bei geringer Strömungsgeschwindigkeit kann man hinter einer quer zur Strömung gestellten Platte gut die abwechselnde Ablösung der Wirbel am oberen und unteren Ende sowie die Entstehung einer Wirbelstraße beobachten (Abb. 4.2.5./3). An der parallel zur Stromrichtung stehenden Platte läßt sich die Herabsetzung der Geschwindigkeit infolge Reibung in der Grenzschicht nachweisen, indem man die Nebelzufuhr plötzlich unterbricht. Der Stromfaden in der Grenzschicht haftet noch am Körper, während die übrigen bereits vorausgeeilt sind (Abb. 4.2.5./4).

4.2.6. Strömung an einem Fallschirm mit Scheitelöffnung

1. Nebelströmungsgerät mit Zubehör
2. Profilmodell einer Hohlhalbkugel
3. Profilmodell einer Hohlhalbkugel mit zentraler Öffnung

Methodischer Hinweis

Der Fallschirm wird als Rettungsgerät im Flugwesen und zum Abwerfen von Lasten, z. B. von Lebensmitteln, Medikamenten, Kleidung und Decken, in Katastrophengebieten u. a. m., verwendet. Besondere Bedeutung kommt ihm beim Abbremsen der Fallbewegung bei der Landung von Raumflugkörpern zu.
In den letzten Jahrzehnten haben sich Fallschirme mit quadratischer Grundfläche durchgesetzt, weil man ihren Fall in Richtung und Geschwindigkeit besser beeinflussen (steuern) kann. Bei dieser Form ist eine Scheitelöffnung nicht erforderlich. Die Strömungsverhältnisse an solch einem Fallschirm können mit einem Flachprofil nicht gezeigt werden.

Versuch

In die Kammer wird das Profil einer Hohlhalbkugel mit der Höhlung gegen den Luftstrom eingesetzt. Hinter dem Versuchskörper ist eine besonders starke Turbulenz zu beobachten (Abb. 4.2.6./1a). Ein Fallschirm dieser Form würde unter dem Einfluß der sich ablösenden sehr kräftigen Wirbel stark pendeln. Zur Beruhigung der Fallbewegung versieht man ihn daher mit einer Öffnung. Die Strömung an

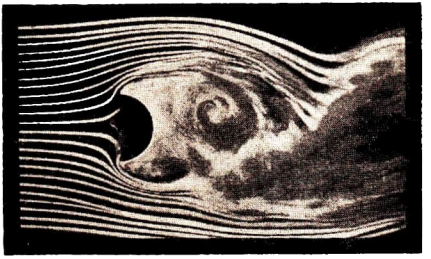
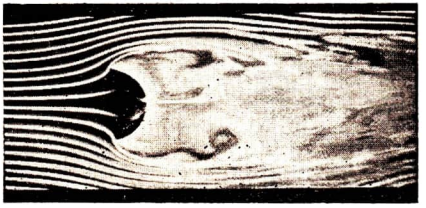


Abb. 4.2.6./1
Strömung um einen Fallschirm mit Scheitelöffnung

a) Halbkugel ohne Öffnung



b) Halbkugel mit Öffnung

einem solchen Fallschirm kann im Nebelströmungsgerät durch das mit einem zentralen Loch versehene Profil einer Hohlhalbkugel veranschaulicht werden (Abb. 4.2.6./1b). Man erkennt deutlich, daß die Strömung durch diese Veränderung beruhigt wird.

4.2.7. Strömung an verschiedenen Formen von Kraftfahrzeugen

1. Nebelströmungsgerät mit Zubehör
2. Profilmodelle verschiedener Kraftfahrzeuge

Methodischer Hinweis

Die Strömungsverhältnisse entsprechen bei diesem Experiment nur teilweise den tatsächlichen, denn die Stromlinienbilder stellen nur einen vertikalen Schnitt durch das Strömungsfeld dar, das außerdem noch durch die Vorder- und Rückwand der

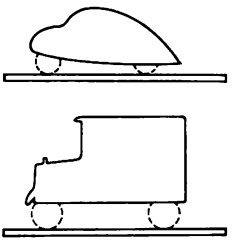


Abb. 4.2.7./1
Versuchskörper zur Veranschaulichung der Strömung an Kraftfahrzeugen

Kammer beeinflußt wird. Es ist deshalb zweckmäßig, bei Kraftwagenmodellen die Räder wegzulassen, damit auch der Anteil der Strömung unter dem Fahrzeug wirksam dargestellt wird. Das Experiment zeigt, mit welchen Methoden die zweckmäßigsten Formen von Kraftfahrzeugkarosserien entwickelt werden können.

Versuch

In die Kammer des Nebelströmungsgerätes setzt man horizontal eine Leiste zur Veranschaulichung der Fahrbahn ein. In einiger Entfernung darüber, die etwa der Achshöhe des Modells entspricht, wird ein plattenförmiger Einsatz (Abb. 4.2.7./1) zur Darstellung eines Kraftfahrzeuges angebracht. Das Stromlinienbild läßt erkennen, an welchen Stellen Wirbel entstehen. Ein Vergleich der Wirbelgebiete an den verschiedenen Kraftfahrzeugmodellen zeigt, daß die modernen Formen wesentlich günstigere aerodynamische Eigenschaften haben als ältere Typen.

Bemerkung

Soweit die Modelle nicht vorhanden sind, kann man sie behelfsmäßig aus Pappstreifen von der Breite der Kammertiefe zurechtbiegen und verkleben.

4.2.8. Nachweis der Wirbelbildung hinter einer Platte mit Hilfe einer Luftschraubensonde

1. Luftstromerzeuger
2. Luftschraubensonde
3. kreisförmige Scheibe (⌀ etwa 100 mm) mit Stiel

Methodischer Hinweis

Strenggenommen wird mit der Luftschraubensonde nicht die Wirbelbildung selbst, sondern die Umkehrung der Strömungsrichtung hinter der Platte nachgewiesen. Aus diesem Grunde sollte das Experiment durch eine Tafelskizze nach Art der Abbildung 4.2.8./2 ergänzt werden.

Versuch

Ein Luftstromerzeuger wird so aufgestellt, daß sein Luftstrom waagerecht gerichtet ist. Wenn man eine Luftschraubensonde in die Strömung bringt, so wird die Luftschraube in Rotation versetzt und auf dem Haltestiel zurückgeschoben (Abb. 4.2.8./1). Hält man eine kreisförmige Scheibe dicht vor die Sonde, so bewegt sich die Luftschraube sofort mit großer Geschwindigkeit auf die Scheibe zu, wobei sie

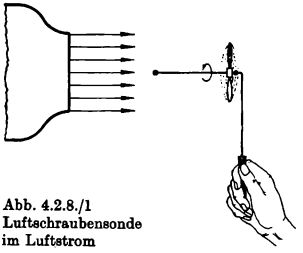


Abb. 4.2.8./1
Luftschraubensonde im Luftstrom

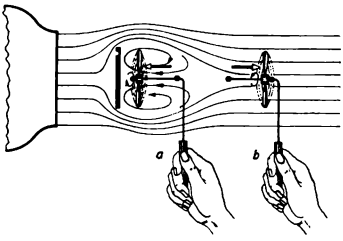


Abb. 4.2.8./2
Luftschraubensonde
a) im Wirbelgebiet hinter einer Platte,
b) außerhalb des Wirbelgebietes

ihre Drehrichtung umkehrt. Man erkennt daran, daß hinter der Scheibe eine Rückströmung eintritt (Abb. 4.2.8./2a). Entfernt man die Luftschraubensonde allmählich von der Scheibe, so verlangsamt sich die Drehbewegung der Luftschraube bis zum Stillstand. Sie wird wieder vom Luftstrom erfaßt und auf dem Haltestiel zurückgeschoben, wobei sie gleichzeitig wie bei Beginn des Versuches zu rotieren beginnt (Abb. 4.2.8./2b). Sie befindet sich dann wieder außerhalb des Wirbelgebietes.

4.2.9. Wirbelbildung hinter einer Platte — Nachweis mit Hilfe brennender Kerzen

1. Luftdusche oder kleiner Luftstromerzeuger
2. 10 oder mehr Kerzen
3. Glasplatte (10 cm × 25 cm)

Methodischer Hinweis

Wurde der Strömungsverlauf an einer Platte bereits nach V 4.2.4. oder V 4.2.5. demonstriert, dann kann dieses Experiment zur Wiederholung und Leistungskontrolle dienen. Es können daran das Beobachten, das Erkennen und Erläutern physikalischer Zusammenhänge geübt bzw. überprüft werden.

Versuchsanordnung

Eine Luftdusche oder ein anderer Luftstromerzeuger wird an einem Stativ so befestigt, daß der Luftstrom waagerecht dicht über die Tischplatte dahinstreicht. Ungefähr 30 cm vom Strahlrohr entfernt befestigt man als Widerstandskörper eine Glasplatte an zwei Stativen von oben her so, daß die Stative das Wirbelfeld nicht

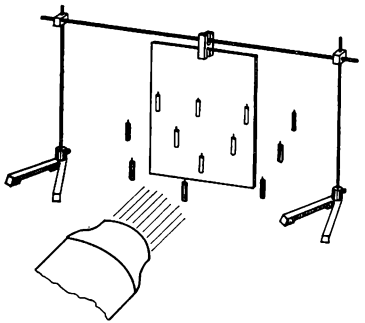


Abb. 4.2.9./1
Nachweis der Wirbelbildung mit Kerzenflammen

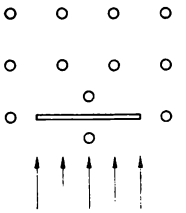


Abb. 4.2.9./2
Aufstellung der Kerzen

stören (Abb. 4.2.9./1). Die Platte steht dabei auf dem Tisch. Man stellt die Kerzen etwa nach der Art der Abb. 4.2.9./2 auf. Etwa 3 cm hohe Kerzenreste eignen sich für diesen Versuch am besten.

Versuch

Bei eingeschaltetem Luftstromerzeuger erkennt man an der Stellung der verschieden gerichteten Flammen den Verlauf der Stromlinien hinter der Platte. Mit einer weiteren brennenden Kerze kann man das Strömungsfeld auch an beliebigen anderen Stellen untersuchen.

Bemerkungen

1. An Stelle der Kerzen kann man auch kleine Papierfähnchen oder Wollfäden verwenden, die man auf Nägel oder lange Stecknadeln steckt bzw. mit einem Ende an ihnen befestigt.
2. Können die Schüler den Vorgang schlecht übersehen, so bringe man über der Versuchsanordnung einen geneigten Spiegel an.

4.2.10. Umströmung einer schräg zur Strömung gestellten Platte

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. steife Pappe
3. dünne Schnur

Methodischer Hinweis

Obwohl den Schülern diese Erscheinung von fallendem Herbstlaub her bekannt ist, wirkt auf sie das Ergebnis dieses Experiments gewöhnlich überraschend.
Die Ursache für dieses Verhalten der Platte ist die stärkere Wirbelbildung hinter der weiter vorstehenden Kante der Platte. Eine ähnliche Erscheinung kann auch an einem Tragflügel bei negativem Anstellwinkel auftreten (vgl. V 5.1.6.).

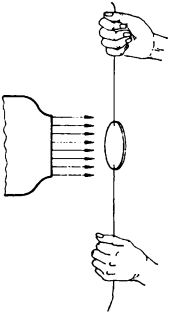


Abb. 4.2.10./1
Schräg zur Stromrichtung stehende Platte

Versuch

Man schneidet aus fester Pappe eine Kreisplatte mit einem Durchmesser von 5 cm, an der man an zwei gegenüberliegenden Randstellen Fäden befestigt. Die Pappe wird von oben und unten durch die Fäden gespannt und so in den Luftstrom gehalten, daß sie schräg zur Anblaserichtung steht (Abb. 4.2.10./1). Schaltet man den Luftstromerzeuger ein, so dreht sich die Pappe sofort senkrecht zur Richtung der Strömung.

Bemerkungen

1. Das Stau- und das Soggebiet vor und hinter einer schräggestellten Platte liegen nicht symmetrisch zur Platte, sondern sind gegeneinander verschoben. Durch die Asymmetrie kommt ein Drehmoment zustande, welches die Platte senkrecht zur Richtung der Strömung stellt.
2. Diese Erscheinung kann auch in einem Freihandversuch gezeigt werden. Man läßt ein Blatt Papier mit nach unten gerichtetem Rand fallen, es dreht sich um 90° und flattert in dieser Lage zu Boden.

4.2.11. Veranschaulichung der Stromlinien mit Hilfe einer Flammensonde

1. Luftdusche oder kleiner Luftstromerzeuger
2. verschiedene Widerstandskörper an Stielen
3. rechtwinklig gebogenes Glasrohr, dessen kurzer Schenkel zu einer Spitze ausgezogen ist, oder Lötrohr
4. Gasschlauch
5. punktförmige Lichtquelle (Bogenlampe oder Physikleuchte ohne Kondensor)
6. Transparentschirm oder weiße Projektionsfläche

Methodischer Hinweis

Für den Einsatz der Flammensonde gelten ähnliche Hinweise wie für die Fadensonde (vgl. MH V 4.2.4.!). Nur bei laminaren Strömungen sind in der Schattenprojektion die Stromlinien als Schlieren deutlich zu sehen. Bei Verwirbelungen sind die Schlieren in der Projektion verwaschen.

Versuch

Eine Luftdusche wird an einem Stativ so befestigt, daß ihr Luftstrom vertikal nach oben gerichtet ist. Etwa 15 cm über der Strahlrohröffnung werden die Widerstandskörper nacheinander an einem Stativ in den Luftstrom gehalten. Mit Hilfe einer punktförmigen Lichtquelle, die etwa einen halben Meter vor dem Körper aufgestellt ist, wird sein Schatten auf einen Bildschirm in etwa 1 m Entfernung geworfen.
Die Versuchsdurchführung entspricht der in V 4.2.4. beschriebenen. An Stelle der Einfadensonde wird eine Flammensonde benutzt (Abb. 4.2.11./1). Als solche dient eine lange, sehr dünne Stadtgasflamme. Man erzeugt sie dadurch, daß man ein spitz ausgezogenes, rechtwinklig gebogenes Glasrohr oder ein Lötrohr ohne Mundstück an eine Stadtgasleitung anschließt und das ausströmende Gas entzündet. Die Stromlinien werden durch Schlieren in der Projektion veranschaulicht.

Bemerkungen

1. In diesem Versuch muß der Luftstrom deshalb vertikal nach oben gerichtet sein, weil die heißen Verbrennungsgase aufsteigen und einen horizontalen Luftstrom beeinflussen würden.
2. Als punktförmige Lichtquelle eignet sich am besten eine Bogenlampe. In diesem Falle kann der Versuch auch ohne völlige Verdunkelung bei gedämpftem Tageslicht ausgeführt werden.

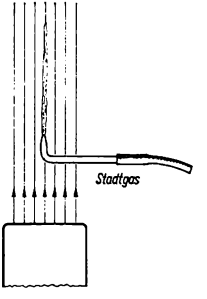


Abb. 4.2.11./1
Flammensonde im Luftstrom

4.2.12. Erzeugung ringförmig geschlossener Wirbel in der Luft

1. Leere Konservenbüchse oder Pappbüchse
2. Gummihaut
3. Bindfaden
4. Kerze

Methodischer Hinweis

Das Experiment zeigt, daß Wirbel relativ lange bestehen können und in der Lage sind, Energie zu übertragen. Dies trifft auch für Wirbelzöpfe (Tragflügelrandwirbel) und Wirbelstraßen (hinter Hindernissen in Flüssen u. a. m.) zu. Außerdem ist der Versuch dazu geeignet nachzuweisen, daß die Luftwirbel oder Luftverschiebungen nicht die Ursache für die Ausbreitung des Schalles sein können (vgl. 10. Teil, V 1.3.7.). Während sich der Schall mit einer Geschwindigkeit von etwa 340 $m \cdot s^{-1}$ ausbreitet, ist die Geschwindigkeit der Luftwirbel im Experiment nur etwa $1 m \cdot s^{-1}$.

Versuch

Von einem zylindrischen Hohlkörper, zum Beispiel von einer großen Konservenbüchse oder einer Pappbüchse, wird der Deckel entfernt und die Öffnung mit einer Gummihaut überspannt. In den gegenüberliegenden Boden schneidet man ein kreisförmiges Loch mit einem Durchmesser von etwa 2 cm bis 4 cm. Man bläst etwas Tabakrauch in das Innere. Klopft man gegen die Gummibespannung, so entsteht ein Luftstoß. An den Kanten der Öffnung bildet sich ein ringförmig geschlossener

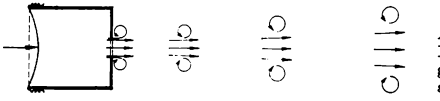


Abb. 4.2.12./1
Entstehung ringförmig geschlossener Wirbel an einer Ringblende

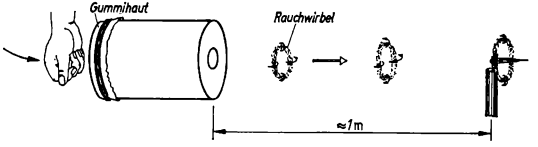


Abb. 4.2.12./2
Auslöschen einer Kerzenflamme durch einen Wirbelring

Rauchwirbel, der sich ablöst und mit großer Geschwindigkeit senkrecht zu seiner Ebene fortfliegt (Abb. 4.2.12./1). Die Bewegung im Wirbel ist sehr kräftig, so daß sie längere Zeit hindurch bestehenbleibt und in einer Entfernung von etwa einem Meter eine Kerzenflamme auszulöschen vermag (Abb. 4.2.12./2).

Bemerkung

An Stelle der Gummihaut kann auch Zellglasfolie oder Pergamentpapier als Bespannung dienen.

4.2.13. Projektion von Wirbelringen im Wasser

1. Glasschale oder würfelförmige Küvette
2. Tropfpipette
3. Farbflüssigkeit (Tinte)
4. Tageslichtschreibprojektor
5. Bildschirm

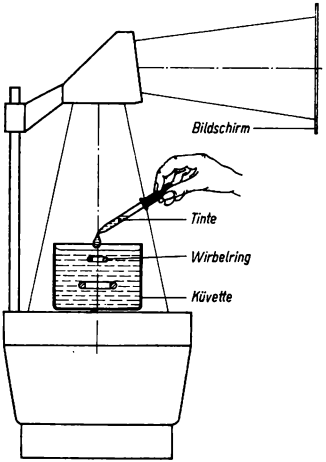


Abb. 4.2.13./1
Versuchsanordnung zur Projektion von Wirbelringen im Wasser

Versuch

Wirbelringe lassen sich im Wasser mit Hilfe einer einfachen Versuchsanordnung erzeugen; sie haben im allgemeinen einen Durchmesser von einigen Millimetern bis zu wenigen Zentimetern. Es ist deshalb zweckmäßig, sie in der Projektion zu beobachten. Auf die Arbeitsfläche des Tageslichtschreibprojektors stellt man eine mit Wasser gefüllte Kristallisierschale oder eine Küvette. Der Projektionskopf wird so eingestellt, daß die in der Mitte der Schale befindlichen Objekte auf einem etwa 2 m entfernten Bildschirm deutlich abgebildet werden (Abb. 4.2.13./1).
Aus einer kleinen Tropfpipette läßt man aus einer Höhe von etwa 1 mm einen Tropfen Farbflüssigkeit auf die Mitte der Wasseroberfläche in der Küvette fallen. Es bildet sich ein kleiner, ringförmig geschlossener Wirbel im Wasser, der in der Projektion infolge seiner Färbung gut sichtbar ist. Der Ring sinkt ab und vergrößert sich dabei allmählich. Er ist auf dem Boden der Küvette noch einige Zeit zu sehen, wobei sein Durchmesser weiterhin beständig zunimmt. Da er dabei allmählich verblaßt, kann der Vorgang mehrmals nacheinander wiederholt und beobachtet werden.

Bemerkung

Die Dichte der Farbflüssigkeit soll sich möglichst wenig von der des Wassers unterscheiden. Wenn die Wirbelringe zu rasch absinken, empfiehlt es sich, die Farbflüssigkeit anzuwärmen oder zu verdünnen.

4.2.14. Wirbelbildung beim Umströmen von Hindernissen in einer Strömungswanne

1. Strömungswanne mit Zubehör
2. Tageslichtschreibprojektor
3. Bildschirm
4. Experimentiermotor
5. Aluminiumflitter oder Korkpulver mit Streubüchse
6. verschiedene Widerstandskörper

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.2.!
2. Beim Vorführen der Strömungen an den verschiedenen Widerstandskörpern ist darauf hinzuweisen, daß alle Einsätze gleich breit sind, also der Strömung gleich große Flächen entgegensetzen. Es ist zweckmäßig, bei etwa gleichen Strömungsgeschwindigkeiten die Wirbelbildungen hinter den Einsätzen zu vergleichen und die Körper danach zu ordnen, wie stark an ihnen das Wirbelfeld ausgebildet ist. Man erhält dieselbe Reihenfolge wie in V 4.3.1.

Versuch

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 4.2.14./1 zu ersehen. Die Strömung wird durch zwei schiffsschraubenartige Flügelräder verursacht, die an derselben Welle befestigt und in den beiden Zweigkanälen untergebracht sind, in die sich der Strömungskanal teilt. Nachdem man die Wanne mit Wasser gefüllt hat, streut man mit einer Streubüchse Aluminiumflitter oder Korkpulver in feiner Verteilung auf die Wasseroberfläche. Die Propellerwelle wird durch den Experimentiermotor in Umdrehung versetzt. Man kann die für stationäre Ströme charakteristischen, zeitlich unveränderlichen Stromlinien beobachten.

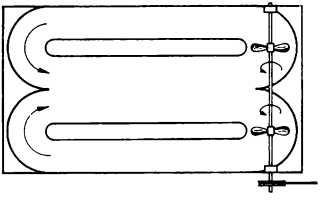


Abb. 4.2.14./1
Strömungswanne zur Projektion von Strömungsbildern (Draufsicht)

Versetzt man die Propeller in etwas raschere Umdrehung und stellt nacheinander die verschiedenen Widerstandskörper in die Strömung, so kann man sehen, daß sich die vor den Körpern gut zu unterscheidenden Stromlinien hinter den Körpern in Wirbeln ablösen.

Bemerkung

Die Strömungswanne ist mit einem Glasboden versehen. Man stellt sie auf die Arbeitsfläche eines Tageslichtschreibprojektors und projiziert das Strömungsbild.

4.2.15. Wirbelbildung beim Umströmen von Hindernissen in einer Strömungswanne — Benutzung des WSP 220

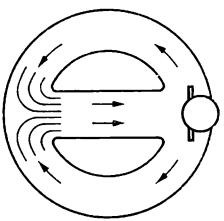


Abb. 4.2.15./1
Strömungswanne des WSP 220 (Draufsicht)

1. Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät WSP 220 mit Zubehör
2. Bildschirm
3. Lykopodium

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.2.!
2. Vergleiche MH V 4.2.14.!

Versuch

Die Vorbereitung der Strömungsversuche mit dem WSP 220 erfordert nur einen geringen Zeitaufwand. Man stellt die Strömungswanne über die Kondensorlinse des Gerätes, setzt die Kreiselpumpe entsprechend der Abbildung 4.2.15./1 ein und verbindet sie mit den gekennzeichneten Buchsen an der Frontplatte. Danach füllt man die Wanne so hoch mit Wasser, daß die beiden Ausflußrohre der Pumpe mit Wasser bedeckt sind. Um die Strömung sichtbar zu machen, streut man mit der Pipette eine kleine Menge Bärlappsporen (Lykopodium) auf die Wasseroberfläche und schaltet die Lampe im Gerät ein (Schalthebel auf Mittelstellung). Die Stroboskopscheibe wird für Strömungsversuche nicht eingeschwenkt. Durch Heben oder Senken des Objektivs wird an der Wand oder auf einem Bildschirm ein deutliches Bild der Wasseroberfläche entworfen. Unter den Anschlußbuchsen für die Kreiselpumpe ist der Bedienungsknopf eines Reglers angebracht, mit dem man die Leistung der Pumpe und damit die Strömungsgeschwindigkeit in weiten Grenzen verändern kann.
Zum Gerät gehören verschiedene Einsatzkörper, deren Strömungsfelder man bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten untersuchen kann: Platte, Halbzylinder, Zylinder, Stromlinienprofil.
Darüber hinaus können mit je einem Paar im Zubehör enthaltener Einsatzkörper laminare Strömungen in einem Rohr mit einer Querschnittsveränderung und in einer Düse veranschaulicht werden.

4.2.16. Wirbelbildung beim Umströmen von Hindernissen im Strömungskanal

1. Strömungskanal
2. verschiedene Körperprofile
3. Eichenholzspäne oder Aluminiumflitter

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment wurde hier aufgenommen, weil Geräte dieser Art in den Lehrmittelsammlungen älterer Schulen noch vorhanden sind. Wenn man es einsetzt, muß man beachten, daß es vorwiegend zur Veranschaulichung laminarer Strö-

mungen gedacht ist und Wirbelbildung nur bei plötzlich einsetzender Strömung zeigt.

Versuch

Das Gerät wird mit Wasser gefüllt, dem Eichenholzspäne oder andere Schwebekörperchen, wie zum Beispiel Aluminiumflitter oder Korkpulver, beigegeben werden. Der zu untersuchende Körper wird von oben her in den Kanal eingesetzt und die Stange, an der der Körper befestigt ist, am oberen Geräterand eingehängt. Die Strömung wird durch ein Gummiballgebläse erzeugt (Abb. 4.2.16./1). Die durch die beigefügten Schwebekörperchen veranschaulichten Stromlinien können auf einen Wandschirm projiziert werden.

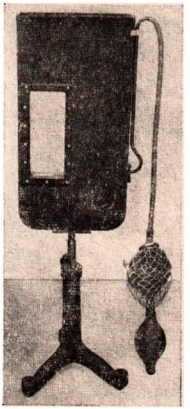


Abb. 4.2.16./1
Strömungskanal

Bemerkungen

1. Bei ruckartig einsetzender Bewegung entstehen hinter dem Hindernis Wirbel, die man als Anfahrwirbel bezeichnet. Bei gleichmäßiger, sehr langsam erfolgender Bewegung verschwinden die Wirbel; es entsteht eine laminare Strömung mit symmetrischem Stromlinienverlauf.
2. Der Strömungskanal kann mit dem Tageslichtschreibprojektor mit Kippeinrichtung projiziert werden.

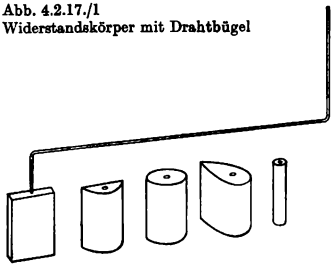
4.2.17. Wirbelbildung beim Schleppen von Widerstandskörpern

1. Flache Glasschale als Schleppwanne
2. verschiedene Widerstandskörper (∅ etwa 1 cm) ⑤
3. steifer Draht
4. Aluminiumpulver oder Lykopodium
5. Tageslichtschreibprojektor

Methodischer Hinweis

Steht keine Strömungswanne zur Verfügung, dann können die Strömungsverhältnisse an den verschiedenen Widerstandskörpern behelfsmäßig in den hier beschriebenen Schleppversuchen beobachtet werden. Während beim Experiment mit Strömungswannen die Versuchskörper ruhen und die Flüssigkeit an ihnen vorbeiströmt, werden bei Schleppversuchen die Widerstandskörper durch die ruhende Flüssigkeit bewegt. Das hat den Nachteil, daß man hier im Gegensatz zu den Experimenten mit der Strömungswanne die Strömungsverhältnisse jeweils nur wenige Sekunden beobachten kann.
Bei diesem Experiment bietet sich die Gelegenheit, auf die Relativität der Bewegungen hinzuweisen.

Abb. 4.2.17./1
Widerstandskörper mit Drahtbügel



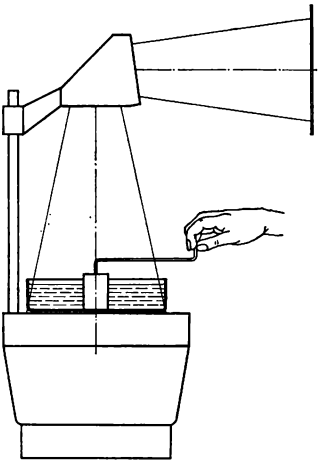


Abb. 4.2.17./2
Versuchsanordnung für Arbeiten in einer Schleppwanne

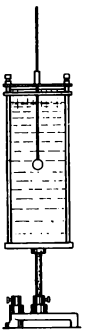


Abb. 4.2.17./3
Strömungsgerät nach R. W. Pohl

Versuch

Verschieden geformte Widerstandskörper (Abb. 4.2.17./1) sägt man mit der Laubsäge aus einem etwa 1 cm dicken Brettchen aus, glättet ihre Oberflächen mit einer Feile und überzieht sie zum Schutz vor Benetzung mit Stearin oder Lack. Auf der Oberseite werden sie mit einer Bohrung versehen, deren Durchmesser dem des Schleppbügels entspricht. Der Schleppbügel wird aus steifem Draht gebogen.
Die Versuchsanordnung ist aus der Abb. 4.2.17./2 zu ersehen.

Variante a

Die Schleppwanne wird etwa 8 mm hoch mit Wasser gefüllt und auf die Wasseroberfläche Lykopodium oder Aluminiumpulver gestreut. Man dreht den Schleppbügel zwischen den Fingern, so daß sich der Versuchskörper mit gleichbleibender Geschwindigkeit durch die Wanne bewegt. In der Projektion erkennt man durch die Bewegung der Lykopodium- oder Aluminiumkörperchen die verschiedenen Wirbelbildungen hinter den bewegten Profilkörpern.

