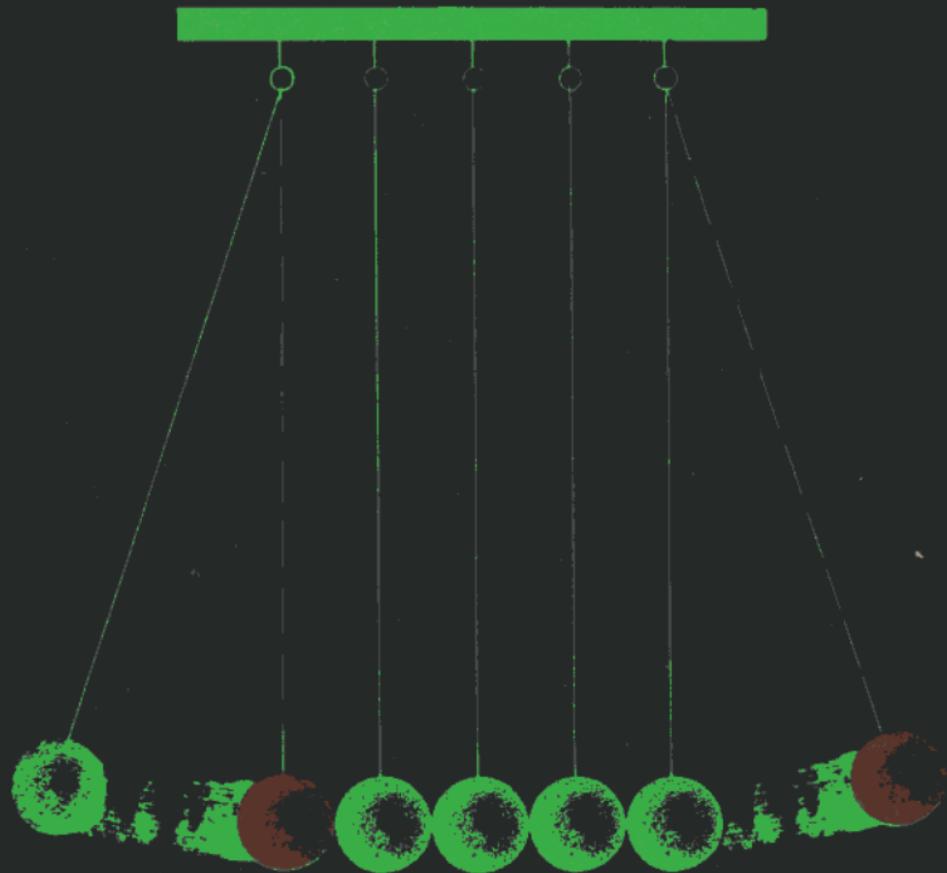


# Physikalische Schulversuche

1|2

## Mechanik der festen Körper



---

# **Physikalische Schulversuche**

---

**Erster und zweiter Teil**

**Meßkunde**

**Statik und Dynamik fester Körper**

**Herausgegeben von Georg Srockhoff**

**Bearbeitet von Josef Fischer**

**8. Auflage**



**Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1983**

**Verfaßt von**

Rudolf Girke und Georg Sprockhoff (1.0., 1.1. außer 1.1.7. und 1.1.8., 1.2.2., 1.3. außer 1.3.6., 2.0., 2.1., 2.2., 2.3.1. bis 2.3.4., 2.3.8., 3.0., 3.2. außer 3.2.6. und 3.2.12., 3.3. außer 3.3.7. und 3.3.9., 3.4.1. bis 3.4.8., 3.4.14., 3.4.23., 3.5., 4.1.1., 4.1.3., 4.3.7., 4.4.\*, 4.5.\*, 4.6.\*., 5.0., 6.1.1., 6.1.10., 6.1.13., 6.1.14., 6.2.1. bis 6.2.3., 6.2.5., 6.2.8. bis 6.2.10., 6.2.13., 7.1.7., 7.1.9., 7.1.17., 7.2.6., 7.2.7., 7.2.9. bis 7.2.12.)

Josef Fischer (1.1.7., 1.1.8., 1.2.1., 1.3.6., 2.3.5. bis 2.3.7., 2.3.9., 3.1. 3.3.7., 3.3.9., 3.4.9. bis 3.4.13., 3.4.15. bis 3.4.22., 4.0.\*., 4.1. außer 4.1.1., 4.1.3. und 4.1.8., 4.2. außer 4.2.3., 4.3. außer 4.3.7., 4.4.\*., 4.5.\*., 4.6.\*., 5.1., 5.2., 6.0., 6.1.2. bis 6.1.9., 6.1.11., 6.1.12., 6.1.15. bis 6.1.18., 6.2.4., 6.2.6., 6.2.7., 6.2.11., 6.2.12., 7.0., 7.1.1. bis 7.1.6., 7.1.8., 7.1.10. bis 7.1.13., 7.2.1. bis 7.2.5., 7.2.8., 7.2.13.)

Dr. Hans-Joachim Wilke (4.0.\*., 4.1.8., 4.2.3., 4.5.2., 4.6.3., 5.1.4., 5.2.3., 5.2.10., 6.1.13.).

Günter Buse (3.2.6., 3.2.12.)

Wolfgang Hering (4.0.\*.)

Die Abschnitte mit einem Stern (\*) wurden von mehreren Autoren verfaßt.

Redaktion: Bettina Rosenkranz, Willi Wörstenfeld

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1983

Erweiterte Ausgabe der 7. Auflage

Lizenz Nr. 203 · 1000/83 (BN 022172-1)

LSV 0645

Einband: Manfred Behrendt

Zeichnungen: Kurt Dornbusch, Heinrich Linkwitz

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, Bad Langensalza

Schrift: 9/10 Extended Monotype

Redaktionsschluß: 20. 12. 1981

Bestell-Nr. 7090437

DDR: 11,40 M

# **Inhalt**

<b>Einleitung</b>	13
<b>1. Maße und Messen</b>	17
1.0. Methodische Bemerkungen	17
1.1. Längen und Raummessungen	19
1.1.1. Einfache Längenmessungen	19
1.1.2. Messungen mit dem Spiegelmeßstab	20
1.1.3. Modellversuch zum Meßschieber	21
1.1.4. Messungen mit dem Meßschieber	22
1.1.5. Modellversuch zur Feinmeßschraube	23
1.1.6. Messungen mit der Feinmeßschraube	24
1.1.7. Flächenbestimmungen	24
1.1.8. Volumenbestimmung fester Körper durch Längenmessungen	26
1.1.9. Volumenbestimmung von Flüssigkeiten	27
1.1.10. Volumenbestimmung eines Gefäßes durch Wägung	28
1.1.11. Volumenbestimmung fester Körper durch Wasserverdrängung im Meßzylinder	28
1.1.12. Volumenbestimmung fester Körper mit dem Überlaufgefäß	29
1.2. Wägungen	30
1.2.1. Bestimmung der Gewichtskraft mit dem Kraftmesser	30
1.2.2. Massenvergleich mit der Waage	30
1.3. Zeitmessungen	31
1.3.1. Zeitmessung mit der Sanduhr	31
1.3.2. Zeitmessung mit der Wasseruhr	33
1.3.3. Vergleich zwischen Sanduhr und Fadenpendel — Zeitteilung	33
1.3.4. Zeitmessung mit dem Stabpendel	34
1.3.5. Zeitmessung mit dem Metronom	35
1.3.6. Zeitmessung mit dem Digitalzähler Polydigit	35
<b>2. Physikalische Grundeigenschaften der Körper</b>	37
2.0. Methodische Bemerkungen	37
2.1. Volumen und Gestalt	38
2.1.1. Kennzeichnen des festen und flüssigen Aggregatzustandes durch Vergleich von Volumen und Form	38
2.1.2. Unterscheidung des flüssigen und gasförmigen Aggregatzustandes — Versuch mit einer Knallbüchse	39
2.1.3. Gegenseitige Verdrängung fester Körper	40

## Inhalt

---

2.1.4.	Verdrängung von Flüssigkeiten beim Eintauchen von festen Körpern . . . . .	40
2.1.5.	Verdrängung von Flüssigkeiten durch Gase — Die Taucherglocke . . . . .	40
2.1.6.	Einfüllen von Wasser in eine Flasche — Die Luft als Körper . . . . .	41
2.2.	<b>Mass, Gewichtskraft, Trägheit, Dichte</b> . . . . .	42
2.2.1.	Wirkungen der Gewichtskraft . . . . .	42
2.2.2.	Wirkungen der Trägheit . . . . .	42
2.2.3.	Mass, Dichte fester Körper . . . . .	43
2.2.4.	Dichte von Flüssigkeiten — Bestimmen mit einem Meßzylinder . . . . .	43
2.2.5.	Dichte von Flüssigkeiten — Bestimmen mit einem Pyknometer . . . . .	44
2.2.6.	Mass der Luft — Dichte gasförmiger Körper . . . . .	44
2.2.7.	Beobachten der Trägheit an einer Walze oder Kugel . . . . .	46
2.2.8.	Beobachten der Trägheit an einem Holzklotz . . . . .	47
2.2.9.	Trägheitswirkung beim Fortziehen der Unterlage . . . . .	47
2.2.10.	Trägheitswirkung beim Anheben eines Körpers . . . . .	48
2.2.11.	Trägheit einer hängenden Kugel . . . . .	49
2.2.12.	Trägheit einer Flüssigkeit . . . . .	49
2.2.13.	Trägheit der ruhenden Luft . . . . .	50
2.3.	<b>Teilbarkeit, Porosität, Verformbarkeit</b> . . . . .	50
2.3.1.	Zerkleinern eines festen Körpers . . . . .	50
2.3.2.	Zerstäuben einer Flüssigkeit . . . . .	51
2.3.3.	Ausbreitung von Gasen . . . . .	51
2.3.4.	Gefügemodell zum Veranschaulichen der Teilbarkeit . . . . .	52
2.3.5.	Adhäsion und Kohäsion . . . . .	52
2.3.6.	Versuche zur Adhäsion . . . . .	53
2.3.7.	Aufnahmefähigkeit und Durchlässigkeit für Wasser — Porosität (Modellversuche) . . . . .	55
2.3.8.	Gasdurchlässigkeit eines Mauerziegels . . . . .	56
2.3.9.	Elastische, plastische und thermoplastische Verformbarkeit . . . . .	57
3.	<b>Feste Körper in Ruhe</b> . . . . .	59
3.0.	<b>Methodische Bemerkungen</b> . . . . .	59
3.1.	<b>Statische Kraftwirkungen, Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften</b> . . . . .	64
3.1.1.	Die Kraft als Ursache einer Verformung . . . . .	64
3.1.2.	Kraftmessung mit einem Kraftmesser — Die Kraft als vektorielle Größe . . . . .	65
3.1.3.	Verschiebung der Kraft entlang ihrer Wirkungslinie . . . . .	66
3.1.4.	Addition von Kräften mit gemeinsamer Wirkungslinie . . . . .	67
3.1.5.	Bestätigung des 3. Newtonschen Gesetzes — Das Gegenwirkungsprinzip . . . . .	68
3.1.6.	Addition von Kräften mit unterschiedlichen Richtungen — Benutzung von Kraftmessern . . . . .	68
3.1.7.	Parallelogramm der Kräfte — Benutzung von Hakenkörpern . . . . .	70
3.1.8.	Zerlegung einer Kraft in zwei Komponenten, die senkrecht aufeinander stehen — Wagen auf waagerechter Bahn . . . . .	71
3.1.9.	Zerlegung einer Kraft in zwei parallele Kräfte . . . . .	72
3.1.10.	Kräftezerlegung am Ausleger (Kran) . . . . .	74
3.2.	<b>Elastische Kräfte</b> . . . . .	74
3.2.1.	Herleitung des Hookeschen Gesetzes an einer Schraubenfeder . . . . .	74
3.2.2.	Bestimmen einer unbekannten Gewichtskraft mit Hilfe einer Schraubenfeder . . . . .	76
3.2.3.	Dehnung einer Gummischnur . . . . .	77
3.2.4.	Elastische Dehnung von Drähten . . . . .	78

3.2.5.	Unelastische Dehnung von Drähten . . . . .	80
3.2.6.	Längenänderung, Fließverhalten und Zugfestigkeit einer Drahtprobe . . . . .	82
3.2.7.	Zugfestigkeit und Sprödigkeit eines Glasfadens . . . . .	83
2.3.8.	Versuche mit Bologneser Fläschchen und Glastränen — Hohe Sprödigkeit schnell gekühlter Gläser . . . . .	83
3.2.9.	Biegung einer Blattfeder . . . . .	85
3.2.10.	Zerbrechen eines Eisendrahtes durch wiederholtes Biegen . . . . .	86
3.2.11.	Zerdrehen eines Eisendrahtes . . . . .	86
3.2.12.	Die elastische und plastische Verformung von Polymeren . . . . .	87
<b>8.3.</b>	<b>Schwerpunkt und Gleichgewichtslage — Standfestigkeit</b> . . . . .	88
3.3.1.	Balancieren eines flachen Körpers auf der Fingerspitze . . . . .	88
3.3.2.	Balancieren eines Papierblattes auf einer Bleistiftspitze . . . . .	89
3.3.3.	Schwerlinien und Schwerpunkt von Blechscheiben . . . . .	89
3.3.4.	Schwerlinien und Schwerpunkt von Papp scheiben . . . . .	90
3.3.5.	Gleichgewichtslagen eines hängenden Körpers . . . . .	91
3.3.6.	Gleichgewichtslagen einer Kugel . . . . .	92
3.3.7.	Gleichgewichtslagen — Schwerpunkt außerhalb des Körpers . . . . .	92
3.3.8.	Pappfiguren im stabilen Gleichgewicht . . . . .	93
3.3.9.	Standfestigkeit eines Prismas . . . . .	94
3.3.10.	Standfestigkeit einer Quaders . . . . .	95
3.3.11.	Standfestigkeit einer Kerze und eines Bleistiftes . . . . .	95
3.3.12.	Standfestigkeit einer kleinen Flasche . . . . .	96
3.3.13.	Standfestigkeit von Schachteln mit verschiedenen Füllungen . . . . .	96
3.3.14.	Messen der Standfestigkeit eines Quaders . . . . .	97
<b>8.4.</b>	<b>Kraftumformende Einrichtungen — Das Drehmoment</b> . . . . .	98
3.4.1.	Die Wippe . . . . .	98
3.4.2.	Vorversuche mit Hebeln . . . . .	99
3.4.3.	Zweiseitiger Hebel . . . . .	99
3.4.4.	Einseitiger Hebel . . . . .	101
3.4.5.	Waagenmodelle . . . . .	102
3.4.6.	Seilmaschinen an einer Standleiter . . . . .	105
3.4.7.	Feste und lose Rolle . . . . .	106
3.4.8.	Der Klobenzug . . . . .	107
3.4.9.	Der Potenzflaschenzug . . . . .	108
3.4.10.	Der Faktorenflaschenzug . . . . .	108
3.4.11.	Der Differentialflaschenzug . . . . .	109
3.4.12.	Das Drehmoment — Herleitung des Momentensatzes mit der Drehmomentenwaage . . . . .	110
3.4.13.	Bestätigung des Momentensatzes mit einer Momentenscheibe . . . . .	113
3.4.14.	Die Stufenrolle — Das Wellrad . . . . .	115
3.4.15.	Kraftübertragung durch Riemen- oder Seiltrieb . . . . .	116
3.4.16.	Offener Riementrieb . . . . .	117
3.4.17.	Gekreuzter Riementrieb . . . . .	118
3.4.18.	Stufenscheibentrieb . . . . .	118
3.4.19.	Einfacher Stirnradtrieb . . . . .	119
3.4.20.	Doppelte Zahnradübersetzung . . . . .	120
3.4.21.	Kräfte an der geneigten Ebene . . . . .	121
3.4.22.	Modell einer Schraube . . . . .	124
3.4.23.	Kräftezerlegung am Keil . . . . .	125
<b>8.5.</b>	<b>Arbeit und Leistung</b> . . . . .	126
3.5.1.	Arbeit an der Rolle und am Flaschenzug — Arbeitsdiagramm . . . . .	126
3.5.2.	Arbeit an der geneigten Ebene . . . . .	128

3.5.3. Ermittlung der Arbeit beim Spannen einer Feder . . . . .	129
3.5.4. Arbeit und Leistung beim Ziehen eines Wagens . . . . .	130
3.5.5. Arbeit und Leistung beim Stangenklettern . . . . .	131
3.5.6. Modellversuch zum Pronyschen Zaum . . . . .	132
3.5.7. Pronyscher Zaum an einer Modelldampfmaschine . . . . .	133
3.5.8. Pronyscher Zaum an einem Elektromotor . . . . .	134
<b>4. Translatorische Bewegungen . . . . .</b>	<b>136</b>
4.0. Methodische Bemerkungen . . . . .	136
4.1. Die gleichförmige geradlinige Bewegung . . . . .	165
4.1.1. Veranschaulichung einer gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit einer rollenden Kugel — Geschwindigkeit . . . . .	165
4.1.2. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit der Fallrinne — Geschwindigkeit . . . . .	167
4.1.3. Geschwindigkeitsbestimmungen an gleichförmigen Bewegungen im Freien . . . . .	170
4.1.4. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit dem Reifenapparat . . . . .	171
4.1.5. Bestätigung der Gesetze der geradlinigen gleichförmigen Bewegung mit der Fallrinne nach Duff . . . . .	175
4.1.6. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit dem Bandgerät . . . . .	176
4.1.7. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit dem Schienenwagen . . . . .	180
4.1.8. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit einer Luftkissenbahn . . . . .	183
4.2. Die gleichmäßig beschleunigte geradlinige Bewegung . . . . .	187
4.2.1. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit der Fallrinne — Momentangeschwindigkeit und Beschleunigung . . . . .	187
4.2.2. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit dem Reifenapparat . . . . .	192
4.2.3. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit der Luftkissenbahn . . . . .	198
4.2.4. Bestätigung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit der Fallrinne nach Duff . . . . .	201
4.2.5. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit dem Bandgerät . . . . .	202
4.2.6. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit dem Schienenwagen . . . . .	205
4.3. Der freie Fall . . . . .	206
4.3.1. Vergleich der Fallbewegungen im luftverdünnten Raum . . . . .	206
4.3.2. Bestätigung des Weg-Zeit-Gesetzes des freien Falls mit einer Fallschnur . . . . .	207
4.3.3. Bestätigung des Weg-Zeit-Gesetzes des freien Falls durch Vergleich der Fallzeiten beim Fall aus verschiedenen Höhen . . . . .	208
4.3.4. Bestimmung der Fallbeschleunigung durch Messung der Fallzeit eines aus 5 m Höhe fallenden Körpers . . . . .	209
4.3.5. Bestimmung der Fallbeschleunigung mit elektronischer Zeitmessung . . . . .	210
4.3.6. Bestimmung der Fallbeschleunigung mit dem physischen Pendel nach Whiting . . . . .	212
4.3.7. Bestimmung der Fallbeschleunigung mit dem Fadenpendel . . . . .	214
4.4. Zusammengesetzte Bewegungen . . . . .	215
4.4.1. Zusammensetzung zweier gleichförmiger Bewegungen — Veranschaulichung an der Wandtafel . . . . .	215



4.4.2.	Zusammensetzung zweier gleichförmiger Bewegungen – Veranschaulichung mit einer rollenden Kugel . . . . .	216
4.4.3.	Zusammensetzung einer gleichförmigen und einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung . . . . .	217
4.4.4.	Der horizontale Wurf – Punktweise Aufnahme der Wurfkurve' . . . . .	220
4.4.5.	Vergleich der Fallzeiten beim freien Fall und beim horizontalen Wurf . . . . .	222
4.4.6.	Der schräge Wurf – Abhängigkeit der Wurfweite vom Wurfwinkel . . . . .	222
4.4.7.	Veranschaulichung von Wurfbahnen mit einem Wurfbahnmodell . . . . .	225
4.4.8.	Der lotrechte Wurf nach oben . . . . .	226
4.5.	<b>Kraft und Bewegung</b> . . . . .	228
4.5.1.	Herleitung des zweiten Newtonschen Gesetzes mit dem Schienenwagen . . . . .	228
4.5.2.	Herleitung des zweiten Newtonschen Gesetzes mit der Luftkissenbahn . . . . .	230
4.5.3.	Herleitung des zweiten Newtonschen Gesetzes mit dem Reifenapparat . . . . .	233
4.5.4.	Herleitung des Grundgesetzes der Mechanik mit einem gleichmäßig beschleunigten absinkenden Körper . . . . .	235
4.5.5.	Änderung der Gewichtskraft eines beschleunigt absinkenden oder aufsteigenden Körpers – Die Trägheitskraft . . . . .	239
4.5.6.	Änderung der Gewichtskraft beim Kniebeugen und -strecken . . . . .	241
4.5.7.	Scheinbare Schwerelosigkeit gleichzeitig fallender Körper . . . . .	241
4.6.	<b>Reibung</b> . . . . .	242
4.6.1.	Reibungsarten (Vorversuch) . . . . .	242
4.6.2.	Verminderung der Reibung durch ein Luftkissen – Modell eines Luftkissenfahrzeugs . . . . .	244
4.6.3.	Verminderung der Reibung durch ein Luftkissen . . . . .	245
4.6.4.	Herleitung der Bestimmungsgleichung für den Betrag der Reibungskraft der Gleitreibung – Die Reibungszahl . . . . .	246
4.6.5.	Bestätigung der Proportionalität der Beträge der Reibungskraft und der Normalkraft . . . . .	248
4.6.6.	Haft- und Gleitreibung bei Gleitversuchen auf der geneigten Ebene . . . . .	250
4.6.7.	Haft- und Gleitreibung an einem geneigten Stab . . . . .	251
4.6.8.	Haftreibungszahl einer Kette . . . . .	252
4.6.9.	Bestimmung der Reibungszahl aus dem Böschungswinkel (Schüttwinkel) eines Sandhaufens . . . . .	254
4.6.10.	Haftreibung und Gleitreibung an einem waagerecht gelagerten Stab . . . . .	255
5.	<b>Mechanische Energie, Impuls und Kraftstoß</b> . . . . .	257
5.0.	<b>Methodische Bemerkungen</b> . . . . .	257
5.1.	<b>Mechanische Energie</b> . . . . .	259
5.1.1.	Umwandlung der kinetischen Energie einer rollenden Kugel in Verschiebungsarbeit . . . . .	259
5.1.2.	Energieumwandlung am Fadenpendel und am Federschwinger . . . . .	260
5.1.3.	Umwandlung potentieller Energie in kinetische an einer hüpfenden Stahlkugel . . . . .	262
5.1.4.	Wechselseitige Umwandlung von potentieller und kinetischer Energie auf einer Luftkissenbahn . . . . .	265
5.1.5.	Umwandlung potentieller Energie in Rotationsenergie am Reifenapparat . . . . .	266
5.1.6.	Energieumwandlungen beim lotrechten Wurf nach oben . . . . .	268
5.1.7.	Energieumwandlungen am Maxwell'schen Rad . . . . .	269
5.1.8.	Bestimmung der kinetischen Energie eines fallenden Körpers mit einem Kraftmesser . . . . .	270

## Inhalt

---

<b>5.2.</b>	<b>Impuls und Kraftstoß</b>	272
5.2.1.	Bestimmung der Stoßkraft und der Stoßdauer beim Fall einer elastischen Kugel auf eine harte Unterlage	272
5.2.2.	Rückstoß eines Wasserstrahls am beweglichen Ausflußrohr	274
5.2.3.	Rückstoß eines Luftstrahls	275
5.2.4.	Nachweis des Satzes von der Erhaltung des Impulses mit einem beweglichen Wagen	276
5.2.5.	Vergleich zweier Kraftstöße mit dem Federstoßgerät — Satz von der Erhaltung des Impulses	277
5.2.6.	Bestimmung der Wucht eines Hammerschlags mit dem Stoßpendel	280
5.2.7.	Bestimmung der Geschwindigkeit eines Luftgewehrgeschosses mit dem Stoßpendel	282
5.2.8.	Experimente mit dem Perkussionsapparat — Der zentrale elastische Stoß — Der unelastische Stoß	283
5.2.9.	Experimente mit der Perkussionsrinne — Der zentrale elastische Stoß — Der unelastische Stoß	286
5.2.10.	Experimente zum zentralen elastischen und unelastischen Stoß mit der Luftkissenbahn	288
<b>6.</b>	<b>Drehbewegungen</b>	292
6.0.	Methodische Bemerkungen	292
6.1.	Die gleichförmige Kreisbewegung	296
6.1.1.	Trägheitswirkung auf das Wasser in einer Kanne	296
6.1.2.	Nachweis der Radialkraft — Abhängigkeit vom Radius der Kreisbahn	296
6.1.3.	Nachweis der Radialkraft — Abhängigkeit von der Drehzahl	297
6.1.4.	Nachweis der Radialkraft mit der Kugelschwebe — Abhängigkeit von der Drehzahl	299
6.1.5.	Nachweis der Radialkraft — Abhängigkeit von der Masse	300
6.1.6.	Abplattung einer deformierbaren Kugel durch Rotation	301
6.1.7.	Modell einer Zentrifuge	302
6.1.8.	Verteilung einer Flüssigkeit in einem rotierenden kugelförmigen Gefäß	303
6.1.9.	Oberfläche einer rotierenden Flüssigkeit	303
6.1.10.	Strömungen in einer rotierenden Flüssigkeit	305
6.1.11.	Drehzahlmessung mit einem Zählwerk	306
6.1.12.	Drehzahlmessung mit der stroboskopischen Scheibe	307
6.1.13.	Drehzahlmessung mit dem Digitalzähler Polydigit	310
6.1.14.	Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit	311
6.1.15.	Beobachtung der Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit an einem Rad	312
6.1.16.	Untersuchung der Abhängigkeit des Drehwinkels von der Zeit bei der gleichförmigen Kreisbewegung	313
6.1.17.	Bestimmung der Geschwindigkeit eines Luftgewehrgeschosses	315
6.1.18.	Trägheitswirkung an einem Kettenring	317
6.1.19.	Schneidwirkung einer rotierenden Papierscheibe	318
6.2.	<b>Das Trägheitsmoment — Der Kreisel</b>	319
6.2.1.	Trägheitserscheinungen an einem Hebel	319
6.2.2.	Trägheitserscheinungen an rollenden Büchsen	319
6.2.3.	Trägheitserscheinungen an rollenden Zylindern aus Holz und Blei	320
6.2.4.	Herleitung der Gleichung des Trägheitsmoments mit rotierenden Metallscheiben	322
6.2.5.	Abhängigkeit der Schwingungsdauer vom Trägheitsmoment bei Torsionsschwingungen	325



6.2.6.	Bestimmung des Trägheitsmoments eines Probekörpers mit Hilfe von Torsionsschwingungen . . . . .	328
6.2.7.	Herleitung des Grundgesetzes der Drehbewegung mit dem Reifenapparat . . . . .	330
6.2.8.	Nachweis der freien Achsen an einem Holzquader . . . . .	333
6.2.9.	Nachweis der freien Achsen an verschiedenen rotierenden Körpern . . . . .	334
6.2.10.	Rotation zweier Körper um den gemeinsamen Schwerpunkt . . . . .	335
6.2.11.	Versuche mit einem Kreisel — Stabilität der Kreiselachse . . . . .	336
6.2.12.	Versuche mit einem kardanisch gelagerten Kreisel . . . . .	338
6.2.13.	Versuche mit einem Fahrradkreisel . . . . .	339
<b>7.</b>	<b>Schwingungen . . . . .</b>	<b>341</b>
7.0.	Methodische Bemerkungen . . . . .	341
7.1.	<b>Die harmonische Bewegung — Das Pendel . . . . .</b>	<b>342</b>
7.1.1.	Schwingungen eines vertikalen Federschwingers . . . . .	342
7.1.2.	Schwingungen eines horizontalen Federschwingers . . . . .	343
7.1.3.	Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Federschwingers von der Masse des Pendelkörpers . . . . .	343
7.1.4.	Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Federschwingers von der Federkonstanten . . . . .	345
7.1.5.	Herleitung der Gleichung zur Berechnung der Schwingungsdauer eines Federschwingers . . . . .	347
7.1.6.	Vergleich einer Pendelschwingung mit der Projektion der Bewegung einer Kurbel . . . . .	348
7.1.7.	Unabhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Masse des Pendelkörpers . . . . .	350
7.1.8.	Einfluß der Schwingungsweite auf die Schwingungen eines Fadenpendels . . . . .	351
7.1.9.	Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Pendellänge . . . . .	352
7.1.10.	Einfluß eines Magnets auf die Schwingungen eines eisernen Pendelkörpers . . . . .	353
7.1.11.	Aufzeichnen der Schwingungen einer Blattfeder mit einer Schreibspitze . . . . .	355
7.1.12.	Aufzeichnen der Schwingungen einer Blattfeder durch einen Lichtzeiger . . . . .	356
7.1.13.	Aufzeichnen der Schwingungen eines Fadenpendels durch ausfließenden Sand — Das Sandpendel . . . . .	356
7.1.14.	Gedämpfte Schwingungen einer Wassersäule . . . . .	359
<b>7.2.</b>	<b>Resonanz — Überlagerung von Schwingungen . . . . .</b>	<b>360</b>
7.2.1.	Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen eines Federschwingers und eines Fadenpendels (Vorversuch zur Resonanz) . . . . .	360
7.2.2.	Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen — Resonanz . . . . .	361
7.2.3.	Resonanzerscheinungen an drei Fadenpendeln . . . . .	363
7.2.4.	Resonanzerscheinungen an einem unwuchtigen Motor und einer Holzleiste . . . . .	363
7.2.5.	Resonanzerscheinungen an zwei gekoppelten Fadenpendeln . . . . .	364
7.2.6.	Resonanzerscheinungen an mehreren gekoppelten Fadenpendeln oder Federschwängern . . . . .	366
7.2.7.	Entdämpfung eines Fadenpendels durch rhythmische Impulse . . . . .	367
7.2.8.	Entdämpfung eines physischen Pendels — Die Pendelhemmung . . . . .	368
7.2.9.	Überlagerung gleichgerichteter Schwingungen am Sandpendel . . . . .	369
7.2.10.	Überlagerung verschieden gerichteter Schwingungen am Sandpendel . . . . .	370
7.2.11.	Überlagerung der Schwingungen zweier Blattfedern — Aufzeichnung durch einen Lichtzeiger . . . . .	371
7.2.12.	Überlagerung von Schwingungen eines Stahldrahtes . . . . .	372
7.2.13.	Schwingungen gekoppelter Pendel . . . . .	373
<b>Register</b>		<b>375</b>

## **Einleitung**

1. Das vorliegende Buch der „Physikalischen Schulversuche“ behandelt in zwei Kapiteln Maße und Messen sowie die physikalischen Grundeigenschaften der Körper. Im dritten Kapitel sind Experimente zur Statik der festen Körper und im vierten zu ihrer translatorischen Bewegung beschrieben. Das fünfte Kapitel enthält Versuche zu den Größen Energie, Impuls und Kraftstoß. Das letzte Kapitel ist der Drehbewegung und den Schwingungen gewidmet.

2. Die methodischen Grundsätze, die für die bisherigen Auflagen des Werkes bestimmend waren, wurden beibehalten. Bei der Bearbeitung dieser Auflage wurde die TGL 31548 „Einheiten physikalischer Größen“ berücksichtigt.

Die Bände der Reihe „Physikalische Schulversuche“ sind keine Lehrbücher. Sie sind nicht für Schüler, sondern für die Physiklehrer selbst und setzen die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge voraus. Aufgabe dieser Bücher ist es, den Lehrern eine Hilfe bei der Auswahl und 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 Benutzer Hinweise zu geben, wie er den Sachverhalt im Unterricht in methodisch zweckmäßiger Weise behandeln kann. Aus demselben Grunde wurden hier und da Rechenbeispiele eingefügt. Auch die vielfach den Versuchsbeschreibungen beigegebenen Meßwerttabellen sollen lediglich einen Hinweis geben, wie man das betreffende Gesetz, zu dessen Auffindung das Experiment dienen soll, aus den Versuchsergebnissen herleitet. Selbstverständlich brauchen die im Unterricht ermittelten 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 stammen alle aus Versuchsreihen.

3. Jedes Kapitel wird durch methodische Bemerkungen eingeleitet. Dabei wird auf allgemeine methodische Fragen nicht eingegangen, dies ist nicht die Aufgabe des Buches, sondern gehört in ein besonderes methodisches Handbuch. Die methodischen Bemerkungen dieses Buches beziehen sich vielmehr auf die in dem betreffenden Kapitel behandelten Versuche. Sie geben Hinweise, die für das Gelingen der Experimente zu beachten sind und dem Lehrer bei der Auswahl und der Durchführung der Versuche nützlich sein können.

4. Die „Physikalischen Schulversuche“ sind nicht für einen bestimmten Lehrplan oder Schultyp geschrieben. Der sachliche Inhalt, auf den sich die Experimente beziehen, geht zum Teil über die Anforderungen der zehnklassigen allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule, auch der erweiterten Oberschule, hinaus. Dadurch kann die Buchreihe in Arbeitsgemeinschaften und im fakultativen Unterricht der erweiterten Oberschule und an anderen Schultypen, z. B. an Berufs-

schulen, 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 fachlichen Gesichtspunkten gegliedert ist. Andererseits ist aber auch diese systematische Bindung keineswegs als starr zu bezeichnen. Die einzelnen Versuchsbeschreibungen sind in zwangloser Weise nach fachlich zusammenhängenden Stoffgebieten geordnet. Diese Reihenfolge muß sich keineswegs mit der Reihenfolge der Stoffgebiete im Lehrplan decken. Es bleibt den Physiklehrern überlassen, 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 müßte seinen Schülern möglichst alle beschriebenen Versuche zeigen. Wenige, wirklich gut durchgeführte und von den Schülern in allen Einzelheiten verstandene Experimente sind methodisch wirkungsvoller als eine Fülle halbverstandener Versuche.

5. Bei der Auswahl und der Beschreibung der Versuche waren die Verfasser darauf bedacht, in erster Linie auch solche Experimente zu beschreiben, bei denen die Versuchsanordnungen unter Verwendung von Unterrichtsmitteln zusammengestellt werden können, die im allgemeinen in den Schulen vorhanden sind. Für die allgemeinbildende Schule sind das die Unterrichtsmittel, die im Gesamtbedarfsplan für Unterrichtsmittel für die jeweilige Klassenstufe aufgeführt sind. Bei der Einrichtung einer Sammlung sollten diese Pläne die Richtschnur sein.

Neben Versuchsbeschreibungen, die sich auf die Benutzung moderner Unterrichtsmittel beziehen, wurden aber auch Beschreibungen aufgenommen, wie man dieselben Gesetzmäßigkeiten mit älteren Geräten herleiten oder bestätigen kann. Häufig muß damit allerdings eine geringere Effektivität in Kauf genommen werden. 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 Aufbau- teilen 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 ein leistungsfähiger Experimentiermotor, ein Gerät zur experimentellen Untersuchung der Kinematik, z. B. das Bandgerät, der Schienenwagen mit den dazugehörigen Schienen, eine Luftkissenbahn oder der Reifenapparat, ein elektrischer Kurzzeitmesser (Demonstrationsstoppuhr) oder ein elektronischer Kurzzeitmesser.

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 begrenzt, 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 Beschreibungen sind so gehalten, daß die Modelle von Schülern unter Anleitung ihres Lehrers hergestellt werden können. Die Modelle sollten deshalb in erster Linie in Arbeitsgemeinschaften angefertigt werden.

7. Damit den Lesern die Benutzung des Buches erleichtert wird, sollen einige Hinweise über die Anlage des Buches gegeben werden:

1. Jede Versuchsbeschreibung ist in sich abgeschlossen und numeriert. Die Versuchsnummer besteht aus drei durch Punkte getrennte Zahlen. Die erste Zahl gibt das Kapitel, die zweite den Abschnitt, die dritte den Versuch an.
2. Das der Versuchsüberschrift in eckigen Klammern beigelegte Zeichen [SE] bringt zum Ausdruck, daß der Versuch als Schülerexperiment geeignet ist. Selbstverständlich können diese Versuche auch als Demonstrationsexperimente ausgeführt werden.
3. Auf Gefahrenmomente wird durch besondere Marken hingewiesen, die neben den Überschriften angebracht sind. Diese Gefahren erwachsen z. B. aus der Möglichkeit des Zustandekommens gesundheitsschädigender Dämpfe bei der Arbeit mit Quecksilber oder bei den Versuchen mit einem Luftgewehr. Die angegebenen Vorsichtsmaßnahmen müssen unbedingt eingehalten werden.
4. Jede Versuchsbeschreibung beginnt mit der 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 ist, daß dieses Material in ausreichender Menge zur Verfügung steht 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 ⑧ bedeutet, daß das Gerät zur Selbstherstellung empfohlen wird.
7. Sämtliche Längen in den Zeichnungen werden den Standards entsprechend in Millimetern angegeben. In den Versuchsbeschreibungen werden dagegen auch die Einheitenvorsätze Zenti-, Dezi- und Kilo- verwendet.
8. Die in die Versuchsbeschreibungen eingefügten „Methodischen Hinweise“ beziehen sich nur auf den jeweiligen Versuch. Sie sollen die Auswahl der Experimente erleichtern, zu ihrer effektivsten methodischen Gestaltung beitragen bzw. auf besondere erzieherische Potenzen der Experimente hinweisen.
9. Zusätzliche Ausführungen, die über die eigentliche Versuchsbeschreibung hinausgehen, erscheinen unter der Überschrift „Bemerkungen“.

## ● **Einleitung**

---

10. Bei Hinweisen auf andere Versuche des Buches wird der Versuchsnummer das Zeichen V vorangestellt, z. B. V 3.2.8. Auf Versuche aus anderen Teilbänden der „Physikalischen Schulversuche“ wird hingewiesen durch Angaben wie z. B. siehe 10. 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., oder der Seitenzahl, z. B. MB S. 18, angegeben. Auf „Methodische Hinweise“ verweisen die Zeichen MH, z. B. vergleiche MH Nr. 2, V 3.4.1.

# 1. Maße und Messen

## 1.0. Methodische Bemerkungen

1.0.1. Maße der verschiedensten Art sind den Schülern aus dem täglichen Leben bekannt. Im physikalischen Unterricht sollen sie den sachgemäßen Gebrauch dieser Maße bei der Lösung von Aufgaben kennenlernen und Verständnis dafür gewinnen, wie man durch besondere *Meßgeräte* und *Meßverfahren* die uns durch die unmittelbaren Sinneswahrnehmungen gegebenen Grenzen erweitern kann. Die von einem bloßen Größenvergleich bis zu einer genauen Messung führenden Schritte sind beim Einführen einer neuen physikalischen Größe deutlich zu machen. Zur Belebung des Unterrichts wird man auch auf die historische Entwicklung des Meßwesens und die große Bedeutung einheitlicher Maße für Produktion, Handel und Verkehr eingehen. In diesem Zusammenhang können die Aufgaben des ASMW und die Standardisierungsbestrebungen als Grundlage unserer sozialistischen Volkswirtschaft erörtert werden.

Immer wieder sollten die Schüler bei geeigneten Gelegenheiten auf den Wert wissenschaftlicher Erkenntnisse für das Verstehen und Beherrschen der Umwelt hingewiesen werden. An der historischen Entwicklung des Meßwesens läßt sich nachweisen, daß der Mensch seine Umwelt und ihre Gesetzmäßigkeiten immer genauer erkennt und immer besser beherrschen lernt.

Zur Kennzeichnung physikalischer Größen und ihrer Einheiten sind die amtlich vorgeschriebenen oder sonst allgemein üblichen Formelzeichen bzw. Kurzzeichen zu verwenden. Im Buch sind die Kurzzeichen für physikalische Größen, *Formelzeichen*, schräg (kursiv), die Kurzzeichen für Einheiten, *Einheitenzeichen*, senkrecht stehend (gerade) gedruckt. Es bedeutet z. B. *l* eine Länge, *m* eine Masse, *s* einen Weg, *t* eine Zeit, dagegen *m* Meter, *s* Sekunde, *t* Tonne. In ihren Aufzeichnungen und Arbeiten sollten auch die Schüler entsprechend verfahren und die Formelzeichen in Schreibschrift, die Einheitenzeichen dagegen in Druckschrift schreiben.

Die Schüler sind anzuhalten, bei einem Meßergebnis die gemessene Größe durch ihr Formelzeichen, den Zahlenwert und die Einheit anzugeben. Beispiel: „Die Länge des Bolzens beträgt  $l = 3,50 \text{ cm}$ “. Die Ergebnisse und Meßreihen schreibt man zweckmäßig in Form von Tabellen, deren Kopf die Namen der physikalischen

Größen bzw. ihr Formelzeichen und die Einheiten enthält, z. B.  $t$  in  $s$  oder  $\frac{t}{s}$ . In den Spalten erscheinen dann nur die Zahlenwerte (vgl. V 3.2.1. und V 3.4.3.). Physikalische Gleichungen werden als Größengleichungen formuliert; die Einheiten werden nicht ausdrücklich genannt, z. B.  $s = v \cdot t$ . Bei der Lösung von Aufgaben sind jedoch die Einheiten mitzuführen, z. B.  $s = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 2 \text{ s}$ .

Die Schüler müssen damit vertraut gemacht werden, daß die Meßergebnisse streuen und daß ihnen nur innerhalb gewisser Grenzen eine verbürgte Genauigkeit kommt. Die Bildung von *Mittelwerten* ist zu üben. Es ist — je nach dem Ausbil-

dungsstand — auf den *absoluten* und *relativen* Fehler einer Messung hinzuweisen. Der Umfang der Fehlerrechnung wird sich ebenfalls nach der Altersstufe der Schüler richten. Im Ergebnis muß die Genauigkeit der Messungen aus der Anzahl der angegebenen Dezimalstellen ersichtlich sein.