Variante b

Mit derselben Versuchsanordnung kann man auch Bilder bei laminarer Strömung erzeugen, so wie sie im Stromfädengerät nach Pohl beobachtet werden. Man gießt das Wasser nur 3 mm hoch in die Wanne und zieht die Versuchskörper durch die mit Lykopodium bestreute Flüssigkeitsschicht. Die Reibung der dünnen Wasserschicht am Boden der Wanne ist zum Erzeugen einer laminaren Strömung ausreichend.

Variante c

Das Gerät ermöglicht es auch, Strömungsbilder in zäheren Flüssigkeiten als Wasser zu erzeugen. Statt Wasser füllt man etwa 8 mm hoch Paraffinöl in die Versuchswanne und bestreut die Oberfläche wieder mit Lykopodium. Man erkennt hinter den geschleppten Versuchskörpern eine verzögerte Schicht. Es treten keine Wirbel auf.

Bemerkungen

1. Fetthaltiges Aluminiumpulver setzt die Oberflächenspannung des Wassers herab und stört die Strömungserscheinungen. Durch Auskochen in Spiritus und anschließendes Trocknen kann man das Aluminiumpulver entfetten. Häufig genügt es auch schon, wenn man dem Wasser etwas Fit oder Spiritus zusetzt.
2. An Stelle der beschriebenen Schleppwanne kann auch das Strömungsgerät nach R. W. Pohl benutzt werden (Abb. 4.2.17./3). Dieses besteht aus einem 1 cm weiten, lotrecht aufgestellten Glastrog, der mit Wasser unter Beigabe von Schwebestoffen gefüllt wird. Der Hinderniskörper ist an einem Stab befestigt, der, in einer Führung laufend, in vertikaler Richtung bewegt werden kann. Die Sichtbarkeit kann durch Projektion mit dem Tageslichtschreibprojektor mit Kippeinrichtung verbessert werden.

4.3. Widerstand eines Körpers in strömenden Gasen und Flüssigkeiten

4.3.1. Vergleich der Strömungswiderstände verschieden geformter Körper [SE]

Zu Variante a

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Drehmomentenwaage
3. Widerstandskörper verschiedener Formen (Zubehör zur Drehmomentenwaage)

Zu Variante b

4. Luftdusche
5. Widerstandskörper verschiedener Formen mit gleichen Querschnittsflächen (∅ etwa 2 cm)
6. empfindliche Neigungswaage (Briefwaage)
7. Holzspeiler (Länge etwa 30 cm)
8. Vertikalmeßstab
9. Federklammer, dünner Draht

Methodische Hinweise

1. Das Experiment der Variante a ist des einfachen, übersichtlichen Aufbaues wegen besonders zu empfehlen.
2. Die strömungstechnisch günstige Form des „Stromlinienkörpers" ist den Schülern i. a. bereits bekannt, trotzdem wirkt erfahrungsgemäß die Tatsache, daß bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit verschieden geformte Körper mit gleich großem Querschnitt unterschiedliche Strömungswiderstände haben, überraschend und interessant. So ist dieses Experiment nicht nur geeignet, Kenntnisse zu vermitteln, es kann auch der Problemstellung dienen. Die Frage, wodurch die unterschiedliche Größe der Widerstände zustande kommt, drängt sich auf.
3. Der Strömungswiderstand spielt bei verschiedenen Sportarten eine ausschlaggebende Rolle (Skilanglauf, Skisprunglauf, Bobfahren, Rennschlittenfahren, Eisschnellauf, Motorradrennsport, Autorennsport u. a. m.). Höchstleistungen können nur vollbracht werden, wenn die Gesetzmäßigkeiten der Strömungslehre beachtet werden. Durch Hinweise auf diese Zusammenhänge kann der Unterricht belebt und interessant gestaltet werden.

Variante a

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 4.3.1./1 dargestellt. Der besseren Stabilität wegen verwendet man zum Aufstellen der Geräte Tischklemmen. Der Stellzeiger und der bewegliche Zeiger der Drehmomentenwaage werden auf Null gestellt. Danach befestigt man den Hebelarm als Träger der Widerstandskörper so, daß er lotrecht nach unten hängt. Danach werden auch der waagerechte Hebelarm und der Begrenzungsbügel angebracht. Dieser Hebelarm ist mit einer Einkerbung versehen, in die die Befestigungsschraube eingreifen soll. Er trägt außerdem einen zylindrischen Metallkörper zum Gewichtsausgleich.
Als erster Versuchskörper wird die Kreisscheibe mit dem Durchmesser von etwa 5 cm eingesetzt. Sie soll sich etwa 20 cm vor der Düse des Luftstromerzeugers befinden. Nach dem Einschalten des Luftstromerzeugers wird die Platte infolge ihres aerodynamischen Widerstandes zurückgedrückt. Durch Verdrehen des hinter

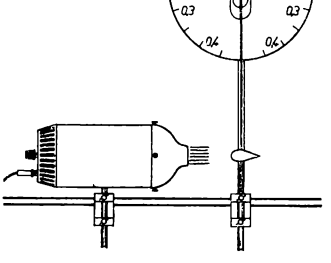


Abb. 4.3.1./1
Versuchsanordnung zum Vergleich der Strömungswiderstände mit Hilfe der Drehmomentenwaage

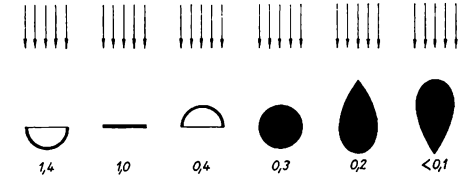


Abb. 4.3.1./2
Übersicht zum Vergleich der Strömungswiderstände verschiedener Körper

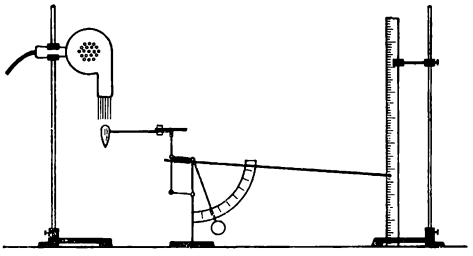


Abb. 4.3.1./3
Versuchsanordnung zum Vergleich der Strömungswiderstände mit Hilfe einer Briefwaage

der Skalenscheibe befindlichen Stellzeigers bringt man den Widerstandskörper wieder in seine ursprüngliche Lage zurück. Dabei spielt der vordere Zeiger wieder auf Null ein. Die Widerstandskraft ergibt sich als Differenzbetrag zwischen den beiden Zeigern.
In gleicher Weise untersucht man nacheinander die verschiedenen Widerstandskörper mit gleichen Querschnittsflächen. Vergleicht man die ermittelten Widerstandskräfte miteinander, so erkennt man, daß die von der Höhlung her angeblasene Hohlhalbkugel den größten Strömungswiderstand hat. Ihr folgen mit abnehmender Größe des Widerstandes die Kreisscheibe, die von der Wölbung her angeblasene Hohlhalbkugel, die Kugel, der mit der Spitze gegen den Luftstrom gerichtete Stromlinienkörper und als Körper mit dem kleinsten Widerstand der am stumpfen Ende angeblasene Stromlinienkörper. Bei einem Vergleich der Zahlenwerte ergibt sich, bezogen auf den Widerstand der Kreisplatte als Einheit, etwa die in Abbildung 4.3.1./2 gezeigte Reihenfolge.
Schließlich kann man noch nachweisen, daß der Strömungswiderstand von der Querschnittsfläche abhängig ist. Dazu verwendet man die Kreisscheibe mit dem Durchmesser von etwa 7 cm. Ihre Fläche ist etwa doppelt so groß wie die der kleinen Kreisscheibe. Um die Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit zu zeigen, setzt man den Stromlinienkörper mit rauher Oberfläche ein.

Variante b

Die Luftdusche wird so an einem Stativ befestigt, daß ihr Luftstrom vertikal nach unten gerichtet ist. Am kurzen Hebelarm einer empfindlichen Briefwaage wird ein

Holzspeiler mittels eines dünnen Drahtes als Zeiger befestigt. Die Widerstandskörper werden an der Waage angebracht, indem man ihren Stiel mit einer Federklammer an den Teller klemmt. Der Widerstandskörper soll sich etwa 10 cm unterhalb der Strahlrohröffnung der Luftdusche befinden. Hinter das Zeigerende stellt man einen Vertikalmeßstab und bestimmt die Ausgangsstellung bei abgeschalteter Luftdusche. Nach dem Einschalten wird der Versuchskörper infolge seines Strömungswiderstandes im Luftstrom nach unten gedrückt; der Zeiger hebt sich. Als Vergleichsmaß für die Größe des Widerstandes liest man den Zeigerausschlag ab (Abb. 4.3.1./3). Durchführung und Auswertung des Experiments erfolgen so, wie sie in der Variante a beschrieben wurden.

Bemerkungen

1. Die Empfindlichkeit der Briefwaage kann dadurch gesteigert werden, daß man ihr Neigungsgewichtsstück entfernt und den Zeiger durch Zusammenbinden zweier Speiler verlängert.
2. Zum Vereinfachen der Ablesung ist es zweckmäßig, einen Satz von Widerstandskörpern gleichen Gewichts zu verwenden. Man gleicht die Gewichte ab, indem man auf die Stiele der leichten Körper Metallhülsen aufschiebt.
3. Der beschriebene Versuch eignet sich in erster Linie für einen einfachen Vergleich der Größe der Strömungswiderstände und ist deshalb für den Anfangsunterricht zu empfehlen.

4.3.2. Widerstandsmessung mit einer Einkomponentenwaage

1. Kleiner Luftstromerzeuger oder Luftdusche
2. Widerstandskörper gleichen Querschnitts an Stielen
3. Kraftmesser (1 N)
4. Holzleiste (30 cm × 2 cm × 1 cm) mit 2,5-mm-Bohrung in der Mitte
5. 2 Federklammern, Holzspeiler, Faden

Methodische Hinweise

Vergleiche MH Nr. 2 und 3 V 4.3.1.!

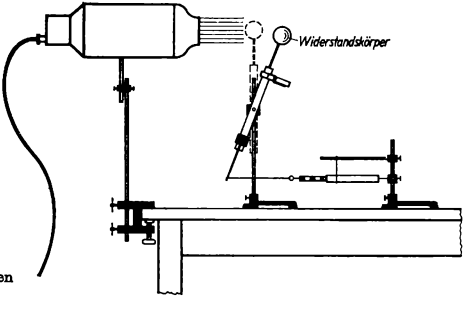


Abb. 4.3.2./1
Aufstellen der behelfsmäßigen Einkomponentenwaage

Herrichten der Versuchsanordnung

Man klemmt einen Lagerzapfen waagerecht an ein 50 cm hohes Stativ und steckt eine in der Mitte durchbohrte, 30 cm lange und 1 cm dicke Holzleiste darauf. An ihrem oberen Ende befestigt man mittels einer Federklammer einen Widerstandskörper. Den Gewichtsausgleich stellt man dadurch her, daß man am anderen Ende der Leiste eine Kreuzmuffe befestigt. Unter dieser klemmt man gleichzeitig einen Holzspeiler fest und verschiebt sie so weit, bis die Leiste in jeder Lage im Gleichgewicht ist. Vor dem Widerstandskörper stellt man in einer Entfernung von 20 cm einen Luftstromerzeuger auf. An den Speiler knüpft man in der Entfernung des Widerstandskörpers einen Faden und bindet diesen an einen Kraftmesser. Er wird an einem Stativ in waagerechter Lage gehalten, damit er die Leiste nicht belastet (Abb. 4.3.2./1).

Versuch

Der Kraftmesser wird bei vertikaler Stellung der Leiste in einer solchen Entfernung aufgestellt, daß der Faden straff verläuft, ohne gespannt zu sein. Schaltet man den Luftstromerzeuger ein, so wird der Widerstandskörper etwas zurückgedrückt und der Faden gespannt. Zur Wiederherstellung der Ausgangslage des Widerstandskörpers verschiebt man den Kraftmesser so weit, daß die Leiste wieder vertikal einspielt. Dann liest man den Widerstand am Kraftmesser ab.
Man kann auf diese Weise die Widerstände der verschiedenen Körper ermitteln und miteinander vergleichen. Es ergeben sich bei gleicher Windgeschwindigkeit dieselben Werte wie in V 4.3.1.

Bemerkung

Ein nach dem gleichen Prinzip wirkendes Gerät wird als Winddruckmeßgerät industriell hergestellt (Abb. 4.3.2./2).

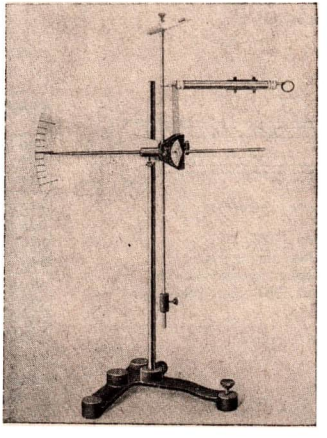


Abb. 4.3.2./2
Winddruckmeßgerät

4.3.3. Widerstandsmessung mit einer Tafelwaage [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger oder Luftdusche
2. Widerstandskörper mit gleich großen Querschnittsflächen an Stielen
3. oberschalige Tafelwaage
4. Tarierbecher mit Schrot
5. Wägesatz
6. Federklammer

Methodische Hinweise

1. Die Tafelwaage wird wie alle Hebelwaagen im Physikunterricht im allgemeinen nur zum Massenvergleich benutzt. Das ist wichtig, um die Unterscheidung der Begriffe Kraft und Masse zu erleichtern. Bei diesem Experiment wird die Tafelwaage ausnahmsweise zur Ermittlung von Kräften benutzt. Man erhält mit ihr exakte Ergebnisse, und der Aufbau ist einfach und übersichtlich. Wenn man mit den Schülern über die Benutzung der Waage spricht, kann man darauf hinweisen, daß der Massenvergleich mit einer Balkenwaage durch den *Gewichtsvergleich* (Gleichgewicht), also durch einen *Kräftevergleich* erfolgt.
2. Vergleiche MH Nr. 2 und 3 V 4.3.1.!

Versuch

Eine oberschalige Tafelwaage wird an die Kante des Experimentiertisches gestellt. An einer Schale wird mittels einer Federklammer ein Widerstandskörper an seinem Stiel so angeklemmt, daß er möglichst weit über die Tischkante ragt. Die Waage wird mit Schrot austariert. Der kleine Luftstromerzeuger wird unter den Widerstandskörper gestellt. Hierbei soll der Luftstrom lotrecht nach oben gerichtet sein und die Düse vom Versuchskörper einen Abstand von etwa 20 cm haben (Abb. 4.3.3./1).

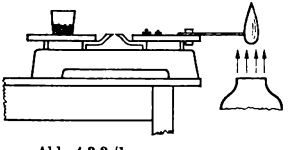


Abb. 4.3.3./1
Bestimmung des Strömungswiderstandes mit Hilfe einer Tafelwaage

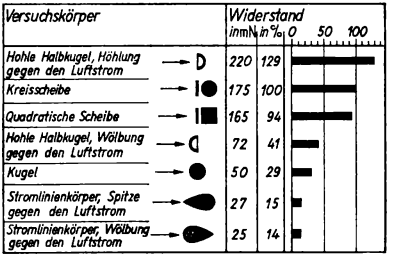


Abb. 4.3.3./2
Strömungswiderstände verschiedener Körper. Der Widerstand der Kreisscheibe wurde gleich 100% gesetzt.

Beim Einschalten des Luftstromerzeugers wird infolge des Strömungswiderstandes des Versuchskörpers die Waage aus dem Gleichgewicht gebracht. Durch Auflegen von Wägestücken auf die Waagschale, an der der Widerstandskörper befestigt ist, wird das Gleichgewicht wiederhergestellt. Die aufgelegten Wägestücke sind ein Maß für den Strömungswiderstand des Körpers. Die Gewichtskraft eines Wägestücks von 100 g entspricht angenähert einer Widerstandskraft von 1 N.
Der Versuch wird mit verschiedenen Widerstandskörpern durchgeführt (Abb. 4.3.3./2).

Bemerkungen

1. Wenn die Widerstandskörper sich im Gewicht unterscheiden, so muß die Waage nach jedem Wechsel neu austariert werden.
2. Es ist darauf zu achten, daß die Waagschale nicht im Luftstrom liegt.

4.4. Druck- und Geschwindigkeitsmessungen in strömenden Stoffen — Die Kontinuitätsgleichung — Die Bernoullische Gleichung

4.4.1. Bestätigung der Kontinuitätsgleichung mit Hilfe eines Wasserstrahls [SE]

1. Mariottesche Flasche (Flasche mit seitlichem Tubus)
2. Unterstellkasten (Höhe 30 cm)
3. Meßzylinder (1000 ml)
4. große Glasschale
5. Meßstab
6. Lot
7. Meßschieber
8. Stoppuhr
9. Glasrohr (⌀5 mm, Länge 25 cm)
10. Glasrohr (⌀5 mm, Länge 5 cm)
11. 2 durchbohrte Gummistopfen
12. Gummischlauch
13. Quetschhahn, Klebepapier

Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment ist besonders als Schülerexperiment geeignet. Sein Aufbau ist einfach und übersichtlich, und bei seiner Ausführung kann eine Reihe von Kenntnissen und Fertigkeiten wiederholt bzw. geübt werden (Messen mit dem Meßschieber, Flächenberechnung, Gesetze des freien Falles und Gesetze des horizontalen Wurfes).
2. Der Versuch dient zur angenäherten Bestätigung des Gesetzes, daß bei einer stationären Strömung das Produkt aus dem Flächeninhalt A des Strömungsquerschnitts und der Strömungsgeschwindigkeit v konstant ist. Diese Tatsache wird durch die Kontinuitätsgleichung

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

ausgedrückt und ist eine Voraussetzung zum Verständnis der Bernoullischen Gleichung.

Versuch

Die Versuchsanordnung ist in der Abb. 4.4.1./1 dargestellt. Die eine Meßstelle ist der Wasserspiegel in einer Mariotteschen Flasche (Flächeninhalt A_1 des Querschnitts, Strömungsgeschwindigkeit v_1), die andere das Ausflußrohr der Flasche

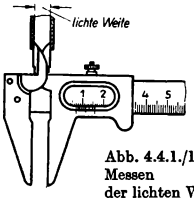


Abb. 4.4.1./1
Messen
der lichten Weite
mit dem Meßschieber

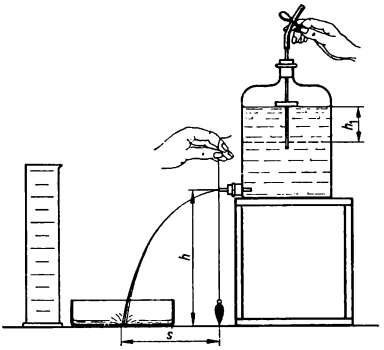


Abb. 4.4.1./2
Bestätigung der Kontinuitätsgleichung
mit Hilfe einer Mariotteschen Flasche

(Flächeninhalt A_2 des Querschnitts, Strömungsgeschwindigkeit v_2). Die Flasche wird auf einen Unterstellkasten gestellt und mit Wasser gefüllt. Auf ihr vertikales Verschlußrohr wird ein Schlauchstück geschoben und mit einem Quetschhahn verschlossen. Das untere Ende dieses Rohres soll etwa 5 cm bis 10 cm höher liegen als die Ausflußöffnung. In Höhe des Wasserspiegels klebt man eine Papiermarke außen an die Flasche.
Eine große leere Glasschale wird so auf den Experimentiertisch gestellt, daß der ausfließende Wasserstrahl sie etwa in der Mitte treffen muß. Man ermittelt die lichte Weite d des seitlichen Rohres mit einem Meßschieber (Abb. 4.4.1./2) und seine Höhe h über dem Boden der Glasschale mit einem Meßstab. Den Querschnitt des Ausflußrohres findet man aus

$$A_2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 .$$

Die Ausflußgeschwindigkeit v_2 kann als Anfangsgeschwindigkeit einer horizontalen Wurfbewegung aufgefaßt werden. Hierbei gilt für die Horizontalkomponente das Weg-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung

$$s = v_2 \cdot t$$

und für die Vertikalkomponente das Weg-Zeit-Gesetz des freien Falles

$$h = \frac{g}{2} \cdot t^2 .$$

Der Flächeninhalt A_1 des Querschnittes in der Flasche ist für eine Messung nicht zugänglich. Man berechnet ihn, indem man mit einem Meßzylinder das Volumen des ausgeflossenen Wassers bestimmt und das Volumen V durch die Höhe h dividiert.
Mit Hilfe dieser Gleichungen kann man die Produkte $A_1 \cdot v_1$ und $A_2 \cdot v_2$ berechnen und findet ihre Gleichheit innerhalb der Grenzen der Meßgenauigkeit bestätigt. Das Produkt $A_2 \cdot v_2$ fällt etwas kleiner aus als $A_1 \cdot v_1$, weil beim Versuch der Luftwiderstand unberücksichtigt bleibt.

Beispiel

In einem Versuch wurden ermittelt:

Durchmesser des Ausflußrohres	$d = 0{,}42$ cm	Sinkhöhe des	
Fallhöhe des Wasserstrahles	$h = 32$ cm	Wasserspiegels	$h_1 = 5{,}4$ cm
Wurfweite des Wasserstrahles	$s = 23$ cm	Ausflußmenge	$V = 960$ cm³
Ausflußdauer	$t_1 = 72$ s		

Es ergibt sich $A_1 = \frac{V}{h_1} \approx 178$ cm² und $A_2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \approx 0{,}14$ cm².

Aus $h = \frac{g}{2} \cdot t^2$ folgt $t = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}}$ und somit $v_2 = s \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot h}} \approx 23 \cdot \sqrt{\frac{981}{2 \cdot 32}} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \approx$

$\approx 90 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$.

Es ist ferner $v_1 = \frac{h_1}{t_1} \approx 0{,}075$ cm · s^{-1}.

$A_1 \cdot v_1 = 178 \cdot 0{,}075$ cm³ · s^{-1} $\approx 13{,}35$ cm³ · s^{-1}.

$A_2 \cdot v_2 = 0{,}14 \cdot 90$ cm³ · s^{-1} $\approx 12{,}60$ cm³ · s^{-1}.

Der Versuch zeigt, daß die Produkte $A_1 \cdot v_1$ und $A_2 \cdot v_2$ annähernd gleich sind; dieses Ergebnis kann also als Bestätigung der Kontinuitätsgleichung gelten.

4.4.2. Bestätigung der Kontinuitätsgleichung durch Messen der Strömungsgeschwindigkeiten in zwei Rohren verschiedenen Querschnitts [SE]

Zu Variante a

1. Mariottesche Flasche (Flasche mit seitlichem Tubus)
2. Glasrohr (∅5 mm, Länge 25 cm)
3. Glasrohr (∅20 mm, Länge 25 cm)
4. Glasrohr (∅8 mm, Länge 1 m)
5. Gummischlauch
6. 3 durchbohrte Gummistopfen
7. Glastrog oder Becherglas
8. Meßschieber oder Greifzirkel
9. Meßstab
10. Stoppuhr
11. Quetschhahn
12. Holzspäne

Zu Variante b

13. kleiner Luftstromerzeuger
14. Tafelschaltgerät
15. Aufbausatz Aero- und Hydromechanik
    1 Windkanal
    1 Windfahne, links, mit Skale und kurzer Achse
    1 Windfahne, rechts, mit Skale und langer Achse

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 2 V 4.4.1.1
2. Während im Experiment der Variante a eine quantitative Auswertung möglich ist, soll in der Variante b die Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vom Strömungsquerschnitt möglichst anschaulich qualitativ gezeigt werden.

Variante a

An den Seitentubus einer Mariotteschen Flasche wird mittels eines kurzen Verbindungsrohres ein 20 mm weites, 25 cm langes Glasrohr angeschlossen, das in einem 8 mm weiten, 1 m langen Glasrohr seine Fortsetzung findet. Mit diesem ist ein Schlauchstück verbunden, das durch einen Schraubquetschhahn verschlossen ist. Die Mariottesche Flasche wird auf einige Unterlegklötze erhöht aufgestellt, so daß das Ende des Ausflußrohres über einem Glastrog zu liegen kommt (Abb. 4.4.2./1). Vor dem Zusammensetzen der Versuchsanordnung mißt man mit Hilfe eines Meßschiebers oder eines Greifzirkels die Durchmesser d_1 und d_2 des weiten und des engen Ausflußrohres und berechnet daraus ihre Querschnittsflächen.
Man versetzt eine größere Wassermenge mit feinen Holzspänen und läßt sie unter mehrfachem Umrühren so lange stehen, bis sich die Späne voll Wasser gesaugt haben und als Schwebekörper wirken. Dann füllt man die Flasche bei verschlossenem Quetschhahn mit der so vorbereiteten Flüssigkeit und öffnet den Hahn vorübergehend so weit, daß sich das Ausflußrohr der ganzen Länge nach mit Wasser füllt. Danach regelt man die Hahnöffnung so, daß im Ausflußrohr eine langsame Strömung entsteht.
Man legt am weiten und am engen Rohrteil durch Fadenschlingen je eine Strecke fest, deren Längen s_1 und s_2 man mißt, und stellt mehrmals mit einer Stoppuhr die Zeiten fest, in denen ein Schwebeteilchen die Strecken durchläuft. Aus den Zeiten ermittelt man die für das weite und das enge Rohr geltenden Mittelwerte t_1 und t_2. Bildet man die Quotienten aus den Längen s_1 und s_2 und den dazugehörigen Zeiten t_1 und t_2, so erhält man die für die eingestellte Strömung geltenden Geschwindigkeiten v_1 und v_2.
Multipliziert man die Geschwindigkeiten mit den Querschnitten A_1 und A_2 der Rohrteile, so sind die entstehenden Produkte $A_1 \cdot v_1$ und $A_2 \cdot v_2$ angenähert gleich groß.

Bemerkungen

1. Es kann vorkommen, daß der aus dem Verbindungsrohr zur Mariotteschen Flasche in das weite Rohr austretende Flüssigkeitsstrahl eine längere Strecke geschlossen bleibt, ehe er die ihn umgebende Flüssigkeit in Bewegung setzt. Will man dies verhüten, so muß man die Übergangsstelle so weit wie möglich machen. Am zweckmäßigsten ist es, das Verbindungsrohr fortzulassen und das Anschlußrohr so weit zu wählen, daß es über den Tubus der Mariotteschen Flasche paßt. Man stülpt es über diesen und dichtet den Zwischenraum mit Siegellack, Kitt

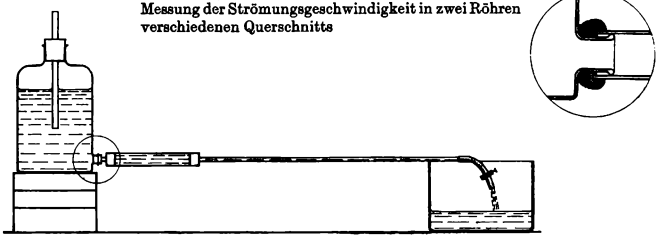


Abb. 4.4.2./1
Messung der Strömungsgeschwindigkeit in zwei Röhren verschiedenen Querschnitts

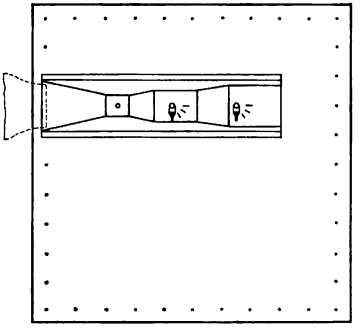


Abb. 4.4.2./2
Versuchsanordnung
zum Nachweis der Abhängigkeit
der Strömungsgeschwindigkeit
vom Strömungsquerschnitt

oder Goteamasse ab, ein bei der Fruchtweinbereitung zum Abdichten der Gärtrichter verwendetes Präparat (Abb. 4.4.2./1, Nebenbild).

2. Es empfiehlt sich, den Versuch bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten durchzuführen. Es zeigt sich, daß dabei die Produkte $A_1 \cdot v_1$ und $A_2 \cdot v_2$ immer wieder gleich groß sind.

Variante b

Der Windkanal wird waagerecht am Tafelschaltgerät befestigt (Abb. 4.4.2./2). Den Luftstromerzeuger stellt man so auf, daß seine Düse in den konischen Teil des Windkanals hineinragt. Vorerst setzt man nur das Anzeigesystem mit der kurzen Achse ein. Dazu schiebt man die Vorderwand des Windkanals seitlich heraus. Bei eingeschaltetem Luftstromerzeuger zeigt die Windfahne einen Ausschlag, dessen Betrag an der Skale abgelesen werden kann. Danach entfernt man dieses Anzeigesystem und setzt das zweite an der Stelle mit größerem Querschnitt ein. Die beiden Rohrquerschnitte verhalten sich wie 1:2. Bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit ist der Ausschlag der Windfahne hier kleiner.
Es ist nicht zweckmäßig, beide Anzeigesysteme gleichzeitig zu benutzen, weil sich hinter der ersten Windfahne Wirbel bilden, die die zweite Fahne beeinträchtigen.

4.4.3. Nachweis des Druckgefälles in einem durchströmten Rohr von gleichmäßigem Querschnitt

1. Große Mariottesche Flasche (Flasche mit seitlichem Tubus)
2. Glasrohr (⌀5 mm, Länge 25 cm)
3. Glasrohr (⌀8 mm, Länge 60 cm) mit 4 senkrechten, in Abständen von je 10 cm angebrachten Ansatzröhren (⌀2 mm)
4. 2 durchbohrte Gummistopfen
5. Gummischlauch
6. Quetschhahn

Methodischer Hinweis

Das Experiment zeigt, daß in einem dünnen, langen Ausflußrohr mit gleichbleibendem Querschnitt der Druck zur Ausflußöffnung hin beständig abnimmt. Diese Erscheinung ist auf die innere Reibung in dem Rohr (vgl. V 4.1.3. bis V 4.1.6.) zurückzuführen. Zur Erklärung kann man folgende Zusammenhänge anführen: Durch die Reibung wird die kinetische Energie der Flüssigkeit und damit auch ihr Druck so stark verringert, daß die Ausströmungsgeschwindigkeit nur noch sehr gering ist. Zur Überwindung der Reibungskraft ist ein Teil des Schweredrucks der Flüssigkeit im Vorratsgefäß erforderlich (*Druckhöhe* h_1 in der Abb. 4.4.3./1). Der Überschuß bewirkt die Ausströmgeschwindigkeit (*Geschwindigkeitshöhe* h_2 in der Abb. 4.4.3./1).

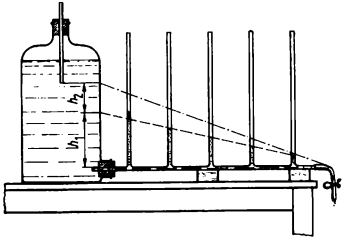


Abb. 4.4.3./1
Druckgefälle in einem Rohr von gleichmäßigem Querschnitt

Versuch

Die Versuchsanordnung wird nach Abb. 4.4.3./1 zusammengestellt und die Mariottesche Flasche langsam mit Wasser gefüllt, wobei darauf zu achten ist, daß sich in den Manometerröhren keine Lufteinschlüsse bilden. Zur besseren Sichtbarmachung der Druckanzeige kann in jede Manometerröhre ein Tropfen Farbflüssigkeit gegeben werden. Beim Öffnen des Quetschhahnes sinkt die Flüssigkeit in den Röhren. Die Flüssigkeitsspiegel in den letzten 4 Röhren liegen in guter Näherung auf einer geneigten Geraden, während die Flüssigkeit in der ersten Manometerröhre etwas höher steht, als es der bis zu ihr extrapolierten Geraden entspricht. Die beobachtete Abweichung ist um so geringer, je weniger weit der Hahn geöffnet wird. Bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten liegen sämtliche Menisken praktisch auf einer Geraden, die durch das Niveau der unteren Öffnung des in die Mariottesche Flasche eingeführten Luftrohres bestimmt wird (in Abb. 4.4.3./1 strichpunktiert angedeutet). In diesem Falle ist der Druckabfall proportional dem Abstand von der Flasche.

Bemerkung

Abweichungen von der Proportionalität zwischen dem Druckabfall und dem Abstand von der Flasche bestehen besonders in der Nähe des Rohreinlaufs. Die Ursache hierfür ist eine Strahlkontraktion im Rohreinlauf und eine infolgedessen veränderte Geschwindigkeitsverteilung.

4.4.4. Nachweis des Druckgefälles in einem mit einer Verengung versehenen Rohr

1. Mariottesche Flasche (Flasche mit seitlichem Tubus)
2. Glasrohr (⌀5 mm, Länge 25 cm)
3. Glasrohr (⌀8 mm, Länge 50 cm), das in der Mitte verengt ist und vor und hinter der Verengung je 2 Manometerröhren trägt
4. 2 durchbohrte Gummistopfen
5. Gummischlauch
6. Quetschhahn

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 4.4.3.!
2. Dieses Experiment sollte nur ausgeführt werden, wenn V 4.4.3. vorangegangen war. Die Erklärung kann dann von den Schülern selbst gefunden werden.

Versuch

Die Zusammenstellung der Versuchsanordnung und die Durchführung des Versuches erfolgen nach den gleichen Vorschriften wie bei V 4.4.3. Die Verbindung der Flüssigkeitsspiegel in den Manometerröhren liefert vor und hinter der Verengung zwei Geraden von gleicher Neigung (Abb. 4.4.4./1a), die zueinander parallel verschoben sind.

Bemerkung

Dieses Verhalten erklärt sich dadurch, daß im Bereich der Verengung ein größerer Druckabfall auftritt. Ein Rohr mit einer Verengung kann man sich daher durch ein gleich weites, aber längeres Rohr ersetzt denken (Abb. 4.4.4./1b).

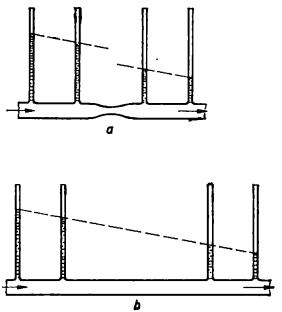


Abb. 4.4.4./1
Schematische Darstellung des Druckabfalles in einem verengten Rohr. Die Einschnürung (a) hat die gleiche Wirkung wie ein an ihrer Stelle eingesetztes längeres Rohrstück von der ursprünglichen Weite (b)

4.4.5. Nachweis des Druckgefälles in einem Rohr mit einer Verengung von veränderlicher Lage

1. Standzylinder mit seitlichem Tubus (5 l)
2. rechtwinklig gebogenes Glasrohr (⌀5 mm)
3. 4 Glasrohre (⌀10 mm, Länge 15 cm), an die je eine Manometerröhre (⌀2 mm, Länge 40 cm) T-förmig angeschmolzen ist
4. durchbohrter Gummistopfen
5. Gummischlauch
6. Quetschhahn
7. Eisenstift (⌀5 mm, Länge 4 cm)
8. Magnet

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 4.4.3.1
2. Dieses Experiment bereitet das Verständnis der *Bernoullischen Gleichung* vor. Es zeigt, daß an einer Rohrverengung, wo nach der Kontinuitätsgleichung eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit herrschen muß, ein geringerer statischer Druck besteht.

Versuchsvorbereitung

Die T-förmigen Rohre verbindet man durch Schlauchstücke, so daß sich die Ränder der Rohre berühren, und schließt sie nach Abb. 4.4.5./1 an den Seitentubus eines Standzylinders an. Das offene Ende der Leitung verschließt man durch einen Schraubquetschhahn. Man füllt den Zylinder bei geschlossenem Quetschhahn mit einem an die Wasserleitung angeschlossenen Schlauch mit Wasser.

Versuch 1

Solange der Schraubquetschhahn geschlossen ist, steht das Wasser in dem gesamten Röhrensystem gleich hoch. Öffnet man ihn, so sinkt der Druck in dem Ausflußrohr ab, und zwar nach der Öffnung zu in zunehmendem Maße. Man öffnet den Schraubquetschhahn und den Wasserleitungshahn so weit, daß sich Zu- und Abfluß des Wassers ausgleichen. Wie bei V 4.4.3. kann man einen linearen Druckabfall beobachten.

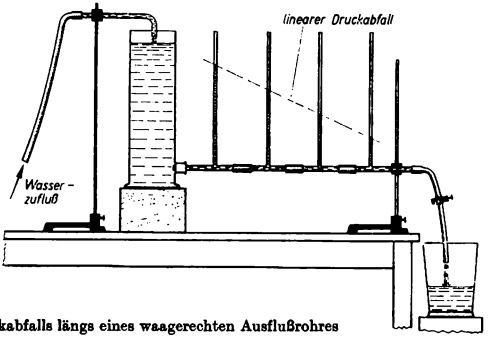


Abb. 4.4.5./1
Nachweis des Druckabfalls längs eines waagerechten Ausflußrohres

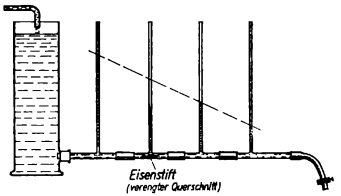


Abb. 4.4.5./2
Druckabfall länge eines an einer Stelle verengten Ausflußrohres

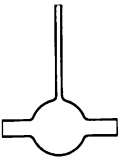


Abb. 4.4.5./3
Kugelig erweitertes Rohr mit angeschmolzenem Manometerrohr

Versuch 2

Man führt vor dem Einfüllen des Wassers von der Seite her einen Eisenstift in das Ausflußrohr ein, der den Querschnitt des Rohres wesentlich verengt. Dann läßt man wie beim ersten Versuch das Wasser ausfließen. Durch einen seitlich an das Rohr gehaltenen Magneten zieht man den Eisenstift weiter in das Rohr hinein, so daß er der Reihe nach unter die Öffnungen der Manometerröhren zu liegen kommt. Jedesmal, wenn dies der Fall ist, sinkt die Wassersäule im Manometer weit unter den Stand, der dem linearen Druckabfall entspricht (Abb. 4.4.5./2).

Bemerkung

Es ist ein großer Vorteil dieser Versuchsanordnung, daß das Durchflußrohr aus mehreren Einzelrohren besteht. Dadurch ist es möglich, die Anordnung abzuändern und noch ein kugelig erweitertes Rohr mit angeschmolzenem Manometer einzufügen (Abb. 4.4.5./3). In ihm ist der Druck höher, als es dem linearen Druckabfall entspricht.

4.4.6. Nachweis der Abhängigkeit des statischen Druckes von der Strömungsgeschwindigkeit

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Tafelschaltgerät
3. Aufbausatz Aero- und Hydromechanik
   1 Windkanal
   2 U-Rohr-Manometer
   2 Schlauchstücke (Länge 22 cm)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 2 V 4.4.5.!
2. Bei diesem Experiment wird vorausgesetzt, daß die Schüler die Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vom Strömungsquerschnitt bereits kennen. Deshalb sollte es besonders dann ausgeführt werden, wenn dieser Zusammenhang

in V 4.4.2. nach der Variante b mit dem Aufbausatz Aero- und Hydromechanik nachgewiesen wurde.

3. Zum besseren Verständnis sollte man die Schüler vor der Messung darauf aufmerksam machen, daß bei der Benutzung offener U-Rohr-Manometer stets ein Vergleich zweier Drücke erfolgt. Bei diesem Experiment wird der statische Druck an der Meßstelle mit dem äußeren Luftdruck verglichen.

Versuch

Der Versuchsaufbau ähnelt dem von V 4.4.2., Variante b. Statt der Anzeigesysteme werden an die Bohrungen in der Vorderwand des Windkanals die beiden U-Rohr-Manometer angeschlossen (Abb. 4.4.6./1). Da sich die Querschnittsflächen der drei zylindrischen Abschnitte des Windkanals wie 1:2:4 verhalten, ist das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten an diesen Stellen 4:2:1.
Nach dem Einschalten des Luftstromerzeugers zeigen die Flüssigkeitssäulen der Manometer, daß der statische Druck an den Meßstellen um so kleiner ist, je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist.

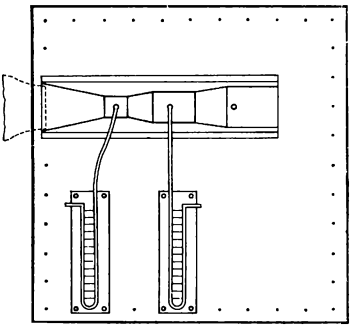


Abb. 4.4.6./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Abhängigkeit des statischen Druckes von der Strömungsgeschwindigkeit mit zwei Manometern

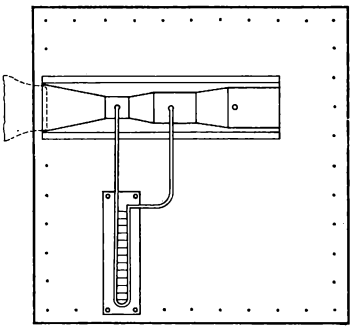


Abb. 4.4.6./2
Versuchsanordnung mit nur einem Manometer

Bemerkung

Die Versuchsanordnung kann auch dahingehend abgeändert werden, daß man nur ein U-Rohr-Manometer benutzt und die statischen Drücke an zwei Meßstellen mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten miteinander vergleicht (Abb. 4.4.6./2).

4.4.7. Staudruckmessung mit Hilfe eines Pitotrohres [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Pitotrohr
3. Mikromanometer (vgl. V 4.4.9. und Abb. 4.4.10./2)
4. Schlauchverbindung

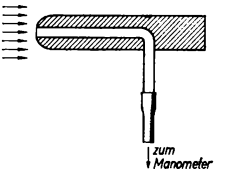


Abb. 4.4.7./1
Pitotrohr zur Messung des Gesamtdruckes bzw. Staudruckes

Methodischer Hinweis

Bei diesem und den folgenden Experimenten ist besonderer Wert auf die klare Unterscheidung der verschiedenen Druckarten zu legen.
Mit dem Pitotrohr mißt man den Gesamtdruck. Er ist gleich der Summe aus Staudruck und statischem Druck.
Schließt man das Pitotrohr an ein Mikromanometer an und läßt auf das freie Ende des Manometerrohres den statischen Druck einwirken, dann wird die Differenz beider Drücke, der Staudruck, angezeigt.

Versuch

Man versieht einen zylindrischen Körper, dessen eine Stirnseite halbkugelförmig gestaltet ist, mit einer axialen Bohrung, die mit einem seitlich heraustretenden Rohr verbunden ist, und hält ihn mit der Rundung nach vorn in eine Strömung (Abb. 4.4.7./1). Verbindet man diese Sonde mit einem Mikromanometer, so kann man den Staudruck messen, wenn man auf den anderen Schenkel den statischen Druck einwirken läßt. Da dieser näherungsweise gleich dem Luftdruck ist, genügt zur Staudruckmessung eine einfache Verbindung des Pitotrohres mit dem Behälter des Mikromanometers, während der offene Schenkel unter dem Einfluß des Luftdrucks steht.

Bemerkung

Das Pitotrohr kann man aus Metall oder aus Holz anfertigen. Bei der Ausführung aus Holz kittet man ein Glasrohr oder Metallrohr für den Schlauchanschluß ein. Die Oberfläche der Sonde sollte möglichst glatt bearbeitet werden. Als Richtwerte für das Gerät werden empfohlen: Durchmesser 15 mm, Länge 10 cm, Durchmesser der Bohrung 4 mm.

4.4.8. Messung des statischen Druckes mit Hilfe einer Drucksonde [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Drucksonde
3. Mikromanometer (vgl. V 4.4.9. und Abb. 4.4.10./2)
4. Schlauchverbindung

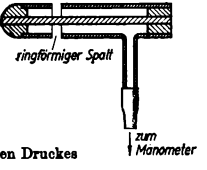


Abb. 4.4.8./1
Drucksonde zur Messung des statischen Druckes

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.4.7.!

Versuch

Die Drucksonde besteht aus einem rechtwinklig gebogenen, nach vorn durch eine Rundung geschlossenen Rohr, das in einem bestimmten Abstand vom Staupunkt einen ringförmigen Spalt besitzt (Abb. 4.4.8./1). Durch einen Schlauch ist die Drucksonde mit dem Behälter eines Mikromanometers verbunden. Hält man die Drucksonde mit der Rundung nach vorn in einen Luftstrom, so wird der statische Druck durch den Schlauch bis zum Mikromanometer übertragen. Läßt man auf den anderen, offenen Schenkel den Luftdruck wirken, so beobachtet man eine geringe Verschiebung des Flüssigkeitsfadens im schrägen Rohr des Manometers. Es besteht nur ein geringer Unterschied zwischen dem statischen Druck und dem Luftdruck (vgl. V 4.4.7.).

Bemerkung

Die Drucksonde kann man aus Metall herstellen. Ihr Durchmesser beträgt etwa 15 mm bis 20 mm, ihre Länge etwa 10 cm. Der ringförmige Spalt ist etwa 30 mm vom abgerundeten Ende entfernt und hat eine Breite von 2 mm. Die beiden Rohrstücke werden durch einen axial verlaufenden Bolzen miteinander verbunden. Es ist darauf zu achten, daß sich am ringförmigen Spalt die beiden Rohrstücke genau gegenüberstehen, so daß keine Stufe entsteht.

4.4.9. Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe eines Prandtlschen Staurohres [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Prandtlsches Staurohr
3. Mikromanometer
4. Schlauchverbindungen

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.4.7.!

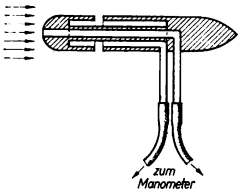


Abb. 4.4.9./1
Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit einem Prandtlschen Staurohr

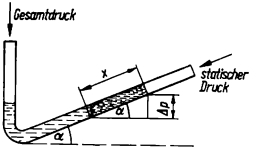


Abb. 4.4.9./2
Prinzip eines Mikromanometers zur Messung kleiner Druckdifferenzen

Versuch

Das Staurohr wird so in den Luftstrom gebracht, daß die Achse des Gerätes in der Strömungsrichtung liegt. Durch zwei Schlauchleitungen wird der Gesamtdruck auf den feststehenden Schenkel eines Mikromanometers, der statische Druck auf den neigbaren Schenkel übertragen (Abb. 4.4.9./1). Die Differenz beider Drücke wird durch eine Verschiebung des Flüssigkeitsfadens im geneigten Manometerrohr angezeigt und ergibt den Staudruck. Nach der Bernoullischen Gleichung ist die Strömungsgeschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\varrho}}$ · Über die Bedeutung der hierin auftretenden Größen und über die bei ihrer Messung zu verwendenden Einheiten s. MB 4.0.4.

Ist der schräge Schenkel des Manometers um den Winkel α gegen die Horizontale geneigt, so ist bei einer Manometerablesung x die Druckdifferenz

$$\Delta p = \varrho_1 \cdot g \cdot x \cdot \sin\alpha ,$$

wobei ϱ_1 die Dichte der Manometerflüssigkeit ist (vgl. Abb. 4.4.9./2). In dieser Gleichung wird ϱ_1 in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und x in m angegeben.

4.4.10. Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe einer Venturidüse [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Venturidüse
3. Mikromanometer
4. Winkelmesser mit Lot
5. Innentaster
6. Meßstab
7. Schlauchverbindungen

Methodischer Hinweis

Bei der Auswertung dieses Experiments wird die Kenntnis der Bernoullischen Gleichung als bekannt vorausgesetzt. Man nennt sie den Schülern hier in der Form: „Die Summe von statischem Druck und Staudruck ist in einem horizontalen Strömungssystem konstant."

Setzt man für den Staudruck den Ausdruck $\frac{\varrho}{2} \cdot v^2$, so kann man auch folgern:

„Der statische Druck in strömenden Flüssigkeiten oder Gasen ist kleiner als in ruhenden, und zwar um so kleiner, je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist."

Versuch

Will man die Strömungsgeschwindigkeit eines Luftstroms mit Hilfe einer Venturidüse bestimmen, so muß man vorher ihre lichten Weiten an beiden Druckmeßstellen ermitteln. Hierzu benutzt man einen Innentaster und einen Meßstab (Abb. 4.4.10./1). Die Düse wird danach an einem Stativ befestigt und mit Schlauchverbindungen an ein Mikromanometer angeschlossen. Zur Erhöhung der Meßgenauigkeit neigt man die Skale des Manometers; der gewählte Neigungswinkel α wird mit Hilfe eines mit einem Lot versehenen Winkelmessers festgestellt und die Nullage abgelesen. Bringt man die Venturidüse in einen Luftstrom, so zeigt der Wasser-

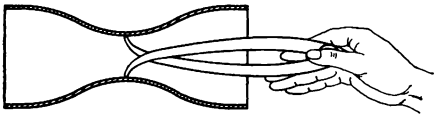


Abb. 4.4.10./1
Messung der lichten Weiten einer Venturidüse

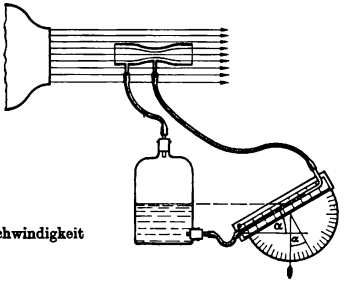


Abb. 4.4.10./2
Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mittels einer Venturidüse

spiegel des Manometers eine Verschiebung um x an (Abb. 4.4.10./2). Den Druckunterschied Δp berechnet man nach der Gleichung

$$\Delta p = \varrho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot x \cdot \sin\alpha \,.$$

Nach der Bernoullischen Gleichung

$$p_1 + \frac{\varrho}{2} \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{\varrho}{2} \cdot v_2^2$$

ergibt sich für die Druckdifferenz

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{\varrho}{2} \cdot v_2^2 - \frac{\varrho}{2} \cdot v_1^2$$

oder

$$\Delta p = \frac{\varrho}{2} \cdot v_1^2 \cdot \left(\frac{v_2^2}{v_1^2} - 1 \right).$$

Hierin ist ϱ die Dichte der Luft. Aus der Kontinuitätsgleichung

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

folgt

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2}.$$

Somit ist

$$\Delta p = \frac{\varrho}{2} \cdot v_1^2 \cdot \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right).$$

Diese Gleichung bietet die Möglichkeit, die Strömungsgeschwindigkeit v_1 zu ermitteln:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\varrho \cdot \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1\right)}} .$$

Beispiel

Bei einem Versuch wurden gemessen:

$$d_1 = 31{,}8 \text{ mm}, \qquad d_2 = 23{,}0 \text{ mm}.$$

Daraus wurden die Strömungsquerschnitte A_1 und A_2 berechnet. Es ergab sich

$$A_1 = \pi \frac{d_1^2}{4} = \pi \frac{31{,}8^2}{4} \text{ mm}^2 \approx 795 \text{ mm}^2,$$

$$A_2 = \pi \frac{d_2^2}{4} = \pi \frac{23{,}0^2}{4} \text{ mm}^2 \approx 416 \text{ mm}^2 .$$

An der Manometerskale wurde eine Verschiebung des Wasserspiegels um

$$x = 21{,}5 \text{ mm} = 0{,}0215 \text{ m}$$

abgelesen. Der Neigungswinkel α betrug 30°. Danach war

$$\Delta p = \varrho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot x \cdot \sin\alpha = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9{,}81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0{,}0215 \text{ m} \cdot 0{,}5$$
$$\approx 105 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \approx 105 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \approx 105 \text{ Pa} .$$

Für ϱ_{Luft} wurde der gerundete Wert 1,29 kg · m^{-3} eingesetzt. Somit ergab sich

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 105 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}}{1{,}29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}\left[\left(\frac{795}{416}\right)^2 - 1\right]}} \approx 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} .$$

Bemerkungen

1. Die in dem Meßbeispiel angegebenen Meßwerte wurden als Mittelwerte aus mehreren Einzelmessungen bestimmt.
2. Bezüglich der zu verwendenden Einheit vgl. MB 4.0.4.!

4.4.11. Festlegen der Skale eines Schalenkreuzanemometers [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Schalenkreuzanemometer
3. Prandtlsches Staurohr
4. Mikromanometer
5. Schlauchverbindungen

Methodischer Hinweis

Zur Erklärung der Wirkungsweise des Anemometers kann man die Beobachtungen aus V 4.3.1. bis V 4.3.3. heranziehen.

Versuch

Man legt die Skale eines Schalenkreuzanemometers fest, indem man die Anzeige des Anemometers mit den Meßwerten eines Prandtlschen Staurohres vergleicht. Zu diesem Zwecke werden das Anemometer und das Staurohr in den Luftstrom des Luftstromerzeugers gebracht, und zwar an Stellen, wo die Geschwindigkeiten gleich groß sind, jedoch so, daß sie sich gegenseitig nicht beeinflussen können. Die Geschwindigkeit des Luftstromes bestimmt man mit Hilfe des Prandtlschen Staurohres nach V 4.4.9.
Mit dem auf diese Weise geprüften Anemometer können die Geschwindigkeiten in einem von einer Luftdusche erzeugten Luftstrahl in verschiedenen Abständen von der Düse näherungsweise gemessen werden.
Es ergaben sich bei einem Versuch:
in einer Entfernung von 1 m von der Düse die Geschwindigkeit 92 cm · s^{-1},
in einer Entfernung von 2 m von der Düse die Geschwindigkeit 79 cm · s^{-1}.

Bemerkung

Es ist darauf zu achten, daß bei der Messung alle Schalen des Anemometers im Luftstrom liegen.

4.4.12. Messung der Durchflußmenge mit Hilfe einer Ringblende [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. 2 Ofenrohre (Länge etwa 25 cm)
3. kreisförmige Metallscheibe (∅ um 10 cm größer als der Rohrdurchmesser) mit einer zentrisch angebrachten kreisförmigen Öffnung, deren Durchmesser halb so groß wie der Rohrdurchmesser ist
4. U-Rohr-Manometer mit Wasserfüllung
5. Prandtlsches Staurohr
6. Schlauchverbindungen
7. Kitt
8. Drehzahlmesser

Methodischer Hinweis

Die Versuchsanordnung entspricht im Prinzip dem in der Industrie angewandten Verfahren der Durchflußmengenmessung in Rohrsystemen. Man bestimmt auf diese Weise die Mengen strömender Flüssigkeiten und Gase besonders in der chemischen Industrie. Die besondere Bedeutung des Experiments liegt deshalb auf dem Gebiet der polytechnischen Bildung.

Herstellen der Versuchsanordnung

Zwei Ofenrohre werden an einander zugekehrten Enden, etwa 2 cm von diesen entfernt, mit je einer Bohrung von 2 mm Durchmesser versehen, von denen der Bohrgrat entfernt wird. Auf der Rohrwand wird dann über jeder Bohrung je ein Schlauchstutzen aus Messingrohr aufgelötet. Sodann wird die Kreisscheibe als Ringblende mittels einer Parallelmuffe in vertikaler Stellung an einem Stativ befestigt und zwischen die beiden vorbereiteten Rohrstücke gebracht, die vorher horizontal ge-

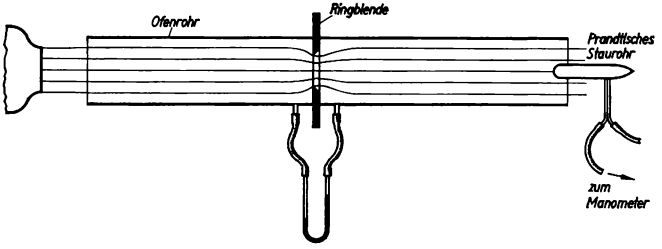


Abb. 4.4.12./1
Bestimmung der Durchflußmenge mit Hilfe einer Ringblende

lagert werden. Die Rohrenden sollen die Kreisscheibe möglichst dicht berühren. Die verbleibenden Fugen werden mit Papierstreifen gut verklebt und mit Kitt gedichtet (Abb. 4.4.12./1).
Die beiden Schenkel eines U-Rohr-Manometers werden durch Gummischläuche mit den Stutzen an den Rohren verbunden. Der Luftstromerzeuger wird vor dem Rohr aufgestellt und am anderen Rohrende ein Prandtlsches Staurohr angebracht.

Versuch

Der Luftstromerzeuger wird in Tätigkeit gesetzt und der an der Blende auftretende Druckabfall gemessen.
Daraus wird nach der Gleichung

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p)}{\varrho}}$$

die Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet. Zur Kontrolle wird sie am Rohrende mit einem Prandtlschen Staurohr gemessen. Bildet man das Produkt aus der Geschwindigkeit v und dem Rohrquerschnitt A, so erhält man die Stromstärke Q (Durchflußmenge)

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p)}{\varrho}} \; .$$

Der Versuch wird bei veränderten Drehzahlen des Motors wiederholt. Man ermittelt jedesmal den Druckabfall und daraus die mittlere Strömungsgeschwindigkeit sowie die dazugehörige Durchflußmenge. Trägt man zusammengehörige Werte der Drehzahlen und der Durchflußmengen in ein Koordinatensystem ein, so erhält man ein Diagramm, aus dem man die zu jeder Drehzahl gehörende Durchflußmenge entnehmen kann.

Bemerkung

Statt der Ofenrohre können auch Papprohre verwendet werden, in die man die Schlauchanschlußstutzen einklebt.

4.4.13. Messung des statischen Druckes in einer Wasserstrahlpumpe

1. Wasserstrahlpumpe
2. U-Rohr-Manometer mit Quecksilberfüllung (Länge 80 cm)
3. Dreiwegehahn
4. Schlauchverbindungen
5. Stoppuhr
6. Meßzylinder (1000 ml)
7. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberzange, Quecksilberbrett, Trichter
8. Barometer

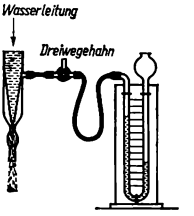


Abb. 4.4.13./1
Messung des Druckes in einer Wasserstrahlpumpe

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment dient in erster Linie dazu, die Leistung einer Wasserstrahlpumpe zu ermitteln, um bei ihrer Benutzung zum Evakuieren eines Gefäßes den zu erwartenden Druck abschätzen zu können.

Versuch

Nach Anschluß der Wasserstrahlpumpe an die Wasserleitung wird ein U-Rohr-Manometer mit Quecksilberfüllung durch einen Gummischlauch über einen Dreiwegehahn mit dem Saugstutzen der Pumpe verbunden. Der in der Pumpe entstehende Unterdruck wird am Manometer abgelesen (Abb. 4.4.13./1). Einer Höhendifferenz der Quecksilberspiegel im U-Rohr-Manometer von 1 mm entspricht ein Druck von 133,3224 Pa.
Da der statische Druck in der Pumpe mit zunehmender Geschwindigkeit des Wassers immer weiter sinkt, ist es zweckmäßig, die Abhängigkeit des Unterdruckes von dem die Pumpe je Sekunde durchfließenden Wasservolumen zu bestimmen und die Ergebnisse grafisch darzustellen. Dieses je Sekunde austretende Wasservolumen wird mit Hilfe eines Meßzylinders und einer Stoppuhr ermittelt.

Meßbeispiel

Atmosphärischer Luftdruck $p_a = 1{,}013 \cdot 10^2\,\text{kPa}$

Durchflußmenge in $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Höhendifferenz der Quecksilberspiegel in mm	Druckdifferenz Δp in kPa	statischer Druck $p_1 = p_a - \Delta p$ in kPa
74	605	$0{,}807 \cdot 10^2$	$0{,}206 \cdot 10^2$
77	628	$0{,}837 \cdot 10^2$	$0{,}176 \cdot 10^2$
81	640	$0{,}853 \cdot 10^2$	$0{,}160 \cdot 10^2$

Bemerkungen

1. Vor dem Schließen des Wasserhahnes muß über den Dreiwegehahn ein Druckausgleich am Manometer herbeigeführt werden, da sonst Wasser in das Manometer gedrückt wird.