Dienen die Messungen als Grundlage für Rechnungen, wie z. B. bei der Bestimmung von Flächen- und Raumhalten aus Längenmessungen, so sind die Ergebnisse der Rechnungen sinngemäß zu runden. Bei einer Produktbildung darf man nur so viel geltende Ziffern als sicher ansehen, wie die kleinste Anzahl der sicheren geltenden Ziffern in einem der Faktoren beträgt. Sind z. B. die durch Messung bestimmten Seiten eines Rechtecks  $a = 11,4 \text{ cm}$  und  $b = 6,3 \text{ cm}$ , so würde die Rechnung für den Flächeninhalt  $A = 71,82 \text{ cm}^2$  ergeben. Da nur zwei Ziffern als sicher gelten können, lautet das Ergebnis: Der Flächeninhalt beträgt  $A \approx 72 \text{ cm}^2$  oder auch  $A = 72 \text{ cm}^2$ .

Längenmessungen werden im allgemeinen im Mathematik- und Werkunterricht schon in unteren Klassen durchgeführt. Im Physikunterricht werden die bereits vorhandenen Fertigkeiten weiterentwickelt. Hier wird besonderer Wert darauf gelegt, die Schüler mit den verschiedenen Meßgeräten vertraut zu machen und sie zu befähigen, diese Geräte richtig zu handhaben.

Es sollte nicht versäumt werden, auch das *Schätzen* von Längen zu üben und Vergleichsmaße am menschlichen Körper und an Gegenständen des täglichen Gebrauchs heranzuziehen.

Die Körper, an denen Längen zu messen sind, werden möglichst durch *Zeichnungen* (Schrägbild, Grundriß, Aufriß) veranschaulicht. Die gemessenen Längen werden durch *Maßlinien* und *Maßpfeile* bezeichnet.

Besonders einfach ist die *Volumenmessung* bei Flüssigkeiten. Aus methodischen Gründen kann die Volumenbestimmung der Flüssigkeit an den Anfang gestellt werden. Es ergibt sich dann ungezwungen die Ermittlung des Volumens fester Körper durch Wasserverdrängung. Bei der ersten Benutzung des Meßzylinders im Unterricht sind Ableseübungen zu empfehlen. Dazu kann man ein Flachmodell für den Tageslichtschreibprojektor selbst herstellen (vgl. V 1.1.9.).

Bei festen Körpern von einfacher Gestalt kann, wie vom Mathematikunterricht her bekannt ist, das Volumen auf Grund von Längenmessungen durch Berechnen bestimmt werden. Es ist in unteren Klassen nicht überflüssig, auch im Physikunterricht die Berechtigung dieser Methode zu zeigen und etwa einen zerlegbaren Würfel von  $1 \text{ dm}^3$  Inhalt aus Würfeln von  $1 \text{ cm}^3$  Inhalt, aus Stäbchen  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  und aus Platten von  $1 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  aufzubauen. An diesem Beispiel lässt sich gut veranschaulichen, daß eine Größe immer nur mit einer gleichartigen Einheit gemessen werden kann.

Dieser Sachverhalt bleibt unverändert, auch wenn man die zu messende Größe durch eine andere ersetzt, mit der sie funktional eindeutig verbunden ist, z. B. beim Kraftmesser die Kraft durch die Verlängerung der Feder, bei der Uhr die Zeit durch den Drehwinkel des Zeigers.

Die bei der Eichung eines Meßgerätes in andersartigen Einheiten vorzunehmenden gedanklichen Operationen werden am Beispiel des Kraftmessers (V 3.2.2) erläutert.

**1.0.2.** Im Abschnitt *Wägungen* sind nur zwei Versuche zusammengefaßt. Der eine befaßt sich mit der Gewichtsbestimmung mit einem Kraftmesser, der andere mit der Massenbestimmung mit einer Balkenwaage. Diesen beiden Versuchen wurde so viel Bedeutung beigemessen und ein besonderer Abschnitt gewidmet, weil in der

Umgangssprache sowie in populärwissenschaftlichen Schriften *Masse* und *Gewichtskraft* (Gewicht) kaum voneinander unterschieden werden. Auch die Einheit der Masse, das Kilogramm, wird fälschlicherweise für beide Größen verwendet. Im Physikunterricht sollte auf eine klare Unterscheidung beider und auf den richtigen Gebrauch der zugehörigen Einheiten besonderer Wert gelegt werden. So sollte die *Gewichtskraft* möglichst mit einem *Kraftmesser* gemessen werden, während man die *Masse* eines Körpers durch Vergleich mit geeichten Wägestücken eines Wägesatzes mit Hilfe einer *Balkenwaage* ermittelt (vgl. auch 2.0.2.).

**1.0.3.** Als *Zeitmesser* kommen in erster Linie die Taschenuhr mit Sekundenzeiger und die Stoppuhr in Frage. Wünschenswert ist eine größere Stoppuhr, die von der gesamten Klasse beobachtet werden kann, wie sie als elektrischer Kurzzeitmesser als Zentraluhr im Unterrichtsmittelsortiment angeboten wird. Für viele Zwecke ist ein Metronom brauchbar, weil an ihm der Ablauf der Zeit eindringlich durch das Ohr wahrgenommen werden kann und die gleichzeitige visuelle Beobachtung eines Vorgangs nicht gestört wird. Das Metronom bietet außerdem den Vorteil, die zur Messung verwendete Zeiteinheit den Bedingungen des Versuchs anpassen zu können. In der gleichen Weise kann auch die Zentraluhr benutzt werden, wenn man mit ihr akustische Signale im Sekundenrhythmus erzeugt.

In höheren Klassen ist die Verwendung eines elektronischen Impulszählgeräts, z. B. des digitalen Zählgerätes Polydigit, oft zeitsparend und zweckmäßig. Um kurze Zeitspannen möglichst genau zu ermitteln, führt man mehrere Messungen durch und bestimmt den Mittelwert. Bei der elektrischen Stoppuhr und dem elektronischen Impulszählgerät geschieht dies dadurch, daß man den Versuch z. B. zehnmal nacheinander ausführt, ohne die Stoppuhr bzw. das Zählgerät jedesmal wieder auf Null zu stellen. Die Zeiten werden von der Meßeinrichtung selbst addiert, man braucht das Meßergebnis nur durch die Anzahl der Messungen zu dividieren. Die Benutzung des Digitalzählers Polydigit ist im Kapitel 4.0.2. ausführlich beschrieben.

## 1.1. Längen und Raummessungen

### 1.1.1. Einfache Längenmessungen [SE]

1. Meßstab aus Holz mit dm- und cm-Teilung
2. Meßstab aus Holz mit cm- und mm-Teilung, Gliedermeßstab
3. Meßband aus Stahl (Rollmaß)
4. Schneidermeßband
5. technisches Meßband (10 m bis 20 m lang)
6. Stahlmeßstab (30 cm lang mit cm- und mm-Teilung)

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 1.0.1.!
2. Exakte Längenmessungen sind eine Voraussetzung zur Volumenbestimmung. Deshalb werden im allgemeinen Übungen dazu in den ersten Physikstunden durchgeführt. Dabei

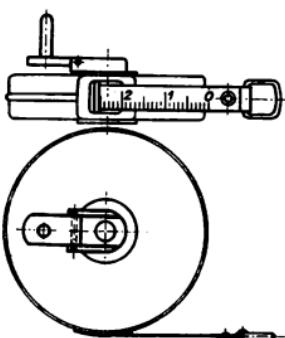


Abb. 1.1.1./1 Technisches Meßband

sollen die Schüler verschiedene Meßgeräte, ihre Besonderheiten und ihre Handhabung kennenlernen. Sie sind zu befähigen, selbst zu entscheiden, welches Gerät für eine bestimmte Messung am geeigneten ist.

3. Schon von der Klasse 6 an ist zu beachten, daß jedem Meßstab Fehler anhaften, die durch Unvollkommenheiten des Materials und der Herstellung bedingt sind und jede Messung in gleichem Sinne beeinflussen: *systematische Fehler*. Davon zu unterscheiden sind *subjektive* oder *zufällige Fehler*, die von der Art des Beobachtens und vom Beobachter selbst abhängen. Sie können durch Verbesserung der Meßtechnik verringert werden. Das gleiche gilt für alle anderen Meßgeräte.
4. Um die Begriffe des Mittelwertes, des absoluten und des relativen Fehlers zu entwickeln, ist es zweckmäßig, dieselben Gegenstände mehrfach und mit verschiedenen Meßstäben zu messen.

### **Versuch**

Es werden gemessen:

- a) mit Meßstäben verschiedener Teilung, Gliedermeßstab, Rollmaß: Heftdeckel, Holzquader, Tuschkasten, Tischplatte, Wandtafel, Papierkasten, Klassenraum,
- b) mit Meßband aus Stoffgewebe (Schneidermeßband): Brustumfang, Umfang eines Becherglases, eines Zylinders, größter Kugelkreis eines Fußballs,
- c) mit technischem Meßband (Abb. 1.1.1./1): Schulhof, Flurlänge, Straßenbreite, Höhe des Fenstersimses über dem Erdboden, Breite und Länge von Gebäuden.

### **Bemerkung**

Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Lineal, Holzklotz mit Bohrungen, Quader aus verschiedenen Materialien) benutzt.

## **1.1.2. Messungen mit dem Spiegelmeßstab [SE]**

1. Spiegelmeßstab ⑤
2. zylindrischer Bolzen (an einem Ende abgerundet, am anderen zugespitzt, z. B. Reißnadel)
3. Nägel, Schrauben und andere Meßkörper

### **Methodischer Hinweis**

Der Zweck des Spiegelmeßstabs ist die Vermeidung von Fehlern, die durch die Schräglablesung entstehen. Vor der Ausführung des Experiments sollte erklärt werden, wie diese Fehler entstehen.

### **Versuch**

Ein Spiegelmeßstab wird hergestellt, indem man einen Streifen Millimeterpapier oder sonst eine mm-Teilung auf einen Spiegel klebt.



Abb. 1.1.2./1  
Ablesen am Spiegelmeßstab

Der Bolzen wird unmittelbar neben die Teilung auf den Spiegel gelegt. Beim Ablesen muß der Blick senkrecht zur Teilung gerichtet sein. Dies wird erreicht, wenn sich das Ende des Bolzens und sein Spiegelbild für den Beobachter decken (Abb. 1.1.2./1).

### 1.1.3. Modellversuch zum Meßschieber [SE]

1. Meßschieber
2. Noniusmodell ⑧ mit einer Hauptteilung in cm, wenn möglich, auch ein größeres Modell mit dm-Teilung
3. Meßkörper (Rundholz, Rohr, Holzklotz)

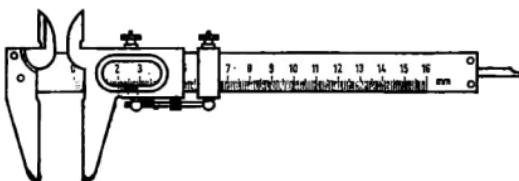
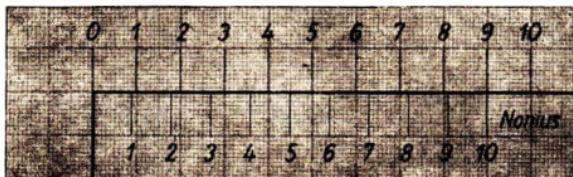


Abb. 1.1.3./1 Meßschieber

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 1.0.1.!
2. Der Meßschieber und das Pappmodell sind für Demonstrationszwecke zu klein. Dafür verwendet man am besten ein größeres Modell aus Holz oder ein Projektions-Flachmodell für den Tageslichtschreibprojektor „Polylux“ im Maßstab des unten beschriebenen Pappmodells.



a

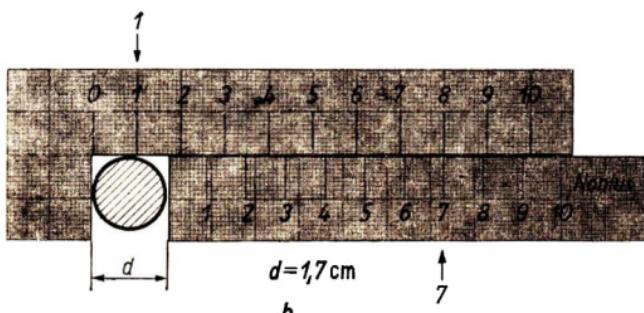


Abb. 1.1.3./2 Modell eines Nonius: a) Nullstellung, b) Schema einer Messung

### **Versuch**

Der **Meßschieber** (Abb. 1.1.3./1) trägt außer der Hauptteilung auf dem Rand des verschiebbaren Fensters noch eine Nebenteilung, den **Nonius**. Sind die beiden Schenkel zusammengeschoben, so stehen die Anfangsstriche beider Teilungen genau übereinander. Es ist dann ersichtlich, daß 10 Teile auf dem Nonius 9 Teilen der Hauptteilung entsprechen. Ein Teil des Nonius ist also  $9/10$  eines Teiles der Hauptteilung, und der Unterschied zwischen einem Teil der Hauptteilung und einem Teil der Teilung des Nonius beträgt  $1/10$  der Einheit der Hauptteilung. Ein Modell eines Nonius kann sich jeder Schüler aus Pappe mit aufgeklebtem Millimeterpapier anfertigen (Abb. 1.1.3./2).

Die Hauptteilung ist eine Zentimeterteilung. Eine Einheit auf dem Nonius ist 0,9 cm lang. Verschiebt man den Nonius aus der Nullstellung (Abb. 1.1.3./2a), bis sein erster Teilstrich mit dem Teilstrich 1 der Hauptteilung zusammenfällt, so beträgt der Abstand zwischen den Backen 0,1 cm. Wenn bei einer Verschiebung des Nonius ein anderer Teilstrich mit einem Teilstrich der Hauptteilung zusammenfällt, so braucht man nur abzuzählen, der wievielte Teilstrich dies auf dem Nonius ist, wenn man die Entfernung zwischen den Backen in Zehnteln eines Teils der Hauptteilung erhalten will. In Abbildung 1.1.3./2 b ist die Messung des Durchmessers  $d$  einer Walze dargestellt. Es ergibt sich unmittelbar, daß  $d$  zwischen 1 cm und 2 cm liegt. Da der 7. Teilstrich des Nonius mit einem Teilstrich der Hauptteilung zusammenfällt, ist  $d = 1,7$  cm.

### **1.1.4. Messungen mit dem Meßschieber [SE]**

#### **1. Meßschieber**

**2. verschiedene Meßkörper wie Quader aus Metall, Walzen, Röhren, Drähte, rechteckige Blechstücke, Sechskantmutter mit passendem Bolzen**

#### **Methodische Hinweise**

1. Dieses Experiment dient dem Erwerb von Fertigkeiten im Umgang mit dem Meßschieber. Zur Erklärung der Wirkungsweise des Geräts sollte als Vorversuch V 1.1.3. ausgeführt werden.
2. Bei der Berechnung von Flächen- und Rauminhalten sind die Ergebnisse sinnvoll zu runden (vgl. MB 1.0.1.).
3. Die Schüler sollen den Gebrauch des Gerätes für Messungen lichter Weiten (Innenmessungen) besonders üben.

#### **Versuch**

**Gemessen werden alle Längenausdehnungen: Länge, Breite, Höhe, Dicke, Durchmesser, lichte Weite in Verbindung mit der Bildung von Mittelwerten.**

**Berechnet werden: Flächen- und Rauminhalte.**

**Zur Veranschaulichung dienen: Schrägbild, Grundriß und Aufriss; die Maße sind mit Maßlinien und -pfeilen einzutragen.**

#### **Beispiele**

1. Messungen an einem Quader (Kanten)
2. Messungen an einem Zylinder (Durchmesser, Höhe)
3. Messungen an einer Sechskantmutter (Schlüsselweite, Spitzkant, Kerndurchmesser, Gewindedurchmesser). Siehe dazu Abbildung 1.1.4./1!

**Bemerkung**

Zum Feststellen der Dicke eines einzelnen Blattes eines Buches mißt man die Gesamtdicke einer größeren Anzahl von Blättern und dividiert das Ergebnis durch die Anzahl der Blätter.

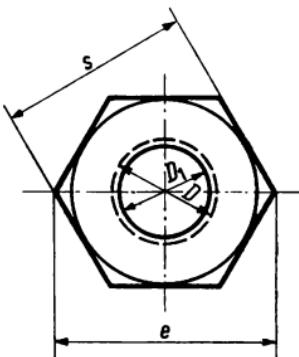


Abb. 1.1.4./1 Sechskantmutter mit metrischem Gewinde; Beispiel: Schlüsselweite  $s = 22$  mm, Spitzkant  $e = 25,4$  mm, Kerndurchmesser  $D_1 = 9,7$  mm, Gewindedurchmesser (am Bolzen gemessen)  $D = 12,2$  mm

**1.1.5. Modellversuch zur Feinmeßschraube [SE]**

1. Hölzerne Schraubzwinge
2. zylindrische Schachtel
3. Holzklotz als Meßkörper
4. dünnes Blech

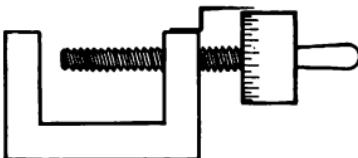


Abb. 1.1.5./1 Modell einer Feinmeßschraube

**Methodischer Hinweis**

Dieses Experiment ist ein Vorversuch zu V 1.1.6. Es ist nötig, weil die Feinmeßschraube selbst für Demonstrationszwecke zu klein ist.

**Herstellung des Modells**

Der Mantel einer zylindrischen Schachtel wird mit weißem Papier beklebt und der Umfang in 10 gleiche Teile geteilt. Die Schachtel wird in der Achsenrichtung durchbohrt und am Griff auf der Spindel der Schraubzwinge befestigt (Abb. 1.1.5./1). Ein am Körper der Zwinge angebrachter gebogener Blechstreifen dient als Zeiger zum Feststellen der Größe der Drehung und damit des Vorrückens der Spindel. Bei einer vollen Umdrehung verschiebt sich die Spindel um die Höhe eines Schraubenganges. Mit Hilfe der angegebenen Teilung kann eine Verschiebung der Spindel bis auf  $\frac{1}{10}$  der Ganghöhe gemessen werden. Der tote Gang ist dabei zu beachten. Man zeigt den Meßvorgang an einem Holzklotz.

### 1.1.6. Messungen mit der Feinmeßschraube [SE]

#### 1. Feinmeßschraube

2. Meßkörper wie Objektträger, Deckgläschchen, dünnes Blech, Drähte, Glasfäden, Haare u. a. m.

#### *Methodische Hinweise*

1. Vor diesem Experiment sollte V 1.1.5. als Vorversuch ausgeführt werden.
2. Das Experiment dient dem Erwerb von Fertigkeiten im Umgang mit der Feinmeßschraube. Dabei sollte man den Schülern klarmachen, daß dieses Gerät Messungen mit erheblich größerer Genauigkeit ermöglicht als Meßstab oder Meßschieber und deshalb besonders pfleglich behandelt werden muß.

#### *Benutzung des Geräts*

Die Feinmeßschraube (Abb. 1.1.6./1) enthält eine flachgängige Schraube von 1 mm oder 0,5 mm Ganghöhe und gestattet, Dickenunterschiede von 0,02 mm bzw. 0,01 mm festzustellen. Gegebenenfalls sind Nullpunktabweichungen zu berücksichtigen.

Es ist auf gleichmäßigen Meßdruck zu achten. Der Meßdruck wird gefühlsmäßig nach dem Widerstand beurteilt, mit dem die Finger beim Einstellen über die Fischhaut der Spindel gleiten. Zum objektiven Einhalten des gleichen Meßdrucks sind Feinmeßschrauben häufig mit einer Gefühlsschraube für den Meßdruck versehen.

Die oben angegebenen Gegenstände werden auf gleichmäßige Dicke geprüft.

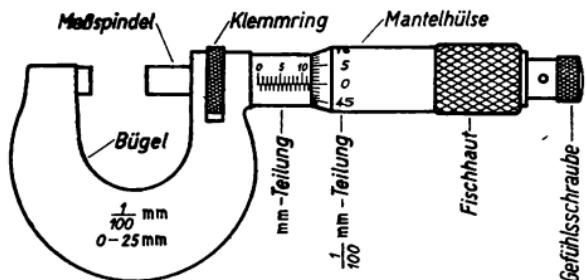


Abb 1.1.6./1.  
Feinmeßschraube

### 1.1.7. Flächenbestimmungen [SE]

#### *Zu Variante a*

1. Meßstab (Lineal oder Zeichendreieck mit Millimeter-Teilung)
2. Winkelmesser

#### *Zu Variante b*

3. Millimeterpapier

#### *Zu Variante c*

4. Pappe
5. Waage
6. Wägesatz

#### *Methodische Hinweise*

1. Der Wert dieses Experiments liegt darin, daß der unter der Variante a beschriebenen Methode zur Bestimmung des Flächeninhalts, der den Schülern vom

Mathematikunterricht her bekannt ist, zwei weitere gegenübergestellt werden, mit denen man auch unregelmäßige ebene Figuren ausmessen kann. Die Methoden der Varianten b und c werden in der Forschung und in der Technik angewandt.

2. Mit den Methoden der Varianten b und c kann man z. B. auch den Flächeninhalt von Kreisen gegebener Radien bestimmen und daraus einen Näherungswert für  $\pi$  ermitteln.

**Variante a: Flächenbestimmung durch Längenmessungen und Berechnung**

Flächen, die von Geraden oder Teilen eines Kreises und Geraden begrenzt werden, ermittelt man, indem man sie in einzelne Flächenstücke zerlegt, die man berechnen kann, und addiert die errechneten Teilflächen.

**Variante b: Flächenbestimmung durch Auszählen der Einheiten**

Die zu bestimmende Fläche wird auf Millimeterpapier übertragen (Abb. 1.1.7./1). Man zählt und schraffiert nacheinander die in der Fläche enthaltenen Flächeneinheiten. Dabei beginnt man mit den größten, setzt mit halben oder Vierteleinheiten fort und zählt danach jeweils die nächstkleineren Einheiten. Schließlich können noch verbleibende Teile der kleinsten Einheiten geschätzt und addiert werden.

Flächeninhalt:

$$2 \text{ mal } 1 \text{ cm}^2 = 2,0 \text{ cm}^2$$

$$2 \text{ mal } \frac{1}{2} \text{ cm}^2 = 1,0 \text{ cm}^2$$

$$2 \text{ mal } \frac{1}{4} \text{ cm}^2 = 0,5 \text{ cm}^2$$

$$102 \text{ mal } 1 \text{ mm}^2 = 1,02 \text{ cm}^2$$

$$\approx 17 \text{ mal } 1 \text{ mm}^2 = 0,17 \text{ cm}^2$$

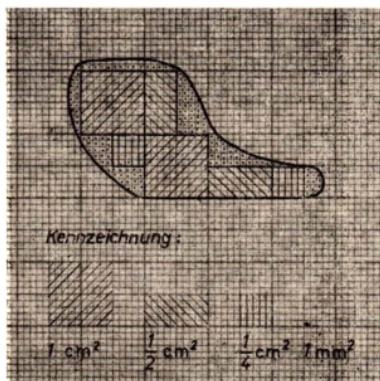
$$A \approx 4,7 \text{ cm}^2$$

**Variante c: Flächenbestimmung durch Wägung**

Die Fläche, deren Inhalt bestimmt werden soll, wird auf Pappe gezeichnet und ausgeschnitten. Aus derselben Pappe schneidet man noch ein rechteckiges Stück aus. Beide Stücke sind zylindrische oder prismatische Körper aus gleichem Material und gleicher Höhe, nämlich der Dicke der Pappe. Ihre Grundflächen  $A_1$  und  $A_2$  verhalten sich deshalb wie ihre Volumina und auch wie ihre Massen  $m_1$  und  $m_2$ .

$$A_1 : A_2 = m_1 : m_2.$$

Abb. 1.1.7./1 Anleitung zur Flächenbestimmung



Der Flächeninhalt des Rechtecks  $A_2$  kann aus seinen Seiten berechnet werden. Dann gilt für den Flächeninhalt des anderen Stückes:

$$A_1 = \frac{m_1}{m_2} \cdot A_2 .$$

*Beispiel*

Rechteckseiten

$$l = 10 \text{ cm}, \quad b = 12 \text{ cm}$$

Flächeninhalt des Rechtecks

$$A_2 = 120 \text{ cm}^2$$

Masse des rechteckigen Stückes

$$m_2 = 36,0 \text{ g}$$

Masse des unregelmäßigen Stückes

$$m_1 = 28,5 \text{ g}$$

Somit ergibt sich für den gesuchten Flächeninhalt

$$A_1 = \frac{28,5 \text{ g}}{36,0 \text{ g}} \cdot 120 \text{ cm}^2, \quad A_1 = 95 \text{ cm}^2 .$$

*Bemerkung*

Zur Ausführung der Wägung vgl. V 1.2.2.!

### 1.1.8. Volumenbestimmung fester Körper durch Längenmessungen [SE]

1. Verschiedene Körper aus Holz oder Metall (Würfel, Quader, Zylinder, Prisma, Kugel u. a. m.)
2. Meßschieber

*Methodischer Hinweis*

Zur Fehlerabschätzung und Fehlerrechnung vgl. MB 1.0.1.!

*Versuch*

Das Volumen eines Quaders wird ermittelt, indem man seine Länge  $l$ , seine Breite  $b$  und seine Höhe  $h$  mißt. Ihr Produkt ergibt das gesuchte Volumen  $V$ .

$$V = l \cdot b \cdot h .$$

In ähnlicher Weise wird bei einem Würfel, Prisma, Zylinder usw. verfahren, indem man die entsprechenden Abmessungen bestimmt und in die bekannten Gleichungen für die Volumina einsetzt.

*Bemerkung*

Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Lineal, Quader aus verschiedenen Materialien) benutzt.

### 1.1.9. Volumenbestimmung von Flüssigkeiten [SE]

1. Hohlmaße (Meßbecher) von 0,5 l und 1 l Inhalt
2. Meßzylinder von 10 ml, 50 ml, 100 ml, 250 ml und 500 ml Fassungsvermögen
3. Bechergläser, Glastrog u. a. Gefäße, Eßlöffel, Teelöffel, Tropfflaschen

#### Methodische Hinweise

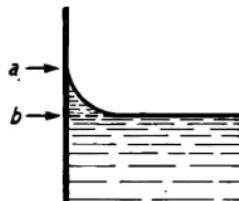
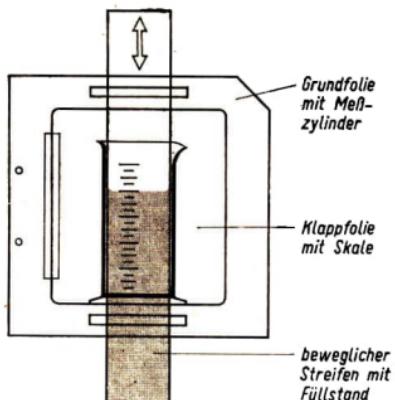
1. Über Volumenmessungen vgl. MB 1.0.1.!
2. Für Ableseübungen ist eine Schablone nach Abbildung 1.1.9./1 zu empfehlen, die mit dem Tageslichtschreibprojektor projiziert wird. Durch Klappfolien können verschiedene Skalenteilungen (z. B. bis 500 ml oder 0 bis 250 ml) wahlweise dargeckelt werden.

#### Beispiele

- Feststellen des Volumens von Bechergläsern, Flaschen, eines Glastrogs usw. durch Umgießen von Wasser in einen Meßzylinder,
- Bestimmen des Fassungsvermögens eines Eßlöffels und eines Teelöffels durch wiederholtes Einfüllen in einen Meßzylinder,
- Ermitteln des Volumens eines Tropfens durch Eintropfen der Flüssigkeit in einen kleinen Meßzylinder und Auszählen der Tropfen.

#### Bemerkung

1. Beim Umgießen von Flüssigkeit aus dem Meßzylinder in ein Gefäß bleiben unvermeidlicherweise Flüssigkeitstropfen an der Wand des Meßzylinders hängen. Um die dadurch entstehenden Fehler auszugleichen, spült man den Meßzylinder vor Einfüllen der Flüssigkeit mit dieser aus.
2. Wegen der Randkrümmung der Flüssigkeit ist für die Ablesung nicht der Flüssigkeitsrand, sondern die Mitte der Oberfläche maßgebend (Abb. 1.1.9./2).
3. Bei genauen Messungen ist die Temperatur zu berücksichtigen.



Nicht bei a, sondern bei b ablesen!

Abb. 1.1.9./2 Benetzende Flüssigkeit; Berücksichtigung der Randkrümmung

Abb. 1.1.9./1 Schablone für Ableseübungen mit dem Tageslichtschreibprojektor

### 1.1.10. Volumenbestimmung eines Gefäßes durch Wägung [SE]

1. Tafelwaage
2. Wägesatz
3. Tarierbecher und Schrot
4. Standzylinder, Standkolben, Becherglas

#### *Methodischer Hinweis*

Bei diesem Experiment wird eine physikalische Größe, das Volumen eines Gefäßes, durch eine andere, die Masse des eingefüllten Wassers, gemessen. Diese Methode wird bei verschiedenen physikalischen Größen in der Forschung und in der Technik angewandt (vgl. MB 1.0.1.). Bei der Ausführung des Experiments sollte man mit den Schülern herausarbeiten, daß diese Methode berechtigt ist, wenn die beiden physikalischen Größen einander proportional sind.

#### *Versuch*

Man bringt an dem Gefäß eine Marke an, stellt es auf die Waage und tariert es aus, füllt bis zur Marke Wasser ein und bestimmt dessen Masse. Der Zahlenwert der Masse in g ist dann mit einer meist hinreichenden Genauigkeit gleich dem Zahlenwert des Volumens in  $\text{cm}^3$ . Bei genaueren Messungen muß die Temperatur berücksichtigt werden.

#### *Bemerkung*

Die Ausführung der Wägung ist in V 1.2.2. beschrieben.

### 1.1.11. Volumenbestimmung fester Körper durch Wasserverdrängung im Meßzylinder [SE]

1. Meßzylinder
2. Steine, Metallstücke
3. dünner Draht

#### *Methodische Hinweise*

1. Vor der ersten Benutzung von Meßzylindern sollten Ableseübungen durchgeführt werden (vgl. MH Nr. 2, V 1.1.9.).
2. Über Volumenbestimmung vergleiche auch MB 1.0.1.!

#### *Versuch*

Der Meßzylinder wird zum Teil mit Wasser gefüllt und der Wasserstand abgelesen (vgl. V 1.1.9.). Der an einem dünnen Draht befestigte Körper wird eingetaucht. Luftblasen sind durch wiederholtes Heben und Senken des Körpers oder mit Hilfe eines Drahtes zu beseitigen. Aus der Differenz zwischen dem neuen und dem alten Wasserstand ergibt sich das Volumen des Körpers. Man gewöhne die Schüler daran, vor der Messung den Rauminhalt zu schätzen.

**Bemerkung**

Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Meßzylinder, Quader aus verschiedenen Materialien, Klammer u. a. m.) benutzt.

### 1.1.12. Volumenbestimmung fester Körper mit dem Überlaufgefäß[SE]

1. Überlaufgefäß
2. Meßzylinder
3. zwei Bechergläser
4. Stein, Kartoffel, Korken, ein Stück Paraffin, Blei- oder Eisenstücke zum Beschweren, Schrot, kleine Nägel, dünner Draht
5. Unterlegklötze

**Methodischer Hinweis**

Wenn das Überlaufgefäß den Schülern noch nicht bekannt ist, sollte seine Wirkungsweise in einem Vorversuch oder bei der Vorbereitung der Versuchsanordnung erklärt werden.

**Versuch**

Abbildung 1.1.12./1 zeigt verschiedene Formen von Überlaufgefäßen. Gefäße mit angeblasenem Abflußrohr sind unzweckmäßig, da ein Ersatz eines abgebrochenen Rohres umständlich ist. Behelfsmäßig kann man ein Überlaufgefäß herstellen, indem man nach Abbildung 1.1.12./1b ein gebogenes Glasrohr mittels einer Schelle und einer Federklammer an einem geeigneten Glasgefäß befestigt. Das Glasrohr ist vor dem Einsetzen in das gefüllte Gefäß vollständig mit Wasser zu füllen. Das Überlaufgefäß wird so hoch gestellt (Abb. 1.1.12./2), daß das Wasser in den Meßzylinder fließen kann. Während des Versuchs darf die Lage des Überlaufgefäßes nicht verändert werden.

Zu Beginn des Versuchs wird ein Becherglas untergestellt und so viel Wasser in das Überlaufgefäß gegossen, daß es abfließen kann. Wenn kein Wasser mehr ausfließt, wird das Becherglas durch den Meßzylinder ersetzt und der zu messende Körper eingesenkt (Luftblasen entfernen!). Die ausgeflossene Wassermenge gibt das Volumen des Körpers an.

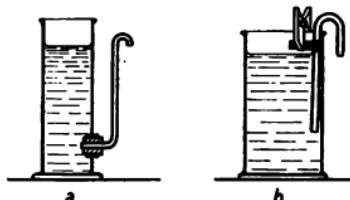


Abb. 1.1.12./1 Verschiedene Formen von Überlaufgefäßen

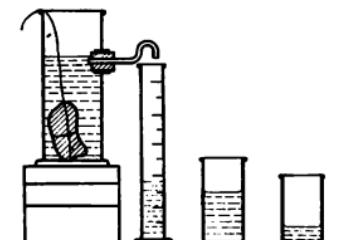


Abb. 1.1.12./2 Bestimmung des Volumens eines festen Körpers mit dem Überlaufgefäß

**Bemerkung**

1. Nach demselben Verfahren kann man auch das durchschnittliche Volumen von kleinen gleichartigen Gegenständen (Schrotkugeln, Nägel) bestimmen, von denen eine größere Anzahl vorliegt, indem man ihr Gesamtvolume bestimmt und durch die Anzahl der Körper dividiert.
2. Körper aus Stoffen mit einer geringeren Dichte als Wasser (z. B. ein Korken oder ein Stück Paraffin) werden an gegenüberliegenden Stellen mit Drahtösen versehen. Die untere dient zum Anhängen eines Blei- oder Eisenstückes, die obere zum Befestigen des Aufhängedrahtes. Man bestimmt das Volumen des zusammengesetzten Körpers und des Metallstückes. Das Volumen des Versuchskörpers ergibt sich dann aus beiden als Differenz.

**1.2. Wägungen**

**1.2.1. Bestimmung der Gewichtskraft mit dem Kraftmesser [SE]**

1. Kraftmesser
2. verschiedene Körper (Wägestück, Stein, Schraube o. dgl.)
3. Faden

**Methodische Hinweise**

1. Über die Kraftmessung vergleiche MB 1.0.1. und MB 1.0.2.!
2. Vor der ersten Benutzung eines Kraftmessers empfiehlt es sich, Ableseübungen durchzuführen. Dazu kann man ein Flachmodell für den Tageslichtschreibprojektor leicht selbst herstellen.
3. Man kann den Vektorbegriff vorbereiten, wenn man schon bei diesen ersten Kraftmessungen jeweils die Richtung der Kraft angeben lässt.

**Versuch**

Ein beliebiger Körper wird mit einem Faden an einen Kraftmesser gehängt. Der Kraftmesser zeigt den Betrag der Gewichtskraft an (Abb. 1.2.1./1). Die Richtung des Kraftmessers gibt die Richtung der Kraft an.

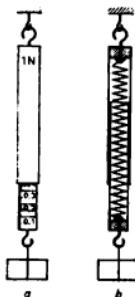


Abb. 1.2.1./1 Mayescher Kraftmesser: a) Ansicht, b) Schnitt

**1.2.2. Massenvergleich mit der Waage [SE]**

1. verschiedene Körper (Stein, Kartoffel, Holzklotz, Becherglas o. dgl.)
2. Balkenwaage, Hornschalenwaage oder oberschalige Tafelwaage
3. Wägesatz

**Methodische Hinweise**

- Der Balkenwaage kommt als Gerät zur Massenbestimmung im Unterricht eine besondere Bedeutung zu. Wenn auch für Schülerexperimente im allgemeinen das Modell einer Balkenwaage genügt, das man aus Teilen des Schülerexperimentiergeräts Mechanik zusammensetzen kann, sollte doch als Demonstrationsexperiment eine Wägung mit einer Präzisionswaage durchgeführt werden.
- Die Wahl der Waage richtet sich nach der Masse des zu wägenden Körpers, nach dem Zweck der Wägung bzw. nach der gewünschten Genauigkeit. Für viele Zwecke genügt eine einfache Hornschalenwaage (Abb. 1.2.2./1).

**Durchführung der Wägung**

Man ermittelt die Masse des zu wägenden Körpers durch Vergleich mit Wägesäcken des Wägesatzes. Das geschieht durch Eingrenzen innerhalb jeder Zehnergruppe des Wägesatzes.

**Beispiel**

Die Masse eines Becherglases ist  
größer als 100 g — kleiner als 200 g,  
größer als 120 g — kleiner als 130 g,  
größer als 126 g — kleiner als 127 g,  
größer als 126,4 g — kleiner als 126,5 g.

Die Abweichung von der Nullage ist bei 126,5 g geringer als bei 126,4 g.

Mithin hat das Becherglas eine Masse von 126,5 g.

Beim Gebrauch einer empfindlichen Hebelwaage sind zur Vermeidung von Meßfehlern folgende Hinweise zu beachten:

- Mittelsäule durch Lot oder Dosenlibelle lotrecht ausrichten!
- Feststellvorrichtung (Arretierung) lösen und Waage auf richtiges Einspielen des Zeigers in die Nullage prüfen; gegebenenfalls Ausgleich durch Papierstückchen!
- Vor Auflegen bzw. Abheben des Meßkörpers und der Wägestücke ist die Waage zu arretieren. Freischwingende Waage niemals berühren!
- Wägestücke nicht mit den Fingern anfassen; Pinzette benutzen!
- Waage nie über ihre Tragfähigkeit hinaus belasten!

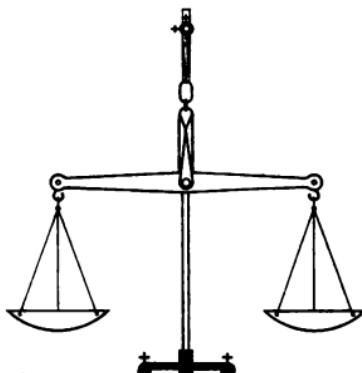


Abb. 1.2.2./1 Hornschalenwaage

**1.3. Zeitmessungen****1.3.1. Zeitmessung mit der Sanduhr [SE]****Zu Versuch 1**

- Trockener, gesiebter Sand (Seesand)
- Trichterrohr
- Becherglas
- Stoppuhr oder Taschenuhr

## ● V 1.3.1.

### Zu Versuch 2

Gerät 4., außerdem  
5. Sanduhr (Eieruhr)

### Zu Versuch 3

Geräte 1. bis 4., außerdem  
6. zwei gleich große Erlenmeyerkolben  
7. zwei durchbohrte Gummistopfen  
8. Glasröhren

### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment hat vorwiegend geschichtliche Bedeutung. Am Beispiel der Zeitmessung kann man den Schülern einen Einblick in die geschichtliche Entwicklung der Naturwissenschaften vermitteln. Dabei sollen sie den Wert wissenschaftlicher Erkenntnisse für das Verstehen und Beherrschen der Umwelt erkennen.

Abb. 1.3.1./2 Zeitmessung durch ausfließenden Sand

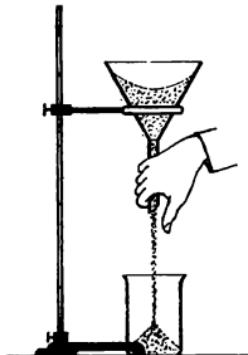


Abb. 1.3.1./2 Modell einer Sanduhr

### Versuch 1

Man verschließt das Trichterrohr (Abb. 1.3.1./1) mit dem Finger und füllt den Trichter mit gesiebtem, trockenem Sand.

Man gibt die Öffnung für eine bestimmte Zeit (30 Sekunden oder 1 Minute) frei und fängt den in dieser Zeit ausfließenden Sand auf. Man wiederholt den Versuch und füllt jeweils nur diese Menge Sand ein. Es ergibt sich beim Ausfließen jeweils mit guter Annäherung die gleiche Zeit.

### Versuch 2

Die Angaben der im Handel erhältlichen Sanduhren prüft man mit einer Taschenuhr oder Stoppuhr nach.

### Versuch 3

Aus zwei kleinen Erlenmeyerkolben kann man das Modell einer Sanduhr zusammensetzen (Abb. 1.3.1./2). Wenn hier auch der Sand nicht vollständig ausfließt, so ist das Gerät doch zur Veranschaulichung brauchbar, da jedesmal annähernd die gleiche Sandmenge zurückbleibt.

Im Handel erhältliche Sanduhren und die Anordnung nach Versuch 1 oder 3 sind zur Beurteilung der Dauer eines Vorganges geeignet.

### 1.3.2. Zeitmessung mit der Wasseruhr

1. Flasche mit seitlichem Tubus
2. zwei durchbohrte Gummistopfen
3. gerades Glasrohr
4. rechtwinklig gebogenes Glasrohr mit Hahn oder ohne Hahn mit Gummischlauch und Schraubquetschhahn
5. Schale oder Becherglas
6. Meßzylinder
7. Taschenuhr oder Stoppuhr

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MB V 1.3.1.!
2. Wasseruhren zählen neben Sonnen- und Sanduhren zu den ältesten Zeitmessern. Durch das Ausfließen des Wassers senkte sich ein Schwimmer. Die Bewegung des Schwimmers wurde auf einen Hebel als Zeiger übertragen. Häufig gab man dem Gerät eine menschliche Gestalt. Ihr Arm zeigte auf einer Skala die Zeit an.

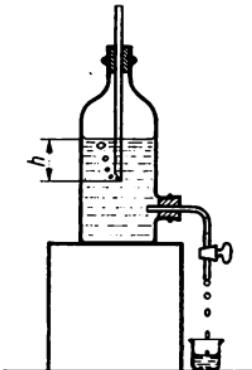


Abb. 1.3.2./1 Zeitmessung durch ausfließendes Wasser

#### *Versuch*

Man setzt aus den genannten Geräten eine Mariottesche Flasche zusammen und läßt aus ihr Wasser tropfenweise ausfließen. Durch Eintropfen in einen Meßzylinder und Auszählen der Tropfen findet man, daß in gleichen Zeiten gleiche Wassermengen aus der Flasche fließen. Die Zeit zwischen zwei Tropfen gibt eine behelfsmäßige kleine Zeiteinheit. Durch Einstellen des Hahnes kann man diese Einheit willkürlich ändern und so abgleichen, daß sie zur Sekunde in einem ganzzahligen Verhältnis steht.

#### *Bemerkungen*

Am Ende des lotrechten Rohres (Abb. 1.3.2./1) ist der Druck stets gleich dem äußeren Luftdruck. Die Luft in der Flasche steht unter einem geringeren Druck als außen, und zwar ist der Unterschied zwischen Außen- und Innendruck gleich dem Druck, den eine Wassersäule von der Höhe  $h$  ausübt. Es wird durch diese Vorrichtung erreicht, daß das Wasser immer mit der gleichen Geschwindigkeit ausfließt.

### 1.3.3. Vergleich zwischen Sanduhr und Fadenpendel—Zeiteilung

1. Sanduhr
2. Fadenpendel von veränderlicher Länge
3. Federklammer

#### *Methodischer Hinweis*

Wenn man im Anfangsunterricht der Physik, für den dieses Experiment gedacht ist, die funktionale Abhängigkeit der Schwingungsdauer des Fadenpendels von der Pendellänge nicht exakt behandeln kann, sollte man in einem Vorversuch zeigen, daß lange Pendel langsamer schwingen als kurze.

#### *Versuch*

Man befestigt mit einer Kreuzmuffe an einem Stativ einen Querstab und klemmt daran mit einer Federklammer ein Fadenpendel. Durch eine Sanduhr ist eine bestimmte Zeiteinheit gegeben. Man zählt die Anzahl der Schwingungen eines Pendels in der Zeit, in der die Sanduhr einmal abläuft. Man kann die Länge des Pendels so abgleichen, daß es während der festgelegten Zeit eine ganze Anzahl von Schwingungen macht. Die Beobachtung zeigt, daß diese Anzahl sich beim Wiederholen des Versuchs nicht ändert, wenn die Ausschläge des Pendels klein sind, daß also eine Schwingung des Pendels stets dieselbe Zeit beansprucht, wenn auch die Schwingungsweite abnimmt. Damit hat man eine Möglichkeit gewonnen, eine längere Zeit genau zu teilen und mit Hilfe eines Fadenpendels verschiedene Zeiten recht genau zu vergleichen.

#### **1.3.4. Zeitmessung mit dem Stabpendel**

1. Holzleiste mit Bohrungen ⑧
2. Metallstücke
3. Draht

#### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment kann im Anschluß an V 1.3.3. ausgeführt werden. Es zeigt, daß für die Schwingungen eines Stabpendels ähnliche Zusammenhänge gelten wie für ein Fadenpendel. Es ist auch zur Erklärung der Wirkungsweise des Metronoms geeignet.

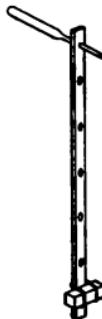


Abb. 1.3.4./1 Stabpendel

#### *Versuch*

Als Stabpendel dient eine an einem Lagerzapfen aufgehängte Holzleiste (Abb. 1.3.4./1).

Die Beobachtung zeigt, daß auch bei einem Stabpendel die Schwingungsdauer bei kleinen Ausschlägen unabhängig von der Schwingungsweite ist. Das Stabpendel ist daher ein ebenso brauchbarer Zeitmesser wie das Fadenpendel. Man kann an verschiedenen Stellen der Leiste Metallstücke mit Draht befestigen und damit die Schwingungsdauer des Stabpendels beeinflussen. Diese ändert sich im allgemeinen auch, wenn man einen anderen Aufhängepunkt wählt.

#### *Bemerkung*

Es gibt Stabpendel, bei denen das Ende jeder halben Schwingung durch einen Anschlag hörbar gemacht wird. Sie eignen sich für physikalische Experimente als Ersatz für ein Metronom.

### 1.3.5. Zeitmessung mit dem Metronom

1. Metronom
2. Holzleiste mit Bohrungen ⑧
3. zwei Blei- oder Eisenstücke
4. Draht
5. Taschenuhr (Stoppuhr)

#### *Methodische Hinweise*

1. Das Prinzip des Metronoms erläutert man durch ein Stabpendel (vgl. V 1.3.4.), bei dem man beiderseits vom Drehpunkt eine Masse anbringt. Die obere befestigt man mit Draht in der Weise, daß man sie wie ein Laufwägestück verschieben kann.
2. Akustische Signale zur Zeitmessung haben bei einigen Experimenten den Vorteil, daß sich die Schüler voll auf den Versuchverlauf konzentrieren können und nicht gleichzeitig die Uhr beobachten müssen (vgl. MB 1.0.3.).

#### *Benutzung des Metronoms*

Man stellt das Metronom mit Hilfe der Taschenuhr (Stoppuhr) auf  $\frac{1}{2}$  s oder auf 1 s ein.

Als Zeiteinheit gilt bei Messungen mit dem Metronom die Dauer zwischen zwei Schlägen, also die Hälfte der Schwingungsdauer. Zur Grobeinstellung der Schwingungsdauer kann man die Skale des Metronoms benutzen, die neben den in der Musik üblichen Tempobezeichnungen auch die Anzahl der Schläge je Minute angibt.

#### *Bemerkung*

An Stelle des Metronoms kann auch die Zentraluhr zur Erzeugung akustischer Signale benutzt werden (vgl. MB 4.0.1.).

### 1.3.6. Zeitmessung mit dem Digitalzähler Polydigit

1. Polydigit

#### *Methodische Hinweise*

1. Die Zeitmessung mit einem Digitalzähler ermöglicht eine große Meßgenauigkeit und ist besonders für die Messung kurzer Zeiten, z. B. der Fallzeit eines Körpers bei Experimenten zum freien Fall, der Schwingungsdauer eines Fadenpendels und zur Zeitmessung bei der Herleitung der Gesetze der translatorischen Bewegungen geeignet.
2. Zur Mittelwertbildung vergleiche MB 1.0.3.!

#### *Zeitmessung*

Der Digitalzähler wird angeschlossen und durch Druck der „Ein“-Taste (Taste A, Abb. 4.0.2./3) eingeschaltet. Durch Druck der Taste „Null“ (Taste B) stellt man

### ● V 1.3.6.

---

den Zähler auf 0000. Schließlich wird durch Betätigung der Taste „100 Hz“ (Taste D) der interne 100-Hz-Generator an den Zählereingang gelegt. Durch Drücken der Taste „Messen“ (Taste C) wird der Zeitmeßvorgang ausgelöst und durch nochmaliges Drücken dieser Taste wieder gestoppt.

#### *Bemerkungen*

1. Bei der manuellen Zeitmessung dürfen die Tasten „1,0 s“ (Taste E) und „0,1 s“ (Taste F) nicht gedrückt werden.
2. Bei der manuellen Messung kurzer Zeiten streuen die Meßwerte in den Hundertstelsekunden meist stark.  
Bessere Ergebnisse erhält man mit einer Fernbedienung des Polydigit oder durch die Benutzung geeigneter Start-Stopp-Einrichtungen, wie Haltemagnet und mechanischer Torschalter oder Lichtschranken (vgl. MB 4.0.2.).

## 2. Physikalische Grundeigenschaften der Körper

### 2.0. Methodische Bemerkungen

**2.0.1.** Die Versuche über die *physikalischen Grundeigenschaften* der Körper werden hier aus systematischen Gründen geschlossen dargeboten. Auf eine zusammenhängende Behandlung im Unterricht soll damit keineswegs hingedeutet werden. Gerade die Grundeigenschaften der Körper sind unmittelbarer Beobachtung nur zum geringen Teil zugänglich und erfordern zu ihrer Klärung ein erhebliches Maß an Abstraktion. Im Unterricht wird man bei der Darbietung dieses an sich etwas spröden Stoffes jede starre Systematik vermeiden. Man wird die Erarbeitung der Grundeigenschaften in den übrigen physikalischen Lehrstoff einfliechten und jeweils das von ihnen bringen, was zum Verständnis des gerade behandelten Sachgebiets erforderlich ist. Es darf dabei nicht übersehen werden, daß der Schüler im Laufe des physikalischen Gesamtunterrichts in mehreren Erkenntnisstufen zur Klarheit vordringt, was an der allmählichen Entwicklung des Molekül- und Atombegriffs, aber auch des Massebegriffs besonders sinnfällig wird.

**2.0.2.** Eine besondere Bedeutung kommt dem zweiten Abschnitt zu. Er befaßt sich mit der *Masse* und ihren Wirkungen. Häufig begegnet man der fehlerhaften Darstellung, für „Masse“ könne „Stoffmenge“ gesetzt werden. Das röhrt daher, daß der Begriff Masse in der Umgangssprache in verschiedenem Sinne gebraucht wird. Auch in der physikalischen Literatur wird oft ein Körper selbst als Masse bezeichnet. Dabei ist immer ein „Körper, der Masse hat“, gemeint. Der Lehrer sollte sich im Unterricht bemühen, die *Masse* konsequent als *Eigenschaft der Körper* darzustellen.

Um eine klare Unterscheidung der Begriffe Kraft und Masse zu erreichen, sollte die Gewichtskraft eines Körpers im Unterricht grundsätzlich mit einem Kraftmesser bestimmt werden (vgl. MB 1.0.2.). So ist auch die Einheit der Gewichtskraft eine Einheit der Kraft, nämlich das *Newton* (N).

Die Gewichtskraft ist vom Schwerkraftfeld abhängig. Es ist die Resultierende aus der Gravitationskraft und der Zentrifugalkraft, die durch die Rotation der Erde entsteht. Somit ist die Gewichtskraft ortsabhängig. Ein Kraftmesser würde für Körper mit gleicher Masse am Pol und Äquator unterschiedliche Gewichtskräfte anzeigen. *Massen* bestimmt man im Unterricht meist mit einer Hebel- oder Balkenwaage. Dabei ist zu bedenken, daß die Gewichtskraft bei der Massenbestimmung eine Rolle spielt, denn die Waage wird ins *Gleichgewicht* gebracht. Mit der Waage wird die Gewichtskraft des Körpers mit der unbekannten Masse mit der Gewichtskraft von Körpern bekannter Massen, den Gewichtskräften der Wägestücke, verglichen. Eine Wägung bringt an jedem beliebigen Erdort das gleiche Ergebnis.

Solche Überlegungen sollten im Zusammenhang mit diesen Experimenten auch mit den Schülern angestellt werden, um klare Vorstellungen von den Begriffen Masse und Gewichtskraft zu schaffen. Besonders hervorheben könnte man aus dieser Gruppe die Experimente V 2.2.5., V 2.2.6. und V 2.2.13. Im Versuch 2.2.5. erhält man durch die Benutzung eines Pyknometers und einer Laborwaage Ergebnisse mit großer Genauigkeit, die aber nur dann als genau angesehen werden können, wenn bei der Messung auch die Temperatur berücksichtigt wird. Verschiedene Pyknometer sind deshalb mit einem Thermometer ausgestattet. Im Versuch 2.2.6. lernen die Schüler eine Methode kennen, mit der man die Masse und die Dichte eines Gases bestimmen kann. Das Ergebnis des Versuchs V 2.2.13. stellt für sie eine besondere Überraschung dar und vermittelt ihnen die Erkenntnis, daß die Luft Trägheit und damit Masse besitzt.

**2.0.3.** Im dritten Abschnitt dieses Kapitels sind einige grundlegende Experimente zur Teilbarkeit, Porosität und Verformbarkeit beschrieben. Sie sollen nur dazu dienen, den *Molekülbegriff* vorzubereiten und einige Eigenschaften der Körper, die mit dem molekularen Aufbau zusammenhängen, zu erklären. Mit den molekularen Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase befaßt sich eingehend der Teil 3/4/5 der „Physikalischen Schulversuche“.

### 2.1. Volumen und Gestalt

#### 2.1.1. Kennzeichnen des festen und flüssigen Aggregatzustandes durch Vergleich von Volumen und Form

1. Holzklotz	3. Meßzylinder (500 ml)
2. Glasschale	4. Glasgefäße möglichst verschiedener Form

##### *Methodische Hinweise*

1. Bei den Experimenten V 2.1.1. bis V 2.1.5. werden die Schüler erstmalig zum bewußten Abstrahieren angeleitet. Sie lernen spezielle Einzelmerkmale der Körper von ihren gemeinsamen Eigenschaften zu unterscheiden und wesentliche Merkmale von unwesentlichen zu trennen.
2. Auf die Veränderlichkeit der Aggregatzustände ist hinzuweisen.

##### *Versuch*

1. Ein Holzklotz wird in wechselnder Lage auf den Tisch gelegt: flach liegend, hochkant stehend, schräg angelehnt, seitlich überstehend, in einer Schale liegend. Feste Körper haben ein unveränderliches Volumen und eine eigene, unveränderliche Gestalt.
2. In einem Meßzylinder wird  $\frac{1}{2}$  l Wasser abgemessen und in verschiedene Gefäße umgegossen. Flüssige Körper haben ein unveränderliches Volumen, aber eine veränderliche Gestalt. Die Kompressibilität der Flüssigkeiten wird vernachlässigt, da sie nur bei höheren Drücken unter Verwendung besonderer Hilfsmittel wahrnehmbar wird. Ebenso bleibt der Einfluß von Temperaturänderungen auf das Volumen unberücksichtigt.

### 2.1.2. Unterscheidung des flüssigen und gasförmigen Aggregatzustandes — Versuch mit einer Knallbüchse

1. Glasrohr ( $\varnothing$  10 mm bis 15 mm, Länge 25 cm bis 30 cm)
2. zwei gut eingepaßte Korken
3. Holzstab

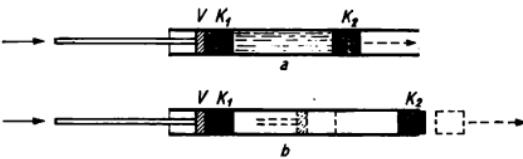


Abb. 2.1.2./1 Knallbüchse: a) mit Wasserfüllung, b) mit Luftfüllung

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1, V 2.1.1.!
2. Die Veränderlichkeit der Form bedarf bei Gasen keiner experimentellen Behandlung. Mit diesem Experiment soll die Veränderlichkeit des Volumens von Gasen der Unveränderlichkeit des Volumens von Flüssigkeiten gegenübergestellt werden.

#### Versuch

Das Versuchsgerät (Abb. 2.1.2./1) ähnelt einer Knallbüchse. Man setzt es aus einer Gläsröhre und zwei Korken zusammen. Zum Verschieben der Korken benutzt man einen Holzstab. Die Korken müssen dicht schließen, trotzdem verschiebbar sein. Sie sind unmittelbar vor dem Gebrauch auszukochen, damit sie möglichst plastisch sind. Man schiebt einen Korken in die Röhre etwa bis zu ihrer Mitte hinein und füllt die eine Röhrenhälfte mit gefärbtem Wasser. Dann verschließt man den gefüllten Teil mit einem zweiten Korken, wobei man es vermeiden muß, daß Luft unter den Korken tritt. Die Wassersäule läßt sich durch Druck auf einen der beiden Verschlußkorken ohne Längenänderung hin- und herschieben (Abb. 2.1.2./1 a). Luft als Füllung läßt sich dagegen erheblich zusammendrücken, ehe der Verschlußkorken beim Erreichen eines bestimmten Druckes herausfliegt (Abb. 2.1.2./1 b).

#### Bemerkungen

1. Es empfiehlt sich, zum Drücken einen möglichst dicken Holzstab zu wählen oder eine Scheibe aus Holz vorzulegen, damit der Korken nicht zerdrückt wird.
2. Als Ersatz für die mit Korken verschlossene Gläsröhre kann man mit gutem Erfolg Kartoffelscheiben verwenden, die man mit einer Korkbohrerröhre aus einer etwa 10 mm dicken Kartoffelscheibe aussticht.
3. Man beachte die beim Herausfliegen des Verschlußkorkens entstehende Nebelbildung, die auf die adiabatische Entspannung der Luft und die damit verbundene Abkühlung des in der Luft enthaltenen Wasserdampfs unter den Taupunkt zurückzuführen ist.

### **2.1.3. Gegenseitige Verdrängung fester Körper**

1. Dickwandiges Glasgefäß
2. Sand, Glasperlen oder kleine Kieselsteine
3. keilförmiges Holzstück oder zugespitzter Holzstab

#### *Methodischer Hinweis*

Vergleiche MH Nr. 1, V 2.1.1.!

#### *Versuch*

Drückt man ein keilförmig geformtes Holzstück oder einen angespitzten Holzstab in einen Behälter mit Sand, Glasperlen, Kieselsteinen oder dgl., so werden die den Behälter füllenden Kleinkörper beiseite gedrängt. Der Versuch stellt zugleich modellmäßig die Verdrängung einer Flüssigkeit durch einen festen Körper dar.

#### *Weitere Beispiele*

Einschlagen eines Nagels in die Wand, in ein Brett, Einschlagen eines Pfostens in den Erdboden, Gebrauch des Spatens, des Messers, der Axt.

### **2.1.4. Verdrängung von Flüssigkeiten beim Eintauchen von festen Körpern**

1. Weiter Meßzylinder
2. enger Meßzylinder
3. Überlaufgefäß
4. Versuchskörper (Wägestück, Schlüssel, Stein)

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MH Nr. 1, V 2.1.1.!
2. Als analoger Modellversuch kann vor diesem Experiment V 2.1.3. gezeigt werden.

#### *Versuch*

Durchführung des Versuchs wie bei V 1.1.11. und V 1.1.12. Die beim Eintauchen des Versuchskörpers auftretende Wasserverdrängung lässt die gegenseitige Verdrängung fester und flüssiger Körper erkennen (vgl. Abb. 1.1.12./2).

### **2.1.5. Verdrängung von Flüssigkeiten durch Gase — Die Taucherglocke**

1. Glastrog (Aquarienglas)	3. Korkscheibe
2. Standzylinder	4. Wägestück

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MH Nr. 1, V 2.1.1.!
2. Auf die Verwendung von Taucherglocken für Fundierungsarbeiten beim Brückenbau kann hingewiesen werden.

**Versuch**

Man taucht, wie es Abbildung 2.1.5./1 a) bis c) wiedergibt, einen Standzylinder wie eine Taucherglocke mit der Öffnung nach unten in ein mit Wasser gefülltes Becken. Zu achten ist auf das Senken des Wasserspiegels unter dem Zylinder und das Heben der äußeren Wasserfläche.

Ein unter dem Zylinder schwimmender Korken mit Papierfahne erleichtert die Beobachtung.

Durch einen auf den Boden gestellten festen Körper wird Luft aus dem Zylinder verdrängt.

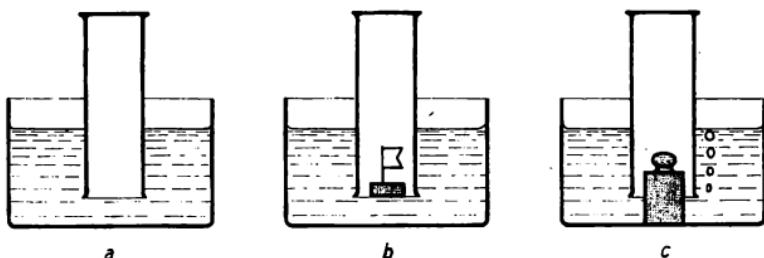


Abb. 2.1.5./1 Standzylinder als Taucherglocke: a) einfache Taucherglocke, b) schwimmender Körper unter der Taucherglocke, c) Verdrängung der Luft durch einen festen Körper

## 2.1.6. Einfüllen von Wasser in eine Flasche — Die Luft als Körper

1. Standkolben (1 l)
2. zweifach durchbohrter Korken oder Gummistopfen
3. langes Trichterrohr
4. rechtwinklig gebogenes Glasrohr mit Hahn

**Methodische Hinweise**

1. Vergleiche MH Nr. 1, V 2.1.1.!
2. Dieses Experiment zeigt die gleiche Erscheinung wie V 2.1.5. Wenn V 2.1.5. als Demonstrationsexperiment gezeigt wurde, kann V 2.1.6. zur Wiederholung und Vertiefung oder zur Leistungskontrolle benutzt werden.

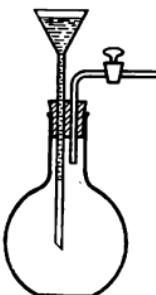


Abb. 2.1.6./1 Einfüllen von Wasser in eine Flasche mit einem Trichter

**Versuch**

Die angeführten Teile werden nach Abbildung 2.1.6./1 zusammengefügt. Man kann Wasser (gefärbt) nur bei geöffnetem Hahn durch den Trichter in die Flasche gießen. Schließen des Hahnes unterbricht den Wasserzufluß augenblicklich.

Bei heftigem Eingießen gelangt meist etwas Wasser infolge seiner Wucht beim Hinabstürzen bis in die Flasche. Die Luft wird vorübergehend leicht zusammengepreßt, entspannt sich jedoch im nächsten Augenblick wieder. Sie drängt das Wasser aus dem Rohr des Trichters in diesen zurück und entweicht in einigen Blasen. Die Vorgänge wiederholen sich mehrere Male.

## **2.2. Masse, Gewichtskraft, Trägheit, Dichte**

### **2.2.1. Wirkungen der Gewichtskraft**

1. Wägestück, Schlüssel, Radiergummi, Stein oder dgl.
2. Waage (Briefwaage, Neigungswaage)
3. Pappstreifen (etwa 30 cm lang, 4 cm breit)
4. Schraubenfedern
5. Gummischnur, Faden



Abb. 2.2.1./1 Durchbiegung eines belasteten Pappstreifens

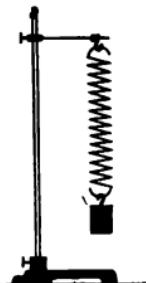


Abb. 2.2.1./2 Elastische Dehnung einer belasteten Schraubenfeder

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MB 2.0.2.!
2. Das Experiment zeigt die verschiedenen Wirkungen der Gewichtskraft. Beim Experimentieren wird man die Schüler zu genauem Beobachten anleiten und danach für jeden Teilversuch die Frage nach Ursache und Wirkung erörtern. Als Ergebnis wird die Erkenntnis gewonnen, daß jeder Körper der Schwere unterliegt bzw. eine Gewichtskraft ausübt. Sie kann sich äußern als Druckkraft auf eine Unterlage, als Zug an einer Aufhängevorrichtung oder in einer Fallbewegung.

#### *Versuche*

1. Ein auf eine Waagschale gelegter Versuchskörper ruft infolge seiner Kraftwirkung auf die Unterlage einen Ausschlag hervor. Ein an beiden Seiten aufliegender Pappstreifen biegt sich bei Belastung durch (Abb. 2.2.1./1).
2. Eine Schraubenfeder wird durch einen angehängten Körper gedehnt (Abb. 2.2.1./2). Ein Faden — eine Gummischnur — wird durch einen darangeknüpften Körper lotrecht gespannt (Senklot).
3. Ein hochgehobener Körper fällt beim Loslassen unter dem Einfluß seiner Gewichtskraft zu Boden.

### **2.2.2. Wirkungen der Trägheit [SE]**

1. Zwei Bälle aus Plast ( $\varnothing$  etwa 7 cm), davon einer mit Bleischrot oder Sand gefüllt ⑧
2. Holzleiste

#### *Methodischer Hinweis*

Zum Begriff *Masse* vergleiche MB 2.0.2.!

#### *Versuch*

Einer von zwei gleichen Bällen aus Plast wird mit einem Korkbohrer angebohrt, mit Bleischrot oder Sand gefüllt und wieder verklebt.



Man legt beide nebeneinander auf den Tisch. Versetzt man beiden gleichzeitig einen leichten Schlag mit einer Holzleiste, so rollt der „leichte“ Ball weit davon, während der „schwere“ Ball nach kurzer Rollstrecke zum Stillstand kommt. Der schwere Ball besitzt eine größere Trägheit als der leichte. Von der Trägheit kann man auf die Masse schließen. Der Ball mit der größeren Trägheit hat eine größere Masse als der mit der kleineren Trägheit.

#### *Bemerkung*

Zur Ausführung als Schülerexperiment benutzt man Teile aus dem SEG Mechanik. Einer Stahlkugel und einer Holzkugel werden mit der Federstoßeinrichtung gleiche Kraftstöße erteilt. Sie rollen verschieden weit.

### **2.2.3. Masse und Dichte fester Körper [SE]**

1. Schalenwaage, Hebelwaage oder Tafelwaage
2. Wägesatz
3. Überlaufgefäß
4. Meßzylinder
5. verschiedene Versuchskörper (Schlüssel aus Eisen und aus Leichtmetall, Porzellanring, Steine, Kartoffel u. a. m.)

#### *Methodische Hinweise*

1. Zu den Begriffen *Masse* und *Dichte* vergleiche MB 2.0.2.!
2. Bei der Volumenbestimmung von Körpern mit einer geringeren Dichte als Wasser verfährt man nach Bem. 2, V 1.1.12.

#### *Versuch*

Die Masse  $m$  des Versuchskörpers wird in Gramm bestimmt, sein Volumen  $V$  durch Wasserverdrängung in Kubikzentimetern gemessen (vgl. V 1.1.11. oder V 1.1.12.). Es ergibt sich die Dichte als Quotient aus Masse und Volumen. Ihre Einheit ist  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  oder  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

#### *Bemerkung*

Bei der Ausführung als Schülerexperiment benutzt man Teile aus dem SEG Mechanik und aus dem SEG Glasgeräte (Teile für eine Balkenwaage, Hakenkörper, Meßzylinder, Quader und Krampen aus verschiedenen Materialien).

### **2.2.4. Dichte von Flüssigkeiten — Bestimmen mit einem Meßzylinder [SE]**

1. Schalenwaage, Hebelwaage oder Tafelwaage
2. Wägesatz
3. Tarierbecher, Tarierschrot
4. Meßzylinder (ml-Teilung)
5. Versuchsflüssigkeit (Salzlösungen, Glyzerin, Petroleum, Benzin, Brennspiritus)

## ● V 2.2.4.

### *Methodischer Hinweis*

Zu den Begriffen **Masse** und **Dichte** vergleiche MB 2.0.2.!

### *Versuch*

Nach Tarieren eines Meßzylinders wird in ihm eine beliebige Menge einer Versuchsfüssigkeit gewogen. Es wird so die Masse in g ermittelt. Gleichzeitig wird das Volumen der Flüssigkeit in ml abgelesen. Division der Masse durch das Volumen liefert wie bei V 2.2.3. die Dichte.

### *Bemerkung*

Von dem Einfluß der Temperatur auf das Volumen wird hier abgesehen.

## **2.2.5. Dichte von Flüssigkeiten — Bestimmen mit einem Pyknometer [SE]**

1. Hebelwaage
2. Wägesatz
3. Tarierbecher, Tarierschrot
4. Pyknometer
5. Versuchsfüssigkeit wie in V 2.2.4.
6. Filterpapier



Abb. 2.2.5./1 Pyknometer

### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MB 2.0.2.!
2. Vor der Benutzung des Pyknometers sollte man den Schülern erklären, daß dieses Gerät Volumenbestimmungen mit großer Genauigkeit ermöglicht. Dadurch, daß der Eichstrich den Flüssigkeitsstand in einer Kapillare angibt, wird der Bruchteil eines Tropfens bereits als Abweichung angezeigt.

### *Versuch*

Das Pyknometer (Abb. 2.2.5./1) wird auf der Waage tariert und mit der Versuchsfüssigkeit gefüllt. Die Durchführung des Versuchs und die Berechnung der Dichte erfolgt wie bei V 2.2.4. Eine Volumenbestimmung erübrigt sich, da das Volumen durch das Fassungsvermögen des Pyknometers gegeben ist.

### *Bemerkungen*

1. Bezüglich der Temperaturabhängigkeit gilt das gleiche wie bei V 2.2.4. Zur Vermeidung von Meßfehlern darf das gefüllte Pyknometer nur am Flaschenhals angefaßt werden.
2. Beim Verschließen des Pyknometers ist darauf zu achten, daß unter dem Stopfen keine Luftblase entsteht. Überschüssige Flüssigkeit, die durch die Kapillare des Stopfens heraustritt, wird mit Filterpapier abgetupft.

## **2.2.6. Masse der Luft — Dichte gasförmiger Körper [SE]**

### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment sollte unbedingt an einer geeigneten Stelle im Physikunterricht durchgeführt werden, weil es ähnlich wie der Nachweis des Luftdrucks (Vgl.

1. Hebelwaage
2. Wägesatz
3. Tarierbecher, Tarierschrot
4. dickwandiger Rundkolben (1l)
5. Gummistopfen mit Bohrung
6. Hahnrohr
7. Luftpumpe (Kapselpumpe mit Glas-schliffstück zum Ansetzen eines Druckschlauches oder Wasserstrahl-luftpumpe)
8. Vakuumschlauch
9. Aquarienglas oder Eimer
10. Meßzylinder (1000 ml)

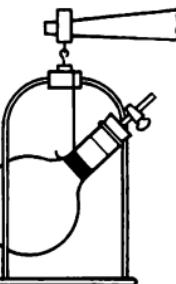


Abb. 2.2.6./1 Rundkolben an einer Waage hängend

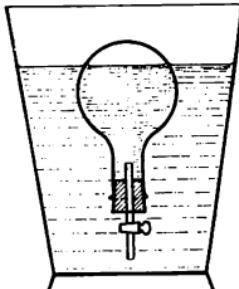


Abb. 2.2.6./2 Gleichstand der Flüssigkeiten bei Druckausgleich

V 2.1.3. oder V 2.2.1. im Teil 3/4/5!) zu den Experimenten gehört, die elementare Erkenntnisse über die Atmosphäre unserer Erde vermitteln. Die Tatsache, daß auf die Luft die Schwere wirkt, ist für einen Schüler keineswegs so selbstverständlich, wie es scheinen mag.

#### *Vorversuch*

Ein durch einen gut passenden Gummistopfen und ein Hahnrohr dicht verschlossener dickwandiger Rundkolben wird auf der Waage tariert. Da er sich nicht auf die Waagschale legen läßt, hängt man ihn mit einer Drahtschlinge am Tragbügel der Waagschale auf (Abb. 2.2.6./1). Saugt man mit dem Mund kräftig Luft aus, so ist eine deutliche Massenabnahme zu erkennen.

#### *Hauptversuch*

Nach vorangegangenem Tarieren bei offenem Hahn wird der Kolben mit einem Vakuumschlauch an eine Luftpumpe angeschlossen und ein Teil der Luft herausgesaugt. Die Masse der herausgesaugten Luft wird durch Wägung festgestellt. Die Ermittlung des Volumens der herausgesaugten Luft erfolgt durch Wasserfüllung, indem man den Hahn unter Wasser vorsichtig öffnet und Wasser bis zum völligen Druckausgleich einströmen läßt (Abb. 2.2.6./2). Druckausgleich ist erreicht, wenn bei geöffnetem Hahn das Wasser im Kolben ebenso hoch steht wie außerhalb. Ist das der Fall, schließt man den Hahn, nimmt den Rundkolben aus dem Wasser und gießt das eingedrungene Wasser — einschließlich des noch im Rohr befindlichen — in einen Meßzylinder um.

Die Berechnung der Dichte erfolgt wie bei Flüssigkeiten (vgl. V 2.2.4.).

#### *Bemerkungen*

1. Die Drahtschlinge wird in einfacher Weise mit einem Stück Isolierband am Kolbenglas befestigt.
2. Damit man nicht ein sehr großes Gefäß mit Wasser füllen muß, empfiehlt es sich, den herausragenden Teil des Hahnrohres möglichst kurz zu wählen.
3. Sollte eine Luftpumpe nicht zur Verfügung stehen, so kann man den Versuch auch durchführen, indem man wiederholt kräftig mit dem Mund saugt. Es leuchtet ein, daß der Versuch dann nur grobe Näherungswerte für die Dichte der Luft liefert.

## • V 2.2.6.

4. Genauso wie mit Luft läßt sich der Versuch mit anderen Gasen, z. B. mit Stadtgas, Kohlendioxid, Sauerstoff, Wasserstoff, durchführen, mit denen man den Kolben vorher bis zur völligen Luftverdrängung füllt. Ein Absaugen mit dem Mund kommt dann erklärlicherweise nicht in Frage.
5. Damit die Luft bei der Wägung möglichst Zimmertemperatur hat, sollte man den Kolben vor dem Wägen nur am Hals anfassen.

## 2.2.7. Beobachten der Trägheit an einer Walze oder Kugel [SE]

1. Holzwalze oder Kugel (als Behelf auch kleine Flasche oder Ball)
2. Brett (etwa 20 cm × 30 cm) oder Papptafel
3. Faden
4. kleiner Holzklotz

### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment und die folgenden dienen der Herleitung oder Bestätigung des 1. Newtonschen Gesetzes. Außer den auffälligen Erscheinungen beim plötzlichen Anziehen und plötzlichen Anhalten sollte auch Wert auf die Feststellung gelegt werden, daß bei gleichförmig geradliniger Bewegung der Unterlage auch die Kugel oder Walze diese Bewegung mitmacht.

### *Versuch*

Ein Brett oder eine Papptafel dient als Unterlage, die an einem Faden über den Tisch gezogen wird. Legt man darauf eine Walze oder Kugel, so gerät diese infolge ihrer Trägheit bei plötzlichem Anziehen und Anhalten in der in Abbildung 2.2.7./1 a) und b) angedeuteten Weise gegenüber der Unterlage in Bewegung. Ein hinter die Walze gelegter Klotz verhindert beim Vorwärtsziehen das Zurückrollen.

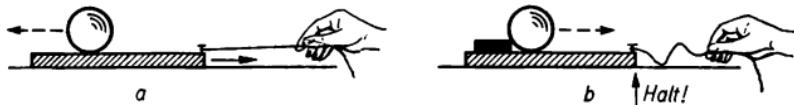


Abb. 2.2.7./1 Trägheit einer Walze: a) beim Anziehen, b) beim Anhalten

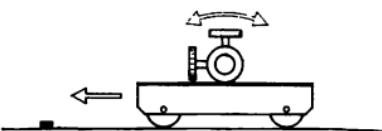


Abb. 2.2.7./2 Versuchsanordnung mit Teilen der SEG Mechanik

### *Bemerkung*

Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Experimentierbrett, Wagen, Kreuzmuffe, Faden) benutzt (Abb. 2.2.7./2).



## 2.2.8. Beobachten der Trägheit an einem Holzklotz [SE]

1. Quaderförmiger Holzklotz (als Behelf Pappschachtel)
2. Brett (etwa 20 cm × 30 cm) oder Papptafel
3. Faden

### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 2.2.7.!
2. Das Experiment kann als Modellversuch für das Verhalten eines frei stehenden Fahrgastes in einer Straßenbahn oder einem Omnibus bei plötzlichem Anfahren oder Anhalten gelten. Darauf sollte der Lehrer hinweisen, weil die Schüler dadurch zum aufmerksamen Beobachten der Vorgänge des täglichen Lebens und zum Nachdenken über die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung angeregt werden.



Abb. 2.2.8./1 Trägheit eines Holzklotzes: a) beim Anziehen, b) beim Anhalten

### Versuch

Durchführung des Versuchs erfolgt wie bei V 2.2.7. Der Holzklotz kippt bei ruckartigem Anziehen der Unterlage nach hinten, bei plötzlichem Anhalten nach vorn (Abb. 2.2.8./1a und b).

### Bemerkungen

1. Man führe den Versuch auch bei genügend langsamer Änderung der Geschwindigkeit aus.
2. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Experimentierbrett, Wagen, Quader, Faden) benutzt.

## 2.2.9. Trägheitswirkung beim Fortziehen der Unterlage [SE]

1. Standzylinder oder Wasserglas	3. Münze	5. Ring aus Kartonstreifen
2. Kartonblatt oder Postkarte	4. Weithalsflasche (Pulverflasche)	(Ø 15 cm bis 20 cm, Breite etwa 2 cm)

### Methodischer Hinweis

Bekannt sind die Versuche, bei denen die Trägheit eines Körpers nachgewiesen wird, indem man ihm plötzlich die Unterlage entzieht. Von den zahlreichen Versuchen sind einige durch die Abbildung 2.2.9./1 a bis c wiedergegeben. Sie dienen wie V 2.2.7. und V 2.2.8. der Herleitung oder Bestätigung des 1. Newtonschen Ge-

setzes und sind besonders als Überraschungsversuche zur Problemstellung geeignet.

*Varianten*

- Eine Münze fällt in einen Standzylinder, wenn man das als Unterlage dienende Kartonblatt schnell wegzieht.
- Eine Münze, die über einer Pulverflasche auf einem aus einem Kartonstreifen gefertigten Ring ruht, fällt in die Flasche, wenn man den Ring beiseite schnellt.
- Ein mit Wasser gefüllter Standzylinder bleibt stehen, wenn man das als Unterlage dienende Kartonblatt ruckartig fortzieht.

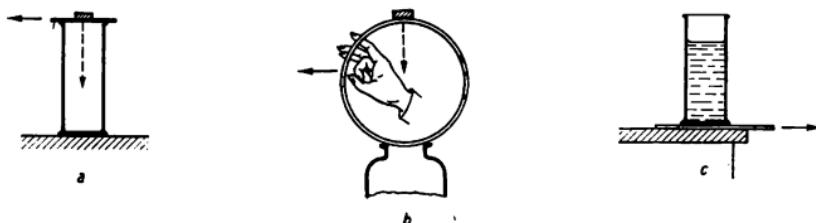


Abb. 2.2.9./1 Trägheitswirkung beim Fortziehen der Unterlage: a) Die Münze fällt in den Standzylinder. b) Die Münze fällt in die Pulverflasche. c) Der Standzylinder bleibt stehen.

*Bemerkung*

Wesentlich überzeugender, wenn auch apparativ aufwendiger, ist die Demonstration der Trägheit eines Körpers mit der Luftkissenbahn. Die Versuchsanordnung entspricht dabei der im V 4.1.8. Nach dem waagerechten Ausrichten der Bahn und dem Auflegen eines Schwebekörpers wird diese in den Richtungen ihrer Längsausdehnung hin- und hergeschoben. Das kann beliebig langsam geschehen. Die Lage des Schwebekörpers relativ zum Tisch verändert sich dabei nicht.

## 2.2.10. Trägheitswirkung beim Anheben eines Körpers [SE]

- Wägestück, Stein oder dgl. (Masse etwa 2 kg)
- Zwirnsfaden

*Methodischer Hinweis*

Auch dieses Experiment ist ähnlich wie V 2.2.9. als Überraschungsversuch zur Problemstellung geeignet. Man kann es aber auch zur Wiederholung und Vertiefung einsetzen oder um festzustellen, ob das 1. Newtonsche Gesetz inhaltlich verstanden wurde.

*Versuch*

Ein an einen Zwirnsfaden gebundener Körper mit einer Masse von etwa 2 kg kann am Faden hochgehoben werden, wenn man die Bewegung genügend langsam ausführt. Bei ruckartigem Anheben reißt der Faden infolge der Trägheit des Körpers.

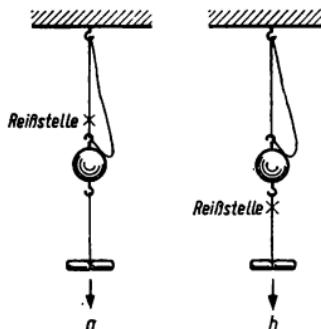
## 2.2.11. Trägheit einer hängenden Kugel

1. Kugel mit 2 Haken (Masse etwa 2 kg) oder ein anderer geeigneter Versuchskörper (s. Bemerkungen)
2. Zwirnsfaden
3. Holzgriff (Stück einer Holzleiste)
4. dicker Bindfaden

### Methodischer Hinweis

Vergleiche MH 2.2.10.!

Abb. 2.2.11./1 Zerreißen eines Fadens  
a) bei langsam zunehmendem Zug,  
b) bei ruckartigem Zug



### Versuch

Eine mit zwei Haken versehene Kugel wird mittels eines Zwirnsfadens an einem in den Türrahmen geschraubten Haken aufgehängt. An ihr hängt an einem zweiten Zwirnsfaden ein hölzerner Handgriff (Abb. 2.2.11./1a) und b). Bei gleichmäßig zunehmendem Zug nach unten reißt schließlich der obere Faden, da er durch die Gewichtskraft der Kugel zusätzlich beansprucht wird. Bei ruckartigem Zug reißt infolge der Trägheit der Kugel der untere Faden.

### Bemerkungen

1. Zur Vermeidung von Unfällen befestigt man neben dem oberen Zwirnsfaden einen zunächst noch schlaff herabhängenden starken Bindfaden, der ein Herabfallen der Kugel verhüten.
2. An Stelle der Kugel kann jeder andere geeignete Versuchskörper verwendet werden, den man mit einer Umschnürung aus starkem Bindfaden oder Draht versieht, um daran die Zwirnsfäden anknüpfen zu können.

## 2.2.12. Trägheit einer Flüssigkeit

1. Flache Schale (Entwicklerschale)

### Methodischer Hinweis

Vergleiche MH 2.2.7.!

### Versuch

Eine flache Schale mit Wasser wird möglichst mit konstanter Geschwindigkeit über den Tisch gezogen. Bei ruckartigem Anfahren fließt das Wasser infolge seiner Trägheit über den hinteren Rand, bei plötzlichem Anhalten über den vorderen Rand der Schale.

## 2.2.13. Trägheit der ruhenden Luft

1. Dünnes, schmales Brettchen (Weichholz, kein Sperrholz — etwa 2 mm × 5 cm × 30 cm)
2. Zeitungspapier
3. Hammer

### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment beruht auf denselben physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie die Versuche V 2.2.9. bis V 2.2.11. (vgl. die methodischen Hinweise zu diesen Experimenten). Besonders überraschend wirkt auf die Schüler, daß auch bei der Luft Trägheitserscheinungen auftreten.