2. Statt des langen, offenen Manometers kann man auch ein geschlossenes mit Quecksilberfüllung (Barometerprobe, vgl. V 2.2.9.) benutzen. Seine Schenkellänge braucht dann nur etwa 20 cm bis 30 cm zu betragen.
3. Es ist ratsam, zwischen das Manometer und die Pumpe ein Sicherheitsgefäß einzuschalten (Abb. 2.0.5./2), um zu verhindern, daß Quecksilber verspritzt oder Wasser in das Manometer eindringt. Um das Druckminimum zu erreichen, dauert es dann allerdings länger.

4.4.14. Druckmessung an einem Zerstäuber [SE]

1. Flüssigkeitszerstäuber
2. U-Rohr-Manometer mit Wasserfüllung
3. Schlauchverbindung

Methodischer Hinweis

Die Wirkungsweise des Zerstäubers kann man mit Hilfe der *Bernoullischen Gleichung* erklären (vgl. V 4.4.5. und V 4.4.10.).

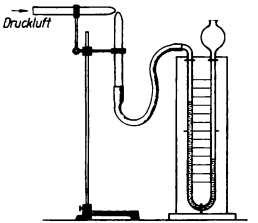


Abb. 4.4.14./1
Druckmessung an einem Zerstäuber

Versuch

Das Saugrohr eines Flüssigkeitszerstäubers wird durch einen Gummischlauch mit dem einen Schenkel eines wassergefüllten U-Rohr-Manometers verbunden (Abb. 4.4.14./1). Der beim Anblasen des Zerstäubers erzielte Unterdruck steigt mit zunehmender Geschwindigkeit des Luftstroms.

4.5. Aerodynamisches und hydrodynamisches Paradoxon

4.5.1. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit einem selbstgefertigten Gerät

Gerät zum Nachweis des aerodynamischen Paradoxons ⑧, dazu erforderliches Material:
Kreisscheibe aus Sperrholz (⌀12 cm, Dicke 3 mm)
durchbohrter Gummistopfen oder Korken
Glasrohr (⌀5 mm, Länge 15 cm)
Kreisscheibe aus Karton (⌀12 cm)
kleine Nägel, Gummischlauch, Alleskleber

Methodischer Hinweis

Die Versuche zum aerodynamischen Paradoxon erwecken erfahrungsgemäß das ungeteilte Interesse aller Schüler. Man kann dieses Überraschungsmoment zur Problemstellung bei der Erarbeitung der *Bernoullischen Gleichung* (vgl. V 4.4.5. und V 4.4.9.) benutzen.

Anfertigung des Gerätes

Man schneidet aus einer 3 mm dicken Sperrholzplatte eine Kreisscheibe mit einem Durchmesser von etwa 12 cm und versieht sie in der Mitte mit einem 15 mm weiten Loch. In dieses paßt man einen durchbohrten Korken ein und kittet ihn mit Alleskleber in der Öffnung fest. In die Bohrung steckt man ein Glasrohr. Die eingeführte Endfläche des Korkens und die Glasröhre sollen bündig mit der Rückseite der Kreisscheibe abschließen. Aus steifem Karton schneidet man eine Kreisscheibe mit gleichem Durchmesser und versieht sie 4 mm vom Rande entfernt mit drei gleichmäßig am Umfange verteilten Löchern mit 3 mm Durchmesser. Durch diese führt man drei dünne Nägel und treibt sie durch Hammerschläge ein Stück in die Sperrholzscheibe ein, so daß die Kartonscheibe leicht längs der Nägel verschiebbar ist. Um ein Herabgleiten über die Nagelkappen zu verhüten, legt man drei kleine Pappscheiben vor (Abb. 4.5.1./1).

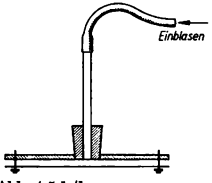


Abb. 4.5.1./1
Selbstgefertigtes Gerät zum Nachweis des aerodynamischen Paradoxons

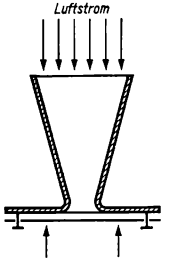


Abb. 4.5.1./2
Gerät zum Nachweis des aerodynamischen Paradoxons

Versuch

Man schließt an das Glasrohr einen Schlauch an und hält das Gerät mit der Kartonscheibe nach unten. Bläst man mit dem Munde kräftig in den Schlauch, so wird die Kartonscheibe nicht von der Sperrholzscheibe abgedrängt, sondern legt sich überraschenderweise flach an diese an.

Bemerkung

Zum Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit dem in Abbildung 4.5.1./2 wiedergegebenen industriell gefertigten Gerät hält man dieses in den Luftstrom eines lotrecht nach unten gerichteten kleinen Luftstromerzeugers.

4.5.2. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit einer Luftdusche und einem selbstgefertigten Gerät

1. Luftdusche
2. Gerät zum Nachweis des aerodynamischen Paradoxons (S), dazu erforderliches Material:
   Pappdeckel mit Rand (etwa 15 cm × 20 cm)
   Papprohr (Länge etwa 5 cm), auf das Strahlrohr der Luftdusche passend
   Papierblatt (etwas kleiner als der Pappdeckel)
   Holzleiste (1 cm × 1 cm × 25 cm), kleine Nägel, Alleskleber

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.5.1.!

Versuch

Man schneidet in einen Pappdeckel eine kreisförmige Öffnung von gleichem Durchmesser wie das Strahlrohr der Luftdusche und klebt nach der Außenseite zu aus Pappe einen Rohrstutzen an, in den das Strahlrohr gerade hineinpaßt. An den Deckel nagelt man eine dünne Holzleiste, damit man ihn an einem Stativ befestigen kann. Die Luftdusche wird so an dasselbe Stativ geklemmt, daß sein Luftstrom lotrecht nach unten gerichtet ist und seine Öffnung in einer Ebene mit dem Deckel liegt (Abb. 4.5.2./1). Dann nähert man mit der anderen Hand das Papierblatt. Es wird durch den Luftstrom an den Pappdeckel angesaugt und festgehalten. Der Rand am Pappdeckel verhindert das seitliche Abgleiten des Blattes.

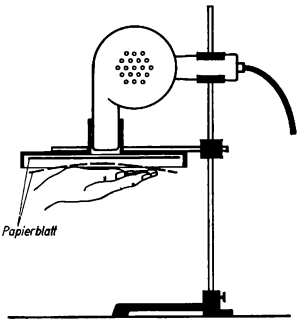


Abb. 4.5.2./1
Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit Hilfe einer Luftdusche und eines Papierblattes

Bemerkung

Der Versuch läßt sich auch ohne Luftdusche durchführen, indem man selbst durch das Loch im Pappdeckel bläst. Der Vorzug dieser Variante liegt in der Einfachheit.

4.5.3. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit einem Glastrichter [SE]

1. Glastrichter
2. Papierkegel, der möglichst genau in den Trichter paßt
3. Gummischlauch

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.5.1.!

Versuch

Ein Glastrichter mit einem eingesetzten Papierkegel wird mit der Trichteröffnung nach oben gehalten. An das Trichterrohr wird ein Gummischlauch angeschlossen, durch den kräftig geblasen wird. Wider Erwarten wird der Kegel nicht aus dem Trichter geschleudert, sondern führt nur kleine, vibrierende Bewegungen aus. Wird der Trichter mit der Öffnung nach unten gehalten, so bleibt der Kegel beim Blasen durch das Rohr im Trichter haften, wobei er wiederum in vibrierende Bewegung gerät (Abb. 4.5.3./1).

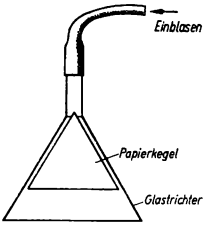


Abb. 4.5.3./1
Glastrichter mit Papierkegel zum Nachweis des aerodynamischen Paradoxons

Bemerkung

Der Versuch läßt sich auch mit Hilfe eines Tischtennisballs durchführen, den man in den Trichter legt. Auch er wird beim Hineinblasen in das Trichterrohr nicht herausgeschleudert, sondern vollführt nur eine vibrierende Bewegung. Hält man den Trichter nach unten, so wird der Ball beim Hineinblasen frei schwebend in der Nähe des Trichterrohres gehalten, wobei er ebenfalls stark vibriert. Wird der Luftstrom unterbrochen, so fällt der Ball herab.

4.5.4. Nachweis des hydrodynamischen Paradoxons

1. Aquarienglas
2. Gerät zur Demonstration des aerodynamischen Paradoxons
3. Becherglas

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment sollte erst ausgeführt werden, wenn den Schülern das aerodynamische Paradoxon bereits bekannt ist. Trotzdem wirkt es auf die Schüler überraschend, weil sie diese Wirkung beim Wasser nicht erwarten.

Versuch

Das in der Abbildung 4.5.4./1 wiedergegebene Gerät ist eigentlich für den Nachweis des aerodynamischen Paradoxons gedacht. Man kann es aber auch zum Nachweis des hydrodynamischen Paradoxons verwenden. Man stellt das Gerät so in Wasser, wie es Abb. 4.5.4./1 zeigt. Gießt man Wasser in den Trichter, so bewegt sich die untere Platte nach oben.

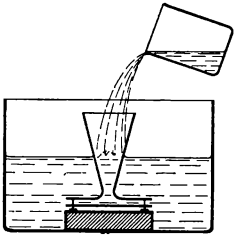


Abb. 4.5.4./1
Nachweis des hydrodynamischen Paradoxons

4.5.5. Versuch zum aerodynamischen Paradoxon

1. Kleiner Luftstromerzeuger oder Luftdusche
2. Rundholz (Ø 1 cm, Länge 15 cm)
3. 3 lange Nägel
4. 2 Streifen aus Karton oder Blech (6 cm × 15 cm)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 4.5.1.!
2. Dieses Experiment ist auch sehr gut zur Wiederholung der Bernoullischen Gleichung geeignet. Man führt es vor und fordert die Schüler auf, die Ursachen zu erklären.

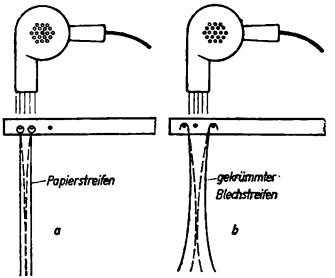


Abb. 4.5.5./1
Verhalten zweier Streifen unter dem Einfluß eines Luftstroms

Versuch

Die beiden Streifen aus Karton oder Blech biegt man jeweils an einem Ende um, so daß eine enge Röhre entsteht. Die so vorbereiteten Streifen steckt man auf zwei Nägel, die man vorher im Abstand von etwa 15 mm in einen Holzstab geschlagen hat. Bläst man von oben her mit einer Luftdusche oder mit einem kleinen Luftstromerzeuger zwischen den beiden Streifen hindurch, so nähern sie einander (Abb. 4.5.5./1).

4.5.6. Versuch zum aerodynamischen und hydrodynamischen Paradoxon mit zwei Löffeln

1. 2 Eßlöffel (möglichst aus Aluminium)
2. Faden
3. Luftdusche oder kleiner Luftstromerzeuger
4. Gummischlauch

Methodische Hinweise

1. Bei der Auswertung dieses Experiments kann man ein Problem der Schiffahrt erörtern. So werden in einem Fluß zwei dicht aneinander vorüberfahrende, nebeneinander fahrende oder ankernde Schiffe gegeneinandergedrückt.
2. Der Versuch regt die Schüler zu eigenem Experimentieren an.



Abb. 4.5.6./1
Nachweis des hydrodynamischen Paradoxons mit zwei Löffeln

Versuch

Man hängt zwei Eßlöffel an Fäden bifilar (zweifädig) so auf, daß ihre gewölbten Flächen einander zugekehrt sind (Abb. 4.5.6./1). Der Abstand der gewölbten Flächen soll etwa 2 cm betragen. Bläst man mit einer Luftdusche von oben her zwischen den Löffeln hindurch oder läßt man einen Wasserstrahl hindurchfließen, so nähern die Löffel einander wie die Streifen im V 4.5.5.

4.5.7. Verhalten einer Stoffsonde am Rande eines Luftstroms

1. Luftstromerzeuger
2. Stoffsonde Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   leichter Stoff (5 cm × 20 cm)
   2 Holzspeiler
   Klebstoff

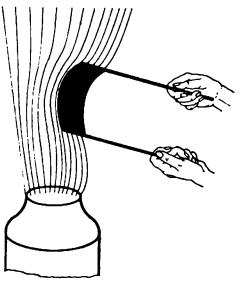


Abb. 4.5.7./1
Stoffsonde am Rande eines Luftstromes

Versuch

Man stellt eine Stoffsonde her, indem man die kurzen Seiten eines rechteckigen Stoffstückes an zwei Speilern festklebt. Der Luftstromerzeuger ist mit seinem Luftstrom lotrecht nach oben gerichtet. Dann nähert man die Stoffsonde von der Seite dem Luftstrom, wie es die Abb. 4.5.7./1 zeigt. Man achtet darauf, daß die Luft nur die eine Seite des Stoffes bestreicht. Zuerst wölbt sich der Stoff zu dem Luftstrom hin. Infolge dieser Ausbuchtung bildet sich die Unstetigkeitsfläche zwischen der ruhenden Luft auf der einen Seite des Stoffes und dem bewegten Luftstrom auf der anderen Seite noch stärker aus. Es bilden sich einzelne Wirbel. Der Stoff fängt an zu flattern.

Bemerkung

Auf ähnliche Weise kommt durch Wirbelbildung auch das Flattern der Fahnen im Wind zustande.

4.5.8. Verhalten eines Pappzylinders beim Annähern an einen Luftstrom

1. Luftdusche oder kleiner Luftstromerzeuger
2. Papierblatt (etwa 15 cm × 15 cm)
3. Klebstoff
4. dünner Stab (Holzspeiler)

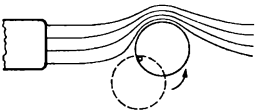


Abb. 4.5.8./1
Ein Papierzylinder wird in den Luftstrom einer Luftdusche gezogen

Methodischer Hinweis

Das Verhalten des Papierzylinders kann mit der Bernoullischen Gleichung erklärt werden. Dazu erläutert man an einer Tafelskizze nach Abb. 4.5.8./1 den Stromlinienverlauf. Nach der Kontinuitätsgleichung (vgl. V 4.4.1. und V 4.4.2.) kann man daraus auf eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit an der Zylinderoberseite schließen.

Versuch

Ein Papierblatt wird zu einer zylindrischen Röhre von etwa 15 cm Länge und 4 cm Durchmesser zusammengeklebt. Man hängt die Röhre über einen dünnen Stab und nähert sie von unten her dem horizontal gerichteten Luftstrom einer Luftdusche quer zur Strahlrichtung. Sobald der Zylinder mit seiner Oberseite in den Strahl kommt, wird er plötzlich gehoben (Abb. 4.5.8./1).

4.5.9. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons

1. Luftdusche
2. Tischtennisball
3. gewölbte Blechscheibe oder großes Becherglas

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 4.5.8.1 Dieser Hinweis gilt sinngemäß auch für den Tischtennisball.
2. Der Versuch 2 eignet sich als Überraschungsversuch zur Problemstellung bei der Erarbeitung des *aerodynamischen Auftriebs*.

Versuch 1

Eine Luftdusche wird so an einem Stativ befestigt, daß sein Strahlrohr lotrecht nach oben gerichtet ist. Auf die Strahlrohröffnung wird ein Tischtennisball gelegt und danach die Luftdusche eingeschaltet. Der Tischtennisball wird im Luftstrom gehoben und schwebt in einer Entfernung von einigen Zentimetern über der Strahlrohröffnung. Die dynamische Druckkraft der strömenden Luft ist dann gleich der Gewichtskraft des Balles (Abb. 4.5.9./1).

Versuch 2

Die Luftdusche, in deren Luftstrom der Tischtennisball schwebt, wird langsam geneigt, bis sie mit der Horizontalen einen Winkel von etwa 45° bildet. Der Tischtennisball entfernt sich um einige Zentimeter von der Strahlrohröffnung und schwebt weiterhin an der Unterseite des Strahles.
Die am Tischtennisball wirkenden Kräfte sind aus Abb. 4.5.9./2 zu ersehen.

Versuch 3

Nähert man dem im schräg aufwärts gerichteten Luftstrom schwebenden Tischtennisball von oben her eine gewölbte Blechplatte, so wird zwischen der Wölbung der Platte und dem Ball die Strömungsgeschwindigkeit noch weiter erhöht und damit der statische Druck verkleinert (Abb. 4.5.9./3). Als Folge davon wird der



Abb. 4.5.9./1
Ein im aufwärts gerichteten Luftstrom einer Luftdusche schwebender Tischtennisball
F_d dynamische Druckkraft,
F_g Gewichtskraft des Tischtennisballes

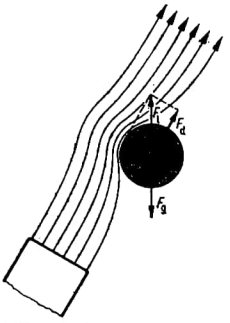


Abb. 4.5.9./2
Kräfte an einem im Luftstrom schwebenden Tischtennisball bei geneigtem Luftstrom
F_a Auftriebskraft,
F_d dynamische Druckkraft,
F_g Gewichtskraft des Tischtennisballs,
F_1 Luftkraft

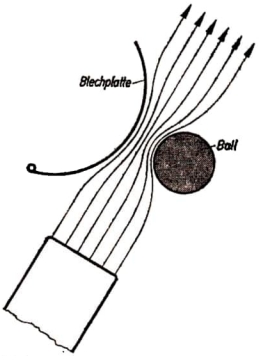


Abb. 4.5.9./3
Bei der Annäherung einer gewölbten Platte wird ein schwebender Tischtennisball im Luftstrom gehoben.

Ball gehoben und berührt die Platte. Dabei wird der Luftstrom unterbrochen; der Ball fällt zurück. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch; der Ball schlägt durch selbsttätige Stromunterbrechung wie der Klöppel einer Glocke gegen die Platte.

Bemerkung

An Stelle der gewölbten Blechplatte eignet sich sehr gut auch ein Becherglas mit einem Durchmesser von etwa 10 cm.
So wie im Versuch 1 kann man einen Tischtennisball auch im Wasserstrahl eines Springbrunnens zum Schweben bringen. Wegen des herumspritzenden Wassers eignet sich der Versuch aber nicht für den Experimentierraum.

4.5.10. Kraftmessung an einer im Luftstrom schwebenden Gummiblase

1. Luftstromerzeuger
2. Gummiblase (Durchmesser etwas größer als der der Düse des Luftstromerzeugers)
3. Pappe (etwa 20 cm × 30 cm)
4. Kraftmesser
5. dünner Bindfaden

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.5.8.! Dieser Hinweis gilt sinngemäß auch für die Gummiblase.

Versuche 1 bis 3

Mit einem Luftstromerzeuger und einer Gummiblase können die gleichen Versuche ausgeführt werden, wie sie in V 4.5.9. für eine Luftdusche und einen Tischtennisball beschrieben sind. Im Versuch 3 kann man auch ein gewölbtes Stück Pappe statt der Blechplatte verwenden, weil dieses den Größenverhältnissen besser entspricht.

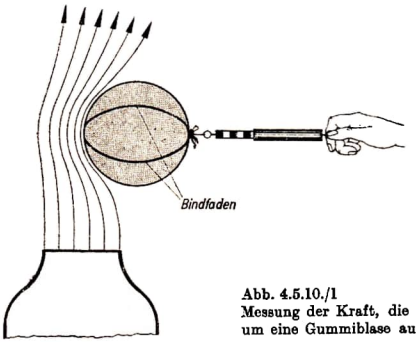


Abb. 4.5.10./1
Messung der Kraft, die erforderlich ist, um eine Gummiblase aus dem Luftstrom zu ziehen

Versuch 4

Die Kraft, mit der die Gummiblase in den Luftstrom gezogen wird, kann mit einem Kraftmesser gemessen werden. Zu diesem Zweck befestigt man die Blase mit einem Bindfaden am Kraftmesser und nähert sie dem vertikal nach oben gerichteten Luftstrom. Man zieht sie langsam in horizontaler Richtung aus der Strömung, wobei man die erforderliche Kraft am Kraftmesser abliest (Abb. 4.5.10./1).

Bemerkung

Der Meßbereich muß den Versuchsbedingungen angepaßt sein. Bei Verwendung des kleinen Luftstromerzeugers liegen die zu messenden Kräfte im Bereich bis 1 N.

4.5.11. Verhalten von mehreren im Luftstrom schwebenden Luftballons

1. Luftdusche oder kleiner Luftstromerzeuger 2. 4 Luftballons 3. dünner Bindfaden

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.5.8.! Dieser Hinweis gilt sinngemäß auch hier.

Versuch

Ähnlich wie in V 4.5.9. mit einem Tischtennisball kann das aerodynamische Paradoxon mit einem Luftballon gezeigt werden. Besonders wirkungsvoll ist dieser Versuch auch deshalb, weil der Luftballon infolge seiner Größe und seines geringen Gewichts in großer Entfernung von der Düsenöffnung schwebt. Außerdem bietet diese Versuchsanordnung die Möglichkeit, den Versuch mit mehreren Ballons gleichzeitig durchzuführen.

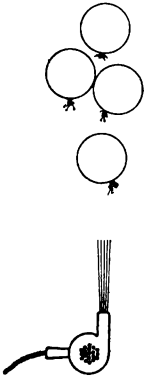


Abb. 4.5.11./1
Vier Luftballons im Luftstrom einer Luftdusche

Man bringt nacheinander zwei Luftballons in den aufwärts gerichteten Luftstrom. Trotz ihres großen Querschnitts schweben beide im Luftstrom, der aus dem engen Strahlrohr der Luftdusche kommt. Sie bewegen sich regellos umeinander und schweben zeitweise über- oder nebeneinander. Im letzteren Falle stoßen sie mehrmals gegeneinander, was auf die Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeit zwischen ihnen zurückzuführen ist (vgl. V 4.5.5., V 4.5.6. und V 4.5.9.). Noch verblüffender wirkt es, wenn man einen dritten und sogar einen vierten Luftballon in die Strömung bringt (Abb. 4.5.11./1).

Bemerkungen

1. Der Versuch kann auch mit einem Luftstromerzeuger ausgeführt werden, doch muß man in diesem Falle entweder mit geringer Strömungsgeschwindigkeit arbeiten oder die Ballons mit kleinen Hakenkörpern beschweren.
2. Besonders eindrucksvoll ist dieser Versuch, wenn man einen mit einigen Hakenkörpern beschwerten Luftballon in einem schräg aufwärts gerichteten Luftstrom zum Schweben bringt.

4.5.12. Nachweis der Reibung im freien und im gebündelten Luftstrom [SE]

1. Luftdusche oder kleiner Luftstromerzeuger
2. Tischtennisball
3. Papprohr (∅ etwas größer als der Durchmesser des Tischtennisballes, etwa 55 mm, Länge etwa 1 m)

Methodische Hinweise

1. Zur Erklärung dieser Erscheinung vergleiche V 4.1.6.!
2. Das Rohr zweigt einen Teil des Luftstromes ab. Die Reibung an der Pappwand ist so gering, daß an beiden Enden des Rohres fast derselbe Druck herrscht. Strömt dagegen ein Luftstrom frei in den Raum, so findet eine Verbreiterung des Strahles statt. Die Grenzschicht zwischen dem ruhenden und dem bewegten deformierbaren Medium ist verwirbelt, die Reibung ist in diesem Falle größer. Man kann das Experiment deshalb zum Anlaß nehmen, um mit den Schülern über den Energietransport in Strömungen zu sprechen. Dieses Problem spielt in der Technik eine große Rolle.

Versuch

Eine Luftdusche wird an einem Stativ so befestigt, daß ihr Luftstrom lotrecht nach oben gerichtet ist. Wie in V 4.5.9. läßt man einen Tischtennisball über der Öffnung

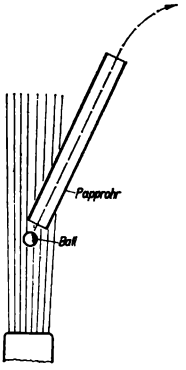


Abb. 4.5.12./1
Ball im gebündelten Luftstrom

der Luftdusche schweben. Man regelt den Luftstrom so, daß sich der Ball gerade über der Öffnung einstellt. Hält man nun ein Papprohr im Winkel von annähernd 70° über den Ball, wie es Abb. 4.5.12./1 zeigt, so fliegt er durch das Rohr hindurch. Hält man den Ball über die obere Rohröffnung, so bleibt er dort schweben.

5. Strömungsvorgänge am Flugzeug

5.0. Methodische Bemerkungen

5.0.1. Voraussetzung zum Verständnis der am Flugzeug wirkenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten ist die Kenntnis des Strömungsverlaufes um den Tragflügel. Dazu sind die Experimente V 5.1.1. bis V 5.1.4. geeignet. Besonders eindrucksvoll ist die Veranschaulichung des Strömungsfeldes mit dem Nebelströmungsgerät. Die Demonstration mit einer Strömungswanne, z. B. mit dem WSP 220 oder dem Tageslichtschreibprojektor, bietet aber ebenfalls sehr eindrucksvolle Bilder.
Die Tatsache, daß an der gewölbten Tragflügeloberseite die Stromfäden dichter verlaufen als an der flachen oder sogar schwach nach innen gewölbten Unterseite, kann mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung auf eine Einengung des Strömungsquerschnitts zurückgeführt werden. Daraus ist zu folgern, daß an der Tragflügeloberseite eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit auftreten muß.
In Fachbüchern findet man häufig die Darstellung, daß der primären Strömung in der Umgebung des Tragflügels eine *Zirkulationsströmung* überlagert wird (Abb. 5.0.1./1). Diese Darstellung kann in der Auswertung der entsprechenden Experimente herangezogen werden.
Aus der Erkenntnis, daß an der Tragflügeloberseite die Strömungsgeschwindigkeit erhöht und an der Unterseite verringert ist, kann nach der Bernoullischen Gleichung gefolgert werden, daß an der Oberseite ein statischer Unterdruck, ein *Soggebiet*, und an der Unterseite ein Überdruck, ein *Druckgebiet*, entstehen muß. Das wird in V 5.1.5. und V 5.1.6. experimentell nachgewiesen. Besonders V 5.1.6. ist als grundlegend anzusehen und sollte unter allen Umständen ausgeführt werden. Dabei ist kein industriell gefertigtes Tragflügelmodell erforderlich. Ein selbstgefertigtes Modell aus Holz liefert brauchbare Meßwerte.
Eine große Bedeutung kommt der Bestimmung des Widerstandes und des Auftriebes eines Tragflügels zu. Quantitative Versuche zu diesem Gegenstand bleiben vornehmlich den höheren Klassen vorbehalten. Für Messungen dieser Art eignet sich sehr gut die Drehmomentenwaage, brauchbar ist aber auch eine *Tafelwaage*. Mit ihr kann man nach V 5.1.9. und V 5.1.10. den Widerstand und den Auftrieb für verschiedene Anstellwinkel ermitteln. Es sollte aber darauf hingewiesen werden, daß die Balkenwaage hier zum Vergleich von Kräften benutzt wird. Die getrennte Messung von Widerstand und Auftrieb und die Änderung der Versuchsanordnung beim Übergang von der einen zur anderen Messung hält etwas auf. Man kann das Meßverfahren beschleunigen, indem man für alle Anstellwinkel erst in einer Meßreihe die Widerstände und dann in einer zweiten Meßreihe die Auftriebe bestimmt.

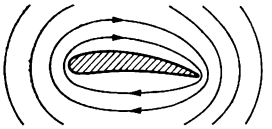


Abb. 5.0.1./1
Zirkulationsströmung um einen Tragflügel. Durch Überlagerung mit der primären Strömung entsteht das bekannte Strömungsbild

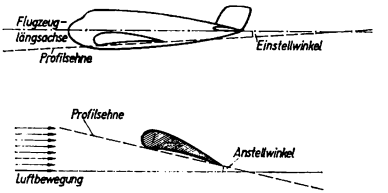


Abb. 5.0.1./2
Einstellwinkel und Anstellwinkel eines Tragflügels

Die Untersuchung des Widerstandes und des Auftriebs eines Tragflügels gipfelt in der Ableitung des *Polardiagramms*, in dem der Auftrieb als Funktion des Widerstandes in Abhängigkeit von den Anstellwinkeln dargestellt wird. V 5.1.12. soll Anregungen dazu geben, wie man die verhältnismäßig schwierigen Zusammenhänge methodisch am günstigsten behandelt. Man faßt zunächst die beiden Einzeldarstellungen des Widerstandes und des Auftriebs, die in V 5.1.9. und V 5.1.10. wiedergegeben sind, zu einer Zeichnung zusammen. Aus dieser kann man dann mühelos den Auftrieb als empirisch gefundene Funktion des Widerstandes entnehmen und grafisch darstellen.
Man kann zur Aufstellung des Polardiagramms auch eine Zweikomponentenwaage verwenden (V 5.1.13.). Dieses Gerät ist mit zwei getrennten Kraftmessern in horizontaler und vertikaler Richtung ausgestattet und bietet den Vorteil, daß man den Widerstand und den Auftrieb eines Tragflügelmodells unabhängig voneinander und gleichzeitig an zwei getrennten Skalen ablesen kann.
Bei dieser Gelegenheit sei darauf hingewiesen, daß man den Anstellwinkel eines Tragflügels von seinem Einstellwinkel zu unterscheiden hat. Unter dem Anstellwinkel versteht man den Winkel, den die Profilsehne des Tragflügels mit der Stromrichtung der anströmenden Luft bildet (Abb. 5.0.1./2). Der Einstellwinkel dagegen wird von der Profilsehne und der Flugzeuglängsachse eingeschlossen; er ist durch technische Eigenschaften des Flugzeuges bedingt. Beide Winkel brauchen bei den verschiedenen Flugzuständen nicht übereinzustimmen.

5.0.2. Ein Problem, das die Schüler unterer Klassen erfahrungsgemäß stark bebeschäftigt, ist die *Stabilität des Flugzeuges* und ihre Aufrechterhaltung durch besondere Steuerorgane. Der Abschnitt 5.2. bringt eine Reihe von Versuchen, die der Veranschaulichung dieses Gegenstandes dienen.
Im übrigen sollte man die Schüler darauf hinweisen, daß man das Flugzeug als Ganzes sehen muß. Die aerodynamischen, statischen und antriebstechnischen Forderungen, die man an ein Flugzeug zu stellen hat, zwingen in mancher Hinsicht zu einer Kompromißlösung.

5.0.3. In einem besonderen Abschnitt sind die Experimente zusammengefaßt, die zur Veranschaulichung der Wirkung einer Luftschraube dienen. Die ersten beiden Versuche dieses Komplexes sind Hilfsversuche. Sie werden i. a. nur im Zusammenhang mit anderen Experimenten (z. B. mit V 5.3.5.) gebraucht. Sie dienen zur Bestimmung der Drehzahl einer Luftschraube, ohne daß die Drehung durch das

Meßverfahren beeinflußt wird. Der Versuch 5.3.5. ist sehr zeitraubend und wird deshalb vorwiegend als Praktikumsversuch durchgeführt werden. Dafür ist er allerdings sehr gut geeignet.
Starkes Interesse erregen bei den Schülern erfahrungsgemäß Versuche zum Problem des *Hubschraubers*. Von den Versuchen hierzu ist besonders V 5.3.7. zu empfehlen, der wegen seiner Einfachheit von den Schülern gern als Anregung zum selbständigen Experimentieren aufgegriffen wird. An Stelle des selbstgefertigten Modells können hier auch die im Spielzeughandel erhältlichen verschiedenartigen Modelle benutzt werden, die auf dem gleichen Prinzip beruhen.

5.0.4. Ein kleiner Abschnitt mit nur drei Experimenten ist dem Strahltriebwerk gewidmet. Besonders eindrucksvoll sind Versuche mit einer Spielzeugrakete (V 5.4.3.). Sie wird mit Preßluft angetrieben und erreicht eine erstaunliche Höhe. Von Raketenversuchen mit chemischen Treibstoffgemischen muß abgeraten werden, weil bei ihrer Nachahmung durch die Schüler in der Vergangenheit bereits zahlreiche Unfälle aufgetreten sind.

5.1. Strömung um einen Tragflügel — Widerstand und Auftrieb des Tragflügels

5.1.1. Strömung um einen Tragflügel

1. Strömungswanne (Vgl. V 4.2.14. bis V 4.2.17.!)
2. Tragflügelprofil

Methodische Hinweise

Bei diesem Experiment sollen zwei Erkenntnisse gewonnen werden:
1. An der gewölbten Tragflügeloberseite ist die Strömungsgeschwindigkeit größer als an der flachen Unterseite (Kontinuitätsgleichung).
2. Bei allmählicher Vergrößerung des Anstellwinkels tritt bei einem bestimmten Grenzwinkel ein plötzlicher Qualitätsumschlag ein, die laminare Strömung schlägt in eine turbulente um.

Versuch

Man erzeugt in einer Strömungswanne eine laminare Strömung und stellt ein Tragflügelprofil in diese hinein. Man geht von dem Anstellwinkel Null aus und wählt dann einen kleinen positiven Anstellwinkel. Wird die Strömungsgeschwindigkeit allmählich gesteigert, so ist deutlich zu erkennen, daß die strömende Flüssigkeit an der nach außen gewölbten Oberseite des Tragflügels schneller vorübergleitet als an der flachen Unterseite. An der hinteren Kante des Tragflügels löst sich eine Wirbelstraße ab.
Geht man zu immer größeren Anstellwinkeln über, so schlägt bei einem bestimmten Grenzwinkel die laminare Strömung in eine turbulente um.

5.1.2. Untersuchung der Strömung um einen Tragflügel mit einer Flammensonde

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Tragflügelmodell mit Stiel
3. Flammensonde (siehe V 4.2.11.!)
4. punktförmige Lichtquelle (Physikleuchte ohne Kondensor)
5. Bildschirm

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll zeigen, daß bei allmählicher Vergrößerung des Anstellwinkels die laminare Strömung plötzlich in eine turbulente umschlägt (Qualitätsumschlag).

Versuch

Der Versuchsaufbau gleicht dem in V 4.2.11. beschriebenen. Als Widerstandskörper wird ein Tragflügelmodell benutzt. Man untersucht die Strömungsverhältnisse bei verschiedenen Anstellwinkeln. In der Projektion ist an der Schlierenbildung deutlich erkennbar, daß bei kleinen Anstellwinkeln die Strömung anliegt (Abb. 5.1.2./1a). Wird ein bestimmter Grenzwinkel überschritten, so reißt die Strömung an der Tragflügeloberseite ab; es bildet sich dort ein Wirbelgebiet. Die Schlieren sind an dieser Stelle unregelmäßig verwaschen (Abb. 5.1.2./1b).

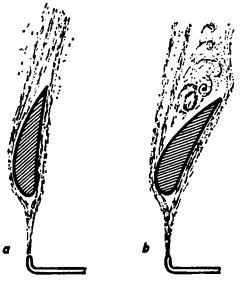


Abb. 5.1.2./1
Nachweis des Strömungsverlaufs an einem Tragflügel mittels einer Flammensonde.
a) Kleiner Anstellwinkel — die Strömung liegt an.
b) Großer Anstellwinkel — die Strömung reißt ab.

5.1.3. Untersuchung der Strömung um einen Tragflügel mit Hilfe eines Nebelströmungsgerätes

1. Nebelströmungsgerät mit Zubehör
2. Profilmodell eines Tragflügels

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 5.1.1.!

Versuch

Als Versuchskörper wird ein Tragflügelprofil eingesetzt. Man erkennt, daß die Stromfäden bei kleinen Anstellwinkeln wirbelfrei anliegen. Sie verlaufen an der gewölbten Tragflügeloberseite dichter als an der flachen Unterseite. Durch kurzzeitiges Unterbrechen der Nebelzufuhr kann man nachweisen, daß die Strömungsgeschwindigkeit an der Oberseite größer ist als an anderen Stellen der Kammer.

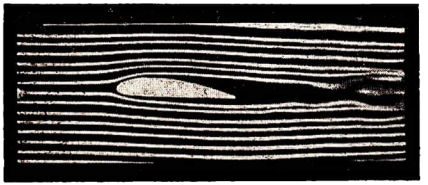
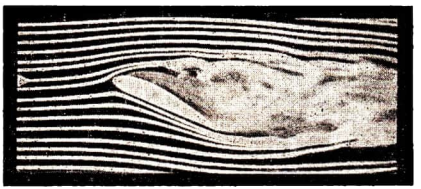


Abb. 5.1.3./1
Strömung um einen Tragflügel

a) Kleiner Anstellwinkel — die Strömung liegt an.



b) Großer Anstellwinkel — die Strömung ist abgerissen.

Außerdem ist zu beobachten, daß die Stromfäden durch den Tragflügel nach unten abgelenkt werden (Abb. 5.1.3./1a).
Man vergrößert den Anstellwinkel nach und nach und stellt zunächst bei anliegender Strömung eine Vergrößerung der Ablenkung fest. Von einem bestimmten Grenzwinkel an reißt die Strömung an der Tragflügeloberseite ab; es entsteht hinter dem Tragflügel ein Wirbelgebiet (Abb. 5.1.3./1b).

5.1.4. Untersuchung der Strömung um einen Tragflügel mit Hilfe einer Fadensonde

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Tragflügelmodell mit Stiel
3. Fadensonde

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 5.1.2.!

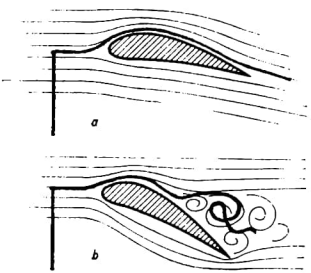


Abb. 5.1.4./1
Untersuchung der Strömung
an einem Tragflügel durch eine Fadensonde.
a) Kleiner Anstellwinkel — Strömung laminar,
b) großer Anstellwinkel — Strömung turbulent

Versuch

Zur Untersuchung der Strömung um einen Tragflügel kann eine Fadensonde benutzt werden. Dabei verfährt man wie in V 5.1.2., nur verwendet man jetzt einen waagerechten Luftstrom. An die Stelle der Flammensonde tritt eine Fadensonde, die man an verschiedene Stellen des Strömungsbereichs hält. Der Faden folgt dem Verlauf der Stromlinien. Er schmiegt sich bei kleinen Anstellwinkeln dem Profil gut an und zeigt so, daß die Strömung anliegt (Abb. 5.1.4./1a). Wenn sie bei größerem Anstellwinkel plötzlich abreißt, vollführt das Fadenende im Wirbelgebiet unregelmäßige Bewegungen (Abb. 5.1.4./1b).

5.1.5. Veranschaulichung der Druckzustände an einem Tragflügelmodell mit beweglicher Papierbespannung

1. Kleiner Luftstromerzeuger oder Luftdusche
2. Tragflügelmodell mit Stiel
3. Papierblatt

Methodischer Hinweis

Die Bedeutung dieses Experiments liegt in seiner Einfachheit. Es wirkt fast ebenso überraschend wie die Experimente zum aerodynamischen Paradoxon (V 4.5.1. bis V 4.5.12.). Man könnte es auch dazu zählen, denn es sind auch hier dieselben physikalischen Gesetze wirksam wie dort. Zur Erklärung der Erscheinung kann deshalb auch eines dieser Experimente, z. B. V 4.5.5., V 4.5.6. oder V 4.5.9., herangezogen werden.

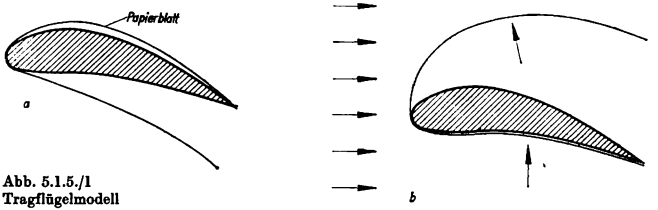


Abb. 5.1.5./1
Tragflügelmodell
a) im Ruhezustand, b) im Luftstrom

Versuch

Ein Blatt Papier wird so zurechtgeschnitten, daß es ein Tragflügelmodell umhüllt. Es wird dem Profil entsprechend gebogen und über das Modell geschoben (Abb. 5.1.5./1). Hält man das so umkleidete Tragflügelmodell in den Luftstrom einer Luftdusche oder eines Luftstromerzeugers, so wird das Papierblatt an der Unterseite des Tragflügels angedrückt und an der Oberseite abgehoben. Der Versuch zeigt, daß im Luftstrom an der Tragflügelunterseite ein Druckgebiet und an der Oberseite ein Soggebiet besteht.

5.1.6. Messung der Druckverteilung an einem Tragflügelprofil bei verschiedenen Anstellwinkeln [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Tragflügelmodell mit Endscheiben, Meßdüsen und Stiel
3. Mikromanometer
4. Schlauchverbindung
5. Winkelmesser mit Lot

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment ist besonders wichtig, weil es eine quantitative Untersuchung ermöglicht. Die grafische Auswertung zeigt sehr anschaulich die Druck- und Sogverhältnisse am Tragflügelprofil und ihre Abhängigkeit vom Anstellwinkel. Der Versuch ist als Schülerexperiment geeignet.

Versuch

Ein mit Endscheiben und Meßdüsen versehenes Tragflügelmodell wird mit seinem Stiel an einem Stativ befestigt und vor die Düse eines waagerecht gestellten Luftstromerzeugers gebracht. Mit Hilfe eines mit einem Lot versehenen Winkelmessers stellt man den Tragflügel auf einen Anstellwinkel von $-10°$ ein. Nach dem Einschalten des Luftstromerzeugers bestimmt man an den einzelnen Meßdüsen den Unter- oder Überdruck mit Hilfe eines Mikromanometers. Die Meßdüsen stehen mit Kanälen in Verbindung, die in einer Seitenfläche des Modells enden. Man verbindet die Meßdüsen nacheinander durch einen Gummischlauch mit dem oberen Tubus der Manometerflasche (Abb. 5.1.6./1). Zum Erhöhen der Meßgenauigkeit wird bei der Verwendung kleiner Windgeschwindigkeiten die Skale des Mikromanometers geneigt. Die Umrechnung der abgelesenen Meßwerte in Druckwerte erfolgt wie in V 4.4.8.

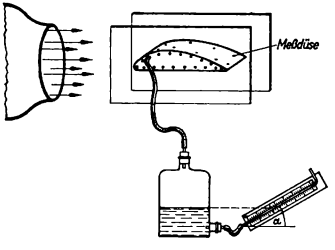


Abb. 5.1.6./1
Messung der Druckverteilung an einem Tragflügelprofil mit einem Mikromanometer

Die gleiche Meßreihe wird für die Anstellwinkel 0°, +10°, +20°, +30° und +40° wiederholt. Die Meßergebnisse der ersten drei Meßreihen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Druck- und Sogverteilung an einem Tragflügelprofil

	Meßdüse	Druck (+), Sog (−) in Pa		
		Anstellwinkel −10 °	0°	+10°
Tragflügel-oberseite	1	+290	+280	+255
	2	+120	+ 25	−120
	3	− 45	−135	−240
	4	−135	−200	−255
	5	−190	−220	−230
	6	−185	−190	−195
	7	−155	−150	−145
	8	−135	−130	−115
	9	− 50	− 60	− 45
	10	− 10	− 15	0
Tragflügel-unterseite	11	−230	−115	+ 5
	12	−190	− 40	+ 5
	13	−150	− 20	+ 5
	14	− 65	0	+ 15
	15	− 50	+ 5	+ 15
	16	0	+ 10	+ 15
	17	+ 20	+ 10	+ 10
	18	+ 35	+ 5	+ 5

Zur grafischen Auswertung des Versuches werden die Meßergebnisse an einer Schnittzeichnung des Profils als Vektoren in einheitlichem Maßstab dargestellt.

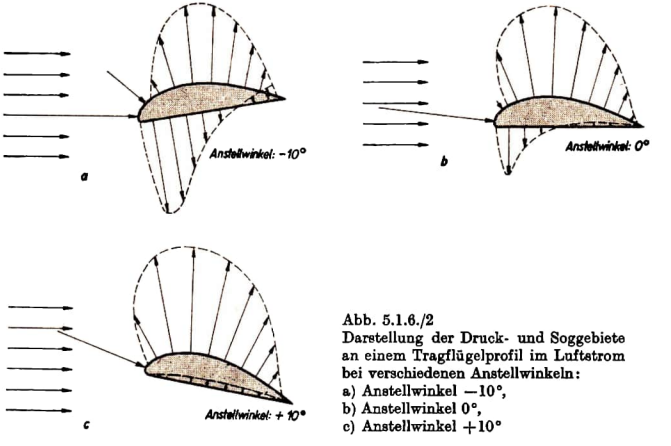


Abb. 5.1.6./2
Darstellung der Druck- und Soggebiete an einem Tragflügelprofil im Luftstrom bei verschiedenen Anstellwinkeln:
a) Anstellwinkel −10°,
b) Anstellwinkel 0°,
c) Anstellwinkel +10°

Da die Druckkräfte senkrecht zur Oberfläche des Tragflügels wirken, sind die Vektoren senkrecht zum Umriß des Profils zu zeichnen.
Die Vektoren und ihre Umhüllenden veranschaulichen die Druck- und Soggebiete (Abb. 5.1.6./2). Aus den vektoriellen Darstellungen ist ersichtlich, daß am untersuchten Profil bei einem negativen Anstellwinkel ein Drehmoment auftritt, das dazu führen kann, daß sich der Tragflügel quer zum Luftstrom einstellt. Es zeigt sich ferner, daß bei wachsendem positivem Anstellwinkel das Soggebiet an der Tragflügeloberseite allmählich zunimmt und sich immer mehr nach vorn verlagert. Gleichzeitig verwandelt sich der Sog an der Tragflügelunterseite in einen Druck.
Der aerodynamische Gesamtauftrieb des Tragflügels setzt sich zusammen aus den Sogkräften an seiner Oberseite und den Druckkräften an seiner Unterseite.

Bemerkungen

1. Werden die Messungen bei größeren Windgeschwindigkeiten durchgeführt, so ist nicht unbedingt ein Mikromanometer erforderlich, sondern es kann ein U-Rohr-Manometer benutzt werden.
2. Bei geringer Windgeschwindigkeit ist es zweckmäßig, die Skale des Mikormanometers zu neigen. Der Neigungswinkel $\alpha = 30°$ ist wegen des bequemen Umrechnungsverhältnisses besonders günstig, da $\sin 30° = 0{,}5$ ist.

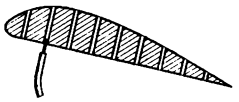


Abb. 5.1.6./3
Schnitt durch ein Tragflügelmodell mit Bohrung zur Messung der Druckverteilung

3. Als Ersatz für das oben beschriebene, industriell gefertigte, mit Endscheiben versehene Tragflügelmodell kann man ein solches auch selbst anfertigen. Man versieht das Modell mit Kartonstücken als Endscheiben und durchbohrt es in gleichen Abständen vertikal. Zur Messung des Druckes an den verschiedenen Stellen der Oberseite wird der Schlauchansatz von unten her in die Bohrungen gesteckt, bei Druckmessungen an der Unterseite von oben her (Abb. 5.1.6./3).

5.1.7. Nachweis der Randwirbel an einem Tragflügelmodell mit Hilfe eines Drallprüfers und einer Fadensonde

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Tragflügelmodell mit Stiel
3. Drallprüfer
4. Fadensonde
5. Kartonstreifen (15 cm × 5 cm)

Methodischer Hinweis

Die Ursache für die Entstehung der Randwirbel, der Druckausgleich von der Tragflügelunterseite zur Tragflügeloberseite, kann von den Schülern selbst gefunden werden. Wichtig ist es, dabei festzustellen, daß Wirbelbildung stets mit der

Umwandlung von Energie verbunden ist und deshalb (ausgenommen bei der Landung, wo die Geschwindigkeit verringert werden soll) in der Regel unerwünscht ist. Man wird außerdem darauf hinweisen, daß man die Bildung von Randwirbeln neben der Verwendung von Endscheiben auch dadurch verringern kann, daß man den Tragflügel zum Randbogen hin spitz auslaufen läßt. Dadurch wird der Druckunterschied geringer.

Versuch

Ein Tragflügelmodell wird mit seinem Stiel an einem Stativ befestigt und in den Strahl eines Luftstromerzeugers gehalten, so daß es bis in die Mitte des Luftstroms reicht. Hält man an das Ende der Tragflügelhinterkante einen Drallprüfer in den Luftstrom, so zeigt er einen Wirbel an (Abb. 5. 1. 7./1). Die Drehrichtung läßt erkennen, daß die Wirbel durch den Druckausgleich von der Tragflügelunterseite zur Tragflügeloberseite entstehen. Das gleiche erkennt man, wenn man den Drallprüfer durch eine Fadensonde ersetzt. Die Randwirbel lassen sich auch noch in einiger Entfernung hinter dem Tragflügel nachweisen.
Wird ein Kartonstreifen als Endscheibe an das Ende der Tragflügelkante gehalten, so zeigen Drallprüfer und Fadensonde keine Wirbel an.

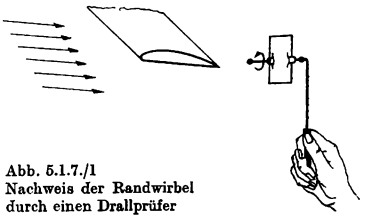


Abb. 5.1.7./1
Nachweis der Randwirbel durch einen Drallprüfer

Bemerkungen

1. Zur Anwendung von Drallprüfer und Fadensonde vgl. V 4.2.3.!
2. Man kann die Randwirbel auch dadurch veranschaulichen, daß man an den hinteren Enden jeder Seitenkante des Tragflügelmodells einen Wollfaden befestigt. Man beobachtet, daß die Fäden eine gegenläufige wirbelnde Bewegung ausführen.
3. Beim Anströmen gegen einen Tragflügel bildet sich an der Unterseite ein Überdruck, an der Oberseite ein Unterdruck aus. Die Luft folgt einem Druckgefälle und umströmt die Tragflügelenden in einer zur Strömung senkrechten Richtung. Die Querströmung wird von der Hauptströmung mitgerissen und führt zu lang auseinandergezogenen Wirbelzöpfen, die von den Tragflügelenden ausgehen.

5.1.8. Nachweis der Randwirbel an einem Tragflügelmodell im Nebelströmungsgerät

1. Nebelströmungsgerät mit Zubehör
2. Modell eines Tragflügels

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 5.1.7.!

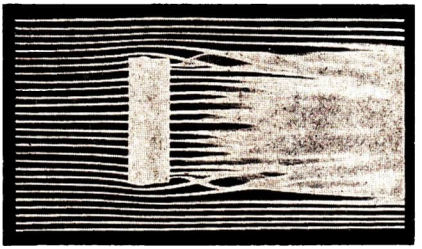


Abb. 5.1.8./1
Veranschaulichung der Randwirbel im Nebelströmungsgerät — Tragflügelmodell von oben gesehen

2. Das Experiment könnte dadurch sinnvoll ergänzt werden, daß man das rechteckige Tragflügelmodell durch ein anderes ersetzt, das an einem Ende verjüngt ist, also schmaler wird. Dieses Modell kann aus Holz selbst hergestellt werden.

Versuch

In die Kammer wird ein Tragflügelmodell so eingesetzt, daß seine Unterseite der Rückwand zugekehrt ist. Auf diese Weise wird erreicht, daß man das Modell gewissermaßen von oben betrachtet. Im Stromlinienbild erkennt man, daß an den Tragflügelenden Randwirbel entstehen; die Wirbelzöpfe werden durch die Nebelfäden deutlich sichtbar (Abb. 5.1.8./1).

5.1.9. Messung des Widerstandes eines Tragflügelmodells bei verschiedenen Anstellwinkeln mit Hilfe einer Tafelwaage [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Tragflügelmodell mit Stiel
3. oberschalige Tafelwaage
4. Tarierbecher mit Schrot
5. Wägesatz
6. Federklammer
7. Winkelmesser mit Lot
8. Lineal

Methodische Hinweise

1. Die Tafelwaage wird hier nicht wie üblich zum Massenvergleich, sondern zur Bestimmung einer Kraft benutzt. Vergleiche dazu MH V 4.3.3.!
2. An der grafischen Darstellung (Kurve oder Vektordiagramm) kann herausgearbeitet werden, daß der Widerstand des Tragflügels in den Grenzen von etwa $-10°$ und $+10°$ relativ gering ist. Das entspricht etwa dem Bereich für den „Schnellflug" und den „Reiseflug".

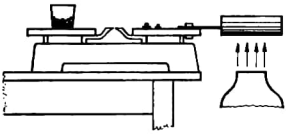


Abb. 5.1.9./1
Bestimmen des Widerstandes eines Tragflügelmodells durch eine Tafelwaage

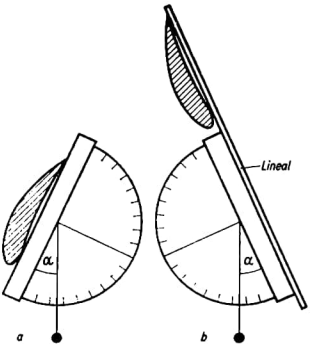


Abb. 5.1.9./2
Messen des Anstellwinkels eines Tragflügelprofils bei vertikalem Luftstrom
a) für positive Anstellwinkel,
b) für negative Anstellwinkel

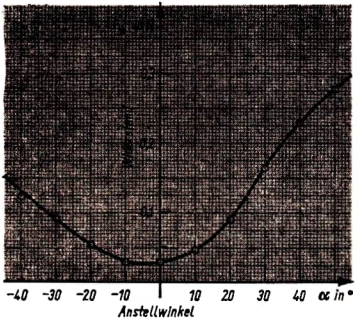


Abb. 5.1.9./3
Abhängigkeit des Widerstandes eines Tragflügelmodells vom Anstellwinkel, dargestellt im rechtwinkligen Koordinatensystem

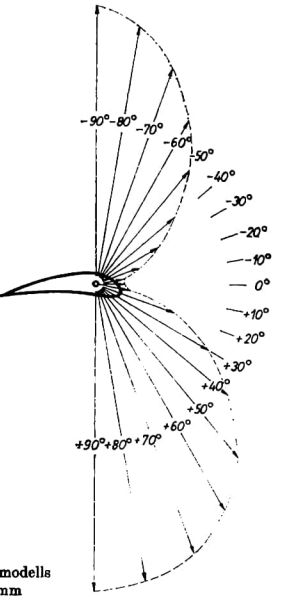


Abb. 5.1.9./4
Abhängigkeit des Widerstandes eines Tragflügelmodells vom Anstellwinkel, dargestellt als Vektordiagramm

Versuch

Die Versuchsanordnung entspricht der in V 4.3.3. beschriebenen. Als Widerstandskörper wird ein mit einem Stiel versehenes Tragflügelmodell verwandt (Abb. 5.1.9./1).

Wie in V 4.3.3. wird der Widerstand des Tragflügelmodells bestimmt, und zwar für verschiedene Anstellwinkel in den Grenzen von $-40°$ bis $+50°$. Den Anstellwinkel mißt man hierbei, indem man einen Winkelmesser, der mit einem Lot versehen ist, an die Profilsehne anlegt. Bei negativem Anstellwinkel verlängert man die Profilsehne mit einem Lineal (Abb. 5.1.9./2). Danach wird der Luftstromerzeuger eingeschaltet und die Waage durch Wägestücke ins Gleichgewicht gebracht. Die Gewichtskraft eines Wägestückes von 100 g entspricht angenähert einer Widerstandskraft von 1 N. Zusammengehörige Werte des Anstellwinkels und des Strömungswiderstandes werden in eine Tabelle eingetragen. Bei abgeschaltetem Luftstromerzeuger wird das Tragflügelmodell für die nächste Messung um 10° gedreht. Bei einer Versuchsreihe ergaben sich die in der beigefügten Tabelle wiedergegebenen Werte.

Widerstand eines Tragflügelmodells in Abhängigkeit vom Anstellwinkel

Anstellwinkel α in °	-40	-30	-20	-10	0	$+10$	$+20$	$+30$	$+40$	$+50$
Widerstand F_W in N	0,122	0,090	0,052	0,028	0,028	0,044	0,080	0,163	0,229	0,276

Die Meßergebnisse können als Kurve in einem rechtwinkligen Koordinatensystem (Abb. 5.1.9./3) oder als Vektordiagramm (Abb. 5.1.9./4) grafisch dargestellt werden.

Bemerkung

Es ist darauf zu achten, daß die Waagschale außerhalb des Luftstroms liegt.

5.1.10. Messung des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Tafelwaage [SE]

Methodische Hinweise

1. Die Tafelwaage wird hier nicht wie sonst zum Massenvergleich, sondern zur Bestimmung von Kräften benutzt. Vergleiche dazu MH V 4.3.3.!
2. Besonderer Wert ist der grafischen Auswertung beizumessen. Die Kurve zeigt deutlich, daß bei einem Anstellwinkel von etwa 22° die laminare in eine turbulente Strömung umschlägt, denn der aerodynamische Auftrieb nimmt bei einer weiteren Vergrößerung des Anstellwinkels nicht weiter zu, sondern ab. In der Fliegersprache sagt man: *„Das Flugzeug ist überzogen"*, gewöhnlich *„schmiert es dann über einen Tragflügel ab"*.

Versuch

Zur Bestimmung des Auftriebs eines Tragflügelmodells kann man im wesentlichen die Anordnung wie in V 4.3.3. und V 5.1.9. verwenden, doch muß hierbei der Luftstromerzeuger horizontal und in gleicher Höhe mit dem Modell aufgestellt werden (Abb. 5.1.10./1). Der aerodynamische Auftrieb wird bei verschiedenen Anstellwinkeln in den Grenzen von $-40°$ bis $+50°$ bestimmt. Der Anstellwinkel wird bei abgeschaltetem Luftstromerzeuger mit Hilfe eines mit einem Lot versehenen Winkelmessers eingestellt (Abb. 5.1.10./3). Nach dem Einschalten des Luftstromerzeugers wird das Modell je nach dem Anstellwinkel entweder gehoben oder gesenkt, es erfährt also entweder einen positiven oder einen negativen Auftrieb. Der positive Auftrieb wird durch Auflegen von Wägestücken auf die Waagschale kompensiert, an der das Modell befestigt ist, der negative Auftrieb durch Belasten der anderen Waagschale. Die Gewichtskraft eines Wägestückes von 100 g entspricht angenähert einer Auftriebskraft von 1 N.

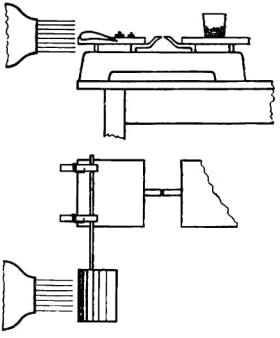


Abb. 5.1.10./1
Versuchsanordnung zur Bestimmung des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells

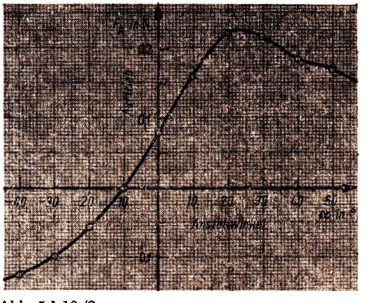


Abb. 5.1.10./2
Abhängigkeit des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells vom Anstellwinkel

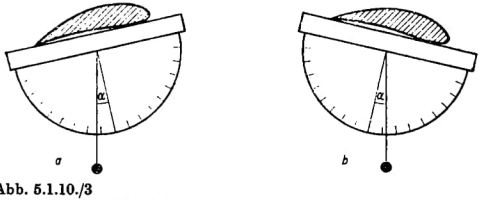


Abb. 5.1.10./3
Messen des Anstellwinkels eines Tragflügelprofils
a) für positive Anstellwinkel,
b) für negative Anstellwinkel

Bei einer Versuchsreihe wurde folgende Tabelle aus den Meßwerten zusammengestellt:

Auftrieb eines Tragflügelmodells in Abhängigkeit vom Anstellwinkel

Anstellwinkel α in °	−40	−30	−20	−10	0
Auftrieb F_A in N	−0,125	−0,099	−0,057	−0,000	+0,080

Anstellwinkel α in °	+10	+20	+30	+40	+50
Auftrieb F_A in N	+0,160	+0,223	+0,217	+0,185	+0,170

Diese Werte wurden grafisch dargestellt (Abb. 5.1.10./2).