### Versuch

Ein dünnes Brettchen läßt man etwa zu einem Drittel seiner Länge über die Tischkante ragen. Ein Schlag gegen den überragenden Teil schleudert das Brettchen mühelos fort. Bedeckt man es nach Abbildung 2.2.13./1 mit einem Bogen Zeitungspapier, so läßt es sich mitsamt dem Papier durch allmählich zunehmenden Druck leicht anlüften. Vollführt man dagegen mit einem flach gehaltenen Hammer einen kräftigen Schlag gegen den überstehenden Teil, so zerbricht das Brett infolge der Trägheit der Luft, die auf dem Papier lastet. Das Papier bleibt unbeschädigt.

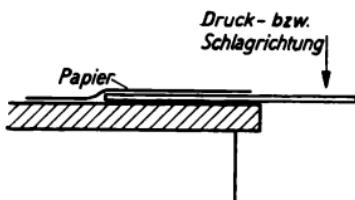


Abb. 2.2.13./1 Brettchen mit Papierbogen bedeckt, zum Nachweis der Trägheit der Luft

## 2.3. Teilbarkeit, Porosität, Verformbarkeit

### 2.3.1. Zerkleinern eines festen Körpers [SE]

1. Kreide, Gips
2. Unterlegbrett
3. Hammer
4. Reibschale mit Pistill

### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment und die folgenden sollen den Molekülbegriff vorbereiten (vgl. dazu MB 2.0.3.).

### Versuch

Die Teilbarkeit fester Körper weist man sehr sinnfällig an einem Stück Kreide nach, wobei man etwa folgende Teilbarkeitsstufen unterscheiden kann:

1. Zerbrechen in große Stücke,
2. Zerbröckeln mit der Hand in erbsengroße Stücke,
3. Zerstoßen mit einem Hammer auf einer Unterlage zu senfkörngroßen Stücken,
4. Zerreißen in einer Reibschale zu Pulver.

**Bemerkung**

Geeignet ist auch ein aus steifem Gipsbrei hergestellter, gut getrockneter Gipsklumpen.

**2.3.2. Zerstäuben einer Flüssigkeit**

1. Becherglas
2. Zerstäuber

**Methodischer Hinweis**

Vergleiche MH, V 2.3.1.!

**Versuch**

Zum Veranschaulichen der Feinverteilung einer Flüssigkeit ist der bekannte Flüssigkeitszerstäuber gut zu gebrauchen.

Man unterscheidet

Zersprühen — gröbere Tropfenbildung,  
Zerstäuben — feine Tröpfchenbildung.

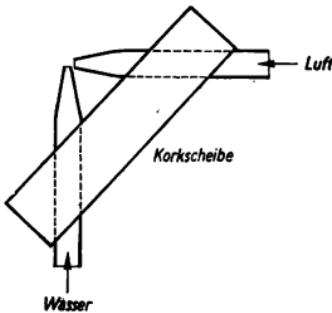


Abb. 2.3.2./1 Selbstgefertigter Zerstäuber

**Anwendungs- und Erfahrungsbeispiele**

Blumenspritze, Baumspritze, Rasensprenger, Desinfektionszerstäuber, Parfümzerstäuber, Regen, Sprühregen, Nebel, Dunst

**Bemerkung**

Man kann einen behelfsmäßigen Zerstäuber nach Abbildung 2.3.2./1 aus zwei Glasröhren und einer größeren Korkscheibe selbst herstellen.

**2.3.3. Ausbreitung von Gasen**

1. Leicht verdunstende Flüssigkeit mit charakteristischem Geruch (Äther, Benzin, Benzol, Ammoniakwasser)
2. Filterpapier oder Löscheblatt

**Methodischer Hinweis**

Vergleiche MH, V 2.3.1.!

**Versuch**

Zum Nachweis der raschen Ausbreitung von Gasen eignen sich die oben aufgeführten Flüssigkeiten. Ihre Dämpfe bzw. das aus Ammoniakwasser entweichende Ammoniakgas können durch ihren Geruch nachgewiesen werden. Dazu beträufelt man ein Stück Filterpapier mit einer dieser Flüssigkeiten.

## V 2.3.4.

### 2.3.4. Gefügemodell zum Veranschaulichen der Teilbarkeit [SE]

#### Zu Versuch 1

1. Kleine Würfel oder Quader (Holzwürfel, Baukastensteine, Streichholzschachteln)

#### Zu Versuch 2

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

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH, V 2.3.1.!
2. Für beide Arten der Veranschaulichung gilt folgendes:
  - a) die Gestalt der Modellkörper berechtigt keinesfalls zu einem Schluß auf die Gestalt der Moleküle;
  - b) es fehlen am Modell die Molekularkräfte, die die Moleküle zusammenhalten;
  - c) es fehlt am Modell jede Eigenbewegung der Moleküle.
3. Auf die Veranschaulichung des Molekulargefüges gasförmiger Körper wird verzichtet, da sich diese zwangloser bei der Behandlung der kinetischen Gastheorie einfügen läßt.

#### Versuch 1: Modell für feste Körper

Aufbau eines Körpermodells aus Holzwürfeln oder anderen geeigneten Bauteilen (s. oben). Die einzelnen Schichten dürfen nicht gegeneinander verschoben sein, sondern müssen fugenweise übereinander liegen. Vergleich mit dem Raumgittermodell der Kristallographie, Hinweise auf die Starrheit des Gefüges.

#### Versuch 2: Modell für flüssige Körper

Kleine Kieselsteine, Glasperlen o. ä., trockener Sand, Bärlappsporen, Blütenstaub von Hasel oder Kiefer in einem Glas. Auffallend ist die Zunahme der Verschiebbarkeit der Teilchen mit abnehmender Größe. Feiner trockener Sand und erst recht Bärlappsporen und Blütenstaub lassen sich fast flüssigkeitsartig in geschlossenem „Strahl“ umgießen. Waagerechte Oberfläche beachten! Sehr geeignet für das Flüssigkeitsmodell sind kleine magnetisierte Stahlkugeln, da diese bis zu einem gewissen Grade, wenn auch in anderer Ausprägung, die zwischenmolekularen Kräfte modellartig wiedergeben.

### 2.3.5. Adhäsion und Kohäsion

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH, V 2.3.1.!
2. Diese und die folgenden Experimente zeigen einige Erscheinungen der Wirksamkeit von Molekularkräften. Dabei sollen die Begriffe *Kohäsion* und *Adhäsion* eingeführt werden.



1. Drei Glasplatten
2. Glasstab
3. Becherglas
4. paraffiniertes Papier
5. Lykopodium
6. Quecksilber
7. Quecksilberbrett oder Tablett mit erhöhten Rändern
8. Quecksilbertropfer
9. Quecksilberwanne
10. Quecksilberzange



Abb. 2.3.5./1 Quecksilbertropfer

### Versuch

Quecksilbertropfchen auf einer gut gereinigten Glasplatte zeigen durch ihre kugelige Gestalt das Wirken starker Kohäsionskräfte (Abflachen bei zunehmender Größe). Einzelne Quecksilbertropfen entnimmt man dem Quecksilber in einer Quecksilberwanne mit einer Quecksilberzange.

Ähnlich verhalten sich Wassertropfen auf paraffiniertem Papier oder auf einer mit einem leicht geölten Lappen überstrichenen Glasplatte. Auch auf einer mit Bärlappsporen eingestäubten Glasplatte zeigen sich dieselben Erscheinungen. Dagegen ist am Verlaufen des Wassers auf einer gut gereinigten Glasscheibe, an seinem Haftenbleiben am eingetauchten Glasstab, am Finger das Überwiegen der Adhäsionskräfte zu erkennen.

Die Kohäsion wirkt zwischen gleichartigen Molekülen. Man muß sie überwinden, wenn man ein Stück Kreide zerbricht.

Die Adhäsion wirkt zwischen verschiedenartigen Molekülen, so z. B. zwischen den Molekülen der grünen Wandtafelfarbe und den Molekülen der Kreide, mit der man an die Tafel schreibt.

### Bemerkungen

1. Quecksilberdämpfe sind giftig, deshalb darf kein Quecksilber verspritzt werden. Nur kleine Mengen, Quecksilbertropfer (Abb. 2.3.5./1), Quecksilberzange und unbedingt das Quecksilberbrett benutzen!
2. Vergleiche 3/4/5 Teil, MB 1.0.6., Anweisung zum Arbeiten mit Quecksilber!

## 2.3.6. Versuche zur Adhäsion

### Zu Versuch 1

1. Zwei Adhäsionsplatten

### Zu Versuch 2

2. zwei Bleizylinder ( $\varnothing$  30 mm) mit geglätteten Endflächen ⑧

### Zu Versuch 3

3. Adhäsionsendmaße

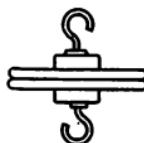


Abb. 2.3.6./1 Adhäsionsplatten

## V 2.3.6.

### Zu Versuch 4

4. Kraftmesser (10 N)
5. Glasschale

### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH, V 2.3.5.!
2. Es wäre falsch, die im Versuch 4 ermittelte Kraft als Adhäsionskraft zu bezeichnen. Beim Abheben wird nicht die Adhäsion zwischen dem Glas der Platte und dem Wasser überwunden, sondern die Kohäsion des Wassers.

### Versuch 1

Haucht man gegen die geschliffene Fläche einer Adhäsionsplatte aus Glas, so überzieht sie sich mit einer dünnen Kondenswasserschicht. Preßt man die zweite Platte dagegen (Abb. 2.3.6./1), so haften beide fest aneinander, und man kann sie nur voneinander trennen, indem man sie seitlich gegeneinander verschiebt.

### Versuch 2

Aus Bleiabfällen gießt man einen Zylinder ( $\varnothing$  30 mm, Länge 100 mm). Man zersägt den Zylinder in zwei etwa gleich lange Stücke; die Schnittflächen werden durch Schaben mit einem Messer geglättet und eine der beiden wie im Versuch 1 leicht mit Wasser benetzt. Wenn man die Stücke mit diesen Flächen gegeneinander drückt und dabei das eine gegen das andere dreht, so haften sie fest aneinander. Vor jedem Gebrauch sind die Endflächen erneut glatt zu schaben.

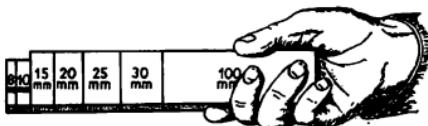


Abb. 2.3.6./2 Aneinanderhaftende Adhäsionsendmaße

### Versuch 3

Adhäsionsendmaße (Abb. 2.3.6./2) haben hochpolierte Endflächen. Aus ihnen kann man beliebige Meßstrecken zusammenstellen, die eine große Genauigkeit aufweisen. Die Haftfähigkeit kommt im allgemeinen bereits durch den hauchdünnen Wasserfilm zustande, der durch Kondensation des in der Zimmerluft enthaltenen Wasserdampfs entsteht. Gegebenenfalls kann man durch Anhauchen der Haftflächen nachhelfen.

### Bemerkung

Die polierten Endflächen der Adhäsionsendmaße müssen sehr pfleglich behandelt werden. Sie dürfen nicht mit den Fingern berührt werden. Nach dem Gebrauch wischt man sie mit einem weichen, sauberen Lappen vorsichtig ab.

### Versuch 4

Man hängt eine Adhäsionsplatte mit einem Faden an einen Kraftmesser, den man an einem Stativ befestigt, und stellt eine Schale mit Wasser darunter. Man stellt zuerst die Gewichtskraft der Platte fest und senkt dann den Kraftmesser so weit, daß

die untere Fläche der Platte das Wasser gerade berührt (Abb. 2.3.6./3). Dann hebt man den Kraftmesser vorsichtig und stellt fest, welche Kraft erforderlich ist, um die Platte von der Wasseroberfläche zu trennen.

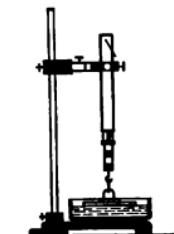


Abb. 2.3.6./3 Versuchsanordnung zum Nachweis der Adhäsion zwischen Glas und Wasser

### 2.3.7. Aufnahmefähigkeit und Durchlässigkeit für Wasser — Porosität (Modellversuche) [SE]

#### Zu Versuch 1

1. Schwamm (Natur- oder Viskose-Wandtafelschwamm) oder Schaumstoff
2. flache Schale oder Teller

#### Zu Versuch 3

3. Gerät 3. und 4., außerdem
6. Glastrichter
7. Holzkohlepulver
8. Becherglas

#### Zu Versuch 2

3. Filterpapier
4. Becherglas mit gefärbtem Wasser
5. Gipsblock (6 cm × 6 cm × 2 cm) Ⓢ

#### Zu Versuch 4

- Gerät 4., außerdem
9. 2 Bechergläser (200 ml, hohe Form)
10. Glasperlen
11. Sand
12. 2 Reagenzgläser

#### Methodischer Hinweis

Die in diesem Experiment untersuchten Eigenschaften poröser oder körniger Körper sind z. B. für die Agrotechnik (Wasserdurchlässigkeit von Sand- und Kiesböden, Aufsteigen des Grundwassers in den Poren des Bodens) und für das Bauwesen sehr wichtig.

#### Versuch 1: Saugfähigkeit eines Schwamms

Man füllt in eine flache Schale (Teller) wenige Millimeter hoch Wasser ein und legt einen angefeuchteten und gut ausgedrückten Schwamm hinein. Er saugt das Wasser auf.

#### Versuch 2: Saugfähigkeit von Filterpapier und Gips

Ein etwa 20 mm breiter Streifen Filterpapier wird mit seinem unteren Ende einige Millimeter tief in angefärbtes Wasser getaucht. Die Flüssigkeit steigt im Filterpapier hoch. Besonders auffallend ist die Porosität eines Gipsblockes mit glatter Oberfläche. Läßt man auf die glatte Fläche einige Tropfen Wasser fallen, so kann man sehen, daß es vom Gips vollkommen aufgesaugt wird.

### *Versuch 3: Durchlässigkeit von Filterpapier — Größenordnung der Poren*

Man röhrt dem gefärbten Wasser Holzkohlepulver bei und filtriert diese Flüssigkeit. Während die Farblösung (molekulare oder kolloide Zerteilung) durch das Filter tritt, bleiben die Holzkohleteilchen (grob disperse Zerteilung) auf dem Filter zurück.

### *Versuch 4: Modelle poröser Körper*

In ein Becherglas mit Glasperlen und ein gleichartiges mit feinem Sand werden gleichzeitig je eine gleiche Menge (z. B. je ein Reagenzglas voll) Wasser geschüttet. Durch die großen Zwischenräume zwischen den Glasperlen gelangt das Wasser sehr schnell zum Boden des Gefäßes, während es durch den Sand erst allmählich hindurchsickert.

### *Bemerkungen*

1. Zum Anfärben des Wassers eignen sich: Eosin, Fluoreszein, Tinte u. a. m.
2. Man stellt einen für den Versuch 2 geeigneten Gipsblock her, indem man gut durchgerührten zähen Gips auf einer sauberen Glasplatte zu einem Quader (etwa 6 cm × 6 cm × 2 cm) formt und mehrere Tage trocknen läßt.

## **2.3.8. Gasdurchlässigkeit eines Mauerziegels**

1. Mauerziegel	5. Wachs (Paraffin oder Stearin)
2. zwei große Glas- oder Metalltrichter	6. Kerze
3. zwei Brettchen mit kreisrunden Löchern @	7. zugespitzte, gewinkelte Glasröhre
4. Glaserkitt	8. Schlauch, Schnur

### *Methodischer Hinweis*

Die Porosität von Mauerziegeln muß im Bauwesen berücksichtigt werden (Isolierschichten zur Vermeidung von aufsteigendem Grundwasser).

### *Versuch*

Zur Durchführung des Versuchs benötigt man einen nicht hart gebrannten, vollkommen trockenen, mörtelfreien Mauerziegel. An seinen beiden großen Flächen befestigt man, achsengleich gegenüberstehend, zwei große Glas- oder Metalltrichter. Man sägt zu diesem Zweck aus zwei Brettchen etwa von der Größe der Ziegelfläche je ein kreisförmiges Loch heraus, so daß sich die Scheiben über die Trichterstülpfen lassen. Durch herumgebundene kräftige Schnüre werden die Scheiben mitsamt den Trichtern fest gegen die Ziegelflächen gepreßt. Durch Glaserkitt wird die Fuge zwischen Trichter und Ziegel luftdicht abgeschlossen und durch Wachs, Paraffin oder Stearin die gesamte freie Oberfläche des Ziegels abgedichtet. Die Porosität des Ziegels macht es möglich, durch den Ziegel hindurch eine Kerze auszublasen (Abb. 2.3.8./1). Schließt man den einen Trichter mit einem Schlauch an die Gasleitung an und setzt auf den anderen eine gewinkelte, zugespitzte Röhre, so kann man den hindurchtretenden Stadtgasstrom entzünden (Abb. 2.3.8./2). Vorsicht beim Anzünden; bis zum völligen Verdrängen der Luft aus dem Trichter warten!



### Bemerkung

Das Abdichten der Ziegelfläche, die nicht von den Trichtern bedeckt wird, geschieht am besten in der Weise, daß man geschmolzenes Wachs, Stearin oder Paraffin mit einem Pinsel aufträgt.

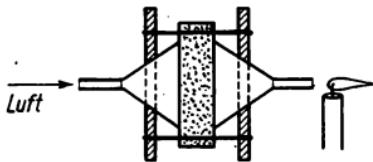


Abb. 2.3.8./1 Hindurchblasen von Luft durch einen Mauerziegel

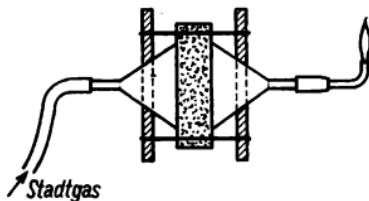


Abb. 2.3.8./2 Hindurchtreten von Stadtgas durch einen Mauerziegel

## 2.3.9. Elastische, plastische und thermoplastische Verformbarkeit

### Zu Versuch 1

1. Stahldraht (Stahlsaite)
2. Glasfaden Ⓛ oder dünne Glasplatte (Deckglas)
3. Streifen aus PVC-Hart (etwa 10 cm × 2 cm × 2 mm)
4. zwei Flachzangen

### Zu Versuch 2

5. dünnes Blech aus Eisen, Kupfer oder Blei

### Zu Versuch 3

- Geräte 1. bis 4., außerdem
6. Bunsenbrenner mit Schlauch

### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment soll den Molekülbegriff vorbereiten (vgl. dazu MB 2.0.3.).

#### Versuch 1: Elastische Verformung

Biegt man einen dünnen Stahldraht leicht mit den Fingern und läßt ihn danach wieder los, so nimmt er seine ursprüngliche Form wieder an. Er ist elastisch. Ebenso würden sich andere Körper aus Stahl, wie Schraubenfedern oder Blattfedern (Uhrfedern), verhalten.

Auch ein dünner Glasfaden, eine dünne Glasplatte (Deckglas für mikroskopische Präparate) oder ein Streifen aus PVC-Hart verhalten sich so, wenn die verformende Kraft eine gewisse Grenze nicht überschreitet. Ist die Kraft zu groß — verbiegt man z. B. den Stahldraht zu kräftig, indem man ihn mit zwei Zangen faßt —, so nimmt er seine ursprüngliche Form nicht wieder an oder bricht sogar.

Auch der Glasfaden bricht, wenn man ihn zu stark biegt. Die Bruchstücke zeigen dabei nichts mehr von der vorangegangenen Verformung; Glas ist sehr spröde.

## ● V 2.3.9.

---

### *Versuch 2: Plastische Verformung*

Dünnes Eisen-, Kupfer- oder Bleiblech behalten die Form, die man ihnen durch Verbiegen gegeben hat. Ebenso verhalten sich auch Drähte aus diesen Metallen und Körper aus Töpferton, Plastilin, Glaserkitt oder aus frisch angerührtem Gipsbrei. Auch damit könnte die plastische Verformung demonstriert werden. Auch Stahl ist im allgemeinen zäh und kann durch starke Kräfte plastisch verformt werden (vgl. Versuch 1 — kräftiges Verbiegen des Stahldrahts).

### *Versuch 3: Thermoplastische Verformung*

Der im Versuch 1 verwendete PVC-Streifen wird etwa in der Mitte über einer Gasflamme vorsichtig erwärmt. Dabei wird er an dieser Stelle weich und plastisch. Verbiegt man ihn und lässt ihn abkühlen, so behält er die neue Form bei.

#### *Bemerkung*

PVC ist strenggenommen nicht elastisch.

### 3. Feste Körper in Ruhe

#### 3.0. Methodische Bemerkungen

3.0.1. Im Vordergrund der Lehre von der relativen Ruhe der festen Körper stehen die *statischen Wirkungen* der Kraft. Der Abschnitt 3.1. enthält Versuche, die ausschließlich dazu dienen sollen, die Kraft als *Vektor* und die geometrischen Methoden der Addition und Zerlegung von Kräften zu veranschaulichen.

Vektoren, also auch Kräfte, werden in der deutschsprachigen Fachliteratur häufig mit sogenannten „deutschen“ Buchstaben ( $\mathfrak{F}$ ,  $\mathfrak{R}$ ) bezeichnet. Diese Schreibweise bereitet den Schülern gewöhnlich Schwierigkeiten, weil sie diese Schrift nicht mehr kennen. In diesem Buch wird über den Buchstaben ein Pfeil gesetzt, wenn es sich um einen Vektor handelt ( $\vec{F}$ ,  $\vec{R}$ ). Ist nur der Betrag gemeint, bleibt der Pfeil weg ( $F$ ,  $R$ ).

Von grundlegender Bedeutung für das Verständnis der Statik ist der Begriff des *Kräftegleichgewichts*, da ein unter der Einwirkung von Kräften stehender frei beweglicher Körper nur dann im Ruhezustand verbleibt, wenn sämtliche Kräfte sich ausgleichen oder, wie man sagt, sich das Gleichgewicht halten. Es versteht sich daher von selbst, daß der Unterricht auf die klare Erfassung dieses wichtigen Begriffes nachdrücklich hinzuarbeiten muß. Die Notwendigkeit dazu ergibt sich bereits bei den einfachsten Versuchen und Überlegungen, bei der Messung von Kräften. Denn die Messung einer Kraft, z. B. einer Muskelkraft, mittels eines Kraftmessers beruht auf dem Eintreten des Gleichgewichts zwischen der zu messenden Kraft und der durch das Spannen der elastischen Feder hervorgerufenen Kraft. Eine Kraft kann unmittelbar nur durch eine andere Kraft gemessen werden.

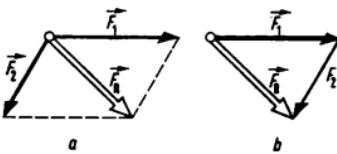


Abb. 3.0.1/1 Addition von Kräften a) mit dem Kräfteparallelogramm, b) mit dem Kraftdreieck ( $F_2$  ist nur eine Hilfslinie; sie ist nicht identisch dem Vektor  $\vec{F}_2$ )

Besondere Bedeutung gewinnt die Vorstellung vom Kräftegleichgewicht bei der Herleitung des Satzes vom *Parallelogramm der Kräfte*, die nur auf dieser Grundlage möglich ist. Denn nur unter der Voraussetzung, daß zwischen drei auf einen Punkt einwirkenden Kräften Gleichgewicht besteht, darf man bei V 3.1.6. und V 3.1.7. den Schluß ziehen, daß man je zwei von ihnen zu einer Kraft, der Resul-

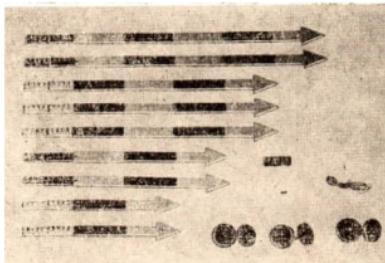


Abb. 3.0.1./2 Satz ausziehbarer Pfeile.  
Zum Zubehör gehören Haftmagnete,  
Gummischnur und ein Winkelmaß.

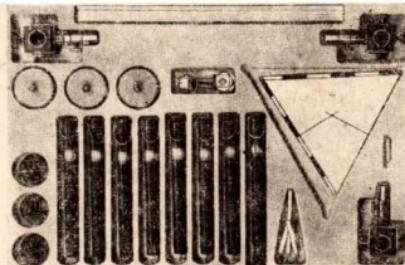


Abb. 3.0.1./3 Satz kombinierte Zug- und Druckkraftmesser mit Zubehör

tierenden, zusammenfassen kann, die der dritten Kraft dem Betrag nach gleich, aber entgegengesetzt gerichtet ist.

In der Praxis wird im allgemeinen statt des Kräfteparallelogramms das *Krafteck* angewandt. Auch die Krafteckmethode kann im Unterricht erläutert werden, jedoch erst dann, wenn die Schüler die Addition von Kräften mit Hilfe des Kräfteparallelogramms beherrschen (Abb. 3.0.1./1). Die Krafteckmethode stellt bereits einige Anforderungen an das Abstraktionsvermögen. Bei der Krafteckmethode wird der Einfachheit halber nur ein Teil des Kräfteparallelogramms gezeichnet. Der an den ersten Pfeil gereihte Pfeil ist nur eine Hilfslinie der Konstruktion, auf der man den Betrag von  $\vec{F}_2$  abträgt. Kräfte dürfen nur entlang ihrer Wirkungslinie, nicht aber seitlich parallel verschoben werden.

Zur Veranschaulichung von Vektoren können an einer Hafttafel ausziehbare Pfeile benutzt werden. Sie werden als kompletter Satz geliefert (Abb. 3.0.1./2). Die Pfeile sind mit einer Maßeinteilung versehen und können in ihrer Länge jeweils um zehn Einheiten verändert werden.

Aus methodischen Gründen sollten als Kraftmesser nach Möglichkeit die als *kombierte Zug- und Druckkraftmesser* angebotenen benutzt werden (Abb. 3.0.1./3). Sie werden als kompletter Lehrmittelsatz mit Zubehör geliefert und bieten gegenüber älteren Ausführungen eine Reihe von Vorteilen. Wie die Bezeichnung bereits aussagt, können sie sowohl als Zug- wie auch als Druckkraftmesser benutzt werden. Zum Zubehör gehört deshalb ein *Druckstab*, auf den man einen *Druckteller* oder einen *Rollenaufsatz* stecken kann. Eine *Kardanhalterung* sorgt dafür, daß der Kraftmesser in allen Richtungen frei beweglich ist und in die Richtung der wirkenden Kraft eingestellt werden kann. Mit *Haftmagneten* können die Kraftmesser mitsamt den Kardanhalterungen an einer *Maniperm-Hafttafel* angebracht werden. Versuchsanordnungen dieser Art können in kürzester Zeit aufgebaut bzw. verändert werden, sind übersichtlich (Demonstration in vertikaler Ebene) und haben den Vorzug, daß man unmittelbar hinter, unter oder neben der Versuchsanordnung Skizzen oder Konstruktionen zeichnen kann. Durch die Verwendung der ausziehbaren Pfeile wird die Anschaulichkeit erhöht. Zum Zubehör gehören weiterhin eine Verbindungshülse (vgl. V 3.1.5.), ein sogenannter *Knotenpunkt* (vgl. V 3.1.6.) und ein Satz von *Keilmodellen* mit unterschiedlichem Keilwinkel (vgl. V 3.4.22.). Um bei Vorbelastungen mit Druckstab, Teller, Rollen u. a. m. die Gewichtskraft dieser

Geräte nicht bei der eigentlichen Messung berücksichtigen zu müssen, sind diese Kraftmesser mit einer verschiebbaren *Justierhülse* versehen, mit deren Hilfe man die Skale des vorbelasteten Kraftmessers innerhalb weiter Grenzen auf Null stellen kann.

Wenn ein älterer Kraftmesser benutzt wird, der noch in Kilopond oder Pond geeicht ist, genügt zur Umrechnung das näherungsweise gültige Verhältnis  $100\text{p} \approx 1\text{ N}$ .

3.0.2. Die Versuche des Abschnitts 3.2. sollen in erster Linie die Kenntnis des *Hooke'schen Gesetzes* vermitteln und im Zusammenhang damit die Begriffe der Elastizität, der Dehnbarkeit, der Zähigkeit und Sprödigkeit sowie der Festigkeit klären. Die Schüler werden zunächst geneigt sein, Gummi als das Musterbeispiel eines elastischen Stoffes anzusehen, weil sie, wie es gemeinhin geschieht, die außerordentlich große Dehnbarkeit von Gummi als besonderes Kennzeichen des elastischen Zustandes betrachten. Sie werden erst lernen müssen, daß Stoffe, wie Stahl und Glas, im physikalischen Sinn sehr elastisch sind, auch wenn an ihnen selbst durch große Zugkräfte nur geringe Deformationen hervorgerufen werden können. Die elastischen Verformungen einer Gummischnur sind bei mäßigen Zugkräften unmittelbar wahrnehmbar, aber die Längenänderung ist hierbei nur in engen Grenzen der wirkenden Kraft proportional und gehorcht bei stärkeren Dehnungen keinem einfachen Gesetz. Gummi ist deshalb strenggenommen nicht *elastisch*.

Die elastische Dehnung von Drähten dagegen wird durch das Hooke'sche Gesetz beschrieben. Doch sind die Längenänderungen eines Drahtes selbst bei großen Belastungen so gering, daß sie nur durch besondere Hilfsmittel, über die man in der Schule im allgemeinen nicht verfügt, aus der Ferne erkannt werden können. Aus methodischen Erwägungen wird es daher vorzuziehen sein, das Hooke'sche Gesetz an der Verlängerung einer belasteten Schraubenfeder zu bestätigen. Es handelt sich hierbei zwar um eine zusammengesetzte Erscheinung (vgl. Bem. zu V 3.2.1.), aber die Längenänderungen der Feder sind auch bei geringen Belastungen zu beobachten und in weiten Grenzen zur wirkenden Kraft proportional. Die Versuche mit der Schraubenfeder sind über ihren sachlichen Inhalt hinaus noch recht wertvoll für die allgemeine Methodik des Physikunterrichts; denn sie sind ein besonders anschauliches Beispiel dafür, wie man aus der *grafischen Darstellung* einer Meßreihe zur Vermutung und schließlich zur Bestätigung eines mathematischen Zusammenhangs zwischen den gemessenen Größen geführt werden kann. Sie kennzeichnen zugleich die Anwendung des induktiven Verfahrens im Unterricht. Die Versuche über elastische Kräfte geben Anlaß, die Eigenschaften der in der Technik benutzten Werkstoffe zu erörtern. Es wird sich in der Schule aber im allgemeinen nicht um eine möglichst genaue Bestimmung der Materialkonstanten handeln (Elastizitätsmodul, Torsionsmodul), sondern um einzelne Beispiele, wie die Ansprüche, die an technische Bauelemente (z. B. Schienen, Kurbelwellen, Balken, Seile) gestellt werden, durch ein geeignetes Material und eine besondere Form erfüllt werden können.

3.0.3. Im Abschnitt 3.3. bildet der Begriff Schwerpunkt den methodischen und sachlichen Mittelpunkt. Man wird ihn im Anfangsunterricht so einfach wie möglich einführen. Der Schwerpunkt ist in enger Anlehnung an die bei zahlreichen Versuchen angestellten Beobachtungen als der Punkt anzusehen, in dem man den Körper unterstützen muß, um ihn im Gleichgewicht zu halten. Die Definition des Schwerpunkts als des Angriffspunkts der Schwerkraft im Sinne eines Massen-

### 3.0.3.

mittelpunkts, in dem man sich die Masse aller Massenteilchen des Körpers vereinigt denken kann, stellt an das Abstraktionsvermögen der Schüler erhebliche Anforderungen und hat erst in einem weiterführenden Unterricht Platz.

Bei der Behandlung des *Gleichgewichts* ist es sachlich unbegründet, zwischen dem Gleichgewicht eines hängenden Körpers und der *Standfestigkeit* bei stehenden Körpern einen wesentlichen Gegensatz zu konstruieren. Definiert man die Gleichgewichtslage als eine Körperlage, bei der ein nur der Schwerkraft ausgesetzter, anderen Kräften sonst nicht unterworferner Körper sich nicht bewegt, so trifft das für hängende wie für stehende Körper zu. Wie bei einem stabil hängenden Körper befindet sich auch bei einem stabil stehenden Körper der Schwerpunkt in einer relativ tiefsten Lage und kehrt bei nicht zu starken Erschütterungen in diese zurück, wenngleich die Standfestigkeit bisweilen sehr gering sein kann.

3.0.4. Die erste der *kraftumformenden Einrichtungen*, der sogenannten *einfachen Maschinen*, mit denen der Schüler bekannt wird, ist der *Hebel*. Man begegnet vielfach der Ansicht, daß das Einspielen des Hebels in die waagerechte Lage eine notwendige Voraussetzung für den Nachweis des Hebelgesetzes sei. Damit eine stabile waagerechte Gleichgewichtslage erreicht wird, befindet sich bei vielen Hebelmodellen die Drehachse etwas oberhalb des Schwerpunkts. Die von der Hebelwaage her vertraute, in der Eigenart ihrer Meßtechnik begründete Gewohnheit hat offenbar Anlaß zu dieser Bauart gegeben. Mag dies auch eine gewisse Erleichterung für den Unterricht mit sich bringen, so liegt darin doch eine Gefahr, auf die ausdrücklich hingewiesen werden soll. Beim Schüler stellt sich leicht die irrite Auffassung ein, als sei die Gültigkeit des Hebelgesetzes an die waagerechte Lage des Hebels gebunden. Dem ist aber nicht so. Das Hebelgesetz ist auch für jede schräge Gleichgewichtslage erfüllt. Nur dürfen bei einem Hebel, dessen Drehachse oberhalb des Schwerpunkts liegt, nicht die Strecken zwischen den Aufhängepunkten der angehängten Körper und der Drehachse, sondern die senkrechten Abstände der Kraftwirkungslinien von der Drehachse als Kraftarme betrachtet werden. Abbildung 3.0.4.1 gibt darüber Aufschluß. In diesem Zusammenhang kann der Begriff *Drehmoment* eingeführt werden. Experimente zur Herleitung und Bestätigung des *Momentensatzes* sind in V 3.4.12. und 3.4.13. beschrieben. Im V 3.4.12. wird die Drehmomentenwaage benutzt. Dieses Gerät kann zur Messung und zum Vergleich von Drehmomenten, zur Messung von Kräften, zur Ermittlung von Trägheitsmomenten durch Drehschwingungen, zur Demonstration von Schwingungsvorgängen und Dämpfungerscheinungen sowie zur Messung des aerodynamischen Auftriebs und des Strömungswiderstandes verwendet werden.

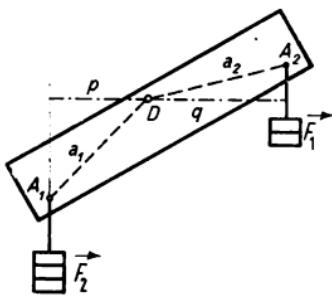


Abb. 3.0.4.1 „Gleicharmiger“ Hebel bei ungleichmäßiger Belastung in schräger Gleichgewichtslage. Der Hebel ist nur scheinbar gleicharmig ( $a_1 = a_2$ ). Die wirklichen Kraftarme  $p$  und  $q$  sind verschieden lang. (Der Hebel ist übertrieben breit gezeichnet.)

Ist der Hebel um seinen Schwerpunkt drehbar, so ist er bei Erfüllung des Hebelgesetzes in jeder Lage im Gleichgewicht. Für das Eintreten des Gleichgewichts ist dann nicht die waagerechte Lage maßgebend, sondern der Umstand, daß der Hebel in jeder beliebigen Lage, also auch in der waagerechten, verbleibt, wenn man ihn nicht anstößt.

Bei der Behandlung der *Rolle* und der aus Rollen zusammengesetzten kraftumformenden Einrichtungen versäume man nicht, auf die entscheidende Bedeutung hinzuweisen, die dem Seil bei diesen Vorrichtungen zukommt. Die Kraftübertragung erfolgt ausschließlich durch das Seil. Kraftumformend wirkt die feste Rolle nur insofern, als sie die Richtung der Kraft ändert; der Betrag der Kraft wird durch sie nicht beeinflußt, wenn man sie als reibungsfrei und masselos betrachten darf. Die Rolle ist mit einem gleicharmigen Hebel vergleichbar, an dem eine Änderung des Betrages der Kraft ebenfalls nicht eintritt. Man sollte daher Einrichtungen dieser Art, zu denen auch der Flaschenzug gehört, treffender als *Seilmaschinen* bezeichnen.

In diesem Abschnitt wurde auch eine Reihe von Versuchen mit einfachen *Getriebe-modellen* mit Riemen- oder Zahnradtrieb aufgenommen, die in leicht abgewandelter Form mit verschiedenen Baukästen ausgeführt werden können. Den Schluß dieses Abschnitts bilden ein Versuch zur *geneigten Ebene* (V 3.4.21.), die Beschreibung eines *Modells der Schraube* (V 3.4.22.) und ein Versuch zur *Kräftezerlegung am Keil* (V 3.4.23.).

Die *Schraube* kann in der Schule kaum quantitativ experimentell behandelt werden. Man muß sich darauf beschränken, Modelle für das Entstehen einer Schraubenlinie bzw. einer Schraubenfläche und für die Schraube selbst vorzuweisen und an ihnen den Zusammenhang zwischen der Schraube und der geneigten Ebene verständlich zu machen.

**3.0.5.** Die Versuchsbeschreibungen zur Einführung des *Arbeits- und Leistungsbe-griffs* sind aus systematischen Gründen von den Beschreibungen zu den kraftumformenden Einrichtungen getrennt in einem besonderen Abschnitt angegeben. Im Unterricht wird man sie an die betreffende Vorrichtung anschließen, zu der sie gehören. Zur Einführung des Begriffs Arbeit gut geeignet sind die Seilmaschinen und die geneigte Ebene, weil bei ihnen die Verhältnisse in dieser Hinsicht besonders einfach sind. Bei allen Experimenten mit kraftumformenden Einrichtungen sollte die Gültigkeit des „Satzes von der Gleichheit der Arbeiten“ herausgearbeitet werden. Dabei sollte man die Schüler aber unbedingt darauf hinweisen, daß die Formulierung  $W_1 = W_2$  strenggenommen nicht gilt, weil bei allen Vorgängen Reibung auftritt. Dadurch wird die Einführung des Wirkungsgrades vorbereitet, und die Schüler empfinden die Beziehung  $W_2 < W_1$  nicht als Widerspruch zum Satz von der Erhaltung der Energie.

In diesem Stoffkomplex soll den Schülern klarwerden, daß sich der Mensch in den kraftumformenden Einrichtungen Hilfsmittel geschaffen hat, um Naturgesetze in seinen Dienst zu stellen und die Natur zu seinem Nutzen zu verändern. Er soll aber auch erkennen, wie wichtig es ist, die auftretenden Kräfte bei der Benutzung kraftumformender Einrichtungen richtig einzuschätzen, um bei der Arbeit mit ihnen Schäden zu vermeiden, die bei unüberlegter Anwendung durch Abdrehen von Schraubenköpfen, Reißen von Seilen u. a. m. entstehen können.

**3.0.6.** Man kann einen Teil der Experimente zur Mechanik auch in der Weise ausführen, daß man z. B. als Rollen die zum Präzisionsstativmaterial gehörenden Rundtischchen verwendet. Als Achsen dienen kurze Stativstäbe, als Lager Tisch-

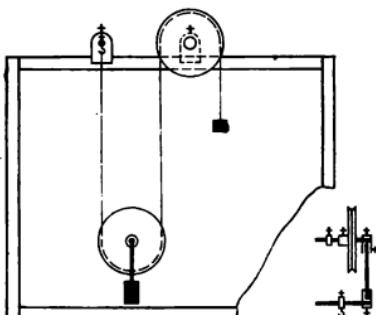


Abb. 3.0.6./1 Versuchsanordnung an einer vertikal aufgestellten Tafel. Als Rollen werden Rundtischchen verwendet.

klemmen, die man am Rahmen einer vertikal auf einem Tisch befestigten Tafel festschraubt. Statt der Hakenkörper kann man dann Handelswägestücke (0,5 kg bis 5 kg) benutzen. Diese Experimentieranordnungen haben den Vorzug, auch aus großer Entfernung noch gut sichtbar zu sein (Abb. 3.0.6./1). Dabei sollte man beachten, daß bei Unachtsamkeit durch herabfallende Wägestücke Schäden entstehen können.

**3.0.7.** Für Demonstrations- und Schülerexperimente benutzt man häufig als Kräfte die Gewichtskräfte von Wägestücken und Hakenkörpern. Dabei nimmt man im allgemeinen für einen Hakenkörper mit einer Masse von 100 g eine Gewichtskraft von 1 N an. Der Fehler, den man dabei in Kauf nimmt, beträgt nur etwa 2% und kann vernachlässigt werden. Bei der Verwendung von Körpern mit größeren Massen muß für 1 kg Masse als Gewichtskraft 9,81 N angenommen werden.

### 3.1. **Statische Kraftwirkungen, Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften**

#### 3.1.1. **Die Kraft als Ursache einer Verformung [SE]**

1. Dünne Holzleiste
2. Hakenkörper

##### *Methodischer Hinweis*

An Stelle dieses Versuchs könnte auch V 2.2.1. (belasteter Pappstreifen oder belastete Schraubenfeder) ausgeführt werden.

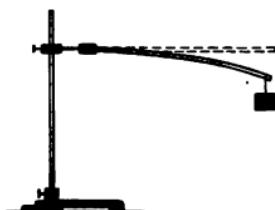


Abb. 3.1.1./1 An einem Ende belastete Holzleiste



### *Versuch*

Eine dünne Holzleiste wird einseitig eingespannt und am freien Ende mit einem Hakenkörper oder mehreren Hakenkörpern belastet (Abb. 3.1.1./1). Die Leiste biegt sich um so stärker, je mehr Hakenkörper angehängt werden. Der Versuch zeigt, daß das Gewicht eine Kraft ist und eine Verformung der Leiste hervorruft.

### *Bemerkung*

Statt der Holzleiste kann die Blattfeder aus dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen benutzt werden.