Bemerkungen

1. Vergleiche Bemerkung V 5.1.9.!
2. Mit einem Tragflügel vergleichbar ist ein geworfener Diskus. Er erhält durch die Drehung die Stabilität eines Kreisels und gleitet nach Erreichen des Gipfelpunktes seiner Wurfbahn wie ein Tragflügel nieder. Daraus erklärt sich, daß der absteigende Ast der Wurfbahn bei einem rotierenden Diskus viel gestreckter ist als bei einem nichtrotierenden, weil sich letzterer quer zur Strömungsrichtung einstellt (vgl. V 4.2.10.).

5.1.11. Messung des Widerstandes und des Auftriebs eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Drehmomentenwaage oder Einkompenentenwaage [SE]

Zu Variante a

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Drehmomentenwaage
3. Tragflügelmodell mit Stiel
4. Winkelmesser mit Lot
5. Lineal

Zu Variante b

Geräte 1., 3. und 4., außerdem

6. behelfsmäßige Einkomponentenwaage (siehe V 4.3.2.) ⑥, dazu erforderliches Material: Holzleiste (30 cm × 2 cm × 1 cm) mit 2,5-mm-Bohrung in der Mitte
7. Kraftmesser (1 N)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH Nr. 2 V 5.1.9. und MH Nr. 2 V 5.1.10.!

Variante a

Die Versuchsanordnung entspricht der von V 4.3.1., Variante a. Das Tragflügelmodell wird an dem waagerechten Hebelarm befestigt. Der Begrenzungsbügel begrenzt die Bewegung des Hebelarmes. Zur Messung des Widerstandes richtet man den Luftstrom lotrecht nach oben (Abb. 5.1.11./1).
Der Einstellwinkel des Tragflügels ist der Winkel zwischen der Profilsehne und der Anströmrichtung. Man mißt ihn wie in V 5.1.9. (Abb. 5.1.9./2).
Nach dem Einschalten des Luftstromerzeugers wird das Modell infolge des Strömungswiderstandes gehoben. Durch Verdrehen des hinter der Skalenscheibe befindlichen Stellzeigers bringt man es wieder in seine ursprüngliche Lage zurück, so daß der vordere Zeiger wieder auf Null einspielt.
Man bestimmt den Widerstand des Modells für verschiedene Anstellwinkel im Bereich von $-40°$ bis $+50°$.
Zur Messung des aerodynamischen Auftriebs bläst man das Modell in waagerechter Richtung an (Abb. 5.1.11./2).

Variante b

Man kann auch die in V 4.3.2. angegebene behelfsmäßige Einkomponentenwaage zur Messung des Widerstandes und des aerodynamischen Auftriebs des Tragflügelmodells benutzen. Zur Widerstandsbestimmung stellt man die Einkomponentenwaage so auf wie in V 4.3.2. Im Gegensatz dazu befestigt man den Stiel des Modells nicht mit einer Federklammer am Hebel, sondern steckt den Stiel seitlich in eine an

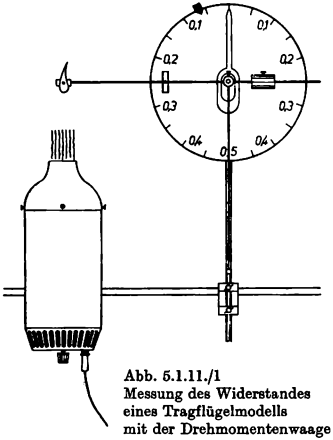


Abb. 5.1.11./1
Messung des Widerstandes eines Tragflügelmodells mit der Drehmomentenwaage

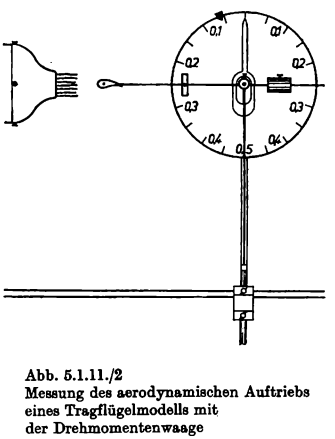


Abb. 5.1.11./2
Messung des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells mit der Drehmomentenwaage



Abb. 5.1.11./3
Befestigung des Tragflügelmodells am Hebel der Einkomponentenwaage
a) Seitenansicht, b) Draufsicht

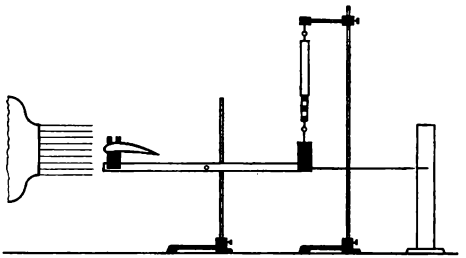


Abb. 5.1.11./4
Aufstellung der Einkomponentenwaage zur Messung des Auftriebs

das Hebelende geklemmte Kreuzmuffe. Dadurch erreicht man, daß das Tragflügelmodell seitlich am Hebel frei herausragt und der Tragflügel vom Luftstrom unbehindert getroffen wird (Abb. 5.1.11./3). Durch Verschieben der beiden an den Hebel geklemmten Kreuzmuffen wird das Gleichgewicht hergestellt. Die Verbindungsschnur zum Kraftmesser läßt man an dem entgegengesetzten Ende des Hebels genau in der Entfernung des Stiels angreifen. Im übrigen verläuft der Versuch wie V 4.3.2.

Will man den Auftrieb des Tragflügelmodells mittels der Einkomponentenwaage messen, so bringt man den Hebel in horizontaler Lage ins Gleichgewicht. Man dreht dabei den Tragflügel, ohne seinen Stiel aus der Kreuzmuffe herauszunehmen, um 90°, so daß er auch bei dieser Stellung des Hebels waagerecht liegt (Abb. 5.1.11./4). Den Kraftmesser läßt man jetzt sinngemäß von oben her am Hebel angreifen.

Die Auswertung erfolgt wie in V 5.1.9. und 5.1.10.

Bemerkungen

1. Will man den Widerstand und den Auftrieb für verschiedene Anstellwinkel ermitteln, so verfährt man zum Einstellen der Anstellwinkel wie in V 5.1.9. und 5.1.10.
2. In der gleichen Weise wie die behelfsmäßige Einkomponentenwaage wird die industriell gefertigte (Winddruckmeßgerät) angewendet. Der Zeitaufwand für die Versuchsvorbereitung wird dadurch geringer.

5.1.12. Ermittlung des Polardiagramms eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Tafelwaage [SE]

Geräte wie zu V 5.1.9.

Methodischer Hinweis

1. Vergleiche MH Nr. 1 V 5.1.9.!
2. Wurden die Experimente V 5.1.9., 5.1.10. oder 5.1.11. ausgeführt, so kann man hier auf den experimentellen Teil verzichten und die dort gewonnenen Ergebnisse zusammenfassen und auswerten. Dabei ist die funktionale Abhängigkeit der Größen Anstellwinkel, Widerstand und aerodynamischer Auftrieb herauszuarbeiten. Außerdem sollte man darauf hinweisen, daß bei diesen Messungen die Strömungsgeschwindigkeit der Luft konstant gehalten wurde. Beim Flug entspricht ihr die Fluggeschwindigkeit. Wird auch sie verändert, ändern sich mit ihr auch der Widerstand und der Auftrieb, so daß jeder Fluggeschwindigkeit ein besonderes Polardiagramm entspricht.

Widerstand und Auftrieb eines Tragflügelmodells in Abhängigkeit vom Anstellwinkel

Anstellwinkel α in °	Widerstand F_w in N	Auftrieb F_A in N
−40	0,122	−0,125
−30	0,090	−0,099
−20	0,052	−0,057
−10	0,028	0,000
0	0,028	+0,080
+10	0,044	+0,160
+20	0,086	+0,223
+30	0,163	+0,217
+40	0,229	+0,185
+50	0,276	+0,170

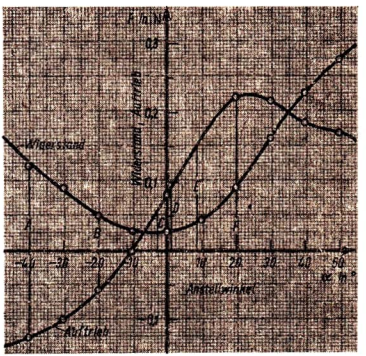


Abb. 5.1.12./1
Abhängigkeit des Widerstandes und des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells vom Anstellwinkel

Versuch

Zur Ermittlung des Polardiagramms eines Tragflügelmodells bestimmt man zuerst seinen Widerstand bei verschiedenen Anstellwinkeln und seinen aerodynamischen Auftrieb und faßt beide Ergebnisse in einer Tabelle und einer grafischen Darstellung zusammen.
Entnimmt man aus dem Diagramm den Auftrieb als Funktion des Widerstandes und stellt diese grafisch dar, so erhält man das Auftrieb-Widerstand-Diagramm des Tragflügelmodells, das wir an Stelle des Polardiagramms betrachten (Abb. 5.1.12./2). Aus beiden Darstellungen sind die Anstellwinkel für verschiedene be-

sondere charakteristische Flugzustände ersichtlich, denen je ein bestimmter Punkt des Polardiagramms entspricht. Es bedeuten:

A Rückenflug, C Schnellflug, E Steigflug,
B Sturzflug, D Reiseflug, F Start und Landung.

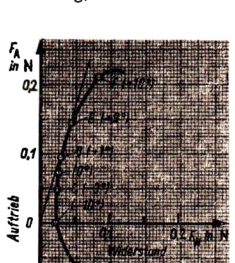


Abb. 5.1.12./2
Auftrieb-Widerstand-Diagramm eines Tragflügelmodells

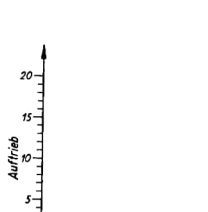


Abb. 5.1.12./3
Technisches Netz eines Polardiagramms

Bemerkung

Das Polardiagramm gibt eigentlich nicht den Zusammenhang zwischen dem Auftrieb und dem Widerstand wieder, sondern stellt den funktionellen Zusammenhang zwischen dem Auftriebsbeiwert und dem Widerstandsbeiwert dar. Diese Beiwerte sind aus den Gleichungen

$$F_A = c_A \cdot A \cdot \frac{\varrho}{2} \cdot v^2 \quad \text{und} \quad F_w = c_w \cdot A \cdot \frac{\varrho}{2} \cdot v^2$$

zu entnehmen. Hierin ist A jeweils gleich dem Querschnitt, den der Tragflügel der anströmenden Luft bietet. ϱ ist die Dichte der Luft, v die Strömungsgeschwindigkeit, c_A der Auftriebsbeiwert und c_w der Widerstandsbeiwert. Man kann v mit Hilfe eines Prandtlschen Staurohres und eines Mikromanometers ermitteln; doch ist eine Berechnung von v selbst nicht erforderlich, da das Manometer schon den Staudruck $\frac{\varrho}{2} \cdot v^2$ anzeigt. Bei der Rechnung sind MB 4.0.4. zu beachten.

Gegenüber dem F_A-F_w-Diagramm bietet das eigentliche Polardiagramm nichts Neues, so daß man sich im Unterricht mit dem F_A-F_w-Diagramm begnügt und den Namen Polardiagramm auf dieses überträgt. Außerdem ist die genaue Bestimmung von A außerordentlich schwierig.
In der Praxis verwendet man an Stelle von c_A und c_w in der Regel die 100fachen Werte und bezeichnet sie als C_A und C_w. Für die Anfertigung des Diagramms legt man für gewöhnlich ein Netz zugrunde, dessen Einheiten in horizontaler Richtung fünfmal so groß sind wie in vertikaler (Abb. 5.1.12./3).

5.1.13. Ermittlung des Polardiagramms eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Zweikomponentenwaage [SE]

1. Großer Luftstromerzeuger
2. Zweikomponentenwaage
3. Tragflügelmodell mit Stiel

Methodischer Hinweis

Die Zweikomponentenwaage bietet den Vorteil, daß der Widerstand und der aerodynamische Auftrieb des zu untersuchenden Tragflügelmodells in einem Arbeitsgang bestimmt werden können. Da das Gerät aber nur für die Ermittlung des Widerstandes und des Auftriebs verwendet werden kann, wird man häufig zugunsten anderer Lehrmittel auf seine Anschaffung verzichten.

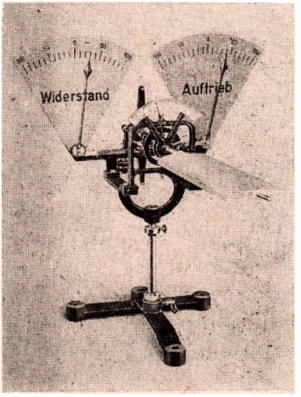


Abb. 5.1.13./1
Zweikomponentenwaage

Versuch

Das Tragflügelmodell wird an der Waage befestigt und der Luftstromerzeuger angestellt (Abb. 5.1.13./1). Der Widerstand und der Auftrieb werden von zwei getrennten Kraftmessern angezeigt. Der Widerstand und der Auftrieb werden bei verschiedenen Anstellwinkeln, zu deren Messung ein an der Waage angebrachter Winkelmesser dient, im Bereich von etwa $-5°$ bis $+16°$ bei einer konstant gehaltenen Strömungsgeschwindigkeit — der maximalen — bestimmt. Zusammengehörige Werte des Auftriebs F_A und des Widerstandes F_w werden in einem F_A-F_w-Diagramm nach Art von Abb. 5.1.12./2 grafisch dargestellt.

5.1.14. Ermittlung des Polardiagramms eines Tragflügelmodells mit Hilfe einer Schraubenfeder [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger oder Luftdusche
2. Tragflügelmodell aus Papier ⑧, dazu erforderliches Material:
   Papier und Pappe
   Holzspeiler
   Klebstoff
3. weiche Schraubenfeder (⌀ etwa 1 cm, Länge etwa 5 cm)
4. Rohr aus Blech (Durchmesser so, daß es mit Reibung über die Schraubenfeder geschoben werden kann, Länge 2 cm)
5. 2 Korken oder Gummistopfen
6. Glasscheibe (etwa 20 cm × 20 cm)
7. Fettstift

Methodischer Hinweis

Das folgende Experiment bietet die Möglichkeit, das Polardiagramm eines Tragflügelmodells mit behelfsmäßigen Mitteln ohne zeitraubende Messungen und Be-

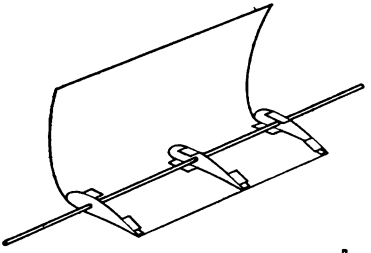


Abb. 5.1.14./1
Tragflügelmodell aus Papier
während der Herstellung

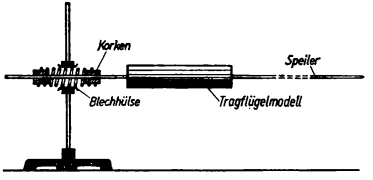


Abb. 5.1.14./2
Federnd gelagertes
Tragflügelmodell mit Zeiger

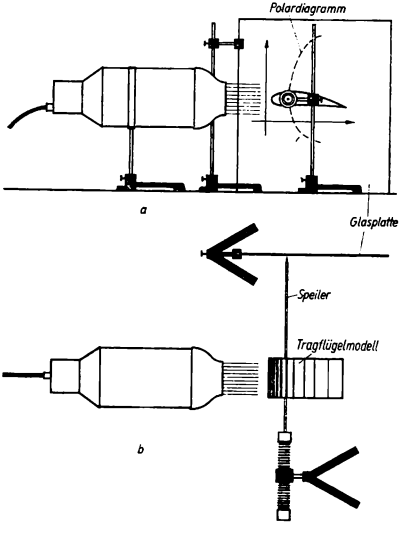


Abb. 5.1.14./3
Versuchsanordnung
zur Ermittlung der Polaren
mit Hilfe einer Schraubenfeder

rechnungen aufzunehmen. Die Schraubenfeder übernimmt dabei die Funktion einer Zweikomponentenwaage, sie reagiert auf den aerodynamischen Auftrieb und auf den Strömungswiderstand und zeigt beide gleichzeitig an. Die Wirkungsweise der Versuchsanordnung muß den Schülern erklärt werden.

Versuchsanordnung

Eine kurze Blechhülse wird über eine weiche Schraubenfeder geschoben und mit einer Klemme horizontal an einem Stativ befestigt. In die Enden der Feder steckt man zwei durchbohrte Korken. Man schiebt einen Speiler durch die Bohrungen, so daß das eine Ende etwa 5 cm übersteht. Auf das andere Ende wird ein aus Papier gefertigtes Tragflügelmodell geschoben und festgeklebt (Abb. 5.1.14./1). Der Speiler soll dann noch mindestens 20 cm über den Tragflügel hinausragen, um als Zeiger zu dienen (Abb. 5.1.14./2). Dicht vor seinem Ende stellt man eine vertikal an einem Stativ befestigte Glasplatte senkrecht auf. Ein Luftstromerzeuger wird mit waagerechter Strahlrichtung etwa 15 cm vor diese gestellt (Abb. 5.1.14./3).

Versuch

Die Zeigerstellung wird bei ausgeschaltetem Luftstromerzeuger als Nullpunkt mit einem Fettstift auf der Rückseite der Glasplatte markiert. Bei eingeschaltetem Luftstromerzeuger wird der Tragflügel infolge des Strömungswiderstandes zurückgedrückt und infolge des aerodynamischen Auftriebs gehoben oder gesenkt. Verändert man nach und nach den Anstellwinkel von etwa $-30°$ bis $+30°$, so durchläuft die Zeigerspitze eine Kurve. Man markiert die jeweilige Zeigerstellung auf der Glasplatte durch Punkte, verbindet die einzelnen Punkte und erhält auf diese Weise das Polardiagramm des Tragflügelmodells. Eine durch den Nullpunkt des Koordinatensystems gelegte horizontale Gerade ergibt die Widerstandsachse, eine vertikale Gerade durch den Nullpunkt die Auftriebsachse.

Bemerkungen

1. Eine Ungenauigkeit entsteht bei diesem Versuch dadurch, daß der Tragflügel infolge des Luftstroms nicht nur verschoben, sondern außerdem gedreht wird, was eine Änderung der Entfernung der Zeigerspitze von der Glasplatte zur Folge hat. Dieser Fehler ist hier jedoch belanglos.
2. An das Ende des Speilers kann man auch einen Pinsel binden, den man mit Farbe versieht. Ersetzt man die Glasscheibe durch ein Stück Pappe, das von der Pinselspitze berührt wird, so zeichnet der Pinsel das Polardiagramm selbsttätig auf.

5.2. Die Stabilität des Flugzeugs — Das Leitwerk — Start- und Landehilfen

5.2.1. Die Strömungsverhältnisse an einem Tragflügel mit Vorflügel

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Tragflügelmodell mit zwei seitlichen Endscheiben, Vorflügel und Stiel
3. Fadenquasten mit Befestigungsstiften

Methodischer Hinweis

Das Tragflügelmodell mit Vorflügel ist eigentlich für den großen Luftstromerzeuger bestimmt. Da es aber die Erscheinungen nur qualitativ wiedergibt, genügt auch der kleine Luftstromerzeuger, wenn man sich auf die Beobachtung der Quasten beschränkt, die in der Richtung des Luftstrahls liegen.

Versuch

Ein mit zwei seitlichen Endscheiben und einem Vorflügel versehenes Tragflügelmodell wird mit seinem Stiel an einem Stativ befestigt und vor die Düse eines Luftstromerzeugers gestellt. An verschiedenen Stellen seiner Oberseite werden kleine Quasten angebracht. Nach dem Einschalten des Luftstromerzeugers stellen sich die Quasten in die Stromrichtung ein. Vergrößert man den Anstellwinkel des Modells bei anliegendem Vorflügel so stark, daß die Strömung abreißt, so stellen sich die Quasten im Wirbelgebiet in verschiedene Richtungen ein, breiten sich fächerförmig aus oder drehen sich regellos (Abb. 5.2.1./1). Schiebt man den Vorflügel heraus, so ordnen sich die Quasten in die Strömungsrichtung und zeigen damit an, daß die Strömung wieder anliegt (Abb. 5.2.1./2).

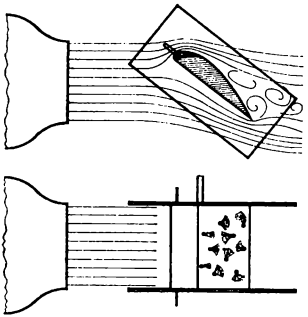


Abb. 5.2.1./1
Strömungsverhältnisse an einem Tragflügel mit großem Anstellwinkel ohne Vorflügel. Die Strömung ist abgerissen.

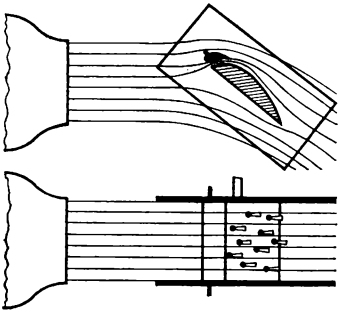


Abb. 5.2.1./2
Strömungsverhältnisse an einem Tragflügel mit Vorflügel bei großem Anstellwinkel. Die Strömung liegt an.

Bemerkungen

1. Zur Veranschaulichung der Strömungsverhältnisse kann an Stelle der Quasten auch eine Fadensonde benutzt werden (siehe V 5.1.4.).
2. Wird ein Tragflügelmodell ohne angebauten Vorflügel benutzt, so kann als behelfsmäßiger Vorflügel ein gewölbter Pappstreifen verwendet werden.
3. Es empfiehlt sich, den Tragflügel nicht in seiner normalen Gebrauchslage zu benutzen, sondern ihn mit nach unten gerichteter Haltestange so am Stativ zu befestigen, daß seine Oberseite vertikal steht und somit von den Schülern gut gesehen werden kann.

5.2.2. Veranschaulichung der Wirkung eines Vorflügels und einer Landeklappe mit Hilfe des Nebelströmungsgerätes

1. Nebelströmungsgerät mit Zubehör
2. Profilmodell eines Tragflügels mit Vorflügel
3. Profilmodell eines Tragflügels mit Landeklappe

Methodischer Hinweis

Vorflügel und Landeklappe sind häufig gleichzeitig als Start- und Landehilfen an Tragflügeln angebracht. An den Stromlinienbildern sollte in diesem Experiment ihre Wirkungsweise erläutert werden.
Der erste Teilversuch zeigt, daß der ausgefahrene Vorflügel auch bei größerem Anstellwinkel das Abreißen der Strömung verhindert. Beim zweiten Teilversuch wird man erklären, daß durch die stärkere Wölbung des Tragflügelprofils bei *aus-*

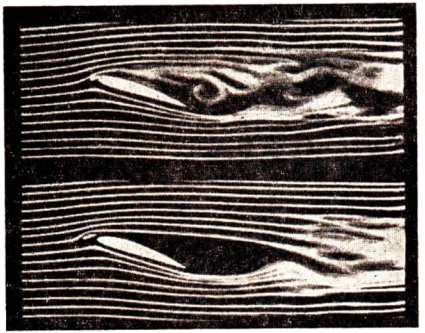


Abb. 5.2.2./1
Strömung um einen mit einem Vorflügel versehenen Tragflügel

a) bei großem Anstellwinkel ohne Benutzung des Vorflügels

b) bei gleichem Anstellwinkel mit ausgefahrenem Vorflügel

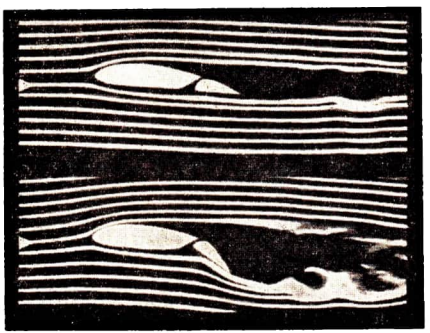


Abb. 5.2.2./2
Ablenkung der Strömung und Wirbelbildung durch eine Landeklappe

gefahrener Landeklappe der aerodynamische Auftrieb bei der kleineren Geschwindigkeit des Flugzeuges bei Start und Landung vergrößert wird. Das erkennt man daran, daß die Strömung stärker nach unten abgelenkt wird als bei *eingefahrener* Landeklappe (Abb. 5.2.2./2). Aus der stärker ausgebildeten Wirbelstraße kann man außerdem auch auf einen größeren Widerstand schließen, was sich für die Landung günstig auswirkt. Beim Start verringert man diesen Widerstand dadurch, daß man die Landeklappe nicht so weit ausfährt. Der Spalt zwischen Tragflügel und Landeklappe wirkt ähnlich wie der Vorflügel.

Versuch

Man ersetzt in V 5.1.3. das einfache Tragflügelmodell durch ein solches mit verstellbarem Vorflügel. Zunächst beobachtet man am Modell bei anliegendem Vorflügel den Verlauf der Stromfäden bei wachsendem Anstellwinkel, bis die Strömung an der Tragflügeloberseite abreißt. In dieser Stellung wird der Vorflügel vorgeschoben. Das Stromlinienbild zeigt nun, daß dadurch das Wirbelgebiet beträchtlich verkleinert worden ist und die Strömung wieder anliegt (Abb. 5.2.2./1).
In der gleichen Weise kann man die Wirkung einer am Tragflügel angebrachten Landeklappe demonstrieren (Abb. 5.2.2./2).

5.2.3. Nachweis der Stabilität eines Flugzeuges um die Hochachse bei Pfeilstellung und bei V-Stellung der Tragflügel

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Sondenstab
3. 2 dünne Blechstreifen (3 cm × 5 cm)
4. durchbohrter Korken
5. Glasröhre (lichte Weite 2 mm, Länge 4 cm)
6. 2 Glasperlen

Methodischer Hinweis

Die Wirkungsweise der Pfeilstellung ist leicht zu erklären. Bei einer Drehung um die Hochachse bietet der nach vorn gedrehte Tragflügel der Strömung eine größere Fläche und hat somit einen größeren Widerstand als der schräg nach hinten gedrehte.
Schwieriger ist die Erklärung, wie die V-Stellung der Tragflügel eine Stabilisierung um die Hochachse bewirkt. Wie das möglich ist, ist in der Versuchsbeschreibung erläutert. Es empfiehlt sich, die Wirkungsweise am Modell zu erklären.

Versuch 1: Pfeilstellung

Zwei rechteckige dünne Blechstreifen aus Konservenbüchsenblech oder Messingblech werden so gebogen, daß sie etwa die Wölbung von Tragflügeloberseiten haben. An eine ihrer Schmalseiten lötet man je ein Drahtstiftchen. Durch einen durchbohrten Korken schiebt man ein kurzes Glasröhrchen, so daß es auf beiden Seiten gleich weit übersteht. Durch das Glasrohr wird der Sondenstab als Hochachse des Modells gesteckt. Die Verschiebbarkeit des Modells auf der Achse wird durch zwei auf den Sondenstab gesteckte Glasperlen begrenzt, die man an dem Stab ankittet. Nun werden die Blechstreifen als Tragflügel in starker Pfeilstellung mit ihren Stiften in den Korken gesteckt (Abb. 5.2.3./1). Bringt man dieses Modell in den Luftstrom, so stellt es sich, wie aus der Abb. 5.2.3./1 ersichtlich, quer zur Strömung

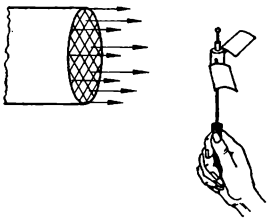


Abb. 5.2.3./1
Modell zum Nachweis der Stabilität um die Hochachse bei Pfeilstellung im Luftstrom

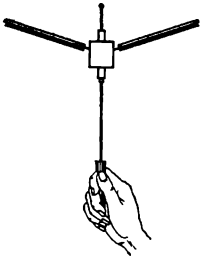


Abb. 5.2.3./2
Modell mit V-Stellung der Tragflügel

ein. In diese Lage kehrt es auch immer wieder zurück, wenn man es aus ihr herausdreht.

Versuch 2: V-Stellung

In dem oben beschriebenen Modell werden die Tragflügel entfernt und jetzt in V-Stellung mit einem positiven Anstellwinkel in den Korken gesteckt (Abb. 5.2.3./2). Im Luftstrom zeigt auch dieses Modell eine Stabilität um die Hochachse. Dreht man es nämlich etwas aus der Normalstellung, so wird der vorgeschobene Tragflügel durch den Luftstrom an der Unterseite, der zurückliegende dagegen an der Oberseite angeblasen. Der erste hat dadurch einen größeren Strömungswiderstand; das Modell wird in die Normallage zurückgedreht. Auch die V-Stellung der Tragflügel eines Flugzeuges bewirkt somit Stabilisierung um die Hochachse.

Bemerkung

Es ist bei diesem Versuch zweckmäßig, zur Vergrößerung des Strömungsquerschnitts die Düse des Luftstromerzeugers abzunehmen.