## **3.1.2. Kraftmessung mit einem Kraftmesser — Die Kraft als vektorielle Größe**

1. Zug- und Druckkraftmesser mit verschiedenen Meßbereichen mit Zubehör (Kardanhalterung, Haftmagnet, Druckstab, Druckteller)
2. Wägesatz
3. Hakenkörper
4. Satz ausziehbarer Pfeile

### *Methodischer Hinweis*

Demonstrationen an der Hafttafel haben den Vorzug, daß man unmittelbar neben oder unter der Versuchsanordnung Vektorendarstellungen mit ausziehbaren Pfeilen anbringen kann. Sie können auch durch zeichnerische Darstellungen ergänzt werden.

#### *Versuch 1: Messung von Zugkräften*

Ein Kraftmesser wird an einem Stativ oder an der Maniperm-Hafttafel befestigt. Man hängt nacheinander einzelne Hakenkörper an den Kraftmesser. Er zeigt jeweils die Gewichtskraft der Hakenkörper an (Abb. 3.1.2./1).

Beispiele für Zugkräfte sind: Kraft am Zugseil von Kränen, Kräfte an Schleppseilen, Kraft am Kupplungshaken einer Lokomotive u. a. m.

#### *Versuch 2: Messung von Druckkräften*

Der Kraftmesser wird mit Druckstab und Teller versehen und die Justierhülse bis zur Nullmarke der Skale herausgezogen. Auf den Druckteller des Kraftmessers stellt man nun nacheinander verschiedene Wägestücke, der Kraftmesser zeigt jeweils ihre Gewichtskraft an (Abb. 3.1.2./2).

Beispiele für Druckkräfte: Kräfte an Stoßstangen, Pleuelstangen, Spatenstielen, an den Anhängerkupplungen, beim Bremsen u. a. m.

#### *Versuch 3: Die Kraft als vektorielle Größe*

Man zieht mit der Hand nacheinander in verschiedenen Richtungen am Haken des Kraftmessers. Der Kraftmesser stellt sich jeweils in die Richtung der wirkenden Kraft, seine Skale zeigt den Betrag dieser Kraft an (Abb. 3.1.2./3).

**Bemerkung**

Statt des Kraftmessers mit kardanischer Aufhängung kann im Versuch 3 auch eine ältere Ausführung eines Kraftmessers benutzt werden, den man am Ring aufhängt. Auch er zeigt die Kraftrichtung an.



Abb. 3.1.2./1  
Messung einer  
Zugkraft

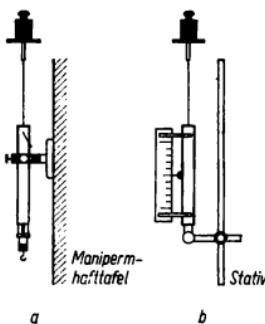


Abb. 3.1.2./2 Messung einer  
Druckkraft:  
a) mit einem kombinierten  
Zug- und Druckkraftmesser,  
b) mit einem Druckkraftmesser

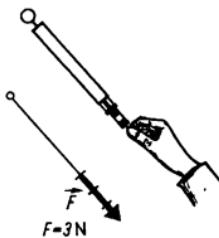


Abb. 3.1.2./3 Die Kraft als  
Vektor. Der Kraftmesser  
gibt den Betrag der Kraft  
an und seine Richtung die  
Richtung der Kraft.

### 3.1.3. Verschiebung der Kraft entlang ihrer Wirkungslinie

1. Zug- und Druckkraftmesser mit Zu-	2. Hakenkörper bzw. Wägestücke
behör (Kardanhalterung, Haftmagnet,	3. Faden
Druckstab, Druckteller)	

*Methodischer Hinweis*

Als Kraft wird hier die Gewichtskraft eines Wägesticks verwendet. Um Irrtümern vorzubeugen, weist man die Schüler vor der Ausführung des Experiments darauf hin.

*Variante a: Verwendung eines kombinierten Zug- und Druckkraftmessers*

An die Hafttafel wird eine lotrechte Linie als Wirkungslinie gezeichnet und genau vor dieser Linie der Kraftmesser mit dem Haftmagnet befestigt. Der Kraftmesser wird mit Druckstab und Teller versehen und seine Skale auf Null gestellt. Man legt zuerst ein Wägestück auf den Teller des Kraftmessers und hängt es dann an einem kurzen und schließlich an einem langen Faden an den Haken des Kraftmessers. Es wird jedesmal derselbe Betrag angezeigt (Abb. 3.1.3./1). Kräfte können entlang ihrer Wirkungslinie beliebig verschoben werden.

*Variante b: Verwendung eines Kraftmessers älterer Ausführung*

Der Kraftmesser wird an einem Stativ befestigt und ein Hakenkörper direkt bzw. nacheinander mit verschiedenen langen Fäden an den Haken des Kraftmessers gehängt. Es wird jedesmal derselbe Betrag angezeigt (Abb. 3.1.3./2).

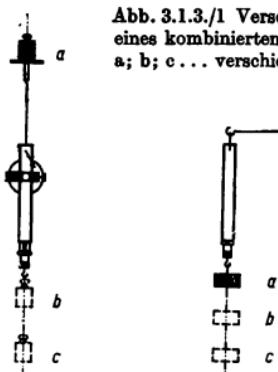


Abb. 3.1.3.1 Verschieben der Kraft entlang ihrer Wirkungslinie (Verwendung eines kombinierten Zug- und Druckkraftmessers):  
a; b; c . . . verschiedene Lagen eines Wägestückes



Abb. 3.1.3.2 Verschieben einer Kraft entlang ihrer Wirkungslinie (Verwendung eines Kraftmessers älterer Ausführung):  
a; b; c . . . verschiedene Lagen des Hakenkörpers

### 3.1.4. Addition von Kräften mit gemeinsamer Wirkungslinie

- 1. Federkraftmesser
- 2. Hakenkörper
- 3. Faden
- 4. Satz ausziehbarer Pfeile

#### Methodischer Hinweis

Vergleiche MH, V 3.1.2. und MH, V 3.1.3.!

#### Versuch

Die Addition von Kräften mit gemeinsamer Wirkungslinie demonstriert man mit einem Federkraftmesser, indem man gleichzeitig die Gewichtskräfte mehrerer Hakenkörper, die direkt oder über einen Faden an den Haken des Kraftmessers gehängt sind, wirken lässt (Abb. 3.1.4.1). Der Betrag der Resultierenden ist gleich der Summe der Beträge der Komponenten.

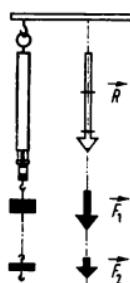


Abb. 3.1.4.1 Addition von Kräften mit gemeinsamer Wirkungslinie

### 3.1.5. Bestätigung des 3. Newtonschen Gesetzes — Das Gegenwirkungsprinzip

1. Zwei Kraftmesser (mit gleichen Meßbereichen) mit Zubehör (2 Kardanhälfte, 2 Haftmagnete, 2 Druckstäbe, 1 Verbindungshülse)
2. Satz ausziehbarer Pfeile

#### Methodische Hinweise

1. Die Schüler sollen als Inhalt des Gegenwirkungsprinzips erkennen: Wenn ein Körper A eine Kraft  $F$  vom Körper B erfährt, übt A eine Kraft gleichen Betrages mit entgegengesetzter Richtung auf B aus. Es handelt sich um eine Wechselwirkung zwischen zwei Körpern.
2. Im Versuch 1 kann auch der Begriff *Zugkraft* und im Versuch 2 der Begriff *Druckkraft* erarbeitet werden.

#### Versuche

1. Die beiden gleichartigen Kraftmesser werden mit ihren Haken ineinandergehakt und an der Hafttafel oder an Stativen in horizontaler Lage befestigt. Beide zeigen stets gleiche Beträge an (Abb. 3.1.5./1).
2. Die beiden Kraftmesser werden mit Druckstäben versehen und mit einer Verbindungshülse zusammengesteckt (Abb. 3.1.5./2). Auch in dieser Lage werden stets gleiche Beträge angezeigt. Zu jeder Kraft gehört eine gleichgroße Gegenkraft.

#### Bemerkung

Unter den Kraftmessern werden die Vektoren zeichnerisch oder mit ausziehbaren Pfeilen dargestellt.

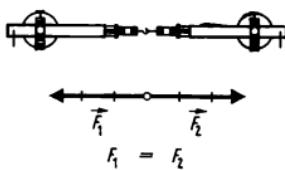


Abb. 3.1.5./1 Versuch zum Gegenwirkungsprinzip mit Zugkräften

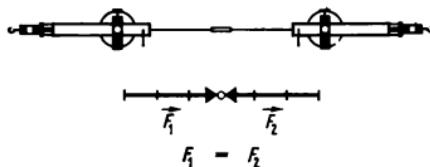


Abb. 3.1.5./2 Versuch zum Gegenwirkungsprinzip mit Druckkräften

### 3.1.6. Addition von Kräften mit unterschiedlichen Richtungen — Benutzung von Kraftmessern [SE]

#### Zu Variante a

1. 3 kombinierte Zug- und Druckkraftmesser mit Zubehör (3 Kardanhälfte, 3 Haftmagnete, 1 „Knotenpunkt“)
2. Satz ausziehbarer Pfeile



### Zu Variante b

Geräte 1. (oder 3 Kraftmesser älterer Ausführung) und 2., außerdem  
3. Faden

### Zu Variante c

Geräte 1. und 2., außerdem  
4. Druckstab

### Methodischer Hinweis

Vergleiche MB 3.0.1. und MH, V 3.1.2.!

### Variante a

Der Aufbau erfolgt an der Maniperm-Hafttafel entsprechend der Abbildung 3.1.6./1. Der obere Kraftmesser erzeugt die Gegenkraft zur Resultierenden  $F_R$ .

### Variante b

Stehen die kombinierten Kraftmesser mit Haftmagnet nicht zur Verfügung, so eignet sich besonders diese Variante. Man hängt zwei Kraftmesser an Nägel, die man in den Rahmen der Wandtafel eingeschlagen hat, und verbindet ihre Haken mit einem Faden. Ein dritter Kraftmesser wird nach Abbildung 3.1.6./2 mit einem Fadenstück angehängt. Der Faden dieses Kraftmessers soll mit einer Schlinge so befestigt werden, daß die Schlinge auf dem ersten Faden leicht gleiten kann.

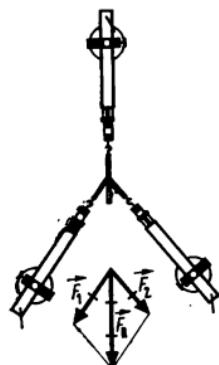


Abb. 3.1.6./1 Addition von Kräften. Der obere Kraftmesser erzeugt die Gegenkraft zur Resultierenden  $F_R$ .

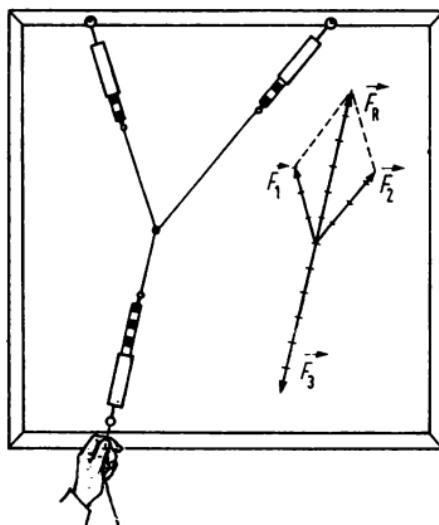


Abb. 3.1.6./2 Gleichgewicht zwischen drei nichtparallelen Kräften; Benutzung von drei Kraftmessern

*Variante c*

Der Aufbau entspricht dem der Variante a, jedoch wird der dritte Kraftmesser über einen Druckstab mit der Bohrung des „Knotenpunkts“ verbunden und als Druckkraftmesser benutzt. Er zeigt so in die Richtung der Resultierenden (Abb. 3.1.6./3).

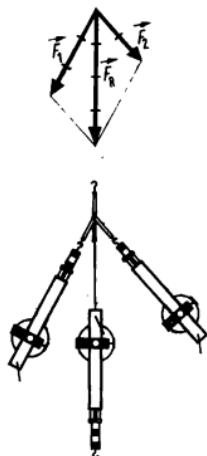


Abb. 3.1.6./3 Addition von Kräften; Benutzung zweier Zug- und eines Druckkraftmessers

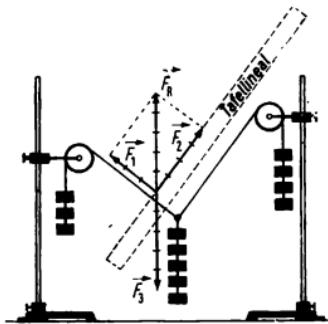


Abb. 3.1.7./1 Gleichgewicht zwischen drei nichtparallelen Kräften; Benutzung von Hakenkörpern

**3.1.7. Parallelogramm der Kräfte — Benutzung von Hakenkörpern [SE]**

1. 2 feste Rollen
2. Hakenkörper
3. Faden
4. Satz ausziehbarer Pfeile

*Methodischer Hinweis*

Baut man die Versuchsanordnung vor der Wandtafel auf, so kann man die Schnurrichtungen durch Parallelhalten eines Tafellineals auf die Wandtafel übertragen und das Kräfteparallelogramm zeichnen oder mit ausziehbaren Pfeilen darstellen.

*Versuch*

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 3.1.7./1 zu ersehen. Verändert man die Anzahl der Hakenkörper an einem der Aufhängepunkte, so ändert sich auch der Winkel zwischen den Fadenstücken, die die Richtung der Komponenten angeben.

*Bemerkung*

Man achtet darauf, daß die Hakenkörper nicht gegen die Rollen stoßen, sondern frei hängen. Dieser Zustand kann durch Heben oder Senken einer Rolle erreicht werden.

### 3.1.8. Zerlegung einer Kraft in zwei Komponenten, die senkrecht aufeinanderstehen — Wagen auf waagerechter Bahn [SE]

#### Zu Variante a

1. Geschlitztes Brett
2. Wägelchen
3. Kraftmesser (mit Kardanhalterungen)
4. Faden
5. Satz ausziehbarer Pfeile

#### Zu Variante b

- Geräte 1., 2., 4. und 5., außerdem
6. 2 feste Rollen
7. Hakenkörper
8. Winkelmesser

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH, V 3.1.2. und MH, V 3.1.7.!
2. Zur Problemstellung kann das Treideln eines Schiffes (Vorwärtsbewegung durch Ziehen vom Ufer aus) oder das Ziehen eines Güterwagens auf einem Anschlußgleis durch einen Traktor, der neben den Gleisen fahren muß, dienen.
3. Neben der geometrischen Lösung mit Hilfe des Kräfteparallelogramms kann zur Kontrolle des Experiments auch die rechnerische Lösung (Satz des Pythagoras) herangezogen werden.

#### Variante a

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 3.1.8./1 zu ersehen. Das geschlitzte Brett wird waagerecht an Stativen befestigt und die Kraftmesser mit Fäden am Wägelchen festgebunden. Danach befestigt man die Kraftmesser an den Stativstäben so, daß das Wägelchen dicht über dem Brett im Gleichgewicht der Kräfte gehalten wird. Die Richtigkeit der an den Kraftmessern abgelesenen Beträge der Kräfte wird zeichnerisch überprüft (Abb. 3.1.8./1). Dabei ist zu beachten, daß der obere Kraftmesser der Normalkomponente und der Gewichtskraft des Wägelchens das Gleichgewicht halten muß. Die Gewichtskraft des Wägelchens muß in einem Vorversuch ermittelt werden.

#### Bemerkungen

1. Bei der Verwendung von kombinierten Zug- und Druckkraftmessern können zu ihrer Befestigung an den Stativstäben die Kardanhalterungen benutzt werden.

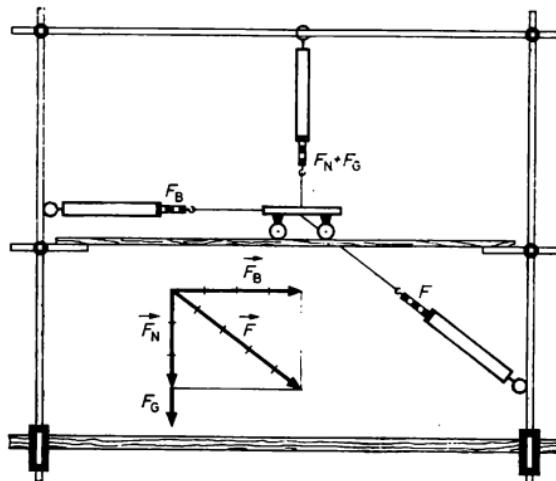


Abb. 3.1.8./1 Zerlegung einer Kraft in zwei senkrecht zueinanderstehende Komponenten;  $F$  wirkende Kraft,  $F_B$  Bewegungskomponente,  $F_N$  Normalkomponente,  $F_G$  Gewichtskraft des Wägelchens

### V 3.1.8.

2. Zur Bestimmung der Beträge der beiden senkrechten Komponenten können auch Druckkraftmesser benutzt werden.
3. Werden kombinierte Zug- und Druckkraftmesser benutzt, dann kann die Gewichtskraft des Wägelchens durch die Nullpunkteinstellung mit der Schiebehülse kompensiert werden.

#### *Variante b*

Bei Schülerexperimenten kann auf die Benutzung von Kraftmessern verzichtet werden, wenn man zwei feste Rollen zur Richtungsänderung der Kräfte verwendet. Als Kräfte wirken die Gewichtskräfte von Hakenkörpern (Abb. 3.1.8./2). Die Normalkraft  $F_N$  wird vom Brett aufgenommen. Der Winkel wird mit einem Winkelmesser bestimmt. Nach dem Projektionssatz der Mechanik gilt die Beziehung

$$F_B = F \cdot \cos \alpha .$$

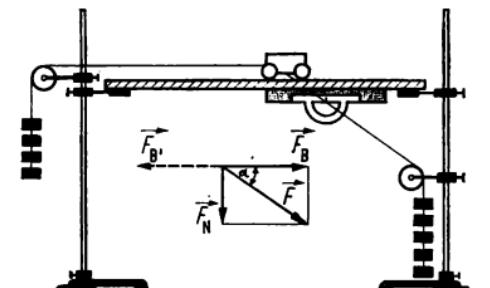


Abb. 3.1.8./2 Zerlegung einer Kraft an waagerechter Bahn

### 3.1.9. Zerlegung einer Kraft in zwei parallele Kräfte [SE]

#### *Zu Variante a*

1. 2 kombinierte Zug- und Druckkraftmesser mit Zubehör (2 Kardanhälterungen, 2 Haftmagnete, 3 Druckstäbe, 2 Rollenaufsätze)
2. Hakenkörper
3. Meßstab
4. Satz ausziehbarer Pfeile

#### *Zu Variante b*

Geräte 2., 3. und 4., außerdem

5. 2 Kraftmesser beliebiger Ausführung

#### *Methodische Hinweise*

1. Der Versuchsaufbau kann als Modell einer Brücke angesehen werden, über die ein Fahrzeug fährt.
2. Das Experiment ist auch als Schülerexperiment geeignet und kann ohne Kraftmesser ausgeführt werden, wenn man ähnlich wie in V 3.1.8. zwei feste Rollen und Hakenkörper verwendet.



### Variante a: Benutzung von Druckkraftmessern

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 3.1.9./1 zu ersehen. Die beiden Kraftmesser werden mit Druckstäben und Rollenaufsätzen versehen und mit Hilfe der Kardanhalterungen und Haftmagnete lotrecht an der Manipern-Hafttafel befestigt. Ein dritter Druckstab dient als Brücke. Er wird über die beiden Rollen gelegt. Die Last, bestehend aus Hakenkörpern, wird nacheinander an verschiedenen Stellen der Brücke aufgehängt. Durch Heben oder Senken eines Kraftmessers in seiner Halterung kann man die Brücke jeweils wieder in ihre waagerechte Lage bringen. Mit einem Meßstab bestimmt man jedesmal die Länge der Abschnitte  $a_1$  und  $a_2$  auf der Brücke, an den Kraftmessern liest man die Beträge der Auflagerkräfte  $F_1$  und  $F_2$  ab.

Es gilt

$$F_1 + F_2 = F \text{ und}$$

$$F_1 : F_2 = a_2 : a_1.$$

Die Vektoren werden zeichnerisch oder mit ausziehbaren Pfeilen dargestellt.

#### Bemerkung

Bei der Nullpunkteinstellung der Kraftmesser ist die Brücke aufzulegen, damit ihre Gewichtskraft mit kompensiert wird. Man braucht sie dann bei den Messungen nicht mehr zu berücksichtigen.

### Variante b: Benutzung von Zugkraftmessern

Die Ausführung des Versuchs mit Zugkraftmessern erfolgt sinngemäß. Es ist zweckmäßig, als Brücke einen Meßstab zu verwenden, weil man an ihm die einzelnen Abschnitte  $a_1$  und  $a_2$  direkt ablesen kann (Abb. 3.1.9./2). Die Gewichtskraft des Stabes wirkt zu gleichen Teilen auf beide Kraftmesser und muß bei Berechnungen berücksichtigt werden.

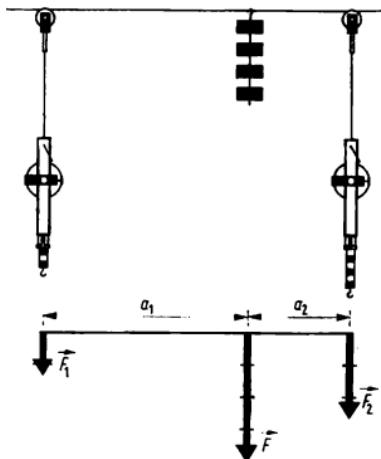
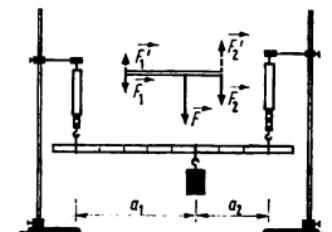


Abb. 3.1.9./1 Zerlegung einer Kraft in zwei parallele Kräfte; Benutzung von Druckkraftmessern

Abb. 3.1.9./2 Zerlegung einer Kraft in zwei parallele Kräfte; Benutzung von Zugkraftmessern



### 3.1.10. Kräftezerlegung am Ausleger (Kran)

1. 2 kombinierte Zug- und Druckkraftmesser mit Zubehör (2 Kardanhalterungen, 1 Druckstab, 1 Rollenaufsatz)
2. Faden
3. Hakenkörper
4. Satz ausziehbarer Pfeile

#### Methodische Hinweise

1. Man kann den Unterricht problemhaft und damit interessanter gestalten, wenn man die Versuchsanordnung von den Schülern erarbeiten lässt.
2. Vergleiche MH, V 3.1.2. und MH Nr. 3, V 3.1.8.

#### Versuch

Den Versuchsaufbau zeigt die Abbildung 3.1.10./1. Einer der Kraftmesser wird auf Zug, der andere auf Druck beansprucht. Der Faden, an dem die Last hängt, führt über die Rolle des Druckkraftmessers zum Haken des Zugkraftmessers. Vor dem Anhängen der Last stellt man die Kraftmesser auf Null.

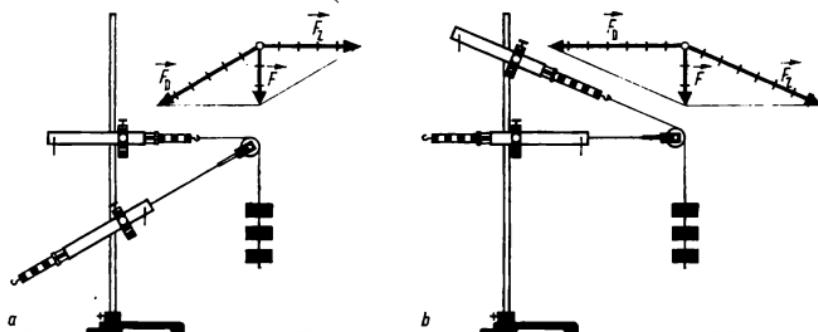


Abb. 3.1.10./1 Kräftezerlegung am Ausleger (zwei Varianten)

### 3.2. Elastische Kräfte

#### 3.2.1. Herleitung des Hookeschen Gesetzes an einer Schraubenfeder [SE]

1. Schraubenfeder
2. Vertikalmeßstab mit verschiebbarem Zeiger
3. Hakenkörper (50 g)

#### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment zeigt in anschaulicher Weise, wie mit der induktiven Methode aus der grafischen Darstellung einer Meßreihe der mathematische Zusammen-

hang zwischen den gemessenen Größen hergeleitet werden kann. Man sollte deshalb auf die Auswertung des Experiments besonderen Wert legen (vgl. dazu auch MB 3.0.2. und MB 3.0.7.).

- Bei der Verlängerung einer belasteten Schraubenfeder handelt es sich nicht um eine Dehnung des Drahtes, sondern um einen aus einer Drillung (Torsion) und einer Biegung zusammengesetzten Vorgang. Die Drillung kann man sichtbar machen, wenn man am unteren Ende der Feder einen leichten Zeiger befestigt.
- Wenn man bei diesem Experiment die Gewichtskraft eines 50 g-Hakenkörpers zu 0,5 N annimmt, so ist das zwar nicht ganz exakt (vgl. MB 3.0.7.), wirkt sich aber auf das Ergebnis (Quotient aus  $F$  und  $s$  konstant) nicht aus.

### Versuch

Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 3.2.1./1 dargestellt. Man richtet den Zeiger des Vertikalmeßstabes auf das untere Ende der unbelasteten Feder ein und liest den Zeigerabstand ab. Dann belastet man die Feder der Reihe nach mit 1, 2, 3 und mehr Hakenköpfen, ermittelt jedesmal den Zeigerabstand und trägt die Meßergebnisse in eine Tabelle nach folgendem Muster ein:

#### Verlängerung einer Schraubenfeder durch Belastung

Belastung $F$ in N	Zeiger- abstand $s_z$ in cm	Gesamt- verlängerung $s$ in cm	Zuwachs der Verlängerung $\Delta s$ in cm	Federkonstante	
				$F$ in $\frac{N}{cm}$	$F$ in $\frac{N}{m}$
0	52,1	0	0	—	—
0,5	53,6	1,5	1,5	0,333	33,3
1,0	55,1	3,0	1,5	0,333	33,3
1,5	56,7	4,6	1,6	0,326	32,6
2,0	58,2	6,1	1,5	0,328	32,8
2,5	59,8	7,7	1,6	0,325	32,5

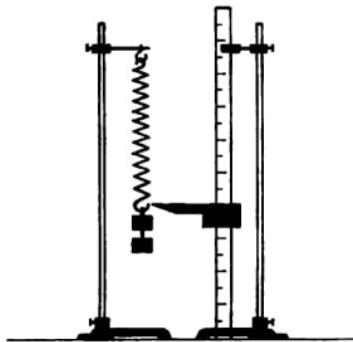


Abb. 3.2.1./1 Elastische Dehnung einer Schraubenfeder

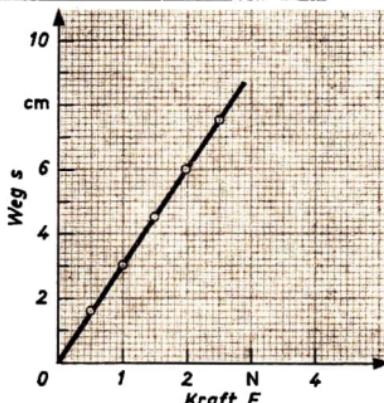


Abb. 3.2.1./2 Kraft-Weg-Diagramm einer Schraubenfeder

### V 3.2.1.

Die Ergebnisse werden durch eine grafische Darstellung auf Millimeterpapier veranschaulicht (Abb. 3.2.1./2).

Es ergibt sich als Kurve mit großer Annäherung eine Gerade. Die Feder verlängert sich beim Vergrößern der Belastung um je 0,5 N jedesmal nahezu um den gleichen Betrag.

Dasselbe zeigt die letzte Spalte der Tabelle, nach der sich der Quotient aus Belastung und Gesamtverlängerung als annähernd konstant erweist (Mittelwert  $32,9 \frac{N}{m}$ ). Weitere Messungen ergeben das Gesetz: *Die elastische Längenänderung einer Schraubenfeder ist proportional der Belastung (Hooke'sches Gesetz).*

$$F \sim s.$$

Durch Einfügen eines Proportionalitätsfaktors entsteht daraus die Gleichung

$$F = k \cdot s.$$

Darin ist  $k$  eine Konstante, die die Feder kennzeichnet, die sogenannte Federkonstante:

$$k = \frac{F}{s}.$$

#### Bemerkungen

1. Die Versuchsanordnung sollte auch zur Ermittlung einer unbekannten Kraft benutzt werden (vgl. V 3.2.2.).
2. Die Schraubenfeder kann dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.
3. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Schraubenfeder, Hakenkörper, Lineal, Linealhalter, Schiebezeiger) benutzt.

### 3.2.2. Bestimmen einer unbekannten Gewichtskraft mit Hilfe einer Schraubenfeder [SE]

Geräte 1. bis 3. wie in V 3.2.1., außerdem

4. Körper aus Blei oder einem beliebigen anderen Stoff als Versuchskörper
5. Faden

#### Methodischer Hinweis

Das Experiment kann als Weiterführung von V 3.2.1. gestaltet werden. Es zeigt so die Benutzung einer Schraubenfeder als Kraftmesser. Soll es nach der Variante b ausgeführt werden, dann muß das Hookesche Gesetz als bekannt vorausgesetzt werden.

#### Variante a

Man verwendet die unveränderte Versuchsanordnung nach V 3.2.1. Das Bleistück mit der unbekannten Gewichtskraft  $F = x \text{ N}$  wird mit einem Faden umschnürt und an die Feder gehängt. Es möge die Feder bis zur Zeigerstellung 58,8 cm ver-

längern. Somit beträgt die Gesamtverlängerung 6,7 cm. Aus der grafischen Darstellung (Abb. 3.2.1./2) ergibt sich durch Interpolieren  $x = 2,2$ , d. h. die Gewichtskraft beträgt 2,2 N.

### Variante b

Steht eine grafische Darstellung nicht zur Verfügung, so belastet man die Feder zunächst mit dem Versuchskörper und bestimmt den Zeigerabstand. Anschließend hängt man statt des Versuchskörpers 50 g-Stücke an die Feder, so daß die vorherige Zeigerstellung durch zwei andere Markierungen eingegrenzt wird. Man braucht dann an Stelle der Gesamtdarstellung nur einen Ausschnitt zu zeichnen (Abb. 3.2.2./1).

### Bestimmung einer Gewichtskraft mit einer Schraubenfeder (Beispiel)

Belastung $F$ in N	Zeigerabstand $s_z$ in cm
×	64,0
3,5	63,0
4,0	64,6

Es ergibt sich  $x \approx 3,8$ . Die Gewichtskraft beträgt angenähert 3,8 N.

### Bemerkungen

1. Die Schraubenfeder kann dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.
2. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Schraubenfeder, Hakenkörper, Lineal, Linealhalter, Schiebezeiger) benutzt.

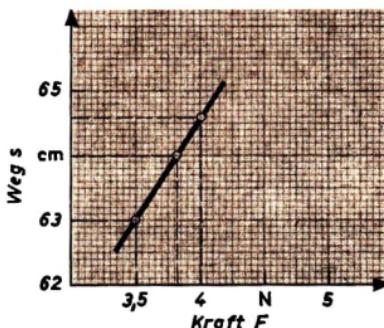


Abb. 3.2.2./1 Kraft-Weg-Diagramm zur Bestimmung einer unbekannten Gewichtskraft mittels einer Schraubenfeder

### 3.2.3. Dehnung einer Gummischnur [SE]

1. Gummischnur oder dünner Gummischlauch (Länge etwa 50 cm)
2. Federklammer

### V 3.2.3.

- 3. kleine Waagschale
- 4. Wägesatz
- 5. Vertikalmeßstab mit verschiebbarem Zeiger

#### *Methodische Hinweise*

1. Im täglichen Sprachgebrauch wird Gummi gewöhnlich als Musterbeispiel für elastische Stoffe dargestellt. Ein Gummifaden hat ähnliche Eigenschaften wie eine Schraubenfeder. Das Experiment zeigt jedoch, daß für Gummi das Hookesche Gesetz nicht gilt.
2. Vergleiche MB 3.0.2.!

#### *Versuch*

Die Schnur wird mit einer Federklammer an einem Stativ befestigt (Abb. 3.2.3./1). An das untere Ende der Gummischur hängt man eine kleine Waagschale. Diese wird in Stufen von je 20 g belastet. Im übrigen wird der Versuch wie bei V 3.2.1. durchgeführt. Die Ergebnisse werden wie dort in eine Tabelle eingetragen und grafisch dargestellt.

#### *Dehnung einer Gummischur durch Belastung (Beispiel)*

Belastung $F$ in N	Zeiger- abstand in cm	Gesamt- verlängerung $s$ in cm	Zuwachs der Ver- längerung $\Delta s$ in cm
0	71,8	0	
0,2	73,5	1,7	1,7
0,4	75,4	3,6	1,9
0,6	77,6	5,8	2,2
0,8	80,0	8,2	2,4
1,0	82,7	10,9	2,7
1,2	86,2	14,4	3,5

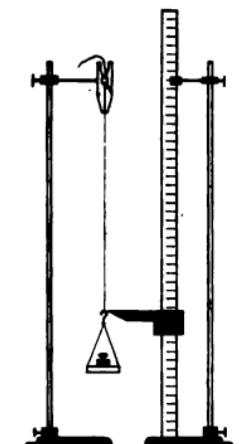


Abb. 3.2.3./1 Nachweis der elastischen Dehnung einer Gummischur

Wenn man die Belastung aufhebt, so erreicht die Schnur, wenn auch erst nach einigen Minuten, wieder ihre ursprüngliche Länge. Es handelt sich in dem angeführten Beispiel um keine elastische Verformung; die Dehnung ist der Belastung nicht proportional. Bei der grafischen Darstellung ergibt sich keine gerade Linie. Das Hookesche Gesetz gilt hier nicht.

#### *Bemerkung*

Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt.



### 3.2.4. Elastische Dehnung von Drähten [SE]

1. Kupferdraht ( $\varnothing$  etwa 0,3 mm, Länge 80 cm)
2. Wägestück (1 kg)
3. Hakenkörper (je 50 g)
4. dünne Holzleiste als Zeiger (Länge etwa 60 cm) ⑧
5. Vertikalmeßstab oder selbstgefertigte Skale

#### Methodische Hinweise

1. Der besondere Wert dieses Experiments besteht darin, daß es die elastische Dehnung eines Drahtes, die im allgemeinen nicht zu beobachten ist, anschaulich nachweist. Es kann damit auch als Musterbeispiel für verschiedene Untersuchungsmethoden in der Technik und für die Wirkungsweise verschiedener Meßgeräte gelten.
2. Wird das Experiment bereits in der Klasse 7 durchgeführt, dann verzichtet man auf die Einführung des Begriffes *Elastizitätsmodul*.

#### Versuch

An ein verlängertes Stativ wird mittels einer Muffe ein etwa 80 cm langer Kupferdraht gehängt und durch die Gewichtskraft eines Wägestückes von 1 kg Masse gespannt. Nahe seinem unteren Ende wird am Stativ, um einen Lagerzapfen drehbar, eine dünne, möglichst leichte, etwa 60 cm lange Holzleiste als Zeiger befestigt. Der Draht wird, etwa 20 mm vom Drehpunkt entfernt, in einer flachen Auskerbung einmal um den Zeiger gewunden. Die Zeigerspitze spielt vor einer auf dem Tisch stehenden Zentimeterskale (Abb. 3.2.4./1).

Durch Anhängen von Hakenkörpern zu je 50 g wird die Belastung allmählich gesteigert. Wird die Elastizitätsgrenze dabei nicht überschritten, so nimmt der Zeigerausschlag gleichmäßig zu (Hooke'sches Gesetz); bei Fortnahme der Hakenkörper geht er wieder auf den Ausgangswert zurück.

Beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze dehnt sich der Draht stärker, als es dem Hookeschen Gesetz entspricht; er beginnt zu „fließen“. Die Länge des Drahtes geht bei Entlastung nicht wieder auf den alten Wert zurück.

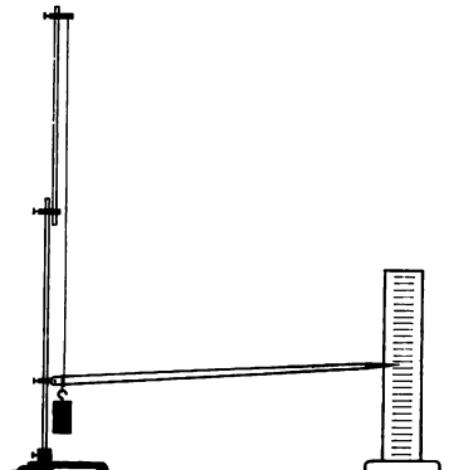


Abb. 3.2.4./1 Zeigergerät zum Nachweis der elastischen Dehnung eines Drahtes



Abb. 3.2.4./2 Drahtöse für stärkere Zugkräfte

#### Bemerkungen

1. Damit die Ösen auch größeren Zugkräften standhalten, wird nach Bilden einer einfachen Öse das freie Ende des Drahtes durch die Öse gesteckt (Abb. 3.2.4./2) und nochmals mit dem Draht verdrillt.
2. Unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses kann man aus dem Zeigerausschlag die Drahtverlängerung  $\Delta l$  errechnen.
3. Benutzt man statt des ersten Drahtes einen solchen mit gleichem Querschnitt, aber anderer nutzbarer Länge oder einen solchen von gleicher nutzbarer Länge, aber anderem Querschnitt, so kann man in grober Annäherung feststellen, daß die Verlängerung  $\Delta l$  im Bereich der elastischen Dehnung der Länge  $l$  und der spannenden Kraft  $F$  proportional, dem Querschnitt  $A$  umgekehrt proportional ist:

$$\Delta l \sim \frac{F \cdot l}{A}.$$

Bei Einführung eines Proportionalitätsfaktors, den man mit  $\frac{1}{E}$  bezeichnet, ist

$$\Delta l = \frac{1}{E} \cdot \frac{F \cdot l}{A}.$$

$E$  ist eine Materialkonstante und heißt *Elastizitätsmodul*.

Sie wird in  $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  gemessen. Vergleichsweise gilt

$$\text{für Stahl} \quad E = 1,96 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \dots 2,16 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$\text{für Kupfer} \quad E = 0,98 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \dots 1,28 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

### 3.2.5. Unelastische Dehnung von Drähten

1. Drähte aus Eisen, Kupfer, Messing ( $\varnothing$  etwa 0,3 mm bis 0,7 mm)
2. zwei starke Rundhölzer
3. technischer Kraftmesser (250 N)
4. Meßstab
5. Feinmeßschraube

#### Methodische Hinweise

1. Das Experiment zeigt, daß das Hookesche Gesetz nur in bestimmten Grenzen gilt. Man kann darauf hinweisen, daß auch andere Gesetze der klassischen Physik nur einen bestimmten Gültigkeitsbereich haben.



## 2. Über den besonderen Wert des Experiments für die polytechnische Bildung vergleiche MB 3.0.2.!

### Versuch

Ein Draht wird, nachdem man seinen Durchmesser bestimmt und den Querschnitt berechnet hat, unter Zwischenschalten eines Kraftmessers mit seinen Enden an zwei kräftigen Rundhölzern befestigt (vgl. V 3.2.4., Bem. 1). Durch zwei dicht an den Drahtenden angeklemmte Papiermarken wird eine bestimmte Länge begrenzt, die gemessen wird. Das eine Rundholz wird mit den Füßen gegen den Boden gedrückt, das andere mit den Händen hochgezogen bzw. hochgestemmt (Abb. 3.2.5./1).

Beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze kann man ohne merklichen Kraftzuwachs eine deutlich sichtbare Verlängerung des Drahtes beobachten. Er beginnt zu „fließen“. Beim Nachlassen der Zugkraft geht die Länge nicht mehr auf den alten Wert zurück. Der Draht hat eine unelastische Dehnung erfahren.

Beim Überschreiten der Festigkeitsgrenze zerreißt der Draht. Der Quotient aus der im Augenblick des Zerreißens wirkenden Zugkraft und dem Drahtquerschnitt beim Beginn des Versuchs gibt die **Zugfestigkeit** in  $\frac{N}{mm^2}$  an (vgl. Tabelle).

### Zugfestigkeit einiger Metalle

Werkstoff- bezeichnung	Markenbezeichnung bzw. Kurzzeichen	Zugfestigkeit in $\frac{N}{mm^2}$
Grauguß	GG 12	137
Flußstahl	St 42	412 ... 490
Flußstahl	St 70	690 ... 835
Federstahl	67 Si Gr 5	1470 ... 1670
Kupfer		195 ... 235
Gußbronze	B 2 10	215 ... 275
Rotguß	Rg 4	490 ... 640
Messing	Ms 60	245 ... 345



Abb. 3.2.5./1 Gerät zum Nachweis der unelastischen Dehnung eines Drahtes

Bei manchen Legierungen ist die Zugfestigkeit größer als bei den reinen Metallen.

### Bemerkungen

- Um die im Augenblick des Zerreißens wirkende Zugkraft festzustellen, klemmt man zu Beginn des Versuchs ein Korkstückchen in den Schlitz des Kraftmessers. Es wird vom Zerreißen mitgenommen, verbleibt beim Entspannen an seiner Stelle und lässt so die größte wirksame Zugkraft erkennen.

## V 3.2.5.

---

2. Nach dem Zerreißen des Drahtes bestimmt man aus den Längen der Stücke die Längenänderung. Die in Prozenten der ursprünglichen Länge angegebene Verlängerung gibt einen Anhalt zur Beurteilung der Dehnbarkeit des Materials. Sie beträgt bei Eisen etwa 20%, bei Kupfer etwa 40%.
3. Die Erfahrung lehrt, daß ein über die Elastizitätsgrenze hinaus beanspruchter Draht nach Aufhören des Fließens eine größere Last als im ungereckten Zustand tragen kann, ohne sich weiter zu verformen. Bei der unelastischen Dehnung verfestigt sich also das Material zunächst von selbst. Diese Eigenschaft sowie die selbst bei großem Kraftaufwand nur geringe elastische Dehnung und die große Zugfestigkeit geben Baustoffen, wie Eisen und Stahl, eine ganz besondere Bedeutung.
4. Zur Befestigung des Drahtes am Rundholz kann man einen kräftigen Haken aus dickem Eisendraht anbringen. Man kann die Öse am Draht aber auch so groß machen, daß man das Rundholz hindurchstecken kann.