5.2.4. Nachweis der Stabilität eines Flugzeuges um die Längsachse bei V-Stellung der Tragflügel

1. Kleiner Luftstromerzeuger (Düse abgenommen)
2. 2 gewölbte Blechstreifen als Tragflügelmodelle, mit Drahtstiften versehen Ⓢ (vgl. V 5.2.3.!)
3. Korken
4. Gummiblase (Luftballon)
5. dünner, steifer Draht
6. Bindfaden

Methodischer Hinweis

Die Wirkungsweise der V-Stellung der Tragflügel zur Stabilisierung um die Längsachse kann an einer Tafelskizze nach der Abb. 5.2.4./1 erklärt werden. Die aerodynamische Auftriebskraft wirkt senkrecht zur Tragfläche. Bei einem schräg



Abb. 5.2.4./1
Tafelskizze zur Erklärung
der Wirkungsweise der V-Stellung
der Tragflügel zur Stabilisierung
um die Längsachse

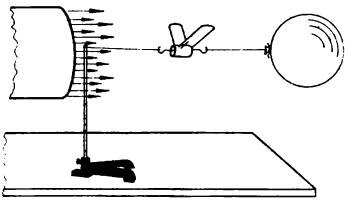


Abb. 5.2.4./2
Modell zum Nachweis der Stabilität
um die Längsachse bei V-Stellung im Luftstrom

stehenden Tragflügel muß man sich diese Kraft in zwei Komponenten zerlegt denken, von denen nur die lotrecht nach oben gerichtete der Schwerkraft entgegenwirkt. Sie ist kleiner als die wirksame Auftriebskraft des waagerechten Tragflügels.

Versuch

Zwei Tragflügelmodelle, deren Herstellung in V 5.2.3. beschrieben ist, werden in V-Stellung mit positivem Anstellwinkel in einen Korken gesteckt. In der Flugzeuglängsachse sticht man durch den Korken ein Drahtstück, das an beiden Enden zu Ösen umgebogen wird. Das Modell wird mit einem etwa 30 cm langen Bindfaden an einem Stativ befestigt. An Stelle eines Leitwerks wird an die hintere Öse in einem Abstand von etwa 30 cm ein Luftballon gebunden.
Im Luftstrom stellt sich das Modell so ein, daß seine Tragflügel nach oben gerichtet sind (Abb. 5.2.4./2). Neigt man es zur Seite, so führt es eine kleine Bewegung in Richtung auf den tiefer liegenden Tragflügel aus und richtet sich wieder auf.

Bemerkungen

1. Die Längsachse des Modells darf bei diesem Versuch nicht starr befestigt werden, weil zum Aufrichten eine Bewegungsfreiheit in seitlicher Richtung vorhanden sein muß.
2. Der Luftstromerzeuger wird wieder ohne Düse benutzt, weil dann sein Luftstrom einen größeren Querschnitt hat und ein unter Umständen vorhandener Drall weniger wirksam ist.

5.2.5. Versuche zur Wirkungsweise des Leitwerks

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. rechtwinklig gebogener Sondenbügel
3. Leitwerkmodell ⑧,
   dazu erforderliches Material:
   durchbohrter Korken
   Glasröhrchen (lichte Weite 2 mm, Länge 4 cm)
4. 2 Brettchen (3 cm × 5 cm × 5 mm)
5. 2 Glasperlen
6. Drahtstifte
   Draht
   Karton

Methodischer Hinweis

Am Flugzeug besteht das Leitwerk in der Regel aus feststehenden Flossen und beweglichen Rudern. Schon durch einen kleinen Ruderausschlag entsteht auf der einen Seite eine Wölbung und dadurch ein Soggebiet wie an der Tragflügeloberseite. Man sollte darauf hinweisen, daß bei dem folgenden Experiment zur Vereinfachung die Flosse weggelassen wurde.

Versuch 1: Das Höhenleitwerk

Durch einen durchbohrten Korken schiebt man ein kurzes Glasröhrchen, so daß es auf beiden Seiten gleich weit übersteht. Ein etwa 200 mm langes Drahtstück wird, wie es Abb. 5.2.5./1 zeigt, an seinem Ende U-förmig gebogen, mit einem Kartonstück als Ruder versehen und in den Korken gesteckt. Das Leitwerkmodell wird auf einen Sondenbügel geschoben, wobei das Glasrohr als Lager dient. Die Begrenzung der Verschiebbarkeit erfolgt wie bei V 4.2.3. Die Drehachse des Modells stellt die Querachse eines Flugzeuges dar.

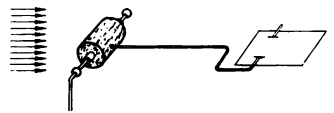


Abb. 5.2.5./1
Leitwerkmodell

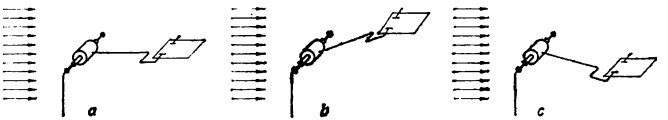


Abb. 5.2.5./2
Verhalten eines Höhenleitwerk-Modells im Luftstrom
a) in Normalstellung,
b) bei positivem Anstellwinkel des Ruders — Übergang zum Gleitflug,
c) bei negativem Anstellwinkel des Ruders — Übergang zum Steigflug

Im horizontalen Strahl eines Luftstromerzeugers stellt sich bei waagerecht gehaltener Achse das Modell etwa in die Strömungsrichtung ein (Abb. 5.2.5./2a). Gibt man dem Ruder einen positiven Anstellwinkel, so wird es im Luftstrom gehoben; die durch den Draht veranschaulichte Flugzeuglängsachse ist schräg abwärts gerichtet (Abb. 5.2.5./2b). Auf diese Weise wird am Flugzeug der Gleitflug eingeleitet. Umgekehrt stellt sich bei negativem Anstellwinkel des Höhenruders die Flugzeuglängsachse schräg aufwärts ein; dadurch geht das Flugzeug zum Steigflug über (Abb. 5.2.5./2c).

Versuch 2: Seitenleitwerk

Das oben beschriebene Modell kann in der gleichen Form auch zur Demonstration der Wirkungsweise des Seitenleitwerks benutzt werden, indem man es mit lotrechter Drehachse in den Luftstrom bringt. Diese veranschaulicht jetzt die Hoch-

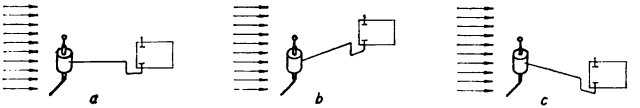


Abb. 5.2.5./3
Verhalten eines Seitenleitwerk-Modells im Luftstrom:
a) Geradeausflug bei Grundstellung des Seitenruders,
b) Linkswendung bei Linkseinschlag des Seitenruders,
c) Rechtswendung bei Rechtseinschlag des Seitenruders

achse eines Flugzeuges. Steht das Seitenruder in Richtung der Flugzeuglängsachse, so stellt sich das Modell in die Strömungsrichtung ein. Bei seitlichem Ausschlag des Ruders dreht es sich um einen bestimmten Winkel, der von der Größe des Ruderausschlages abhängt (Abb. 5.2.5./3). Im Flugzeug dient das Seitenruder zur Drehung um die Hochachse.

Versuch 3: Querruder

Nachdem man von dem Modell den Draht mit dem Ruder entfernt hat, befestigt man mit Drahtstiften zwei kleine gleich große Brettchen so am Korken, daß sie einander gegenüberstehen (Abb. 5.2.5./4). Sie entsprechen den an den Tragflügeln befindlichen Querrudern eines Flugzeuges; die Drehachse des Modells stellt die Flugzeuglängsachse dar. Man bringt das Modell so in den Luftstrom, daß die

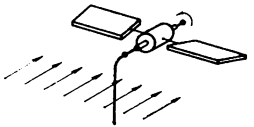


Abb. 5.2.5./4
Querrudermodell

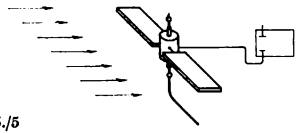


Abb. 5.2.5./5
Seitenleitwerk-Modell
mit angedeuteten Tragflügeln

Drehachse in die Strömungsrichtung zeigt. Liegen beide Brettchen in einer Ebene, so bleibt das Modell in jeder Lage stehen. Verdreht man sie jedoch gegeneinander, so erfolgt eine Drehung um die Längsachse. Beim Flugzeug sind die Querruder an den Hinterkanten der Tragflügel angebracht und dienen, wie aus dem Versuch ersichtlich ist, der Drehung um die Längsachse.

Bemerkungen

1. Die Versuche 1 und 2 an einem ruhenden Modell in bewegter Luft entsprechen nicht ganz den Verhältnissen beim Flug. Während das Modell durch einen Dauerausschlag des Ruders um einen bestimmten Winkel gedreht wird und dann im Luftstrom zur Ruhe kommt, reagiert ein Flugzeug auf einen Dauerausschlag auch mit einer dauernden Drehung, weil die Anblasrichtung im allgemeinen mit der Flugzeuglängsachse zusammenfällt.
2. Zur Erhöhung der Anschaulichkeit kann man schon beim Versuch 2 die beiden Brettchen als Andeutung der Tragflügel am Korken befestigen (Abb. 5.2.5./5).

5.2.6. Versuche zur Autorotation eines Tragflügels

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Tragflügelmodell ® (vgl. V 5.2.3.!)
3. rechtwinklig gebogener Sondenbügel

Methodischer Hinweis

Den Schülern muß erklärt werden, welche Bedeutung diese Erscheinungen für die Flugpraxis haben. Man versteht unter der *Autorotation* die andauernde selbsttätige Drehung eines Körpers im Luftstrom. Das *Trudeln* eines Flugzeuges stellt eine Autorotation dar. Beim *Steiltrudeln* rotiert das Flugzeug um die Längsachse und beim gefürchteten *Flachtrudeln* um die Hochachse. Beide Bewegungen sind Gefahrenzustände im Fluge, die durch falsche Steuerbewegungen entstehen können und durch geeignete Maßnahmen des Piloten beendet werden.

Versuch 1: Autorotation um die Hochachse

Ein Tragflügelmodell ist auf einem rechtwinklig gebogenen Sondenbügel um eine Achse, die der Flugzeughochachse entspricht, leicht drehbar gelagert. Hält man es mit vertikaler Achse in einen lotrecht nach oben gerichteten Luftstrom und versetzt man es in Rotation, so kommt es nicht zur Ruhe, sondern rotiert mit großer Geschwindigkeit ständig weiter (Abb. 5.2.6./1). Das ist auch der Fall, wenn man das Modell anhält und in entgegengesetzter Richtung anstößt.

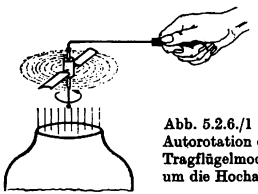


Abb. 5.2.6./1
Autorotation eines Tragflügelmodells um die Hochachse

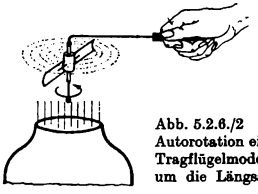


Abb. 5.2.6./2
Autorotation eines Tragflügelmodells um die Längsachse

Versuch 2: Autorotation um die Längsachse

Das Tragflügelmodell wird so eingestellt, daß seine Drehachse der Flugzeuglängsachse entspricht. Die Tragflügel müssen dabei einen positiven Anstellwinkel haben. Man führt nun den Versuch in gleicher Weise durch wie den ersten (Abb. 5.2.6./2). Auch hierbei kann eine Autorotation beobachtet werden, doch ist die Drehgeschwindigkeit nicht so groß.

Bemerkungen

1. Das Tragflügelmodell kann man, wie in V 5.2.3. beschrieben, selbst herstellen.
2. Der Nachweis der Autorotation in beiden Richtungen ist erforderlich, wenn man zeigen will, daß diese Bewegung nicht durch einen Drall des Luftstroms hervorgerufen wird.
3. Eine Autorotation ähnlich dem Flachtrudeln kann man in der Natur an fallenden geflügelten Früchten, z. B. an Früchten des Ahorns, beobachten.

5.3. Die Luftschraube

5.3.1. Messung der Drehzahl einer Luftschraube mit Hilfe eines Stroboskops und eines Drehzahlmessers [SE]

1. Luftschraube mit Triebwerk
2. Elektromotor mit Drehzahlmesser und Regelwiderstand
3. stroboskopische Scheibe Ⓔ, dazu erforderliches Material: Karton oder Blech

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment und das folgende sind eigentlich keine Schulversuche, die zur Strömungslehre gehören. Sie wurden aber hier aufgenommen, weil sie zur Bestimmung der Drehzahl im Versuch 5.3.5. gebraucht werden.
Da man bei Schulversuchen in der Regel kleine Modelle mit leistungsschwachen Motoren verwendet, ist es nicht möglich, einen Drehzahlmesser direkt mit der Welle der Luftschraube zu verbinden. Das Meßgerät würde die Drehzahl selbst stark vermindern. Die hier beschriebenen Methoden stellen interessante Möglichkeiten dar, die bei der Messung den Vorgang selbst nicht beeinflussen. In der in V 5.3.2. beschriebenen Variante wird sogar auf einen Drehzahlmesser verzichtet, allerdings stellt das Verfahren an die Musikalität des Experimentators einige Anforderungen.

Versuch

Eine kreisförmige Scheibe aus Blech oder aus Pappe mit einem Durchmesser von etwa 15 cm ist mit vier radial angeordneten, etwa 10 mm breiten Schlitzen versehen (Abb. 5.3.1./1). Sie wird durch einen mit Drehzahlmesser und Regelwiderstand ausgestatteten Elektromotor angetrieben. Betrachtet man die Luftschraube, deren Drehzahl gemessen werden soll, durch die Schlitze einer gegenläufig rotierenden Scheibe und verändert dabei die Drehzahl des Stroboskops, so beobachtet man, daß die Luftschraube bei bestimmten Einstellungen stillzustehen scheint. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn eine Scheibe mit vier Schlitzen mit der halben Drehzahl einer zweiflügeligen Luftschraube rotiert.
Die gleiche Erscheinung beobachtet man auch, wenn sich die Drehzahlen wie 1:4, 1:6, 1:8 usw. verhalten.

Bemerkung

Um die Drehzahl der Luftschraube eindeutig bestimmen zu können, steigert man, von Null ausgehend, die Drehzahl des Stroboskops so weit, bis man die zweiflügelige Luftschraube mit ihrer tatsächlichen Flügelzahl stillstehen sieht. Man gewinnt dann die Luftschraubendrehzahl, indem man die Drehzahl des Stroboskops mit 2 multipliziert.

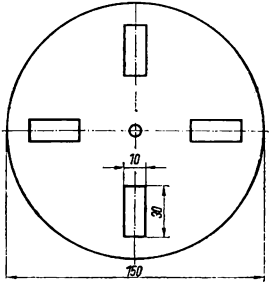


Abb. 5.3.1./1
Stroboskopische Scheibe mit vier Schlitzen

5.3.2. Messung der Drehzahl einer Luftschraube durch Bestimmen der Tonhöhe [SE]

1. Luftschraube mit Triebwerk
2. Elektromotor mit Regelwiderstand
3. stroboskopische Scheibe (S) (vgl. V 5.3.1.!)
4. Musikinstrument

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 5.3.1.!

Versuch

Wenn zur Bestimmung der Drehzahl einer Luftschraube kein Drehzahlmesser zur Verfügung steht, so kann man die Messung behelfsmäßig durch Bestimmen der Tonhöhe vornehmen. Wie in V 5.3.1. beobachtet man die Luftschraube durch ein Stroboskop. Bei scheinbarem Stillstand der Luftschraube bläst man gegen die Schlitze der rotierenden Scheibe wie gegen eine Lochsirene. Die Höhe des dadurch erzeugten Tones ermittelt man durch Vergleich mit dem Ton eines gestimmten Musikinstruments, etwa einer Blockflöte, eines Akkordeons, eines Saiteninstruments oder dergleichen. Es ergibt sich die Drehzahl der Luftschraube, wenn man die Frequenz des Tones durch die Anzahl der Luftschraubenflügel dividiert.

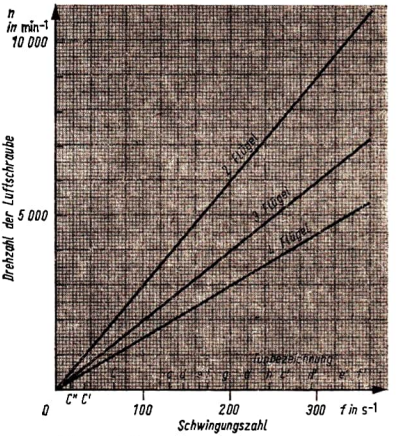


Abb. 5.3.2./1
Diagramm zur Ermittlung der Drehzahl einer Luftschraube

Zu beachten ist dabei, daß die Schwingungszahlen der Töne in s^{-1}, die Drehzahlen einer Welle dagegen meist in min^{-1} angegeben werden. Es muß demnach vor der Division eine Umrechnung in min^{-1} vorgenommen werden. Die beigefügte Tabelle gibt die Schwingungszahlen einiger Töne und die daraus ermittelten Drehzahlen einer zweiflügeligen Luftschraube wieder.

Tabelle zur Ermittlung der Drehzahl einer zweiflügeligen Luftschraube durch Bestimmen der Tonhöhe

Bezeichnung des Tones	Frequenz des Tones		Drehzahl n
	in s^{-1}	in min^{-1}	in min^{-1}
C''	16,4	983	491
C'	32,7	1965	983
C	65,5	3930	1965
c	131	7860	3930
a	220	13200	6600

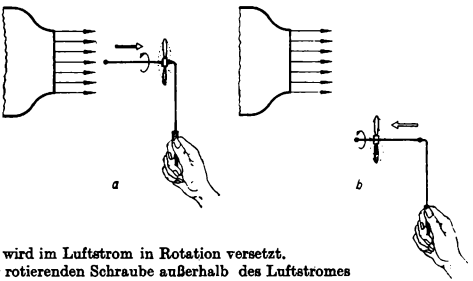
5.3.3. Nachweis der Zugkraft einer Luftschraube mit Hilfe einer Luftschraubensonde

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Luftschraubensonde

Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment kann mit dem Satz von der Erhaltung der Energie erklärt werden. Die Luftschraube nimmt im Luftstrom Energie auf. Die kinetische Energie der strömenden Luft wird in Rotationsenergie der Luftschraube umgewandelt. Außerhalb des Luftstroms wandelt sich diese Energie wieder in kinetische Energie um. Da jede Beschleunigung durch eine Kraft verursacht wird, ist hiermit der Nachweis einer Zugkraft erbracht.
2. Die Wirkungsweise der Luftschraube kann auf die Wirkungsweise des Tragflügels zurückgeführt werden (Profil, Anstellwinkel).

Abb. 5.3.3./1
Luftschraube



a) Die Schraube wird im Luftstrom in Rotation versetzt.
b) Verhalten der rotierenden Schraube außerhalb des Luftstromes

Versuch

Eine Luftschraubensonde wird in einen Luftstrom gebracht. Sie beginnt zu rotieren und wird infolge des Strömungswiderstandes auf ihrer Achse zurückgeschoben (Abb. 5.3.3./1a). Nimmt man die Sonde mit der rasch rotierenden Schraube bei paralleler Verschiebung der Rotationsachse plötzlich aus dem Luftstrom, so bewegt sich die Luftschraube sofort mit großer Geschwindigkeit vorwärts (Abb. 5.3.3./1b).

5.3.4. Nachweis der Zugkraft einer Luftschraube mit Antriebsmotor

1. Luftschraube mit Triebwerk (Elektromotor)
2. leicht beweglicher Wagen
3. Kraftmesser (1 N)
4. dünne, isolierte Litze
5. Stromversorgungsgerät
6. Bindfaden

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH Nr. 2 V 5.3.3.!

Versuch

Eine mit einem kleinen Elektromotor ausgestattete Luftschraube wird auf einem leicht beweglichen Wagen mit einem Bindfaden befestigt. Als Stromzuführung wird isolierte Litze verwendet. Nach dem Einschalten des Motors beginnt die Schraube zu rotieren, und der Wagen setzt sich in Bewegung. Die von der Schraube ausgeübte Zugkraft kann mit einem Kraftmesser gemessen werden (Abb. 5.3.4./1).

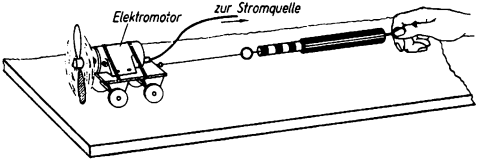


Abb. 5.3.4./1
Nachweis der Zugkraft einer rotierenden Luftschraube

Bemerkung

Wenn der Wagen nicht durch den Kraftmesser festgehalten wird, führt er eine beschleunigte Bewegung aus. Will man die Luftschraube vor Beschädigungen bewahren, so ist es zweckmäßig, am Wagen einen Bindfaden zu befestigen, durch den sein Weg begrenzt wird.

5.3.5. Zugkraft einer Luftschraube in Abhängigkeit von der Drehzahl [SE]

1. Luftschraube mit Triebwerk (Elektromotor)
2. Schiebewiderstand
3. Stromversorgungsgerät für Kleinspannungen
4. dünne, isolierte Litze
5. Tafelwaage
6. Tarierbecher mit Schrot
7. Wägesatz
8. Vorrichtung zum Messen der Drehzahl nach V 5.3.1. oder V 5.3.2.

Methodische Hinweise

1. Die Tafelwaage wird in diesem Versuch nicht wie üblich zum Massenvergleich, sondern zum Vergleich von Kräften benutzt.
2. Vergleiche MH Nr. 2 V 5.3.3.!
3. Bei der Auswertung dieses Experiments kann die Darstellung funktionaler Abhängigkeiten und das Lesen von physikalischen Zusammenhängen aus Tabellen und Diagrammen geübt werden.

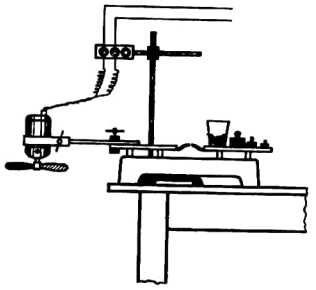


Abb. 5.3.5./1
Versuchsanordnung zur Messung der Zugkraft einer Luftschraube

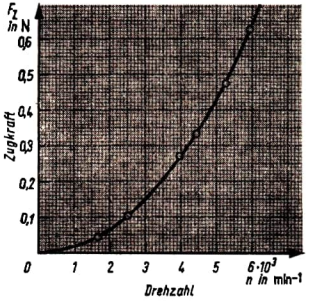


Abb. 5.3.5./2
Zugkraft-Drehzahl-Diagramm einer Luftschraube

Versuchsanordnung

Eine oberschalige Tafelwaage wird nahe an die Tischkante gestellt. An einer der Waagschalen befestigt man mit einer Rohrklemme und einer Plattenmuffe einen mit einer Luftschraube versehenen Elektromotor so, daß die Kraft der Luftschraube vertikal nach unten wirkt (Abb. 5.3.5./1). Als Triebwerk für die Luftschraube eignet sich am besten ein kleiner, leichter Motor mit einer Nenndrehzahl von 8000 bis 10000 U/min. Dieser wird über einen Schiebewiderstand als Spannungsteiler an ein Stromversorgungsgerät angeschlossen. Die Stromzuführung erfolgt über eine Klemmenstange, die an einem Stativ befestigt ist. Damit man die Beweglichkeit der Waagschalen möglichst wenig beeinträchtigt, führt man von der Klemmenstange dünne Litze zu den Anschlußklemmen des Motors.

Versuchsdurchführung

Durch Schrot wird die Waage bei stillstehender Luftschraube tariert. Man legt eine niedrige Spannung an den Motor, so daß die Luftschraube mit geringer Drehzahl rotiert.

Abhängigkeit der Zugkraft von der Drehzahl

Drehzahl n in min^{-1}	Zugkraft F_Z in N	$\frac{F_Z}{n^2}$ in $N \cdot min^2$
1650	0,045	$16{,}5 \cdot 10^{-9}$
2480	0,103	$16{,}7 \cdot 10^{-9}$
3960	0,270	$17{,}2 \cdot 10^{-9}$
4450	0,335	$16{,}9 \cdot 10^{-9}$
5280	0,475	$17{,}1 \cdot 10^{-9}$
5940	0,624	$17{,}7 \cdot 10^{-9}$

Durch die Zugkraft der Luftschraube wird die Waage aus dem Gleichgewicht gebracht. Die Drehzahl bestimmt man nach V 5.3.1. oder V 5.3.2. Durch Auflegen

von Wägestücken wird die Zugkraft der Luftschraube kompensiert. Dieser Versuch wird mehrmals wiederholt, nachdem jeweils durch Vergrößern der Betriebsspannung die Drehzahl erhöht worden ist. Zusammengehörige Werte für die Drehzahl und Zugkraft werden tabellarisch festgehalten. Die beigefügte Tabelle gibt als Beispiel eine solche Meßreihe wieder. Die Luftschraube entspricht in ihrer Wirkungsweise einem Tragflügel. Sein Auftrieb ist proportional dem Quadrat der Fluggeschwindigkeit. Entsprechend ist die Zugkraft einer Luftschraube proportional dem Quadrat der Umfangsgeschwindigkeit und damit auch proportional dem Quadrat der Drehzahl. Diese Proportionalität ist aus der 3. Spalte der Tabelle ersichtlich, da sich der Quotient $\frac{F_Z}{n^2}$ als nahezu konstant erweist. Dementsprechend liegen die Punkte der Meßwerte in der grafischen Darstellung mit guter Annäherung auf einer Parabel (Abb. 5.3.5./2).

5.3.6. Verhalten einer Luftschraube in einem Luftstrom

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Luftschraube
3. Draht (∅ 1 mm, Länge etwa 2 m)

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment vermittelt die Erkenntnis, daß der Strömungswiderstand einer rotierenden Luftschraube erheblich größer ist als der einer stillstehenden. Diese Tatsache ist von Bedeutung für die Wirkungsweise des Rotors eines Hubschraubers.

Versuch

Ein Luftstromerzeuger wird mit vertikal nach oben gerichteter Düse neben dem Experimentiertisch auf den Fußboden gestellt. Am Tisch befestigt man mit Hilfe einer Tischklemme ein Stativ mit einem Querstab. Nun schiebt man eine Luftschraube auf einen Draht und spannt ihn von den Leitblechen des Luftstromerzeugers bis zum Querstab, so daß er in der Mitte der Strömung verläuft.

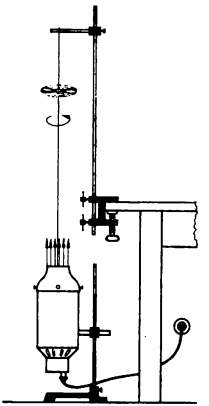


Abb. 5.3.6./1
Schwebeversuch mit einer Luftschraube

Nach dem Einschalten des Luftstromerzeugers wird die Luftschraube in Rotation versetzt und bis zu einer bestimmten Höhe am Draht gehoben. Beim Verändern der Strömungsgeschwindigkeit erkennt man, daß die Steighöhe der Luftschraube von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Hält man die Luftschraube an, so sinkt sie zunächst, gerät in Rotation und steigt wieder auf die ursprüngliche Höhe (Abb. 5.3.6./1).

Der Versuch zeigt, daß eine Luftschraube ohne Antrieb von einem Luftstrom in Rotation versetzt wird und dann einen größeren Strömungswiderstand hat, als wenn sie stillsteht.

Bemerkungen

1. An Stelle des Drahtes und einer daraufgesteckten Luftschraube kann auch eine Luftschraubensonde verwendet werden. Durch Heben und Senken der Sonde wird die Stelle ermittelt, an der die Luftschraube schwebt.
2. Fällt bei einem mehrmotorigen Flugzeug ein Motor aus, so wird seine Luftschraube vom Fahrtwind angetrieben und erzeugt einen großen Widerstand. Um das zu verhindern, stellt man die Luftschraubenblätter auf *Segelstellung*, d. h., man stellt eine Steigung von etwa 90° ein, so daß sie nicht mehr rotiert.
3. Will man die Strömungsgeschwindigkeit verändern, dann schaltet man einen Schiebewiderstand als Vorwiderstand in die Zuleitung des Luftstromerzeugers.

5.3.7. Nachweis der Wirkungsweise einer Hubschraube an einem selbstgefertigten Modell

1. Modell einer Luftschraube Ⓢ,
   dazu erforderliches Material:
   Holzleiste (etwa 15 cm × 3 cm × 2 cm)
   Rundholzstab (∅ etwa 10 mm, Länge etwa 20 cm)
   Leim oder Alleskleber

Methodischer Hinweis

Wie alle Versuche mit Spielzeug, so erweckt auch dieses Experiment erfahrungsgemäß das ungeteilte Interesse der Schüler und regt zur Nachahmung an.

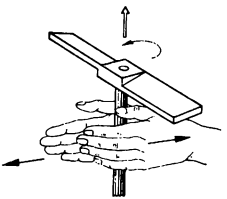


Abb. 5.3.7./1
Modell einer Hubschraube

Versuch

Aus einer Holzleiste fertigt man das Modell einer Luftschraube an. Die Mitte der Leiste wird zur Aufnahme der Welle durchbohrt. Danach wird sie an beiden Seiten so beschnitten, daß zwei gegeneinander verdrehte, schrägstehende Luftschraubenblätter entstehen. Als Welle wird ein Rundholzstab eingesetzt und verleimt (Abb. 5.3.7./1).
Man nimmt die Welle des Modells zwischen beide Handflächen, versetzt die Luftschraube durch eine quirlende Bewegung in rasche Rotation und läßt sie los. Bei richtig gewählter Drehrichtung steigt das Modell nach der Freigabe mehrere Meter hoch und schwebt zu Boden, wobei seine Achse infolge der Kreiselgesetze die gleiche Richtung beibehält.
Bei diesem Versuch wird die Zugkraft einer Luftschraube zur Überwindung des Gewichts genutzt. Auf dem gleichen Prinzip beruht die Wirkungsweise einer Hubschraube.