## 3.2.6. Längenänderung, Fließverhalten und Zugfestigkeit einer Drahtprobe [SE]

1. Drähte aus Kupfer, Eisen, Messing, Aluminium ( $\varnothing$  etwa 0,5 mm, Länge etwa 4 m)
2. technischer Kraftmesser (250 N)
3. Meßstab
4. Federklammer

### *Methodische Hinweise*

1. Bei diesem Experiment kann man sowohl die elastische Verformung des Drahtes als auch sein Fließverhalten beobachten. Solange der Draht nach der Entlastung seine ursprüngliche Länge wieder annimmt, wird er elastisch, sonst plastisch verformt.
2. Die Ausführung des Experiments ähnelt der im V 3.2.5. beschriebenen. Statt der dort verwendeten kurzen Drahtprobe wird hier ein etwa 4 m langer Draht benutzt. Dadurch sind die bei der Dehnung auftretenden Erscheinungen, die elastische Längenänderung und das Fließverhalten, auffälliger.
3. Werden für die aufzuwendende Kraft und die Längenzunahme zusammengehörige Wertepaare ermittelt, so kann damit ein Spannung-Dehnung-Diagramm gezeichnet werden.

### *Versuch*

Das eine Drahtende wird an einem starren Gegenstand, z. B. an einem am Fußboden verankerten Schülertisch oder einem Wandhaken, befestigt und durch den Unterrichtsraum gespannt, so daß sein anderes Ende auf dem Experimentiertisch aufliegt. Dieses Ende bindet man mit einer Drahtöse nach Abbildung 3.2.4./2 an einen technischen Kraftmesser. Als Handgriff steckt man durch den Ring des Kraftmessers einen kurzen Stativstab. Einige Zentimeter vor dem Kraftmesser befestigt man am Draht mit einer Federklammer einen Papierzeiger. Daneben legt man einen Meßstab oder ein Lineal mit Millimeterteilung so, daß der Papierzeiger im gespannten, aber unbelasteten Zustand des Drahtes etwa auf die Nullmarke der Meßteilung zeigt.



Zieht man erst mit geringer und allmählich mit immer größerer Kraft an diesem Drahtende, kann man leicht zusammengehörige Wertepaare ermitteln. Schließlich stellt man fest, daß im Fließbereich eine große Längenzunahme bei gleichbleibender Kraft auftritt.

### 3.2.7. Zugfestigkeit und Sprödigkeit eines Glasfadens

1. Glasstäbchen	7. Feinmeßschraube
2. zwei Holzkötzchen	6. Meßstab
(etwa 2 cm × 2 cm × 6 cm) mit axialen	5. technischer Kraftmesser (250 N)
Bohrungen und Ösen aus dickem Draht ⑧	4. zwei Rundhölzer (wie in V 3.2.5.)
3. Epoxidharzklebstoff	
(Zweikomponentenklebstoff)	

#### Methodischer Hinweis

Man sollte den Glasfaden im Unterricht vor den Schülern herstellen. Sie erkennen dabei, daß Glas im glühenden Zustand *plastisch* ist. Später kann man dann bei der Auswertung des Experiments auf die Abhängigkeit der elastischen Eigenschaften des Glases von der Temperatur eingehen.

#### Versuch

Man kittet das Glasstäbchen mit Epoxidharz in die Bohrungen der beiden Holzkötzchen, zieht es nach genügender Erwärmung in der Mitte zu einem Glasfaden aus, bestimmt dessen Querschnitt und mißt die freie Länge zwischen den Holzstücken. Die weitere Versuchsdurchführung erfolgt wie bei V 3.2.5. Man spannt den Glasfaden, bis er zerrißt, und bestimmt die Zugfestigkeit. Sie beträgt etwa  $200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ .

Durch Ausmessen der Längen der Bruchstücke und Vergleichen mit der ursprünglichen Länge stellt man fest, daß der Glasfaden sich nicht verlängert hat. Glas zeigt keine unelastische Dehnung, es ist *spröde*. Die Elastizitätsgrenze und die Bruchgrenze fallen zusammen.

### 3.2.8. Versuche mit Bologneser Fläschchen und Glastränen — Hohe Sprödigkeit schnell gekühlter Gläser

1. Bologneser Fläschchen	6. Pappe
2. Glastränen	7. Flachzange
3. Reagenzglas	8. 2 Hämmer
4. Standzylinder	9. abgekochtes Wasser
5. Kieselstein	



Abb. 3.2.8./1 Schnell gekühlte Gläser:  
a) Bologneser Fläschchen, b) Glasträne

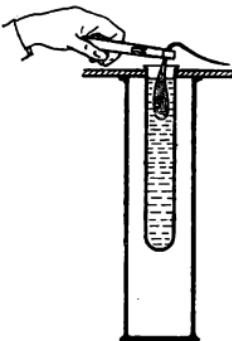


Abb. 3.2.8./2 Glasträne in wasser gefülltem Reagenzglas

#### Methodischer Hinweis

Dieser Versuch wirkt besonders durch das Überraschungsmoment. Er zeigt in überzeugender Weise, welche Wirkungen durch die Molekularkräfte hervorgerufen werden können.

#### Versuch

Wird Glas schnell und ungleichmäßig gekühlt, so bilden sich im Innern starke Spannungen; dadurch wird die Sprödigkeit erhöht. Eindrucksvolle Beispiele liefern *Bologneser Fläschchen* (Abb. 3.2.8./1a) und *Glastränen* (Abb. 3.2.8./1b). Zerschlägt man einen Kieselstein und wirft einen kleinen scharfkantigen Splitter in ein Bologneser Fläschchen, so wird die Innenwand des Bodens geritzt; das Fläschchen zerspringt sofort.

Glastränen zeigen sehr auffällig, daß Elastizität und Sprödigkeit miteinander zu vereinbarende Eigenschaften sind. Das fadenförmige Ende einer Glasträne federt innerhalb gewisser Grenzen wie Stahldraht; bricht man es aber mit einer Zange ab, so zerfällt der ganze Körper sofort zu weißlichem Pulver (Vorsicht! Die Splitter fliegen wie bei einer Explosion auseinander). Bei diesem Versuch hält man die Glasträne am besten mit einer Flachzange in ein Reagenzglas. Ein über einen Standzylinder gelegtes durchbohrtes Stück Pappe dient als Halter für das Reagenzglas. Füllt man bei einem zweiten Versuch das Reagenzglas mit abgekochtem Wasser und taucht eine am fadenförmigen Ende mit einer Zange gehaltene Glasträne hinein, so wird beim Abbrechen der Spitze das Reagenzglas zertrümmt (Abb. 3.2.8./2). Man ersieht daraus, daß bei dem plötzlichen Zerfall der Glasträne stoßartig erhebliche Druckkräfte im Wasser auftreten, die auf die Glaswand übertragen werden (der Standzylinder dient als Schutz gegen Splitterwirkung).

#### Bemerkungen

1. Infolge der unausgeglichenen Spannungen ist das Glas in einer Glasträne doppelbrechend. In polarisiertem Licht kann man die Spannungen nachweisen.
2. Das Zerspringen des Reagenzglases bei Wasserfüllung ist darauf zurückzuführen, daß das Wasser durch seine Inkompresibilität auf die Druckwelle beim Zerplatzen der Glasträne keine Pufferwirkung ausübt. Das vorherige Abkochen des Wassers ist nötig, damit eventuell gelöste Luft entweicht.

### 3.2.9. Biegung einer Blattfeder [SE]

1. Flacher Stahlstreifen, Blattfeder
2. Vertikalmeßstab mit verschiebbarem Zeiger
3. Hakenkörper

#### Methodische Hinweise

1. Das Experiment ähnelt im Aufbau dem Versuch V 3.1.1. Während dort aber nur qualitativ die Verformung einer Holzleiste als Folge einer Kraftwirkung gezeigt werden sollte, wird hier quantitativ die Abhängigkeit der Verformung vom Betrag der Kraft untersucht.
2. Es ist darauf hinzuweisen, daß auch bei diesem Experiment das Hookesche Gesetz nur in bestimmten Grenzen gilt.

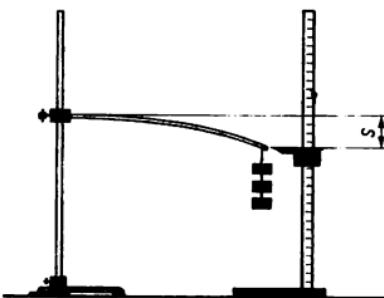


Abb. 3.2.9./1 Biegung eines einseitig befestigten Stahlblechstreifens

#### Versuch

Die Versuchsanordnung geht aus der Abbildung 3.2.9./1 hervor. Zum Einhängen der Hakenkörper legt man um das Ende der Blattfeder einige Drahtwindungen, verdrillt kräftig und biegt das Drahtende zu einer Öse. Man steigert die Belastung des freien Endes stufenweise und misst die Senkung, den sogenannten Biegungspfeil  $s$  mit Hilfe eines Vertikalmeßstabes. Die Ergebnisse trägt man wie bei V 3.2.1. in eine Tabelle ein und stellt sie grafisch dar. Es ergibt sich das Gesetz: *Die Senkung des freien Endes eines einseitig belasteten Stahlstreifens ist proportional der Belastung.* Auch für die Biegung gilt das *Hookesche Gesetz*.

#### Bemerkungen

1. Die Blattfeder kann dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.
2. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile der SEG Mechanik (Lineal, Linealhalter, Schiebezeiger) und statt der Blattfeder eine Fahrradspeiche benutzt.

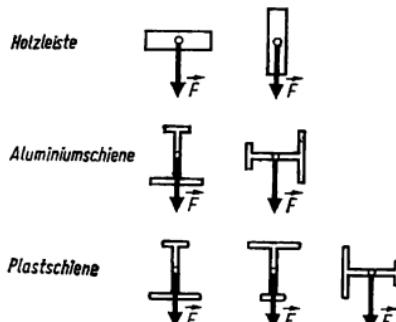


Abb. 3.2.9./2 Verschiedene Querschnittslagen unterschiedlicher Profile

3. Das Experiment kann dahingehend ausgebaut werden, daß auch die Abhängigkeit des Biegungspfeils bei konstanter Kraft
  - von der Länge des Stabes,
  - vom Material,
  - von der Lage des Querschnitts zur Richtung der angreifenden Kraft (Abb. 3.2.9./2) bestimmt wird.
4. Als Untersuchungsmaterial eignen sich Holzleisten mit rechteckigem Querschnitt, Stahlstreifen, Plastlineale, Plastrohre, Gardinenbahnen aus Plast oder Aluminium, Stäbe aus dem SEG Kalorik und Fahrradspeichen.

### 3.2.10. Zerbrechen eines Eisendrahtes durch wiederholtes Biegen

1. Schraubstock
2. Feilkloben
3. Eisendraht ( $\varnothing$  4 mm, Länge etwa 20 cm)

#### *Methodischer Hinweis*

Man erklärt den Bruch des Drahtes damit, daß beim Biegen des Drahtes die Elastizitätsgrenze jedesmal überschritten wird. Aber auch ohne Überschreitung der Elastizitätsgrenze kann ein Werkstück brechen, wenn es wiederholten Wechselbeanspruchungen ausgesetzt ist. Man spricht dann von einer *Ermüdung* des Materials. Sie beruht auf einer Veränderung des inneren Gefüges. Die Kenntnis dieser Erscheinung ist sehr wichtig für den Maschinenbau, z. B. bei Ventilfedern, Kurbelwellen u. dgl.

#### *Versuch*

Der Draht wird mit dem einen Ende in den Schraubstock gespannt; am anderen Ende wird der Feilkloben angeklemmt. Mit Hilfe dieser Handhabe wird der Draht hin und her gebogen. Zunächst zeigt sich seine Zähigkeit darin, daß er diese Deformationen aushält. Schließlich zerbricht er aber. An der Bruchstelle hat er sich erwärmt, wie man durch Anfassen feststellen kann; außerdem ist die vorher glatte Oberfläche rauh geworden. Diese Erscheinung deutet auf eine Gefügeänderung bei der wiederholten unelastischen Biegung und auf die dabei auftretende innere Reibung hin.

### 3.2.11. Zerdrehen eines Eisendrahtes

Geräte 1. bis 3. wie in V 3.2.10., außerdem 4. Dreikantfeile

#### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment soll nicht den Bruch einer Welle durch Torsion veranschaulichen. Es zeigt vielmehr, wie zäh ein Draht aus Weicheisen ist. Für das Experiment wird das innere Gefüge des Metalls durch Ausglühen so verändert, daß der Draht besonders weich wird und der Torsion einen möglichst kleinen Widerstand entgegen-

setzt. Eine Kurbelwelle dagegen kann durch eine Torsion um den Bruchteil eines Winkelgrades bereits überlastet werden und brechen.

#### *Versuch*

Der Draht wird an den Enden rechtwinklig umgebogen und im mittleren Teil ausgeglüht. Dann klemmt man das eine Ende in den Schraubstock und zieht auf dem Draht mit der Feile einen Längsstrich. Das andere Ende faßt man mit dem Feilkloben und dreht diesen um die Längsachse des Drahtes. Der Feilenstrich nimmt dabei die Form einer Schraubenlinie an und läßt die Drillung (Torsion) gut erkennen. Man setzt den Versuch bis zum Zerbrechen des Drahtes fort. Die Anzahl der hierzu erforderlichen Umdrehungen gibt ein Maß für die Zähigkeit des Materials. Der Draht erwärmt sich stark; seine Oberfläche wird rauh (vgl. V 3.2.10.).

#### *Bemerkung*

Holzschrauben können zerdrückt werden, wenn man versucht, diese in nicht genügend vorgebohrte Löcher einzudrehen.

### **3.2.12. Die elastische und plastische Verformung von Polymeren**

1. Streifen aus Piacryl, Polystyrol, Polyvinylchlorid
2. Gummischlauch aus nichtvulkanisiertem Kautschuk
3. Angelsehne (verschiedene Querschnitte)
4. Kraftmesser (100 N)

#### *Methodischer Hinweis*

Der Vorgang der Verformung von Polymeren unterscheidet sich grundsätzlich von der elastischen Verformung niedermolekularer Stoffe. Polymere sind chemische Verbindungen mit großen Molekülen, die durch Verknüpfung (Polymerisation) kleinerer entstanden sind. Die Moleküle vieler Polymere bilden lange, meist gewundene Ketten, die bei der Einwirkung äußerer Kräfte in Richtung der Kraft gestreckt werden können.

Hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften kann man sie in drei Gruppen unterteilen:

1. glasartige Polymere,
2. hochelastische Polymere,
3. zähflüssige bzw. plastische Polymere.

Diese Eigenschaften sind jedoch sehr stark von der Temperatur abhängig und ändern sich auch mit der Einwirkungszeit der Kraft.

Die mechanischen Eigenschaften der Polymere im glasartigen und im zähflüssigen Zustand stellen im Vergleich zu den mechanischen Eigenschaften der niedermolekularen Stoffe nicht prinzipiell Neues dar. Spezifisch ist jedoch der hochelastische Zustand der Polymere.

#### *Versuch 1: Verformung glasartiger Polymere*

Ein Piacrylstreifen wird gebogen. Es kommt bald zum Bruch. Der Elastizitätsbereich ist relativ klein, der Stoff ist spröde. Glasartige Polymere haben einen relativ hohen Elastizitätsmodul.

*Versuch 2: Verformung hochelastischer Polymere*

Ein Gummischlauch wird gedehnt. Hört die Krafteinwirkung auf, nimmt der Schlauch seine ursprüngliche Länge wieder an. Der Elastizitätsmodul hochelastischer Polymere ist relativ klein.

*Versuch 3: Verformung zähflüssiger bzw. plastischer Polymere*

Wird ein Streifen aus nichtvulkanisiertem Kautschuk gedehnt, kommt es bald zur plastischen Deformation.

*Versuch 4: Elastische und plastische Verformung von Angelsehne*

Ähnlich wie bei Metalldrähten im V 3.2.5. untersucht man die Eigenschaften von Angelsehne und bestimmt die Zugfestigkeit für verschiedene Querschnitte.

*Bemerkung*

Piacyrl wird bei Temperaturen von etwa 300 °C plastisch. Das kann man nachweisen, wenn man einen Piacyrlstreifen mit einem Bügeleisen erwärmt.

Gummi wird bei starker Abkühlung spröde. Das könnte man durch Abkühlung in flüssiger Luft erreichen.

### 3.3. Schwerpunkt und Gleichgewichtslage — Standfestigkeit

#### 3.3.1. Balancieren eines flachen Körpers auf der Fingerspitze [SE]

1. Holzleiste, Lineal, Heft, Buch
2. mit Sand gefüllte Schachtel

*Methodischer Hinweis*

Der Versuch gestattet eine erste näherungsweise Bestimmung der Lage des Schwerpunkts. Er dient somit als Vorversuch zur Veranschaulichung der Schwerpunktallage und des Gleichgewichts.

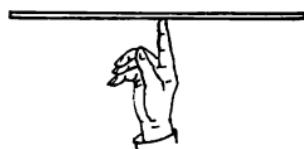


Abb. 3.3.1./1 Holzleiste, auf einer Fingerspitze gelagert

*Versuch*

Man lässt eine Holzleiste oder einen anderen geeigneten flachen Körper, z. B. ein Heft, ein Buch, ein Holzbrettchen in waagerechter oder schräger Lage auf der Fingerspitze schweben (Abb. 3.3.1./1). Man kommt zur Vorstellung vom Schwerpunkt als eines Punktes, durch dessen Unterstützung das Fallen des Körpers verhindert wird.

*Bemerkungen*

1. Durch einseitige Belastung der Holzleiste mit einem Radiergummi oder dgl. wird leicht eine Schwerpunktverschiebung bewirkt.
2. Man versuche, einen etwas höheren Körper, z. B. eine mit Sand gefüllte, gut verklebte Schachtel in der Schwebe zu halten.

### 3.3.2. Balancieren eines Papierblattes auf einer Bleistiftspitze [SE]

1. Papier
2. Schere
3. Bleistift

#### *Methodischer Hinweis*

Der Versuch ist eine Fortsetzung des vorhergehenden (vgl. MH V 3.3.1.).

#### *Versuch*

Man schneidet aus nicht zu steifem Papier einige Blätter in geometrisch einfacher

Form, z. B. Kreis, Quadrat, Rechteck. Die durch den vorigen Versuch nahegelegte Vermutung, daß sich der Schwerpunkt „in der Mitte“ befindet, wird nachgeprüft, indem man die Blätter im Kreismittelpunkt bzw. im Schnittpunkt der Diagonalen auf einer Bleistiftspitze schweben läßt (Abb. 3.3.2./1). Um der Spitze Halt zu gewähren, legt man die Blätter über eine Fingerkuppe und beult sie durch Druck mit einem stumpfen Bleistift gegen den markierten Unterstützungspunkt vorsichtig aus, ohne sie zu durchstoßen.



Abb. 3.3.2./1 Papierblatt, auf einer Bleistiftspitze gelagert

#### *Bemerkungen*

1. Beim Dreieck wird der Schwerpunkt in der bekannten Weise mittels zweier Seitenhalbierenden festgelegt. Sie schneiden einander im Schwerpunkt. Bestätigung durch den Versuch.
2. Daß der Schwerpunkt auf der Seitenhalbierenden liegt, ist daran erkennbar, daß ein dreieckiges Papierblatt bei Unterstützung längs einer Seitenhalbierenden mittels einer Messerschneide oder dgl. in der Schwebe bleibt. Man bezeichnet die Seitenhalbierende daher auch als *Schwerlinie*.

### 3.3.3. Schwerlinien und Schwerpunkt von Blechscheiben

1. Blechscheiben verschiedener Form (Rechteck, Dreieck, Kreis u. a. m.) @ bzw. Platten aus dem SEG „Mechanik“
2. Dreikantfeile
3. Schraubstock

#### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment zeigt anschaulich, daß eine *Schwerlinie* die Blechscheibe in zwei Teile trennt, die sich das *Gleichgewicht* halten.

#### *Versuch*

Die Feile wird mit dem Heft so in den Schraubstock geklemmt, daß eine Kante waagerecht liegt. Auf dieser wird die Blechscheibe ausbalanciert. Dann zieht man die Scheibe in der Richtung der Kante über diese hinweg und ritzt auf diese Weise eine Schwerlinie ein. Der Versuch wird dann bei einer anderen Lage der Scheibe

### V 3.3.3.

noch einmal ausgeführt. Der Schwerpunkt ergibt sich als Schnittpunkt der Schwerlinien (wie bei V 3.3.2.).

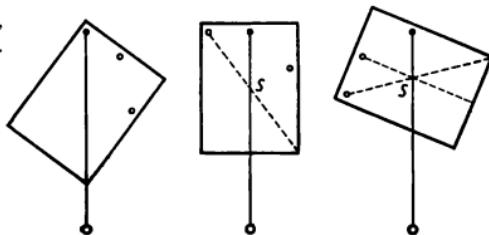
#### Bemerkung

Die Scheibe wird hier als Fläche betrachtet; denn der Schwerpunkt liegt eigentlich im Innern der Blechscheibe und nicht auf ihrer Oberfläche.

### 3.3.4. Schwerlinien und Schwerpunkt von Pappscheiben [SE]

1. Schwarz gestrichene Pappscheiben verschiedener Form (Kreis, Quadrat, Rechteck, Dreieck u. a. m.) ⑧
2. Lot (Bindfaden, Bleikugel) ⑧
3. Federklammer
4. Pinzette

Abb. 3.3.4./1 Schwerpunkt als Schnittpunkt der Schwerlinien (Stativ fortgelassen)



#### Methodischer Hinweis

Dieser Versuch zeigt eine interessante Methode zur experimentellen Bestimmung der Schwerlinien und des Schwerpunkts. Auch hier kann man zur Erklärung wie in V 3.3.3. anführen, daß sich die beiden Teile links und rechts des Lotes bezüglich des Aufhängepunkts im Gleichgewicht halten oder daß im stabilen Gleichgewicht eines hängenden Körpers der Schwerpunkt stets lotrecht unter dem Aufhängepunkt liegt (vgl. V 3.3.5.).

#### Versuch

Papptafeln verschiedener Form werden in beliebig am Rande verteilten Löchern aufgehängt. Um die durch den Aufhängepunkt gehende Lotrechte festzulegen, hängt man vor die Tafeln ein kleines Fadenlot, dessen Faden man gut mit Kreide einreibt (Abb. 3.3.4./1). Den ruhig hängenden Faden klemmt man an seinem unteren Ende mit einer Federklammer an der Tafel fest, zieht ihn mit einer Pinzette etwas von der Tafel fort und läßt ihn gegen diese schnellen. Er kennzeichnet dadurch eine „Schwerlinie“ als Kreidestrich auf der Papptafel. Man wiederholt den Versuch mit anderen Aufhängepunkten und erkennt, daß die Schwerlinien einander in einem Punkt schneiden.

Unterstützt man die waagerecht gehaltene Tafel im Schnittpunkt der Schwerlinien (V 3.3.2.), so verbleibt sie im Gleichgewicht. Der Schnittpunkt der Schwerlinien ist der Schwerpunkt.

#### Bemerkungen

1. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Schwerpunktplatten, Hakenkörper, Schnur) benutzt.
2. Siehe Bemerkung zu V 3.3.3.!

### 3.3.5. Gleichgewichtslagen eines hängenden Körpers [SE]

1. 2 Holzleisten  
(etwa 1,5 cm  $\times$  4 cm  $\times$  30 cm)  
mit Bohrungen ( $\varnothing$  etwa 10 mm) ⑧
2. runder Holzstift ( $\varnothing$  etwas kleiner als der der Bohrungen)

#### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment zählt zu den bekanntesten zur Demonstration der Gleichgewichtslagen. Damit sich die Schüler nicht die irrgreiche Ansicht einprägen, im stabilen Gleichgewicht müsse der Schwerpunkt unbedingt unter dem Unterstützungspunkt liegen, sollte man außerdem unbedingt noch ein weiteres Beispiel — etwa V 3.3.6. zeigen. Allgemeingültige Kriterien sind die Bewegungen des Schwerpunkts bei Störungen der Gleichgewichtslage (vgl. auch V 3.3.9. und V 3.3.10.).

#### *Versuch*

Die eine Holzleiste wird in der Nähe eines Endes, die andere in der Mitte mit einer Bohrung versehen, in der sich ein Holzstift drehen lässt, ohne zu klemmen. Auf der in der Nähe des Endes durchbohrten Leiste wird die Lage des Schwerpunkts durch einen Farbpunkt auf der Oberfläche gekennzeichnet. Man klemmt den Holzstift waagerecht an einem Stativ fest und steckt die Holzleisten nacheinander darauf (Abb. 3.3.5./1). Es lassen sich folgende Gleichgewichtsarten unterscheiden:

- a) *stabiles* (sicheres) Gleichgewicht: Schwerpunkt S in tiefster Lage lotrecht unter dem Aufhängepunkt A; bei Störungen des Gleichgewichts wird der Schwerpunkt gehoben, der Körper kehrt in die ursprüngliche Lage zurück.
- b) *labiles* (unsicheres) Gleichgewicht: Schwerpunkt S in höchster Lage lotrecht über dem Aufhängepunkt A; bei geringster Störung senkt sich der Schwerpunkt, der Körper geht in eine stabile Gleichgewichtslage über.
- c) *indifferentes* Gleichgewicht: Aufhängepunkt im Schwerpunkt; der Körper befindet sich in jeder Lage im Gleichgewicht; bei einer Störung wird der Schwerpunkt weder gesenkt noch gehoben.

#### *Bemerkungen*

1. Es empfiehlt sich, den Durchmesser des Holzstifts nicht zu klein zu wählen. Eine geringfügige Reibung ist für die Ausführung des Versuchs zweckmäßig, da das Vorführen des labilen Gleichgewichts weniger Mühe macht.
2. Statt des Holzstifts kann auch ein Achszapfen verwendet werden.

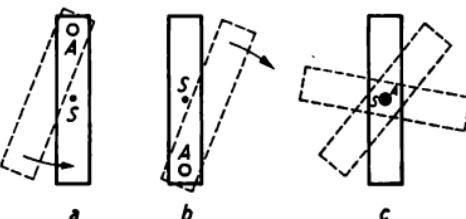


Abb. 3.3.5./1 a) Stabiles, b) labiles, c) indifferentes Gleichgewicht eines hängenden Körpers

### 3.3.6. Gleichgewichtslagen einer Kugel [SE]

1. Holzkugel, Ball oder ähnliches
2. Uhrglas oder Abdampfschale

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH, V 3.3.5.!
2. Steht eine am Boden etwas nach innen gewölbte Schale zur Verfügung (Abb. 3.3.6./1), so läßt sich zeigen, daß es bei der Beurteilung der Gleichgewichtslage nicht auf die absolute, sondern auf die relative Schwerpunktshöhe ankommt.

#### Versuch

Die Gleichgewichtslagen einer Kugel lassen sich nach Abbildung 3.3.6./2 in einfachster Weise mittels einer gewölbten Schale darstellen. Die stabile und labile Lage haben mit den entsprechenden Lagen eines hängenden Körpers den Umstand gemeinsam, daß sich der Schwerpunkt in der tiefsten bzw. höchsten Lage befindet. Bei indifferenter Gleichgewichtslage bewegt sich der Schwerpunkt der Kugel bei einer durch Anstoß herbeigeführten Verschiebung auf einer Waagerechten, die Kugel verbleibt dabei in jeder Lage im Gleichgewicht.

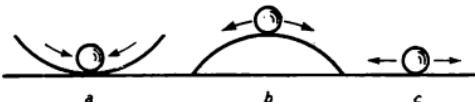


Abb. 3.3.6./1 Kugel in stabiler Gleichgewichtslage

Abb. 3.3.6./2 a) Stabiles, b) labiles, c) indifferentes Gleichgewicht einer Kugel

### 3.3.7. Gleichgewichtslagen — Schwerpunkt außerhalb des Körpers

1. Gerät zur Demonstration der Gleichgewichtslagen

#### Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.5.!

#### Versuch 1: Das stabile Gleichgewicht

Man schiebt die beiden Stäbe mit den Kugeln möglichst weit nach unten (Abb. 3.3.7./1a). Der Körper ist im stabilen Gleichgewicht. Stößt man ihn an, so schwingt er und kehrt wieder in die Ausgangslage zurück. Der Schwerpunkt liegt offensichtlich unterhalb des Unterstützungs punktes, also außerhalb des Körpers.

#### Versuch 2: Das labile Gleichgewicht

Man schiebt die beiden Stäbe mit den Kugeln ganz nach oben (Abb. 3.3.7./1b). Der Körper kann nur mit Mühe ins Gleichgewicht gebracht werden und kippt bei der geringsten Störung. Der Schwerpunkt liegt über dem Unterstützungs punkt.

**Versuch 3: Das indifferente Gleichgewicht**

Man verschiebt die Stäbe so, daß der Körper in jeder beliebigen Lage im Gleichgewicht ist. Der Schwerpunkt fällt mit dem Unterstützungspunkt zusammen (Abb. 3.3.7./1 c).

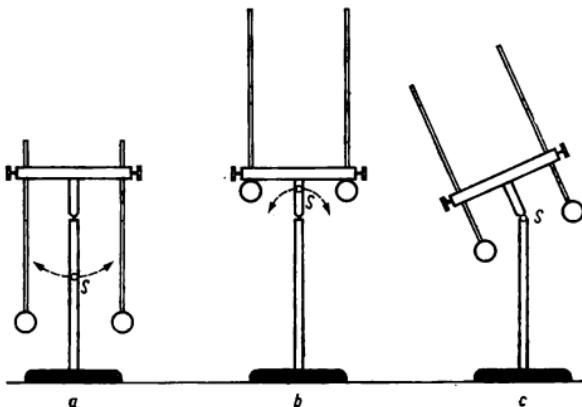


Abb. 3.3.7./1 Gerät zur Demonstration der Gleichgewichtslagen:  
a) stabiles Gleichgewicht,  
b) labiles Gleichgewicht,  
c) indifferentes Gleichgewicht

**3.3.8. Pappfiguren im stabilen Gleichgewicht [SE]**

1. Pappe, Karton
2. Stricknadel

**Methodische Hinweise**

1. Solche Pappfiguren sollte man erst vorführen, wenn Kenntnisse über die Gleichgewichtslage an einem oder einigen der vorher beschriebenen Experimente erworben wurden.
2. Durch diesen Versuch werden die Schüler zum selbständigen Experimentieren angeregt.

**Versuch**

Aus dünner Pappe oder Karton kann man spielzeugartige Pappfiguren ausschneiden, an denen die stabile Gleichgewichtslage veranschaulicht werden kann.

**Beispiele**

- Schwebender Vogel (Abb. 3.3.8./1). Flügel und Schnabelspitze leicht nach unten biegen! Modell schwebt waagerecht, mit Schnabelspitze auf umgekehrte gehaltenem Bleistift aufliegend
- Sitzender Vogel, Kakadu (Abb. 3.3.8./2). Stricknadel als Sitzstange
- Seilläufer (Abb. 3.3.8./3). Stricknadel als Seil

**Bemerkung**

Aus den verschiedensten Gegenständen kann man Körpersysteme zusammenstellen, die sich im stabilen Gleichgewicht halten (Abb. 3.3.8./4 und Abb. 3.3.8./5).



Abb. 3.3.8./1  
Schwebender Vogel

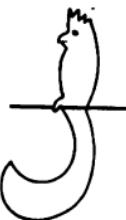


Abb. 3.3.8./2 Sitzender Vogel



Abb. 3.3.8./3 Seilläufer

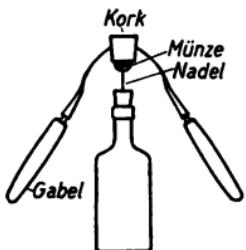


Abb. 3.3.8./4 Zwei Gabeln  
auf einer Nadelspitze gelagert

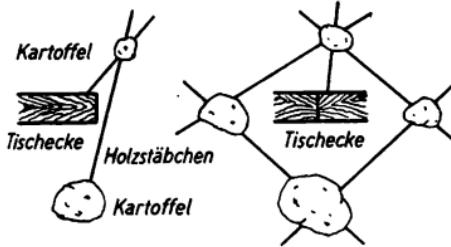


Abb. 3.3.8./5 Kartoffeln über der Tischecke  
a  
b

### 3.3.9. Standfestigkeit eines Prismas

#### 1. Gerät zum Nachweis der Abhängigkeit der Standfestigkeit von der Schwerpunktlage

##### *Methodischer Hinweis*

In der Stellung a, wenn das Gerät die Form eines Quaders hat, kann man zeigen, daß es sich im stabilen Gleichgewicht befindet. Der Schwerpunkt hat seine tiefste Lage. Wenn man das Gerät ein wenig ankippt, wird der Schwerpunkt gehoben.

##### *Versuch*

Das Gerät (Abb. 3.3.9./1) besteht aus drei rechteckigen Brettchen, die durch Metallschienen beweglich verbunden sind. Im Mittelpunkt des Gerätes (Schwerpunkt) ist ein kleines Lot befestigt. Neigt man das Gerät allmählich, bis der Schwerpunkt nicht mehr über der Unterstützungsfläche liegt, dann kippt es nach der Seite (Abb. 3.3.9./1 c).

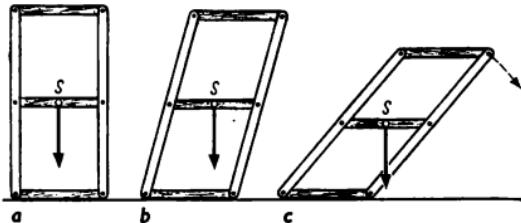


Abb. 3.3.9./1 Abhängigkeit  
der Standfestigkeit von der  
Schwerpunktlage: a) und b)  
standfest,  
c) Körper kippt



### 3.3.10. Standfestigkeit eines Quaders [SE]

1. Holzquader  
(etwa 4 cm × 8 cm × 16 cm)  
oder zugeklebte, mit Sand gefüllte Schachtel  
(auch Streichholzschachtel)

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MH, V 3.3.9.!
2. Bei diesem Experiment nimmt mit der Vergrößerung der Unterstützungsfläche des Quaders zwangsläufig auch die Höhe des Schwerpunktes ab. Auch dadurch wird die Standfestigkeit erhöht. In den folgenden Versuchen können beide Einflüsse voneinander getrennt untersucht werden. Man kann von diesem Experiment ausgehen und diese Einflüsse nacheinander mit den Versuchen V 3.3.12. und V 3.3.13. untersuchen.

#### *Versuch*

Ein Schüler versucht, den vor ihm auf seiner kleinsten Fläche stehenden Quader durch einen leichten Stoß gegen die Mitte einer Seitenfläche umzuwerfen. Ist die Erschütterung nicht zu stark, so kehrt der Quader in seine alte Lage zurück. Er befindet sich demnach im stabilen Gleichgewicht. Bei genügend kräftigem Stoß kippt der Quader um und geht in eine andere stabile Gleichgewichtslage über. Man erkennt, daß der Quader auf seiner kleinsten Fläche am unsichersten, auf der größten am sichersten ruht. Seine Standfestigkeit nimmt mit der Unterstützungsfläche zu.

#### *Bemerkung*

Bei der Ausführung als Schülerexperiment wird der Holzquader des SEG Mechanik verwendet.

### 3.3.11. Standfestigkeit einer Kerze und eines Bleistiftes

1. Kerze
2. Bleistift
3. 2 Pappscheiben (Ø etwa 6 cm)
4. Alleskleber

#### *Methodischer Hinweis*

Vergleiche MH, V 3.3.10.!

#### *Versuch*

Eine Kerze und ein Bleistift, die mit ihren Endflächen auf die Tischplatte gestellt werden, fallen schon bei geringen Erschütterungen um. Erweicht man die Kerze an ihrer Endfläche und klebt sie auf eine kleine Pappscheibe, so nimmt die Standfestigkeit erheblich zu. Dasselbe erreicht man beim Bleistift, wenn man ihn mit seinem stumpfen Ende auf eine Pappscheibe klebt.

### **3.3.12. Standfestigkeit einer kleinen Flasche**

1. Leere Tintenflasche mit Korken
2. Stricknadel oder Holzspießer
3. Sand
4. Kartoffel

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MH, V 3.3.10.!
2. Man könnte dieses Experiment auch mit Stativmaterial durchführen, aber es ist zweckmäßig, gelegentlich auch Versuche mit behelfsmäßigen Mitteln zu zeigen, damit die Schüler nicht den Eindruck gewinnen, physikalische Experimente könne man nur mit speziell dafür bestimmten Geräten ausführen. Außerdem werden sie dadurch zum selbständigen Experimentieren angeregt.

#### *Versuch*

Eine Tintenflasche wird mit Sand gefüllt und verkorkt. Durch den Korken wird lotrecht eine Stricknadel oder ein Holzspießer gestoßen und eine Kartoffel darauf gesteckt (Abb. 3.3.12./1). Je höher die Kartoffel geschoßen wird, desto leichter läßt sich die Flasche umstoßen. Bei tiefster Lage der Kartoffel steht sie am sichersten.

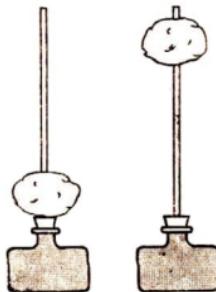


Abb. 3.3.12./1 Abhängigkeit der Standfestigkeit einer Flasche von der Höhe des Schwerpunktes

### **3.3.13. Standfestigkeit von Schachteln mit verschiedenen Füllungen [SE]**

1. 3 Schachteln gleicher Größe
2. Sand
3. Eisen- oder Bleikörper

#### *Methodischer Hinweis*

Vergleiche MH, V 3.3.10.!

#### *Versuch*

Von drei Schachteln gleicher Größe bleibt die eine leer, die zweite wird vollständig mit Sand gefüllt. In der dritten Schachtel wird an der kleinen Wandfläche ein geeigneter Eisen- oder Bleikörper mit Draht befestigt. Alle Schachteln werden so beklebt, daß sie sich äußerlich nicht unterscheiden. Sie werden mit ihren kleinsten Flächen auf den Tisch gestellt. Ein Schüler versucht, sie wie bei V 3.3.10. durch einen leichten seitlichen Stoß umzuwerfen.

Man vergleicht das Verhalten beim Umkippen

- a) der leeren Schachtel und der mit Sand gefüllten,
- b) der leeren Schachtel und der mit Eisen beschwerten.

Der Versuch läßt erkennen, daß die Schachtel umso sicherer steht,  
a) je schwerer sie ist,  
b) je tiefer ihr Schwerpunkt liegt.

### *Bemerkung*

Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Holzklotz, Hakenkörper) benutzt.

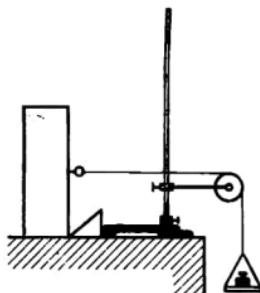
### 3.3.14. Messen der Standfestigkeit eines Quaders

1. Holzquader (etwa 4 cm × 8 cm × 16 cm) mit Ösen	4. Holzkeil (30°)
2. leichte Waagschale	5. feste Rolle
3. Wägesatz	6. Faden

### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment ist sehr gut als Schülerexperiment geeignet. Dazu verwendet man gewöhnlich einen Quader mit drei Bohrungen, in die man nacheinander ein zylindrisches Eisenstück (Hakenkörper) steckt und damit die Abhängigkeit der Standfestigkeit von der Höhe des Schwerpunkts untersucht.

Statt eine Kraft seitlich wirken zu lassen, kann man auch die Unterlage allmählich neigen und feststellen, bei welchem Winkel der Quader kippt. Alle dazu erforderlichen Geräte sind im Schüler-Experimentiergerät Mechanik enthalten.



**Abb. 3.3.14./1**  
Messen der  
Standfestigkeit  
eines Quaders

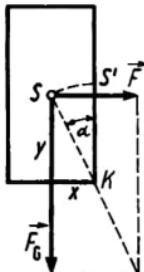


Abb. 3.3.14./2  
Gleichheit der  
Momente  
beim Kippen

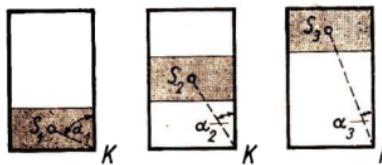


Abb. 3.3.14./3 Abhängigkeit des Kippwinkels von der Schwerpunkthöhe

## Versuch

Als Maß für die Standfestigkeit eines Körpers kann die waagerecht im Schwerpunkt angreifende, senkrecht zur Kippkante wirkende Kraft dienen, die den Körper

per gerade zum Kippen bringt. Zu ihrer Ermittlung werden die Mitten zweier benachbarter Flächen des Quaders mit Ösen versehen und der Quader auf seine kleinste Fläche gestellt. Man läßt senkrecht zur Kippkante eine waagerechte Kraft einwirken (Abb. 3.3.14./1), die man so bemäßt, daß der Quader gerade ankippt. Die Kippkante wird durch einen Holzkeil festgelegt. Auf den Schwerpunkt wirken zwei Kräfte ein, nämlich die Gewichtskraft  $\vec{F}_G$  des Körpers und die seitliche Zugkraft  $\vec{F}$ . Im Augenblick des Ankippens sind ihre Momente einander gleich. Nach Abbildung 3.3.14./2 ist

$$F \cdot \bar{y} = F_G \cdot x$$

oder

$$F = F_G \cdot \frac{x}{y}.$$

Hierbei bedeuten  $y$  die Höhe des Schwerpunktes,  $x$  den Abstand des Lotes durch den Schwerpunkt von der Kippkante.