Bemerkungen

1. Im Handel sind verschiedene Spielzeuge erhältlich, die auf der gleichen Wirkungsweise beruhen. Sie sind zur Durchführung dieses Versuches ebenfalls gut geeignet.
2. Man kann die Steigfähigkeit des Modells noch vergrößern, wenn man den Flügeln durch Bearbeiten mit einer Raspel oder Feile das Profil eines Tragflügels gibt.

5.3.8. Schweben einer Luftschraubensonde im horizontalen Luftstrom

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Luftschraubensonde

Versuch

In den horizontalen Strahl eines Luftstromerzeugers wird eine Luftschraubensonde mit vertikaler Achse gebracht. Neigt man die Achse ein wenig, so daß die Schraubenebene schräg von unten angeblasen wird, so gerät die Luftschraube in Rotation und wird auf der Achse gehoben (Abb. 5.3.8./1).

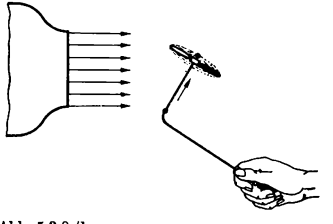


Abb. 5.3.8./1
Benutzung der Luftschraubensonde als Tragschraube

Der Versuch zeigt die Wirkungsweise einer Tragschraube. Beim Tragschrauber sind die Tragflügel durch eine große Luftschraube ohne Antriebsmotor ersetzt. Ihre Achse ist gegen die Flugrichtung ähnlich geneigt wie die Achse der Luftschraube im oben beschriebenen Versuch. Durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeuges wird die Tragschraube angetrieben und erzeugt den erforderlichen aerodynamischen Auftrieb.

5.4. Das Strahltriebwerk

5.4.1. Bestimmung der Schubkraft eines Luftstromerzeugers — Modellversuch zum Strahltriebwerk [SE]

1. Kleiner Luftstromerzeuger
2. Meßstab
3. Kraftmesser
4. Tafelwaage
5. Wägesatz
6. Bindfaden

Methodische Hinweise

1. Das Rückstoßprinzip erklärt man mit Hilfe des Satzes von der Erhaltung des Impulses.

2. Der Modellcharakter dieses Experiments ist herauszuarbeiten. Während hier im Modellversuch die Luft durch einen Elektromotor mit einer Luftschraube bewegt wird, ist es beim Strahltriebwerk die Verbrennung von Kraftstoff und die damit verbundene Ausdehnung der Verbrennungsgase. Die Ausströmungsgeschwindigkeit wird durch eine Verengung des Ausströmungskanals, durch eine Düse, vergrößert. Als Gemeinsamkeit kann aber herausgestellt werden, daß sowohl beim Strahltriebwerk wie auch hier im Modellversuch durch ausströmende Gase ein Rückstoß, die Schubkraft, erzeugt wird.

Variante a

Man bestimmt zunächst die Masse des kleinen Luftstromerzeugers mit Hilfe einer Tafelwaage. Dann wird er mit Bindfäden an einer aus Stativteilen zusammengestellten Aufhängevorrichtung in horizontaler Lage so befestigt, daß sich sein Haltestab dicht über einem auf der Tischplatte liegenden Meßstab befindet. Die Entfernung zwischen den Aufhängepunkten und der Achse des Luftstromerzeugers soll mindestens 1000 mm betragen. Das Anschlußkabel wird über die Haltevorrichtung geführt, damit der Luftstromerzeuger möglichst leicht beweglich ist (Abb. 5.4.1./1). Man mißt nun den Abstand l seiner Achse von den Aufhängepunk-

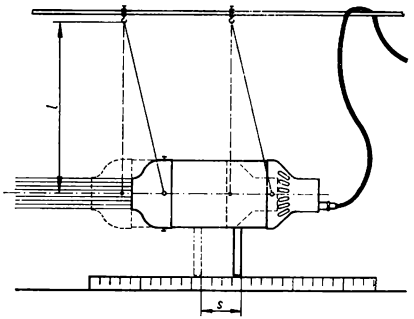


Abb. 5.4.1./1
Bestimmung der Schubkraft eines Luftstromerzeugers durch Messung der Entfernung von der Ruhelage

ten. Seine Ruhelage wird aus der Stellung des Haltestabes über der Skale ermittelt. Nach dem Einschalten erfährt das Gerät einen Rücktrieb und kommt nach kurzer Pendelbewegung zur Ruhe. Die neue Stellung des Haltestabes wird wiederum abgelesen und die Entfernung s von der Ruhelage bestimmt.
Auf den Luftstromerzeuger wirken bei diesem Versuch die Schubkraft F_S und seine Gewichtskraft G ein (Abb. 4.5.1./2). Die Richtung der Resultierenden R entspricht der Richtung der Aufhängefäden. Wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke bestehen die Gleichungen

$$\frac{F_S}{G} = \tan\alpha \qquad \text{und} \qquad \frac{s}{l} = \sin\alpha.$$

Da $\tan\alpha$ für kleine Werte von α nahezu gleich $\sin\alpha$ ist, kann man

$$\frac{F_s}{G} \sim \frac{s}{l}$$

setzen. Aus dieser Proportion ergibt sich für die Schubkraft die Näherungsgleichung

$$F_s = \frac{G \cdot s}{l}.$$

Beispiel

Bei einem Versuch werden folgende Werte ermittelt: $G = 36{,}7$ N; $l = 1$ m; $s = 21$ mm. Die Rücktriebskraft F_s des Luftstromerzeugers beträgt demnach 0,77 N.

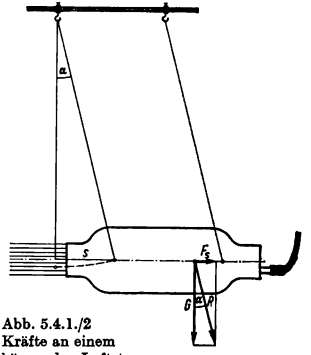


Abb. 5.4.1./2
Kräfte an einem hängenden Luftstromerzeuger

Variante b

Man kann die Schubkraft auch direkt mit einem Kraftmesser messen. Zu diesem Zweck wird in der oben beschriebenen Versuchsanordnung ein Kraftmesser zwischen dem Luftstromerzeuger und dem vor der Düse befindlichen Stativ mit Hilfe einer Hakenmuffe und einer Schnuröse befestigt. Der Kraftmesser wird so weit gespannt, daß der Luftstromerzeuger in die Ruhelage zurückgezogen wird (Abb. 5.4.1./3), Schubkraft und Spannkraft der Feder halten sich hier das Gleichgewicht.

Bei dem im Versuch benutzten Luftstromerzeuger wurde eine Schubkraft von 0,75 N gemessen. Dieser Wert entspricht mit hinreichender Genauigkeit dem durch Rechnung gefundenen.

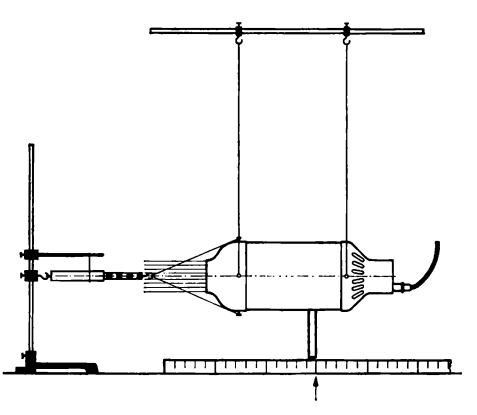


Abb. 5.4.1./3
Messung der Schubkraft eines Luftstromerzeuger s mit einem Kraftmesser

5.4.2. Versuch zur Wirkungsweise eines Strahltriebwerks

1. Gummiblase (Kinderluftballon)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH Nr. 1 V 5.4.1.!

Versuch

Man bläst eine Gummiblase kräftig auf und läßt sie dann los. Die ausströmende Luft erzeugt eine Schubkraft, die Gummiblase wird dadurch angetrieben und schießt in unregelmäßigen Bewegungen kreuz und quer im Raum umher.

Bemerkung

Auf diesem Prinzip beruhen einige Spielzeuge, wie ein kleines Raketenauto, in das als Antriebsvorrichtung eine Gummiblase eingesetzt ist.

5.4.3. Modellversuch zum Raketenantrieb

1. Raketenmodell mit Zubehör (Spielzeug)

Methodische Hinweise

1. Die Wirkungsweise des Modells kann mit Hilfe des Satzes von der Erhaltung des Impulses erklärt werden.
2. Man sollte darauf hinweisen oder in einem Experiment zeigen, daß zwar auch ohne Wasserfüllung durch die ausströmende Luft ein Rückstoß erzeugt wird, daß infolge der geringeren Masse der Luft nach der Gleichung $\dot{m} \cdot \Delta v = F \cdot \Delta t$ die Änderung des Impulses $m \cdot \Delta v$ und damit auch der Kraftstoß $F \cdot \Delta t$ aber erheblich geringer ist als bei Wasserfüllung.

Beschreibung des Gerätes

Das Gerät ist im Spielzeughandel erhältlich und besteht aus einem Hohlkörper aus Plast, der die Form einer Rakete hat (Abb. 5.4.3./1). Die Spitze ist mit einer Gummikappe als Puffer versehen, und am Raketenende sind drei Flossen als Leitwerk angebracht. Die Ausströmdüse ist mit einem Ringwulst verstärkt, der zur Kopplung mit der Luftpumpe dient. Zum Zubehör gehören ein kleiner Trichter und eine Luftpumpe mit einer Koppeleinrichtung. Mit ihr wird das Raketenmodell fest auf eine Gummidichtung des Pumpenstutzens gepreßt. Durch einen Hebel kann die Kopplung plötzlich gelöst werden.

Versuch

Das Experiment wird im Freien ausgeführt. Man füllt den Raketenkörper etwa zu einem Drittel mit Wasser. Der Füllstand kann durch den durchsichtigen Mittelteil des Raketenkörpers beobachtet werden. Dann preßt man das Modell auf den Rohrstutzen der Luftpumpe, bis die Kopplungsbügel über den Ringwulst fassen und das Modell festhalten. Dann pumpt man Luft ein. Die Anzahl der Pumpenhiebe ist der

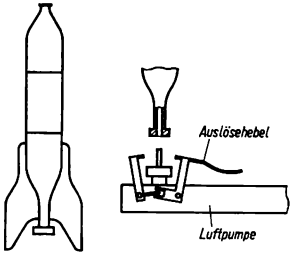


Abb. 5.4.3./1
Raketenmodell mit Luftpumpe
Nebenbild: Koppeleinrichtung

Gebrauchsanweisung des Modells zu entnehmen. Aus Sicherheitsgründen sollte die dort angegebene Anzahl nicht überschritten werden.
Hält man das Modell nach oben gerichtet und löst durch Betätigung des Hebels die Kopplung, dann schießt das Modell vom Rückstoß des ausgestoßenen Wassers angetrieben empor und erreicht eine Höhe von 20 m bis 40 m.

Bemerkungen

1. Der Antrieb des Modells erfolgt durch einen Kraftstoß von kurzer Dauer. Das gesamte Wasser wird im Bruchteil einer Sekunde aus dem Raketenkörper getrieben.
2. Aus Sicherheitsgründen lasse man die Schüler beim Start einige Schritte zurücktreten und starte das Modell unter einem geringen Neigungswinkel, damit es eine steile parabolische Bahn durchfliegt und in einiger Entfernung von der Schülergruppe zur Erde fällt.

6. Der Magnuseffekt — Bumerangmodelle

6.0. Methodische Bemerkungen

6.0.1. Dieses Kapitel bringt einige Versuche zum *Magnuseffekt* und Experimente mit Bumerangmodellen. In V 6.1.1. wird das Strömungsfeld um einen rotierenden Zylinder veranschaulicht. Er zeigt deutlich, daß der primären Strömung eine Zirkulationsströmung überlagert wird und dadurch ein Strömungsbild entsteht, das dem an einem Tragflügel ähnelt. An der einen Seite des Zylinders verlaufen die Stromlinien enger, dort tritt eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf, an der anderen Seite ist es umgekehrt. Nach der Bernoullischen Gleichung kann man die weiteren Auswirkungen dieser Rotation voraussagen. Durch die Experimente V 6.1.2. bis V 6.1.4. kann die Richtigkeit dieser Überlegungen bestätigt werden.

6.0.2. Die Experimente mit Bumerangmodellen erwecken das Interesse der Schüler und regen zum selbständigen Experimentieren an. Da man zur Erklärung der Wirkungsweise des Bumerangs eine Reihe von physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhängen heranziehen kann (Kreiselgesetze, Bernoullische Gleichung, Entstehung des aerodynamischen Auftriebs, Wirkung einer Zirkulationsströmung), sind diese Experimente gut für die Wiederholung geeignet.

6.1. Der Magnuseffekt

6.1.1. Strömungsverlauf um einen rotierenden Zylinder

1. Strömungswanne
2. kleiner Metallzylinder mit Fuß

Methodischer Hinweis

Zur Erklärung dieser Erscheinung kann man annehmen, daß durch die Reibung zwischen den Flüssigkeitsteilchen und der Zylinderwand bei der Rotation eine Zirkulationsströmung entsteht, die der primären Strömung überlagert wird.

Versuch

Der Zylinder wird auf dem dazugehörigen Fuß in die Strömungswanne gestellt. Wird die Antriebsvorrichtung der Strömungswanne eingeschaltet, so bildet sich eine zu beiden Seiten des Zylinders symmetrisch verlaufende Strömung aus. Versetzt man den Zylinder durch Anwerfen mit der Hand in Umdrehung, so tritt auf

der Seite, auf der die Rotationsrichtung mit der Strömungsrichtung übereinstimmt, eine Geschwindigkeitszunahme, auf der anderen Seite des Zylinders eine Geschwindigkeitsabnahme ein. An der erstgenannten Stelle drängen sich infolgedessen die Stromlinien zusammen, während sie an der zweiten weiter auseinander liegen (Abb. 6.1.1./1).

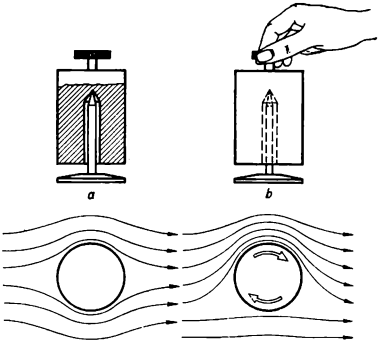


Abb. 6.1.1./1
Stromlinienverlauf um einen Zylinder a) bei Stillstand, b) bei Rotation des Zylinders

6.1.2. Nachweis des Magnuseffekts an einem herabrollenden Papierzylinder [SE]

1. Papierzylinder ⑧, dazu erforderliches Material: Papierblatt (etwa 30 cm × 15 cm) Klebstoff
2. Reißbrett oder Papptafel

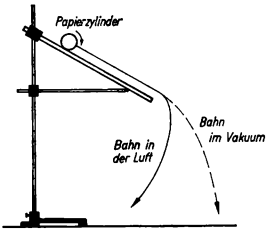


Abb. 6.1.2./1
Wurfkurve eines rotierenden Papierzylinders in der Luft. Die gestrichelte Linie würde der Bahn im Vakuum entsprechen.

Versuch

Zum Nachweis des Magnuseffekts eignet sich folgender Versuch: Ein Papierblatt wird zu einem Zylinder mit einer Länge von etwa 30 cm und einem Durchmesser von 4 cm zusammengeklebt. Läßt man diesen Zylinder auf einer geneigten Ebene, einem schräg gestellten Reißbrett, einer Papptafel oder dergleichen abrollen, so entspricht seine Bahn nach dem Verlassen der Ebene nicht der Wurfparabel; der Körper weicht vielmehr entgegen der Ablaufrichtung von ihr ab (Abb. 6.1.2./1).

6.1.3. Nachweis des Magnuseffekts an einem fallenden und gleichzeitig rotierenden Pappzylinder [SE]

1. Pappzylinder (⌀ etwa 50 mm, Länge etwa 1000 mm)
2. dünne Schnur

Methodischer Hinweis

Zur Erklärung der Wirkungsweise vergleiche MH V 6.1.1.!

Versuch

Nahe den Enden eines Pappzylinders befestigt man je einen Bindfaden. Die anderen Fadenenden bindet man an einen Stativ- oder Holzstab, der in waagerechter Lage von einem Stativ gehalten wird. Der Pappzylinder hängt dabei wie eine Schaukel herab. Dann wickelt man die Schnüre auf dem Zylinder auf und schlingt etwa in der Mitte einen Hilfsfaden um Zylinder und Stab. Der Zylinder wird dadurch in dieser Lage gehalten. Man läßt die Vorrichtung zur Ruhe kommen und brennt dann den Hilfsfaden durch. Der Zylinder fällt herab, wobei er sich gleichzeitig dreht, da sich die Schnüre abrollen. Der Pappzylinder fällt nicht lotrecht nach unten, sondern rollt auf einer gekrümmten Bahn ab, wobei die Richtung der Abweichung von der Vertikalen von der Drehrichtung des Zylinders abhängt (Abb. 6.1.3./1).

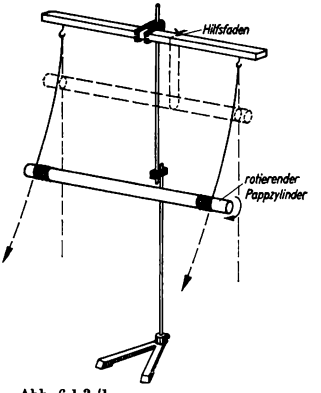


Abb. 6.1.3./1
Fallender und gleichzeitig rotierender Pappzylinder

6.1.4. Ablenkung einer rotierenden Kugel durch den Magnuseffekt

1. Stahlkugeln, Murmeln oder Stahlwalzen aus einem Wälzlager
2. Glasstreifen oder gehobeltes Brett (etwa 60 cm × 10 cm)
3. Glastrog

Versuch

Man befestigt an einem Stativ eine Glasscheibe, so daß sie unter einem Winkel von etwa 45° schräg nach unten geneigt ist und auf dem Rand eines Glastrogs aufliegt. Diesen füllt man mit Wasser, in das die Scheibe noch hineinragt. Läßt man nun eine Kugel oder Walze die geneigte Ebene herabrollen, so folgt sie nach dem Verlassen der Scheibe nicht dem Verlauf der Wurfparabel (Abb. 6.1.4./1).

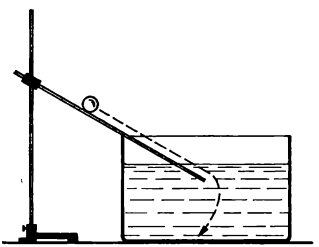


Abb. 6.1.4./1
Ablenkung einer Kugel durch den Magnuseffekt

6.2. Bumerangmodelle

6.2.1. Versuche mit Bumerangmodellen

1. Bumerangmodelle aus Pappe

Methodische Hinweise

1. Diese Experimente regen die Schüler zum selbständigen Experimentieren an.
2. Zur Erklärung der Wirkungsweise des Bumerangs können Gesetzmäßigkeiten aus verschiedenen Gebieten herangezogen bzw. wiederholt werden.
   Der Bumerang wirkt im Fluge infolge seiner Rotation als Kreisel. Seine Rotationsachse behält deshalb ihre Richtung bei.
   Der Querschnitt der Schenkel eines Bumerangs ähnelt dem Profil eines Tragflügels. Dadurch kommt bei der Rotation ein aerodynamischer Auftrieb zustande. Beim Modell wird das durch eine leichte Schränkung der Schenkel erreicht. Durch die Rotation kommt eine Zirkulationsströmung zustande, die eine Komponente senkrecht zur Flugrichtung in der Rotationsebene hervorruft (vgl. V 6.1.1.). Infolgedessen bewegt sich der Bumerang auf einer gekrümmten Bahn.

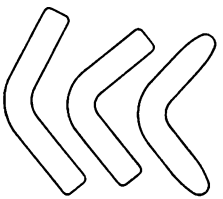


Abb. 6.2.1./1
Verschieden geformte Bumerangmodelle

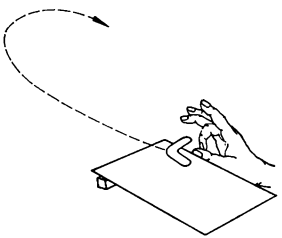


Abb. 6.2.1./2
Fortschleudern eines Bumerangmodells

Versuch

Aus einem Kartonstück schneidet man ein Bumerangmodell mit einer Schenkellänge von etwa 5 cm (Abb. 6.2.1./1). Man verwindet die Schenkel leicht windschief gegeneinander, so daß sie beim Rotieren einen positiven Anstellwinkel haben. Die zweckmäßigste Form des Modells, das Verhältnis seiner Breite zur Schenkellänge und das günstigste Gewicht ermittelt man durch wiederholtes Probieren. Das Modell legt man auf eine schräg aufwärts gerichtete Unterlage, so daß ein Schenkel seitlich übersteht. Schnellt man das Modell mit dem Finger fort, so rotiert es und beschreibt eine gekrümmte Bahn (Abb. 6.2.1./2). Es kehrt bei geeignetem Neigungswinkel der Unterlage sogar an seinen Ausgangspunkt zurück.

Register

Abreißverfahren 216
Absorption 191, 229, 238, 240
Adsorption 191, 229, 234ff.
aerodynamisches Paradoxon 265, 317ff., 321
Alkoholometer 114
allgemeine Strömungslehre 259
Analogbetrachtung 48, 63, 119
Aneroidbarometer 119, 156
Anfahrwirbel 263
Anstellwinkel 239
Aräometer 111f.
Archimedisches Prinzip 22f., 84f., 89f., 112
Aufdruck 21, 60, 73, 87
Auflösen fester Körper 231
Auftrieb 22, 82ff., 120, 174ff., 328
—, aerodynamischer 323, 336, 340ff., 365, 373
Autorotation 357f.
Axialturbine 24, 117

Barometer 118, 146, 156f.
Barometerprobe 119
Behnsches Rohr 155f.
Bernoullische Gleichung 306, 311, 317, 321, 328, 369
Blasensprenger 127
BMSR-Technik 119
Bodendruck 21f., 60ff.
Bourdonsche Röhre 156
Boylesches Gesetz 119, 165ff.
Bremse, hydraulische 54
Brownsche Bewegung 193, 195
Bumerangmodelle 373

Dasymeter 182
Depression, kapillare 224
Dialysator 247
Dichte 76ff., 94, 97f., 111f.
Diffusion 191, 241ff.
—, Modellversuch zur 245
Doppelthermoskop 61
Dosenbarometer 119, 150, 156
Dosenlibelle 43
Drallprüfer 276
Drehmomentenwaage 294
Drehzahl 358f.
Druck 160, 218
—, hydrostatischer 20f.
—, osmotischer 248
Druckdose 62
Druckgefälle 303f.
Druckkessel 119
Druckkraft, dynamische 264
Drucksonde 309
Druckübertragung 20, 44ff., 62
—, pneumatischer 62
Druckverteilung 334
Durchflußmenge 314
Durchflußmengenmesser 314

Einkomponentenwaage 342
Einstellwinkel 329
Energietransport 327
Engler-Grade 200f.
Expansionsvermögen 137

Fadensonde 276f., 332, 336
Flachtrudeln 357
Flammensonde 286, 331
Flotation 210
Flüssigkeitsmodelle 32, 52
Freistrahlturbine 24, 115

Gas- und Wärmetheorie, kinetische 254
Gefäßbarometer 119

Gefäße, verbundene 30, 72
Geschwindigkeitsverteilung 270f.
Giftheber 144
Glasarbeiten 27ff.
Glasrohrschneider 29
Grenzschicht 259, 268
Guericke-Versuch 126, 147

Handspritze 184
Heberbarometer 119
Heber, selbstanlaufender 142
Heißluftdusche 260
Heronsball 143
Höhenleitwerk 355
Höhenmessungen 156
Hubschraube 364
Hubschrauber 330
Huygenssches Kontrabarometer 149
Hydraulik 48

Isotherme Zustandsänderung 119

Kaltwasserschwimmer 107
Kanalwaage 41
Kapillaranalyse 228
Kapillarität 191, 203
Kapillarwirkung 223ff.
Kaplanturbine 117
Kapselluftpumpe 120, 123
kartesianischer Taucher 106
Kolbendruck 20, 44
Kolbenprober 168
Kolbenpumpe 120f.
Kompressibilität 34
Kontinuitätsgleichung 264, 301, 323, 328
Kontrollbarometer 119
Kraftwagenbremse 50
Krone des Hieron 22, 91
Kugelspritze 45

Laktometer 114
Laminarität 259, 274
Landehilfe 351
Landeklappe 351
Leitwerk 354
Lösen 229ff.
Löslichkeit fester Stoffe 230
Lösungsvorgänge 191
Luftdruck 118, 124f., 146ff.
Luftdusche 260
Luftpumpe 120f.
Luftschraube 329, 358ff.
Luftschraubensonde 283, 360, 365
Luftstrom, drallfreier 260
Luftstromerzeuger 260

Magdeburger Halbkugeln 126
Magnuseffekt 370f.
Manometer 119, 146ff., 160ff.
Meldesche Röhre 152, 170
Meßwandler 48, 62, 119
Mikromanometer 163, 271
Mischen 229, 232
Mohrsche Waage 98
Moleküle, Verschiebbarkeit der 192

Nebelströmungsgerät 260, 279, 328, 331, 337, 351

Oberflächenspannung 191, 203ff.
Ölluftpumpe 122f.
Ölmolekül 192
Osmose 191, 241, 248f.
—, Modellversuch zur 249

Papierchromatographie 228
Paradoxan, aerodynamisches 265, 317ff.
—, hydrostatisches 21, 69, 320f.
Pascalsche Waage 21, 65
Peltonturbine 24, 115
Pitotrohr 265, 309
Pneumatik 48
Polardiagramm 329f., 345ff.
Prandtlsches Staurohr 265, 271, 310, 313
Presse, hydraulische 54, 57
Pumpenmodelle 184

Quecksilber 24ff.
Quecksilberbarometer 146f.
Querruder 356

Raketenantrieb 336
Ramsayfett 122
Randwirbel 336f.
Rauchkammer 195
Reaktionsturbine 24, 116
Reynoldsche Zahl 259, 274
Ringblende 315
Röhrenlibelle 41

Salmiaknebel 268
Sättigungsmenge 231
Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie 114
Saug-Druck-Pumpe 185
Saugheber 139 ff.
Saugpumpe 185
Säureprüfer 113
Schalenkreuzanemometer 313
Schlagwetteranzeiger 257
Schlauchwaage 40
Schleppwanne 264, 291
Schweredruck 21, 59 ff.
Schwimmen 100 ff.
Schubkraft 366
Segnersches Wasserrad 24
Seifenblasen 132, 220
Seifenhaut 218
Seifenlösung 124
Seitendruck 21, 71
Seitenleitwerk 356
Sicherheitsflasche 121
Spannkraft 118, 133, 135
Springbrunnen 75
Spritzflasche 134
Starthilfe 351
Stationsbarometer 119
Staudruck 265, 309
Steiltrudeln 357
Strahltriebwerk 330, 365
Stroboskop 358
Stromfäden 259 f., 266 f.
Stromfädengerät 293
Stromlinien 259, 266 ff.
Strömung, drallfreie 276
—, laminare 259, 266 ff.
—, schlichte 259
—, turbulente 259, 273 ff.
Strömungsgeschwindigkeit 310 f.
Strömungskammer 267
Strömungskanal 290
Strömungswanne 259, 263, 289 f.
Strömungswiderstand 264, 293
Tageslichtschreibprojektor „Polylux 1" 189, 263
Torricelli-Versuch 146
Tragschraube 365
Tropfenbildung 206
Tropfgeschwindigkeit 208
Trudeln 357
Turbulenz 273 ff.
Variometer 153 f.
Ventilheber 145
Venturidüse 265, 311
Verformung 202
Viskosität 197 ff.
Vorflügel 349 ff.
V-Stellung 353
Waage, hydrostatische 22
Wagenheber, hydraulischer 54, 57
Wasserbarometer 147
Wasserkraftmaschinen 23, 114 f.
Wassermotor 23
Wasserpumpen 185
Wasserrad, oberschlächtiges 23, 114
—, Segnersches 23
—, unterschlächtiges 114
Wasserstandsanzeiger 38
Wasserstrahlpumpe 120, 316
Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät 263, 290
Wichte 22, 96, 182
Widerstand 328 ff.
Widerstandsmessung 293 ff.
Winddruckmeßgerät 264, 297
Wirbelbildung 273, 279 ff.
Wirbel, ringförmige 287 f.
Wirkungskette 48, 62, 119
WSP 220 263
Zerstäuber 317
Zirkulationsströmung 328, 370, 373
Zugkraft 360 f.
Zustandsänderung, isotherme 119
Zweikomponentenwaage 329, 347

Quellennachweis der Abbildungen

Foto-Römer, Karl-Marx-Stadt, 4.0.2./7; Werkfoto VEB Elektrowerke Altenburg, 4.0.2./8; Werkfoto VEB Labor-Prüfgerätebau Karl-Marx-Stadt 4.3.2./1, 5.1.13./1; Werkfoto VEB Metallbau Apolda 4.2.14./1; VWV Archiv 1.0.5./1, 1.0.5./3, 1.3.4./1, 1.3.5./1, 2.0.5./1a, 2.0.5./3, 4.0.2./1, 4.0.2./4, 4.0.2./6, 4.1.1./1, 4.2.5./2, 4.2.5./3, 4.2.5./4, 4.2.6./1, 4.2.7./2, 5.1.3./1, 5.1.8./1, 5.2.2./1, 5.2.2./2; VWV Seifert, M., Berlin 1.0.5./2, 2.0.5./1b, 2.0.5./4, 4.0.2./3, 4.0.2./5, 4.2.16./1.