#### Bemerkungen .

- Der Versuch zeigt, daß es im Grunde nicht auf die Größe der Unterstützungsfläche, sondern auf den Abstand  $x$  des Lotes durch den Schwerpunkt von der Kippkante ankommt.
- Eine zweite Möglichkeit zur quantitativen Beurteilung der Standfestigkeit bietet sich in der Messung des Winkels, um den der Abstand des Schwerpunkts von der Kippkante (SK in Abbildung 3.3.14./2) gedreht werden muß, damit der Schwerpunkt die höchste Lage S' erreicht (*geometrisches Maß der Standfestigkeit*). Vgl. Abbildung 3.3.14./3.
- Ein drittes Maß für die Standfestigkeit ergibt sich aus der Angabe der Arbeit, die zum Heben des Schwerpunktes in die höchste Lage S' erforderlich ist (*energetisches Maß der Standfestigkeit*). Wie aus Abbildung 3.3.14./2 ersichtlich, ist

$$W = F_G \cdot (\overline{SK} - y)$$

oder

$$W = F_G \cdot (\sqrt{x^2 + y^2} - y).$$

- An Stelle von Rolle, Waagschale und Wägestück kann auch ein Kraftmesser verwendet werden.
- Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Holzklotz, Hakenkörper, Kraftmesser, Experimentierbrett mit Querleiste) benutzt. Der Hakenkörper mit einer Masse von 50 g oder mit einer Masse von 100 g kann in eine der drei Bohrungen des Holzklotzes eingesetzt werden, um die Abhängigkeit der Standfestigkeit von der Schwerpunkthöhe nachzuweisen.

## 3.4. Kraftumformende Einrichtungen — Das Drehmoment

### 3.4.1. Die Wippe

- Dünne Holzleiste  
(0,5 cm × 3 cm × 40 cm)
- 2 Brettchen (6 cm × 10 cm  
und 5 cm × 6 cm, Dicke 1 cm)
- 4 Streichholzsachachteln
- Sand
- Papier, Klebstoff, Nägelchen



Abb. 3.4.1./1 Modell einer Wippe



### *Methodischer Hinweis*

Der Versuch läßt als Vorversuch andeutungsweise den Inhalt des Hebelgesetzes erkennen.

#### *Versuch*

Das Modell besteht aus einer dünnen, etwa 40 cm langen Holzleiste, die man in der Mitte mit einem kleinen Gestell aus zwei senkrecht aufeinandergenagelten Brettchen unterstützt (Abb. 3.4.1./1).

Als „wippende Personen“ dienen zwei gleich schwere, mit Sand gefüllte, gut verklebte Streichholzschachteln. Legt man sie in gleichen Abständen vom Auflager auf die Leiste und stößt diese leicht an, so wippen die Enden einige Zeit auf und nieder, bis sie zur Ruhe kommen.

Ersetzt man die eine Streichholzschachtel durch zwei zusammengeklebte, mit Sand gefüllte Streichholzschachteln, so muß man diese entsprechend näher an das Auflager heranschieben, um das Modell wippfähig zu machen.

### **3.4.2. Vorversuche mit Hebeln [SE]**

1. Mauerziegel oder kleine Kiste mit Sandfüllung	5. Beißzange
2. Holzleiste oder Lineal	6. Axt
3. Holzstange oder Brechstange	7. Nußknacker
4. Brett	8. Hammer, Nagel

#### *Methodischer Hinweis*

Auch dieses Experiment ist ähnlich wie V 3.4.1. als Vorversuch gedacht. Es zeigt einige Anwendungen von Hebeln im täglichen Leben. Man sollte die Schüler auffordern, die entsprechenden Arbeiten auch mit bloßer Hand zu versuchen, damit sie die Bedeutung dieser kraftumformenden Einrichtungen erkennen.

#### *Versuch*

1. Anheben eines Mauerziegels oder einer kleinen, mit Sand gefüllten Kiste mittels einer daruntergeschobenen Holzleiste; diese wird dabei als zweiseitiger und als einseitiger Hebel gebraucht.
2. Anheben eines Möbelstückes mit einer daruntergesteckten starken Holzstange oder Brechstange.
3. Anheben einer geöffneten Tür in den Angeln mit Hilfe einer daruntergeklemmten, am Stiel seitlich angehobenen Axt.
4. Ausziehen eines in ein starkes Brett geschlagenen Nagels mittels einer Beißzange oder eines geschlitzten Hammers.
5. Aufbrechen einer Nuß mit Hilfe eines Nußknackers.

### **3.4.3. Zweiseitiger Hebel [SE]**

1. Meßstab aus Holz als Hebel
2. Hakenkörper
3. Faden

*Methodische Hinweise*

- Der Versuch dient zur Herleitung des Hebelgesetzes für den gleicharmigen und den ungleicharmigen Hebel.
- Für die Entwicklung des Hebelgesetzes ist die waagerechte Lage des Hebels keineswegs erforderlich. Das Gesetz gilt bei einem um den Schwerpunkt drehbaren Hebel auch für jede beliebige Lage. Siehe dazu MB 3.0.5.
- Der Versuch am zweiseitigen Hebel führt zur Prägung des Begriffs vom *Drehmoment*. Auf einen um 0 drehbaren Hebel (Abb. 3.4.3./1) wirke in seiner Drehebene lotrecht nach unten eine schräg zum Hebel gerichtete Kraft  $\vec{F}$  (Vektor AB) ein. Da sich A nur auf einem Kreis bewegen kann, wird lediglich die Kraftkomponente  $\vec{F}_1$  von  $\vec{F}$  wirksam, die bei Projektion von  $\vec{F}$  auf die Tangente durch A in deren Richtung fällt (Vektor  $\vec{AC}$ ). Man zieht  $OE \perp AB$  und außerdem die Hilfslinien  $OC$  und  $OB$ . Es ist  $BC \parallel OA$ . Mithin sind die Dreiecke  $OAB$  und  $OAC$  flächengleich.

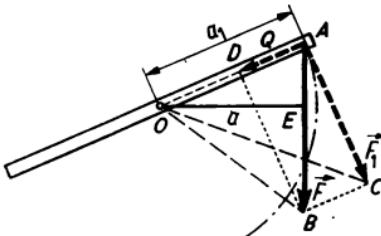
Es ist

$$AB \cdot OE = AC \cdot OA$$

oder

$$F \cdot a = F_1 \cdot a_1.$$

Abb. 3.4.3./1 Das Drehmoment



Man erkennt: Das Produkt aus der senkrecht zum Hebel wirkenden Kraft  $\vec{F}_1$  und dem Hebelarm  $a_1$  ist gleich dem Produkt aus der schräg zum Hebel wirkenden Kraft  $\vec{F}$  und dem senkrechten Abstand  $a$  der Kraftrichtung von der Drehachse. Das Produkt aus einer Kraft und ihrem senkrechten Abstand von der Drehachse heißt *Drehmoment*.

*Versuch*

Der als Hebel verwendete Meßstab wird mit einer Bohrung versehen und auf einen waagerecht an ein Stativ geklemmten Lagerzapfen gesteckt. Die die angreifenden Kräfte verkörpernden Hakenkörper werden an dünne Schnurschlingen gehängt, die über den Hebel gestreift und festgezogen werden.

Man belastet den Hebel auf einer Seite durch einen Körper mit beliebiger Gewichtskraft  $F_1$ , die man bei jeder Versuchsreihe unverändert lässt. An die andere Seite des Hebels hängt man nacheinander verschiedene Körper mit unterschiedlichen Gewichtskräften  $F_2$  und verschiebt den Aufhängepunkt jeweils so weit, bis Gleichgewicht eintritt. Man unterscheidet:

- gleicharmige Hebel (Abb. 3.4.3./2a) bei gleichgroßen Kräften und Hebelarmen von gleicher Länge,
- ungleicharmige Hebel (Abb. 3.4.3./2 b) bei ungleichen Kräften und Hebelarmen von ungleicher Länge.

Zusammengehörige Werte der Kräfte und Kraftarme werden in einer Tabelle übersichtlich zusammengestellt. Die Tabelle lässt erkennen, daß am Hebel Gleichgewicht herrscht, wenn das Produkt aus der Kraft  $F_1$  und dem Kraftarm  $a_1$  gleich dem Produkt aus der Kraft  $F_2$  und dem Kraftarm  $a_2$  ist.

Hierin ist das Gesetz für den gleicharmigen Hebel (Gleichheit der Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  bei gleich langen Hebelarmen) als Sonderfall enthalten.

**Beispiel einer Tabelle zum Hebelgesetz**

Linke Hebelseite			Rechte Hebelseite		
Kraft $F_1$ in N	Kraftarm $a_1$ in m	Kraft · Kraftarm $F_1 \cdot a_1$ in N · m	Kraft $F_2$ in N	Kraftarm $a_2$ in m	Kraft · Kraftarm $F_2 \cdot a_2$ in N · m
0,5	0,48	0,24	0,5	0,48	0,24
			1,0	0,24	0,24
			1,5	0,16	0,24
			2,0	0,12	0,24
			2,5	0,096	0,24
1,5	0,144	0,22	1,5	0,144	0,22
			1,0	0,216	0,22
			0,5	0,432	0,22

**Bemerkungen**

1. Beim unbelasteten Hebel gleicht man geringfügige Abweichungen vom indifferenten Gleichgewicht durch Verwendung leichter, aus U-förmig gebogenen Blechstreifen hergestellter Reiter aus.
2. Statt eines Meßstabes kann als Hebel auch eine Schiene aus Leichtmetall verwendet werden.
3. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Waagebalken, Hakenkörper) benutzt. Der Waagebalken ist mit zwei verstellbaren Schiebern versehen, die das Anhängen von Hakenkörpern an jeder beliebigen Stelle ermöglichen. Dabei ist die Gewichtskraft des Schieber (0,05 N) zur Gewichtskraft der angehängten Hakenkörper zu addieren. Die Bohrungen im Waagebalken haben jeweils einen Abstand von 50 mm und können als Meßmarken benutzt werden.

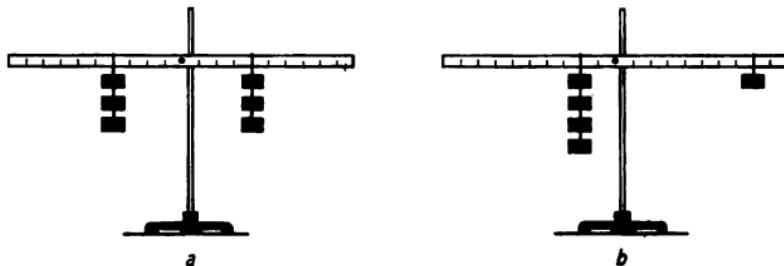


Abb. 3.4.3./2 Zweiseitiger Hebel: a) gleicharmig, b) ungleicharmig

**3.4.4. Einseitiger Hebel [SE]**

Geräte 1. bis 3. wie in V 3.4.3., außerdem 4. feste Rolle

**Methodischer Hinweis**

An die Stelle der nach oben wirkenden Zugkraft kann die Spannkraft eines Kraftmessers treten (Abb. 3.4.4./1 b). Es bietet sich so in bequemer Weise durch Heben

und Senken des Kraftmessers die Möglichkeit zu zeigen, daß das Hebelgesetz für jede Stellung des Hebels erfüllt ist. Voraussetzung ist, daß der Kraftmesser lotrecht hängt.

*Versuch*

Aufstellen des Hebels wie bei V 3.4.3. Beide Kräfte wirken auf derselben Seite von der Drehachse des Hebels, die eine nach unten, die andere mittels einer Schnur über eine Rolle nach oben (Abb. 3.4.4./ 1a). Zusammenstellen der Tabelle und Ableiten des Hebelgesetzes wie bei V 3.4.3.

*Bemerkungen*

1. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt (vgl. Bem. V3.4.3.!).
2. Um das Eigengewicht des Hebels zu kompensieren, muß die Drehachse immer in der Mitte der Stange liegen. Den Schülern sollten aber auch Hebel gezeigt werden, die wirklich einseitig sind, d. h. die Drehachse am Ende der Stange haben.

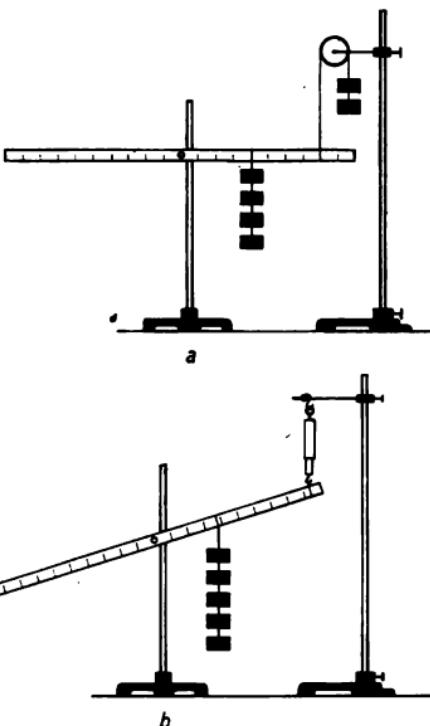


Abb. 3.4.4./1 Einseitiger Hebel:  
a) in waagerechter Lage, b) in schräger Lage

### 3.4.5. Waagenmodelle [SE]

1. Holzleiste (Querschnitt 1 cm  $\times$  3 cm; 1 cm  $\times$  2 cm)
2. dünne Brettchen
3. 2 gleiche Blechdosendeckel ( $\varnothing$  etwa 10 cm) oder Pappschiben
4. steifer Messing- oder Eisendraht, Stricknadeln
5. Faden, Klebstoff, kleine Nägel

*Methodischer Hinweis*

Bei den nachfolgend beschriebenen Modellen wurde auf die Nachahmung feinmechanischer Einzelheiten, wie Lagerung in Pfannen und Schneiden, Arretierung u. dgl., die mit unzulänglichen Mitteln doch nur unvollkommen wiedergegeben werden können, verzichtet. Wert wurde nur darauf gelegt, daß das Herstellen der Modelle auch wenig geübten Händen keine Schwierigkeiten bereitet, daß die Modelle in ihrem Aufbau einfach und übersichtlich sind, den Grundgedanken des



Gerätes klar hervortreten lassen und vor den Augen der Schüler zusammengestellt werden können. Aus diesem Grunde wurde auch davon abgesehen, sie mit festen Gestellen auszurüsten. Sie werden in einfacher Weise mittels der bei anderen Versuchen häufig verwendeten Lagerzapfen an Stativen aufgehängt. Die bei den einzelnen Abbildungen angegebenen Längenmaße sind nur als Richtmaße anzusehen.

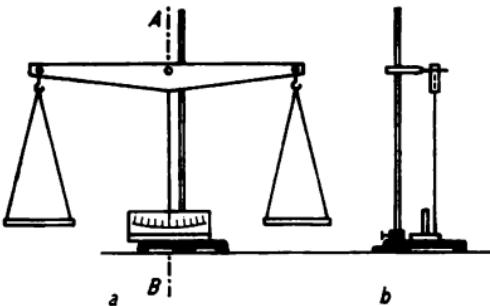


Abb. 3.4.5./1 Modell einer Hebelwaage:  
a) Vorderansicht, b) Schnitt A-B

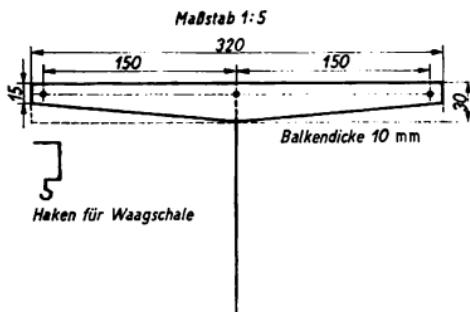


Abb. 3.4.5./2 Waagebalken für das Modell der Hebelwaage



Abb. 3.4.5./3 Kleine Waagschale

#### Hebelwaage (Abb. 3.4.5./1a und b)

Der Waagebalken wird aus einer Holzleiste ( $1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$ ) nach Abbildung 3.4.5./2 ausgesägt. Aus der Abbildung sind auch alle erforderlichen Einzelheiten bezüglich der Bohrungen (Abstände genau einhalten — alle drei Bohrungen auf einer Geraden) und des Zeigers (Stricknadel) sowie der Aufhängehaken für die Waagschalen zu entnehmen. Die Skale befindet sich auf einem besonderen Brettchen mit Grundplatte.

Als Waagschalen benutzt man zwei gleiche Blechdosendeckel, die man mit drei Bohrungen versieht und an drei Fäden aufhängt. Die Fäden knüpft man an einen Drahthaken (Abb. 3.4.5./3). Der Waagebalken und ebenso die Waagschalen sind so abzulegen, daß das Gleichgewicht beim Vertauschen der Waagschalen erhalten bleibt.

#### Römische Schnellwaage (Abb. 3.4.5./4a und b)

Anfertigen des Waagebalkens aus einer Holzleiste ( $1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 48 \text{ cm}$ ) nach Abbildung 3.4.5./5. Gewichtsausgleich wird hergestellt durch zwei seitlich an die kurzen Hebelarme geleimte Brettchen (siehe Abbildung 3.4.5./4b). Anbringen der Bohrungen und der Skale nach Abbildung 3.4.5./5; Abstand der beiden Bohrungen voneinander und Breite der Skalenteile je 30 mm.

### V 3.4.5.

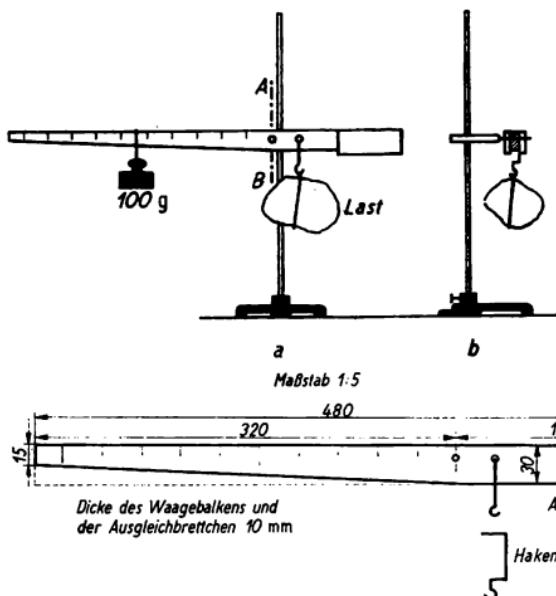


Abb. 3.4.5./4 Modell einer römischen Schnellwaage:  
a) Vorderansicht,  
b) Schnitt A-B

Abb. 3.4.5./5 Waagebalken für das Modell der Schnellwaage

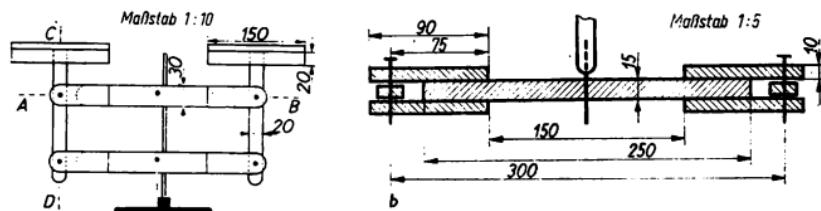


Abb. 3.4.5./6 Modell einer  
oberschaligen Tafelwaage:  
a) Vorderansicht,  
b) Schnitt A-B. Waagebalken,  
c) Schnitt C-D. Tafelträger

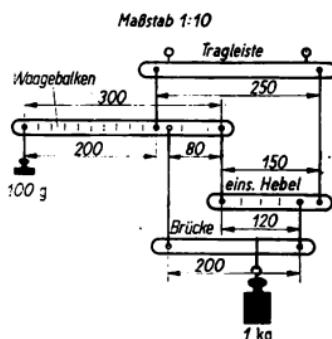
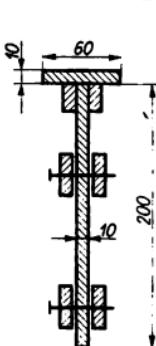


Abb. 3.4.5./7 Fadenmodell einer Brückenwaage

Der Waagebalken ist mitsamt dem Aufhängehaken für die Last so abzugleichen, daß er in die waagerechte Ruhelage einschwingt. Als Vergleichsmasse dient ein an einer Fadenschlinge hängendes 100-g-Stück.

*Oberschalige Tafelwaage, vereinfachtes Modell (Abb. 3.4.5./6a, b, c)*

Anfertigen je zweier Waagebalken und Tafelträger nach Maßgabe der Abbildungen. Die Waagebalken werden mittels zweier Lagerzapfen an ein Stativ gehängt und durch die Tafelträger gelenkig verbunden. Verwendung von starken Nägeln als Gelenkkachsen. Jeder der beiden Waagebalken sowie die beiden Tafelträger sind für sich abzugleichen.

*Brückenwaage, Fadenmodell (Abb. 3.4.5./7)*

Anfertigen des Modells aus Holzleisten und Schnüren nach Abbildung 3.4.5./7; Aufhängen an der Wandtafel. Das Modell unterscheidet sich von der üblichen Ausführung der Brückenwaage dadurch, daß die Brücke nicht auf dem einseitigen Hebel ruht, sondern an ihm hängt. Das Grundsätzliche des Baues und der Funktion der Waage wird dadurch nicht berührt. Es empfiehlt sich, den langen Arm des Waagebalkens vorsorglich etwas länger zu wählen und erst nach dem vollständigen Zusammensetzen des Modells durch Abfeilen abzugleichen.

Bei der Behandlung der Brückenwaage sind folgende Einzelheiten besonders zu beachten:

- die zweifache Möglichkeit der Kraftübertragung von der Brücke auf den Waagebalken und die dabei stattfindende Kraftumformung,
- die Unabhängigkeit der Wägung von der Wahl des Angriffspunktes der Kraft,
- die Parallelverschiebung der Brücke beim Heben und Senken des langen Waagebalkenarmes.

*Bemerkung*

In ähnlicher Weise werden auch aus den Teilen der Schülerexperimentiergeräte Mechanik die Modelle der verschiedenen Waagen zusammengestellt. Die zum Waagebalken des SEG Mechanik gehörenden Schieber werden dabei zum Ausarieren benutzt. Sie werden so verstellt, daß die Waage im Gleichgewicht ist.

### 3.4.6. Seilmaschinen an einer Standleiter [SE]

1. Standleiter	5. 2 Rollen mit Scheren
2. Rundholz ( $\varnothing$ 3 cm bis 4 cm, Länge etwa 1 m)	6. Eimer
3. Kraftmesser (100 N)	7. dicke Schnur
4. 2 kleine Porzellanringe (Vorhangringe)	8. Schraubenzwinge

*Methodische Hinweise*

1. Die Abbildung 3.4.6./1 läßt die gedankliche Entwicklung der Versuchsreihe erkennen. Dabei sollten die Vorschläge zur Erleichterung der Arbeit möglichst von den Schülern kommen. Der Lehrer sollte nur Denkanstöße geben.
2. Bei den einzelnen Teilversuchen stellt man jeweils fest, worin die Arbeitserleichterung besteht und wodurch sie erreicht wurde.
3. Zum Begriff *Seilmaschinen* vergleiche MB 3.0.4.!

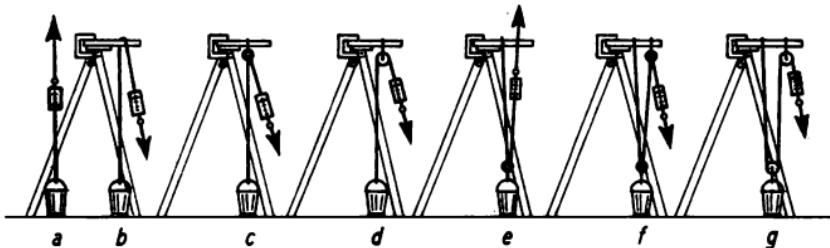


Abb. 3.4.6.1 Seilmaschinen an einer Standleiter:

- einfaches Emporziehen der Last, Standort auf der Leiter,
- Seilführung über ein Rundholz, Standort auf dem Boden,
- Seilführung durch einen festen Porzellanring, Standort auf dem Boden,
- Seilführung über eine feste Rolle, Standort auf dem Boden,
- Seilführung durch einen losen Porzellanring, Standort auf der Leiter,
- Seilführung durch einen festen und einen losen Porzellanring, Standort auf dem Boden,
- Seilführung über eine lose und eine feste Rolle, Standort auf dem Boden

#### Versuch

Als Versuchsgestell dient eine Standleiter mit quer darübergeklemmt Rundholz (in Abbildung 3.4.6.1 in die Zeichenebene hineingedreht), an der ein Schüler, auf der Leiter oder auf dem Boden stehend, mit seiner Muskelkraft Hebeversuche vornimmt. Als Last dient ein mit einigen Wägestücken beschwerter Eimer. Der Versuch hat wegen der Einfachheit der Versuchsmittel und der Durchführung den Vorzug großer Anschaulichkeit und Überzeugungskraft. Die aufzuwendenden Kräfte werden mit einem Kraftmesser gemessen und mit der Gewichtskraft der gehobenen Last verglichen.

#### 3.4.7. Feste und lose Rolle [SE]

1. 2 Rollen mit Scheren (lose Rollen)
2. 2 gleiche Kraftmesser
3. Hakenkörper
4. Faden

#### Methodische Hinweise

1. Die Versuchsreihe führt zur Herleitung der Gleichgewichtsbedingungen für die feste und die lose Rolle:

$$F_1 = F_2 \text{ bzw. } F_1 = \frac{F_2}{2},$$

wenn die lose Rolle keine Eigenmasse hat und beide sich reibungsfrei drehen.

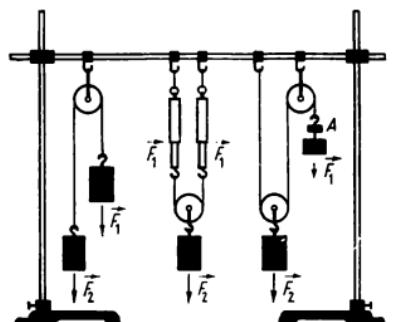


Abb. 3.4.7.1 Feste und lose Rolle, (A Ausgleichsstück)

Dabei kann man in der bekannten Weise im Gleichgewichtszustand die feste Rolle durch einen gleichseitigen Hebel ersetzt denken.

- Zum Begriff *Seilmaschinen* vergleiche MB 3.0.4.!
- Wurde V 3.4.6. als Vorversuch ausgeführt, dann kann hier auf die Bedeutung der Rolle zur Verringerung der Reibung eingegangen werden.

#### *Versuch*

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 3.4.7./1 dargestellt. Da die drei Teilversuche im allgemeinen nacheinander vorgeführt und ausgewertet werden, wird man zuerst nur die feste Rolle am Stativ anbringen und die beiden anderen Anordnungen nacheinander dazufügen.

Es ist zu beachten, daß die Gewichtskraft der losen Rolle zur Kraft  $F_2$  addiert werden muß. Bei der dritten Anordnung wurde der Gewichtsausgleich durch den kleinen Körper A erreicht.

#### *Bemerkung*

Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt.

### 3.4.8. Der Klobenzug [SE]

- Klobenzug ②, dazu erforderliches Material:
  - 2 Brettchen (1 cm × 6 cm × 12 cm)
  - 4 Porzellanringe (Vorhangringe)
  - dicke Schnur
  - dicker Draht
- technischer Kraftmesser
- Eimer

#### *Methodische Hinweise*

- Das Experiment kann als Weiterentwicklung der Versuchsreihe V 3.4.6. oder als Vorversuch zu den Experimenten mit Flaschenzügen ausgeführt werden.
- Zum Begriff *Seilmaschinen* vergleiche MB 3.0.4.!

Abb. 3.4.8./1 Klobenzug

#### *Versuch*

Der Klobenzug, ein rollenloser Flaschenzug, wird nach Abbildung 3.4.8./1 aus den oben angegebenen Hilfsmitteln zusammengestellt und am Türrahmen aufgehängt. Die Kraft wird wie in V 3.4.6. mit einem technischen Kraftmesser gemessen. Da beim Klobenzug die Reibung stärker wirksam ist als bei einem Flaschenzug, mißt man die Kraft sowohl beim Heben wie auch beim Senken der Last und bildet den Mittelwert.



### 3.4.9. Der Potenzflaschenzug (Modell) [SE]

1. 3 lose Rollen
2. Kraftmesser
3. Hakenkörper
4. Faden

#### *Methodische Hinweise*

1. Zum Begriff *Seilmaschinen* vergleiche MB 3.0.4.!
2. In der Abbildung ist eine Möglichkeit angedeutet, wie man die Gleichung für den Betrag  $F_1$  der erforderlichen Kraft herleiten kann.
3. Wurde V 3.4.8. als Vorversuch ausgeführt, dann kann hier auf die Bedeutung der Rolle zur Verringerung der Reibung eingegangen werden.

#### *Versuch*

Die Versuchsanordnung ist aus der Abbildung 3.4.9./1 ersichtlich. Verwendet man einen Kraftmesser neuerer Bauart (kombinierter Zug- und Druckkraftmesser), so kann man die Gewichtskraft der Rollen kompensieren, indem man bei unbelastetem Flaschenzug den Kraftmesser mit Hilfe der Schiebehülse auf Null stellt (vgl. MB 3.0.1.).

#### *Bemerkung*

Der Versuch kann auch ohne Kraftmesser durchgeführt werden, wenn man den Faden über eine feste Rolle führt und Hakenkörper anhängt.

### 3.4.10. Der Faktorenflaschenzug (Modell) [SE]

1. Modell des Faktorenflaschenzuges
2. Kraftmesser
3. Hakenkörper

#### *Methodische Hinweise*

1. Zum Begriff *Seilmaschinen* vergleiche MB 3.0.4.!
2. Vergleiche MH Nr. 3, V 3.4.9.!
3. Zur Herleitung der Gleichung für die Berechnung des Betrages  $F_1$  der erforderlichen Kraft braucht man nur darauf hinzuweisen, daß z. B. bei zwei Rollen in einer Schere die Last an vier Seilstücken hängt, von denen jedes ein Viertel der Last trägt.

#### *Versuch*

Der aus zwei Flaschen mit je zwei oder drei neben- oder untereinanderliegenden Rollen bestehende Faktorenflaschenzug ist die bekannteste Form der Flaschenzüge (Abb. 3.4.10./1). Am unbelasteten Flaschenzug wird der Kraftmesser (vgl. MB 3.0.1.) auf Null gestellt, um die Gewichtskraft der unteren Schere zu kompensie-

ren. Um bei der Kraftmessung die Meßfehler klein zu halten, mißt man die Kräfte beim allmählichen Heben und beim allmählichen Senken der Last und bildet den Mittelwert.

#### Bemerkung

Die Abbildung 3.4.10./2 zeigt, wie der Versuch auch ohne Kraftmesser ausgeführt werden kann.

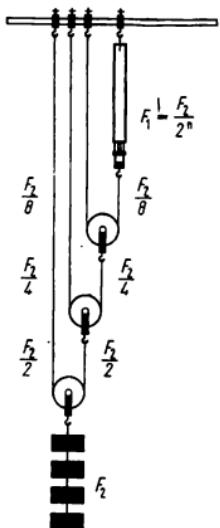


Abb. 3.4.9./1 Modell eines Potenzflaschenzuges

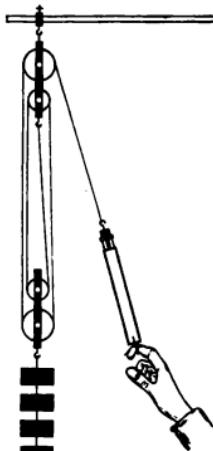


Abb. 3.4.10./1 Modell eines Faktorenflaschenzuges

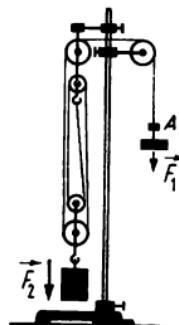


Abb. 3.4.10./2 Faktorenflaschenzug (A Hakenkörper als Gewichtsausgleich)

### 3.4.11. Der Differentialflaschenzug (Modell)

1. Stufenrolle
2. lose Rolle
3. Kraftmesser
4. Hakenkörper
5. Faden

#### Methodischer Hinweis

Das Experiment ist aus systematischen Gründen hier eingeordnet. Da man für die Herleitung der Gleichung für den Gleichgewichtszustand den Begriff des Drehmoments braucht, sollte vorher V 3.4.12. durchgeführt und ausgewertet werden. V 3.4.11. könnte dann der Wiederholung und Vertiefung dienen.

#### Versuch

Für das Modell eines Differentialflaschenzuges benutzt man eine Stufenrolle und eine lose Rolle. Das eine Schnurende bindet man an der Stufenrolle fest und windet

es einige Male um die kleinere Rolle (Abb. 3.4.11./1a). Das entspricht zwar nicht ganz der Wirklichkeit (Abb. 3.4.11./1b), ist aber nötig, weil die Reibung bei Verwendung eines Fadens sonst nicht ausreichen würde. Beim Gebrauchsmuster verwendet man statt des Seiles oft eine Kette. Zur Herleitung der Gleichung für die Berechnung des Betrages  $F_1$  der erforderlichen Kraft benutzt man den Momentensatz.

Wie aus der Abbildung 3.4.11./1b zu ersehen ist, wirken die in der folgenden Gleichung zusammengefaßten Drehmomente:

$$\frac{F_2}{2} \cdot R - \frac{F_2}{2} \cdot r - F_1 \cdot R = 0.$$

Das linksdrehende Moment wurde als positiv, die rechtsdrehenden als negativ eingesetzt. Löst man die Gleichung nach  $F_1$  auf, so erhält man den Betrag  $F_1$  der aufzuwendenden Kraft:

$$F_1 \cdot R = \frac{F_2}{2} (R - r),$$

$$F_1 = \frac{F_2 (R - r)}{2R}.$$

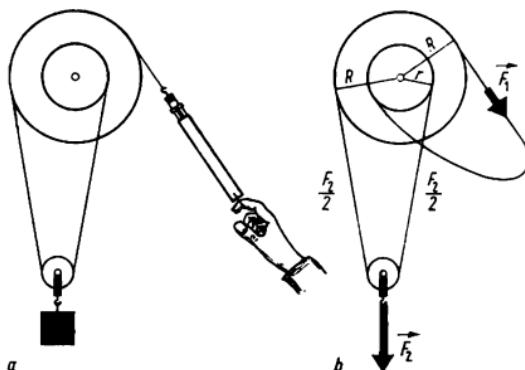


Abb. 3.4.11./1 Modell eines Differentialflaschenzuges

*Bemerkungen*

1. Zur Kompensation der Gewichtskraft der losen Rolle stellt man die Skale des Kraftmessers bei unbelastetem Flaschenzug auf Null (vgl. MB 3.0.1.).
2. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile aus dem SEG Mechanik benutzt. Die Stufenrolle erhält man, wenn man die Rollen mit den Durchmessern von 8 cm und 2 cm durch Verbindungsstifte miteinander verbindet.

**3.4.12. Das Drehmoment — Herleitung des Momentensatzes mit der Drehmomentenwaage**

1. Drehmomentenwaage

2. Hakenwägesatz

3. mehrere Kraftmesser

*Methodische Hinweise*

1. Zur Benutzung der Drehmomentenwaage vergleiche MB 3.0.4.!
2. Der Begriff *Drehmoment* kann durch V 3.4.3. vorbereitet werden (vgl. MH Nr. 3, V 3.4.3.).
3. Bei der ersten Benutzung des Gerätes sollte den Schülern sein Aufbau und seine Wirkungsweise erklärt werden.

4. Der Aufbau der Versuchsanordnung und das Abgleichen des Gerätes sollten bereits vor der Unterrichtsstunde erfolgen. Will man es für denselben Zweck, zur Messung von Drehmomenten, in mehreren Parallelklassen oder mehreren Unterrichtsstunden benutzen, dann braucht man es nicht zu zerlegen und dementsprechend auch nicht jedesmal neu abzulegen.

#### Aufbau und Abgleichen des Gerätes

Der Grundkörper der Drehmomentenwaage wird an einem Stativ befestigt und mit der Skalenscheibe versehen. Man benutzt die Skale 0 bis 50. Dazu gehört die rot gekennzeichnete Meßfeder. Hinter der Skalenscheibe ist ein verstellbarer Zeiger angebracht, dessen Spitze über den Skalenrand ragt. Er wird auf Null gestellt. Dann steckt man vor der Skalenscheibe auch den kürzeren Zeiger auf und stellt ihn ebenfalls auf Null. Die zum Gerät gehörenden Schnüre sind an einem Ende mit Nippeln versehen, die man in die dafür vorgesehenen Bohrungen in den Rillen am Rand der Momentenscheiben einsteckt. Die Scheiben bringt man nach ihrer Größe geordnet so an, daß die Nippel nach unten zeigen, und schraubt sie mit einer gerändelten Überwurfmutter fest.

Zum Abgleichen des Gerätes hängt man an die Schnur der mittleren Scheibe ( $r = 10 \text{ cm}$ ) einen Hakenkörper mit einer Masse von 100 g. Das Gerät müßte dann ein Drehmoment von  $\approx 0,1 \text{ N} \cdot \text{m}$  (10 Skalenteile) anzeigen. Meist ist der angezeigte Wert zu groß, dann verkürzt man die Meßfeder dadurch, daß man einen Teil ihrer ersten Windung durch die Bohrung der Klemme am verstellbaren Zeiger schiebt und sie erneut festklemmt.

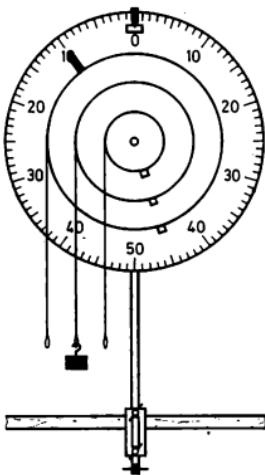


Abb. 3.4.12./1 Messung von Drehmomenten mit der Drehmomentenwaage; Verwendung von Hakenkörpern

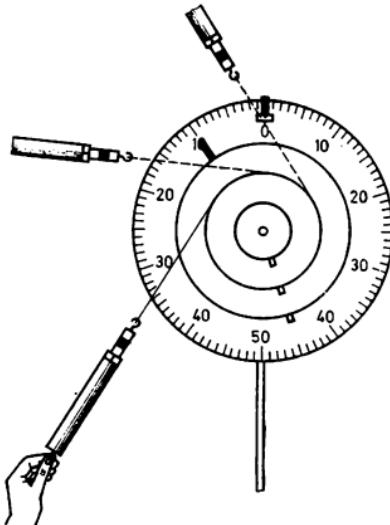


Abb. 3.4.12./2 Messung von Drehmomenten mit der Drehmomentenwaage; Verwendung von Kraftmessern

1. Teilversuch: Einführung des Begriffs Drehmoment

Man hängt nacheinander Hakenkörper mit einer Masse von 50 g, 100 g, 150 g und 200 g an die Schnur der kleinen Momentenscheibe ( $r = 5 \text{ cm}$ ) und notiert die angezeigten Werte in einer Tabelle. Die Meßreihe wiederholt man in der gleichen Weise auch mit den beiden größeren Momentenscheiben ( $r = 10 \text{ cm}$  und  $r = 15 \text{ cm}$ ) (Abb. 3.4.12./1).

Masse $m$ in kg	Gewichtskraft $F_G$ in N	Radius der Momentensch. $r$ in m	Drehmoment $F_G \cdot r$ in N · m	Anzeige in Skalenteilen
0,05	0,5	0,05	$2,5 \cdot 10^{-2}$	2,5
0,10	1,0	0,05	$5,0 \cdot 10^{-2}$	5,0
0,15	1,5	0,05	$7,5 \cdot 10^{-2}$	7,5
0,20	2,0	0,05	$10,0 \cdot 10^{-2}$	10,0
0,05	0,5	0,10	$5,0 \cdot 10^{-2}$	5,0
0,10	1,0	0,10	$10,0 \cdot 10^{-2}$	10,0
0,15	1,5	0,10	$15,0 \cdot 10^{-2}$	15,0
0,20	2,0	0,10	$20,0 \cdot 10^{-2}$	20,0
0,05	0,5	0,15	$7,5 \cdot 10^{-2}$	7,5
0,10	1,0	0,15	$15,0 \cdot 10^{-2}$	15,0
0,15	1,5	0,15	$22,5 \cdot 10^{-2}$	22,5
0,20	2,0	0,15	$30,0 \cdot 10^{-2}$	30,0

Aus der Tabelle kann abgelesen werden, daß der von der Drehmomentenwaage angezeigte Wert proportional dem Produkt aus der wirkenden Kraft und dem Radius der Momentenscheibe, dem Abstand der Wirkungslinie des Kraftvektors von der Drehachse, ist. Dabei entspricht ein Skalenteil jeweils  $10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ . Das Produkt aus der Kraft und dem Abstand ihrer Wirkungslinie von der Drehachse nennt man das *Drehmoment*.

Die Tabelle zeigt weiterhin, daß eine Kraft mit konstantem Betrag auf einen drehbaren Körper unterschiedliche Wirkungen ausübt, wenn der Abstand ihrer Wirkungslinie von der Drehachse verändert wird. Das wird besonders deutlich, wenn man z. B. einen Hakenkörper von 100 g ( $F_G \approx 1 \text{ N}$ ) nacheinander an die Fäden der drei Momentenscheiben anhängt.

2. Teilversuch: Verwendung von Kraftmessern

Statt der Gewichtskräfte von Hakenkörpern läßt man auf einen der Fäden die Spannkraft der Feder eines Kraftmessers wirken. Dabei kann man die im ersten Teilversuch gewonnenen Erkenntnisse bestätigen und erweitern. Man kann nämlich nachweisen, daß es gleichgültig ist, in welcher Richtung die Kraft wirkt (Abb. 3.4.12./2). Stets kommt es nur an auf den Betrag des Drehmoments

$$M = F \cdot r.$$

### 3. Teilversuch: Bestätigung des Momentensatzes

Zur Herleitung des Momentensatzes läßt man zwei oder mehr Kräfte in verschiedenen Richtungen gleichzeitig auf die Drehmomentenwaage einwirken. Man wählt die Kräfte so, daß sie sich in ihrer Wirkung insgesamt gegenseitig aufheben, d. h., daß der Zeiger auf Null zeigt (Abb. 3.4.12./3). Man liest dann die von den Kraftmessern angezeigten Kräfte ab und berechnet ihre Drehmomente. Es ist die Summe der linksdrehenden Momente gleich der Summe der rechtsdrehenden Momente. Setzt man die linksdrehenden Momente positiv und die rechtsdrehenden Momente negativ ein, dann ist die Gesamtsumme aller Drehmomente gleich Null. Diese Erkenntnis wird als *Momentensatz* bezeichnet:

Ein drehbarer Körper ist im Gleichgewicht, wenn die Summe aller Drehmomente gleich Null ist.

#### Bemerkungen

1. Im 1. und 2. Teilversuch kann man das durch eine Kraft hervorgerufene Drehmoment durch eine Vorspannung der Meßfeder kompensieren, indem man den über den Skalenrand ragenden Zeiger so verstellt, daß der kleinere Zeiger wieder auf Null zeigt. Dann gibt der äußere Zeiger den Betrag des Drehmoments an. Das Drehmoment kann immer als Differenzbetrag zwischen den beiden Zeigern abgelesen werden.
2. Im 2. Teilversuch können statt der Kraftmesser auch Hakenkörper verwendet werden, wenn man die Fäden wie im V 3.4.13. über feste Rollen führt.
3. Auch aus den Teilen des Gerätesatzes zur Demonstration mechanischer Schwingungen kann eine Drehmomentenwaage aufgebaut werden.

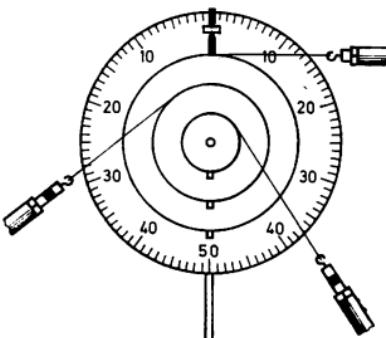


Abb. 3.4.12./3 Herleitung des Momentensatzes mit der Drehmomentenwaage

### 3.4.13. Bestätigung des Momentensatzes mit einer Momentenscheibe [SE]

#### Zu Variante a

1. Momentenscheibe
2. 2 Schnurverlängerer ⑧
3. Faden, Drahtstifte (kleine Nägel)
4. 2 Kraftmesser

#### Zu Variante b

- Geräte 1. bis 3., außerdem
5. 2 feste Rollen
6. Hakenkörper

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 3.0.4.!
2. Das Experiment kann zur Herleitung des Momentensatzes benutzt werden, wenn man eine Meßreihe durchführt und sie in Form einer Tabelle auswertet.

3. Während man mit der Drehmomentenwaage (V 3.4.12.) Drehmomente messen kann, können mit einer Momentenscheibe nur Drehmomente miteinander verglichen werden.

*Variante a: Verwendung von Kraftmessern*

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 3.4.13./1 dargestellt. Die Momentenscheibe wird auf einen Lagerzapfen gesteckt und an einem Stativ befestigt. Die Schnurverlängerer werden mit Drahtstiften am Rand der Momentenscheibe festgesteckt.

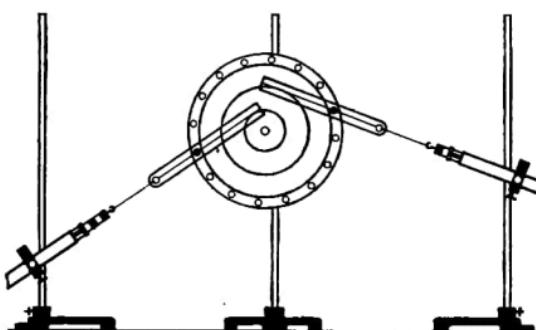


Abb. 3.4.13./1 Momentenscheibe im Gleichgewicht

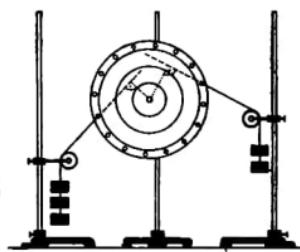


Abb. 3.4.13./2 Momentenscheibe im Gleichgewicht. (Schnurverlängerer gestrichelt angedeutet). Als Kräfte wirken die Gewichtskräfte von Hakenköpfen.

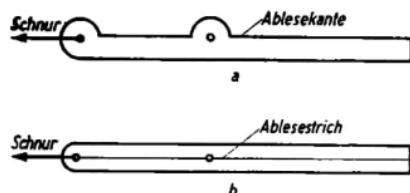


Abb. 3.4.13./3 Schnurverlängerer  
a) aus Pappe, b) aus Plast

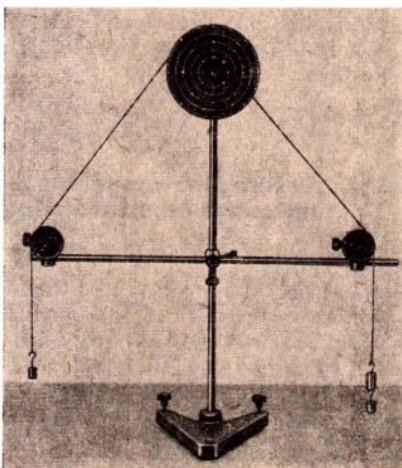


Abb. 3.4.13./4 Versuchsanordnung aus Teilen des SEG Mechanik

Man liest bei verschiedenen Stellungen bzw. bei verschiedenen Kraftwirkungen durch die Kraftmesser jeweils die Beträge der Kräfte und den Abstand der Wirkungslinien von der Drehachse ab. Ist die Scheibe im Gleichgewicht, dann ist

$$F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2 \quad \text{oder} \quad F_1 \cdot a_1 - F_2 \cdot a_2 = 0.$$

*Variante b: Verwendung von Hakenkörpern*

Statt der Kraftmesser wirkt die Gewichtskraft von Hakenkörpern, die Fäden sind über feste Rollen geführt (Abb. 3.4.13./2).

#### Bemerkungen

5. Zur Vermeidung instabiler Gleichgewichtslagen benutzt man als Angriffspunkte die in der Zugrichtung vorn liegenden Bohrungen zum Einsticken der Drahtstifte. Deshalb ist es zweckmäßig, sogenannte Schnurverlängerer (Abb. 3.4.13./3) zu verwenden, damit man den senkrechten Abstand der Wirkungslinie von der Drehachse gut messen kann. Man stellt die Schnurverlängerer aus Pappe oder Plast her.
2. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt. Die Momentenscheibe ist mit einer Vielzahl von Bohrungen versehen, die in konzentrischen Kreisen mit den Radien von 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm und 6 cm angeordnet sind. In die Bohrungen setzt man Kerbstifte ein, an denen die Fäden mit Schlaufen eingehängt werden können (Abb. 3.4.13./4).

### 3.4.14. Die Stufenrolle — Das Wellrad [SE]

1. Stufenrolle
2. Hakenkörper
3. Faden

#### Methodische Hinweise

1. Die Stufenrolle dient als Modell des Wellrades. In der Auswertung des Experiments sollte man darauf eingehen und Anwendungsbeispiele des Wellrades nennen. Dabei kann man darauf hinweisen, daß häufig statt der Rolle an der Welle eine Kurbel angebracht ist.
2. Zum Begriff *Seilmaschinen* vergleiche MB 3.0.4.!

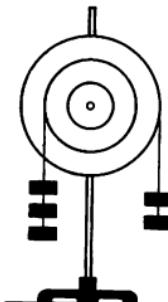


Abb. 3.4.14./1 Stufenrolle

#### Versuch

Die Stufenrolle wird mit ihrer Schere am Stativ befestigt oder auf einen Lagerzapfen gesteckt. Zum Befestigen des Fadens ist der Rand jeder Rolle mit einer Bohrung versehen, die von der Seite her in die Schnurlaufrolle führt. Das Fadenende wird hindurchgesteckt und verknotet. Mit Hakenkörpern stellt man Gleichgewicht her (Abb. 3.4.14./1). Es gilt die gleiche Beziehung wie im V 3.4.13.

#### Bemerkungen

1. Statt der Hakenkörper kann man auch zwei Kraftmesser verwenden.
2. Zu Schülerexperimentiergeräten und Getriebekästen gehören gewöhnlich Rollen mit verschiedenen Durchmessern, die man zu Stufenrollen zusammensetzen kann. Sie werden durch Stifte miteinander verbunden.

### 3.4.15. Kraftübertragung durch Riemen- oder Seiltrieb [SE]

1. 2 Stufenrollen      2. Hakenkörper      3. Faden

#### Methodische Hinweise

- Bei diesem Experiment wird man besonders die technische Bedeutung in den Vordergrund der Betrachtung stellen. Man kann den Versuchsaufbau nach Abbildung 3.4.15./1 als Modell für die Kraftübertragung am Fahrrad, am Motorrad, an Transmissionen, an Mähdreschern und anderen landwirtschaftlichen Maschinen und anderem mehr verwenden.
- Zum Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie vgl. MB 3.0.4.!

#### Versuch

Aus zwei Stufenrollen wird das Modell eines Riemen- oder Seiltriebes nach Abbildung 3.4.15./1 zusammengestellt. Es ermöglicht in einfacher Weise das Nachprüfen der für die Kraftübertragung durch Riementrieb geltenden Gleichgewichtsbedingung

$$F_1 : F_2 = r_1 : r_2 .$$

Hierin bedeuten  $r_1$  und  $r_2$  die Radien der verwendeten Rollen und  $F_1$  und  $F_2$  die Beträge der an beiden Stufenrollen jeweils angreifenden Kräfte.

Wichtig ist für den Schüler das Erkennen folgender Zusammenhänge:

- Untersetzung:  $r_1 : r_2 = 2 : 3$*   
Kraftgewinn — Geschwindigkeitsverlust,
- Übersetzung:  $r_1 : r_2 = 3 : 2$*   
Kraftverlust — Geschwindigkeitsgewinn

#### Bemerkungen

- Statt der Hakenkörper können auch zwei Kraftmesser verwendet werden.
- Zum Vergleich der Drehzahlen  $n_1$  und  $n_2$  bzw. zur Ermittlung des Übersetzungsverhältnisses  $i$  entfernt man die Hakenkörper und dreht eine der Scheiben mit der Hand. Es ist zweckmäßig, die Scheiben am Rande mit einer Marke zu versehen (Abb. 3.4.15./1), um die unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten und Drehzahlen zu verdeutlichen.
- Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Momentenscheibe Ø 12 cm, Rolle Ø 8 cm, Rolle Ø 4 cm, 2 Rollen Ø 2 cm, Verbindungsstifte, Faden, Hakenkörper) benutzt.

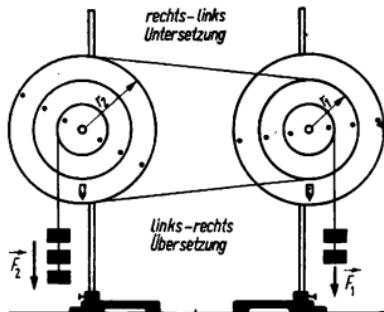


Abb. 3.4.15./1 Modell eines Riemen- oder Seiltriebes

### 3.4.16. Offener Riementrieb

1. Kleiner Getriebebausatz, davon werden benutzt:
  - a) Riemenscheibe ( $\varnothing$  177 mm)
  - b) Riemenscheibe ( $\varnothing$  74,5 mm)
  - c) Stellringe
  - d) Kurbelgriff
  - e) Riemen
2. Schraubenzieher

#### *Methodischer Hinweis*

Vergleiche MH Nr. 1 und 2, V 3.4.15.!

#### *Versuch*

Als Achszapfen dienen kurze Stativstäbe. Auf sie werden die Stellringe und Riemenscheiben geschoben und die Stellringe mit Hilfe der Madenschrauben befestigt. Der Abstand richtet sich nach der Länge des Riemens. Für die Aufnahme des Kurbelgriffs ist in der größeren Scheibe eine Bohrung mit Gewinde vorgesehen (Abb. 3.4.16./1).

#### *Bemerkung*

1. Um den Umschlingungswinkel an Riemenscheiben zu vergrößern, verwendet man häufig Spannrollen. Dazu kann die kleine Riemenscheibe ( $\varnothing$  30 mm) des Getriebebausatzes dienen (Abb. 3.4.16./2).
2. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt. An Stelle des Riemens verwendet man einen Gummiring.

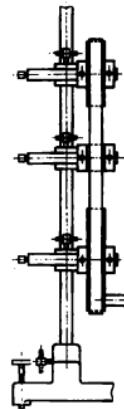
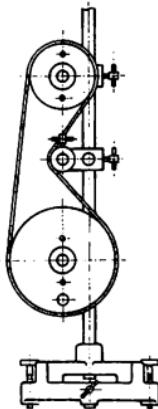
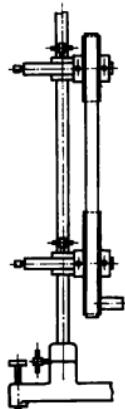
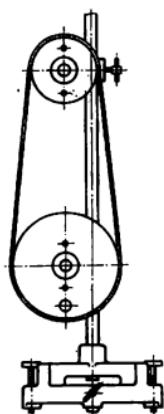


Abb. 3.4.16./1 Offener Riementrieb

Abb. 3.4.16./2 Riementrieb mit Spannrolle

### 3.4.17. Gekreuzter Riementrieb [SE]

Geräte 1. und 2. wie in V 3.4.16.

#### Methodischer Hinweis

Vergleiche MH Nr. 1 und 2, V 3.4.15.!

#### Versuch

Der Aufbau entspricht dem in V 3.4.16. Durch das Kreuzen des Riemens erzielt man eine Umkehrung der Drehrichtung zwischen der treibenden und der getriebenen Scheibe (Abb. 3.4.17./1) und einen größeren Umschlingungswinkel!

#### Bemerkung

Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt. An Stelle des Riemens verwendet man einen Gummiring.

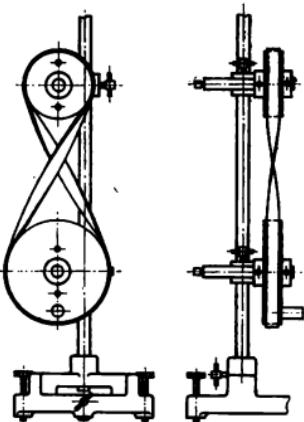


Abb. 3.4.17./1 Gekreuzter Riementrieb

### 3.4.18. Stufenscheibentrieb [SE]

1. Kleiner Getriebekreis, davon werden benutzt:
  - a) 2 Riemscheiben ( $\varnothing$  117 mm)
  - b) 2 Riemscheiben ( $\varnothing$  74,5 mm)
  - c) 2 Riemscheiben ( $\varnothing$  30 mm)
  - d) 4 Stellringe
  - e) 2 halbe Federn bzw. 2 Stifte  
zum Verbinden der Riemscheiben
  - f) Kurbelgriff
  - g) Riemen
2. Schraubenzieher

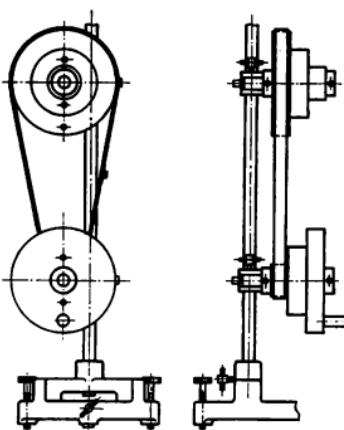


Abb. 3.4.18./1 Stufenscheibentrieb

***Methodische Hinweise***

1. Auch für dieses Experiment gilt sinngemäß MH Nr. 1, V 3.4.15.
2. Die Versuchsanordnung ist ein einfaches Modell für ein Getriebe mit mehreren unterschiedlichen Übersetzungsverhältnissen (Gängen).
3. Zum Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie vergleiche MB 3.0.5.!

***Versuch***

Je drei Riemenscheiben der verschiedenen Durchmesser werden miteinander auf einem kurzen Stativstab als Achse gesetzt und durch eine halbe Feder so miteinander verbunden, daß sie sich nicht gegeneinander verdrehen können. Durch Stellringe sind sie in ihrer Lage so zu begrenzen, daß sie sich trotzdem leicht drehen lassen.

Durch Umlegen des Riemens von einer Stufe zur anderen kann man verschiedene Übersetzungsverhältnisse einstellen (Abb. 3.4.18./1).

***Bemerkungen***

1. Bei zweistufigem Riemenscheibenantrieb verbindet man die beiden Scheiben mit kurzen Federn oder mit Rändelschrauben. Bei der Plastausführung sind dafür Metallstifte vorgesehen.
2. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt. Die Rollen mit verschiedenen Durchmessern werden durch Stifte miteinander verbunden, statt des Riemens verwendet man einen Gummiring.

**3.4.19. Einfacher Stirnradtrieb [SE]**

1. Kleiner Getriebebausatz,	d) 2 Gewinderinge
davon werden benutzt:	e) 4 Stellringe
a) Zahnrad mit 80 Zähnen	f) Kurbelgriff
b) Zahnrad mit 60 Zähnen	g) Hakenschlüssel
c) 2 Einradbuchsen	2. Schraubenzieher

***Methodische Hinweise***

1. Bei diesem Experiment wird man wie bei V 3.4.14. bis V 3.4.17. besonders die technische Bedeutung in den Vordergrund der Betrachtung stellen (vgl. MH Nr. 1, V 3.4.15.).
2. Es ist zweckmäßig, einen Vergleich mit der Versuchsanordnung V 3.4.15. anzustellen und auf Vorzüge und Nachteile einzugehen.
3. Zum Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie vergleiche MB 3.0.5.!

***Versuch***

Es werden zunächst die Buchsen in die Zahnräder eingesetzt, die Gewinderinge aufgeschraubt und mit dem Hakenschlüssel festgezogen, so daß die Buchsen fest mit den Zahnrädern verbunden sind. Man stecke nun die Zahnräder so auf die als Achsen dienenden Stativstäbe, daß die Gewinderinge der Buchsen an den Kreuzmuffen anliegen, mit denen die Achsen am Stativ befestigt sind, oder setzt auch dort einen Stellring dazwischen (Abb. 3.4.19./1). Die vordere Begrenzung des

Zahnrades wird durch einen Stellring gebildet, der so angeschraubt wird, daß das Zahnrad mit genügendem Spiel laufen kann. Durch Heben oder Senken einer Achse werden die Zähne zum Eingriff gebracht. Man stellt das Zahnspiel so ein, daß beide Räder leicht laufen. Das Übersetzungsverhältnis  $i$  und das Drehzahlverhältnis berechnet man nach den Gleichungen

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \quad \text{und} \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_2}{Z_1}.$$

wobei  $Z_1$  und  $n_1$  Zähneanzahl bzw. Drehzahl des treibenden Rades und  $Z_2$  und  $n_2$  die des getriebenen Rades sind.

*Bemerkungen*

1. Es ist zu beachten, daß der Drehsinn des getriebenen Rades dem des treibenden Rades entgegengesetzt ist.
2. Soll gleicher Drehsinn erzielt werden, schaltet man ein Zwischenrad beliebiger Zähneanzahl dazwischen. Es hat auf das Übersetzungsverhältnis keinen Einfluß.
3. Um das Übersetzungsverhältnis umzukehren, schraubt man den Kurbelgriff in das kleinere Zahnrad.

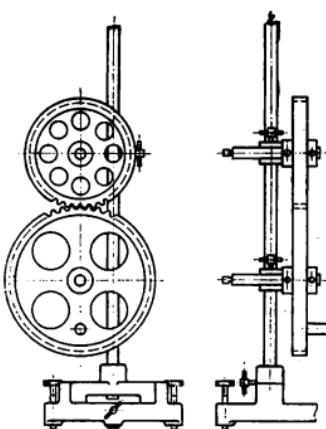


Abb. 3.4.19/1 Einfacher Stirnradtrieb

**3.4.20. Doppelte Zahnradübersetzung [SE]**

1. Kleiner Getriebebausatz, davon werden benutzt:
  - Zahnrad mit 80 Zähnen
  - Zahnrad mit 60 Zähnen
  - Zahnrad mit 40 Zähnen
  - Zahnrad mit 30 Zähnen
  - zwei Einradbuchsen
  - Doppelradbuchse
  - 3 Gewinderinge
  - 6 Stellringe
  - Kurbelgriff
  - Hakenschlüssel
2. Schraubenzicher

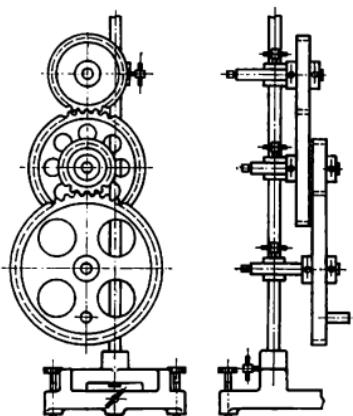


Abb. 3.4.20/1 Doppelte Zahnradübersetzung

**Methodische Hinweise**

1. Vergleiche MH Nr. 1, V 3.4.15.!
2. Zum Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie vergleiche MB 3.0.5.!

**Versuch**

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 3.4.20./1 zu ersehen. Die Einradbuchsen werden in die Zahnräder mit 80 bzw. 40 Zähnen eingesetzt. Mit der Doppelradbuchse verbindet man die Zahnräder mit 60 bzw. 30 Zähnen. Auf die Buchsen werden die Gewinderinge aufgeschraubt und mit dem Hakenschlüssel festgezogen. Die Räder werden auf kurze Stativstäbe gesteckt und diese mit Kreuzmuffen an einem Stativ befestigt. Das obere Zahnrad und die mittleren Zahnräder werden durch je einen Stellring auf der Achse in ihrer Bewegungsfreiheit begrenzt, ihr Gewindering liegt bereits an den Kreuzmuffen an. Es kann aber auch je ein Stellring dazwischen gesetzt werden (Abb. 3.4.20./1).

Das untere Zahnrad wird nach dem oberen ausgerichtet und durch zwei Stellringe festgelegt. Die Gesamtübersetzung kann man berechnen nach der Gleichung

$$i = \frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3}.$$

**Bemerkung**

Um das Übersetzungsverhältnis umzukehren, schraubt man den Kurbelgriff in das obere Zahnrad.

**3.4.21. Kräfte an der geneigten Ebene [SE]**

1. Geschlitztes Brett mit Halterungen
2. Wägelchen
3. 2 Zug- und Druck-Kraftmesser mit Zubehör (2 Kardanhälfte, 2 Druckstäbe, 2 Druckteller)
4. Hakenkörper
5. Maßstab
6. Tafelwinkelmesser

**Methodische Hinweise**

1. Die geneigte Ebene ist eine der ältesten kraftumformenden Einrichtungen. Sie diente z. B. bereits in frühgeschichtlichen Zeiten zum Aufrichten von Obelisken und zum Transport von riesigen Steinquadern zum Bau der Pyramiden.
2. Die geneigte Ebene kann zwei verschiedenartige Aufgaben erfüllen. Bei der Verwendung als Schrägaufzug, Verladerampe, Treppe, Keil, Messer u. dgl. nutzt man sie als kraftsparende Einrichtung. Als Ablaufberg in Rangieranlagen, als Ablauf- oder Gleitbahn in Industrieanlagen, als Anlauf zu Sprungschanzen, als Bob- oder Rodelbahn und in anderen industriellen und sportlichen Anlagen nutzt man die Hangabtriebskraft als Antrieb für Bewegungsvorgänge.

3. Wenn den Schülern die Winkelfunktionen noch nicht bekannt sind, lässt man die erste und zweite Spalte der Tabelle weg. In oberen Klassen dagegen kann man auf die Messung von  $l$  und  $h$  verzichten und die entsprechenden Spalten in der Tabelle weglassen.
4. Zum Satz von der Erhaltung der Energie vergleiche MB 3.0.5.!

*Versuch*

Der Aufbau erfolgt entsprechend der Abbildung 3.4.21./1a. Damit die zu messenden Kräfte groß sind gegenüber den Reibungskräften, die in den Kraftmessern auftreten, ist es zweckmäßig, das Wägelchen zu beladen. Die Kraft  $F_G$  ist gleich der Summe der Gewichtskräfte des Wägelchens und der zusätzlichen Hakenkörper. Sie wird vor dem Versuch mit einem Kraftmesser ermittelt. Beim Versuch stellt man die Kraftmesser so ein, daß das Wägelchen die geneigte Ebene gerade noch berührt oder sich um einige Millimeter abhebt. Mit einem Meßstab bestimmt man die Länge  $l$  und die Höhe  $h$  der geneigten Ebene (Abb. 3.4.21./1b) oder mißt mit einem Tafelwinkelmesser ihren Neigungswinkel.

Die Meßergebnisse werden in einer Tabelle zusammengestellt.

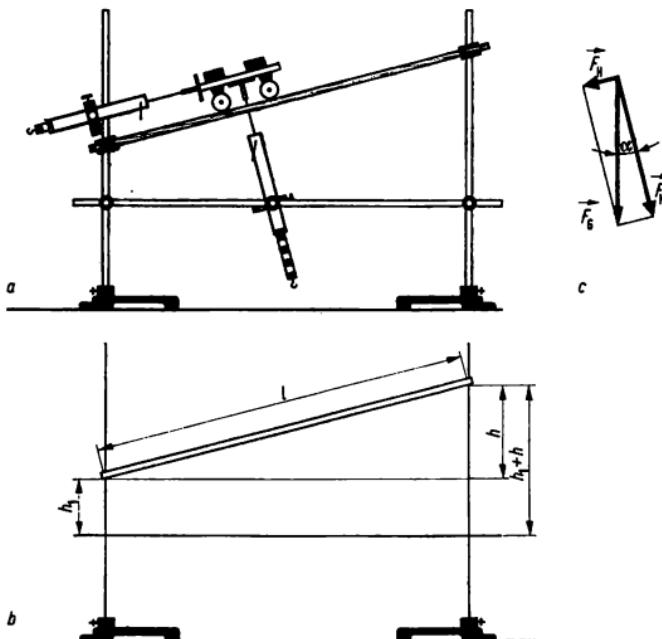


Abb. 3.4.21./1 Kräfte an der geneigten Ebene: a) Versuchsaufbau, b) Messung der Kenngrößen an der geneigten Ebene, c) Gleichgewicht der Kräfte an der geneigten Ebene ( $F_G$  Gewichtskraft des Körpers,  $F_H$  Hangabtriebskraft,  $F_N$  Normalkraft)

$\alpha$ in Grad	$\sin \alpha$	$l$ in cm	$h$ in cm	$\frac{h}{l}$	$F_H$ in N	$F_G$ in N	$F_N$ in N	$\frac{F_H}{F_G}$

Bei richtiger Einstellung und Ablesung müssen jeweils die Werte für  $\sin \alpha$ ,  $\frac{h}{l}$  und  $\frac{F_H}{F_G}$  gleich sein. Die Ergebnisse der Messung werden außerdem geometrisch bestätigt (Abb. 3.4.21./1c).

#### Bemerkungen

1. Statt der Druckkraftmesser können auch Zugkraftmesser benutzt werden, mit denen man jeweils die Gegenkräfte mißt.
2. Gleichgewicht kann auch durch die Gewichtskraft von Wägestücken hergestellt werden (Abb. 3.4.21./2).
3. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik (Experimentierbrett, Wagen, Rolle Ø 4 cm, Achszapfen, Hakenkörper, Faden) benutzt (Abb. 3.4.21./3). Zur Bestimmung der Kraft kann der Kraftmesser benutzt werden.

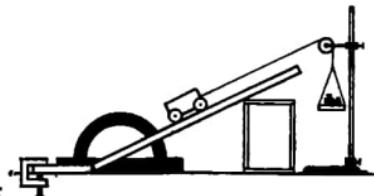


Abb. 3.4.21./2 Versuchsaufbau ohne Kraftmesser

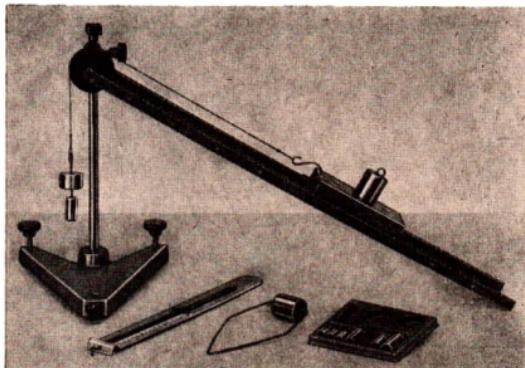


Abb. 3.4.21./3 Versuchsaufbau mit Teilen des SEG Mechanik

### **3.4.22. Modell einer Schraube**

#### *Zu Versuch 1*

1. Runder Bleistift
2. Papierblatt (A 4)

#### *Zu Versuch 2*

3. Rundholz ( $\varnothing$  15 mm bis 20 mm)
4. dicke Pappe
5. kleine Nägel

#### *Methodische Hinweise*

1. Mit diesem Experiment kann man zeigen, daß die Wirkungsweise einer Schraube auf die Kräfteverhältnisse an der geneigten Ebene zurückgeführt werden kann.
2. Man sollte nicht versäumen, auf den Unterschied zwischen einer *Schraubenfeder* (Kraftmesser) und einer *Spiralfeder* (Uhrfeder) hinzuweisen. Die Schraubenlinie ist eine Raumkurve, die Spirale eine ebene Kurve. Man kann durch einen Pappstreifen nicht nur eine Schraubenlinie, sondern auch eine Spirale darstellen.

#### *Versuch 1: Entstehen einer Schraubenlinie*

Man schneidet aus einem Blatt Papier ein rechtwinkliges Dreieck und hebt die Hypotenuse durch einen breiten schwarzen Strich hervor. Wickelt man dieses Blatt um einen Bleistift oder einen anderen zylindrischen Körper, dann entsteht eine Schraubenlinie (Abb. 3.4.22./1).

#### *Versuch 2: Herstellen eines Schraubenmodells*

Schneidet man aus dicker Pappe einen etwa 5 mm breiten Streifen und zieht ihn unter Druck einige Male über eine Tischkante, so kann man daraus leicht das Modell einer Schraubenlinie formen (Abb. 3.4.22./2). Windet man den Streifen um ein Rundholz und nagelt ihn mit kleinen Nägeln fest, so erhält man das Modell einer Schraube (Abb. 3.4.22./3).

#### *Bemerkungen*

1. Umfaßt man das Schraubenmodell mit drei Fingerspitzen als „Mutter“, so erkennt man anschaulich, daß durch Drehen des Rundholzes eine Verschiebung in der Richtung der Achse bewirkt wird.
2. Lötet man einen in Form einer Schraubenlinie gebogenen Draht an einen geraden Draht als Achse (Abb. 3.4.22./4) und taucht ihn in Seifenlösung, so bildet sich beim Herausziehen eine Schraubenfläche.

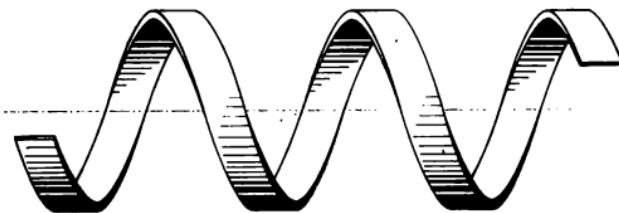


Abb. 3.4.22./2 Pappstreifen als Modell einer Schraubenlinie

Abb. 3.4.22./1 Papiermodell einer Schraubenlinie



Abb. 3.4.22./3 Schraubenmodell aus Rundholz und Pappstreifen



Abb. 3.4.22./4 Drahtgestell zur Erzeugung einer Schraubenfläche mittels Seifenlösung

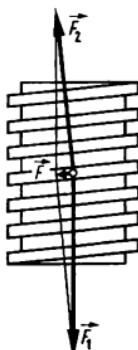


Abb. 3.4.22./5 Zerlegung der wirkenden Kraft  $\vec{F}$  an einer Schraube

3. Dem Verhältnis  $\frac{h}{l}$  der geneigten Ebene entspricht bei der Schraube das Verhältnis der Ganghöhe zum Umfang. Die Zerlegung der wirkenden Kraft  $\vec{F}$  in die beiden Komponenten  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$  zeigt die Abbildung 3.4.22./5.

### 3.4.23. Kräftezerlegung am Keil

1. 2 kombinierte Zug- und Druckkraftmesser mit Zubehör (2 Kardanhälterungen, 2 Druckstäbe, 2 Rollenaufsätze)
2. 1 Satz Keile (Verhältnis Rückenlänge zu Wangenlänge 1:1, 2:3, 1:2, 1:3)
3. Hakenkörper

#### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment sollte erst dann ausgeführt werden, wenn die Kräfteverhältnisse an der geneigten Ebene bereits bekannt sind. Man kann dann die Wirkung des Keils auf die der geneigten Ebene zurückführen.
2. Den Versuchsaufbau zeigt die Abbildung 3.4.23./1. Es wäre zwar konsequenter, die Rückenkraft durch einen Druckkraftmesser ausüben zu lassen, der Versuchsaufbau wird dann aber labiler. Es sollte darauf hingewiesen werden, daß Kräfte entlang ihrer Wirkungslinie verschoben werden können.

#### Versuch

Bei der Messung ist darauf zu achten, daß die Kraftmesser genau senkrecht zu den Wangen des Keiles stehen. Sie werden in dieser Stellung an den Halterungen arretiert. Man setzt den unbelasteten Keil ein und stellt die Kraftmesser auf Null. Belastet man den Keil durch Anhängen von Hakenkörpern, so zeigen die Kraft-

messet die Beträge der beiden Komponenten an. Man führt bei jedem Keil mehrere Messungen mit verschiedenen Belastungen durch und faßt die Meßwerte in einer Tabelle zusammen.

$\frac{a}{b}$	$F$ in N	$F_1$ in N	$\frac{F}{F_1}$

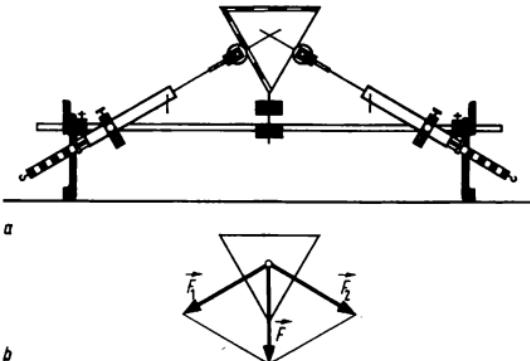
Die Tabelle zeigt, daß jeweils die erste und die letzte Spalte angenähert gleiche Werte enthalten. Es gilt also

$$\frac{F}{F_1} = \frac{a}{b}.$$

### Bemerkungen

1. Ist das Verhältnis der Rückenbreite zur Wangenbreite am Keil nicht angegeben, dann muß man es durch Messung erst ermitteln.
2. Bei diesen Versuchen machen sich im allgemeinen bereits Reibungskräfte bemerkbar, die sich auf die Meßwerte auswirken.

Abb. 3.4.23./1 Kraftzerlegung am Keil:  
a) Versuchsanordnung,  
b) schematische Darstellung



## 3.5. Arbeit und Leistung

### 3.5.1. Arbeit an der Rolle und am Flaschenzug — Arbeitsdiagramm

1. Feste Rolle	5. Hakenkörper
2. lose Rolle	6. Faden
3. Faktorenflaschenzug mit 6 Rollen	7. Vertikalmeßstab
4. Faktorenflaschenzug mit 4 Rollen	

### Methodische Hinweise

1. Mit Hilfe der bekannten Seilmaschinen wird ein Körper mit gleichbleibender Gewichtskraft  $F_2$  um die gleiche Strecke ( $h = 10 \text{ cm}$ ) gehoben. Zur Erhöhung der Anschaulichkeit wird der Körper bei allen Versuchen auf die Deckfläche eines Holzklotzes oder Kastens emporgehoben und dort abgelegt. Dadurch wird die Tatsache unterstrichen, daß jedesmal die gleiche Arbeit verrichtet wird.
2. Vergleiche MB 3.0.6.!

**Versuch**

Die Versuchsanordnung wird so aufgestellt, daß das absinkende Wägestück durch die Tischkante nicht behindert wird (Abb. 3.5.1./1). Die Sinkstrecke (*Kraftweg*  $s$ ) wird gemessen.

In einer Tabelle werden die Meßergebnisse übersichtlich zusammengefaßt.

**Beispiel**

Seilmaschine	$F_2$ in N	$h$ in m	$F_2 \cdot h$ in N · m	$F_1$ in N	$s$ in m	$F_1 \cdot s$ in N · m
feste Rolle	6	0,1	0,6	6	0,1	0,6
lose Rolle						
mit fester Rolle	6	0,1	0,6	3	0,2	0,6
mit 4 Rollen	6	0,1	0,6	1,5	0,4	0,6
mit 6 Rollen	6	0,1	0,6	1	0,6	0,6

Die Versuche lassen erkennen, daß die Produkte aus Kraft und Kraftweg von der gewählten Hebevorrichtung unabhängig sind. Sie ändern sich nur, wenn sich die Kraft  $F_1$  (Gewichtskraft der Last) oder der Weg  $h$  der Last ändern.

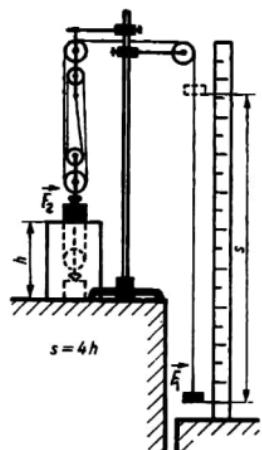


Abb. 3.5.1./1 Arbeit am Flaschenzug mit 4 Rollen

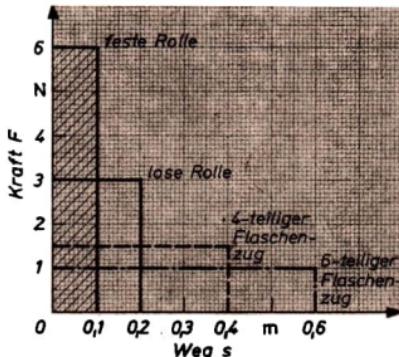


Abb. 3.5.1./2 Arbeitsdiagramme

Man definiert die Arbeit im physikalischen Sinne als Produkt aus Kraft und Kraftweg:

$$W = F \cdot s.$$

Die Einheit der Arbeit ist das Joule J.  
Es gilt  $1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$ .

### **Bemerkungen**

1. Man hängt an den Fäden nur so viele Hakenkörper an, daß Gleichgewicht herrscht. Dabei sinken diese Hakenkörper noch nicht von selbst ab, weil zum Überwinden der Reibung noch eine zusätzliche Kraft erforderlich ist.
2. Zur Einführung des Arbeitsbegriffs im Zusammenhang mit der Herleitung der Gleichgewichtsbedingungen an den Seilmaschinen siehe MB 3.0.5.
3. Man kann die Arbeit als Produkt aus Kraft und Kraftweg durch die Fläche eines Rechtecks veranschaulichen, das man erhält, wenn man den Weg als Abszisse und die Kraft als Ordinate in ein Koordinatensystem einträgt. Es entsteht so ein *Arbeitsdiagramm* (Abb. 3.5.1./2). Dabei wird vorausgesetzt, daß die Kraft längs des Weges konstant ist und Kraft und Weg gleiche Richtung haben.

### **3.5.2. Arbeit an der geneigten Ebene [SE]**

1. Geschlitztes Brett	5. Vertikalmeßstab
2. Wägelchen	6. rechteckiges Brett (etwa 15 cm × 30 cm)
3. feste Rolle	7. Tafelwinkelmesser
4. kleine Waagschale und Wägesatz oder Hakenkörper	

#### **Methodischer Hinweis**

Zur methodischen Eingliederung des Experiments vergleiche MB 3.0.5.!

#### **Versuch**

Versuchsanordnung und Durchführung des Versuches wie bei V 3.4.20. Zwei verschiedene Höhenlagen des Wagens werden dadurch eindeutig festgelegt, daß man ein rechteckiges Brett (etwa 15 cm × 30 cm) erst breitkant (Stellung I), dann hochkant (Stellung II) lotrecht in den Längsschlitz der geneigten Ebene stellt und den Wagen darauf aufsitzt läßt (Abb. 3.5.2./1). Beim Übergang von I zu II wird der Wagen (Kraft  $F_2$ ) um den Höhenunterschied der Brettkanten (Weg  $h$ ) gehoben. Gleichzeitig verschiebt er sich längs der Ebene um die Strecke  $s$ . Das auf der Waagschale liegende, das Gegengewicht darstellende Wägestück (Kraft  $F_1$ ) senkt sich dabei um die gleiche Strecke (Kraftweg  $s$ ), die mit einem Meßstab ermittelt wird. Als Beispiel sind die bei einer Versuchsreihe für verschiedene Neigungswinkel gemessenen Werte in einer Tabelle zusammengestellt.

Die Tabelle läßt erkennen, daß, von geringfügigen Abweichungen abgesehen, die Produkte aus Kraft und Kraftweg von der Neigung der geneigten Ebene unabhängig und dem Produkt aus der Gewichtskraft der Last und dem Weg der Last gleich sind

$$F_2 \cdot h = F_1 \cdot s .$$

Wie bei den Seilmaschinen und dem Hebel gilt auch hier das Produkt aus Kraft und Kraftweg als Maß für die Arbeit:

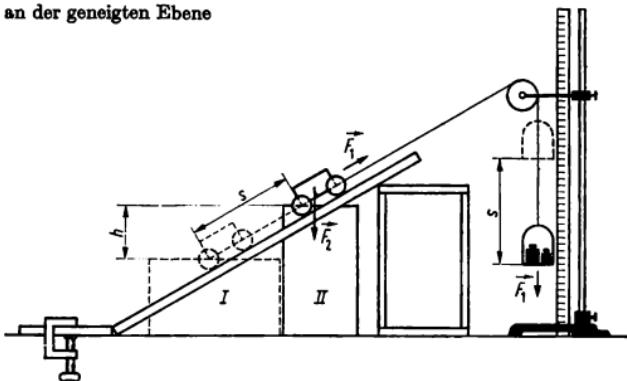
$$W = F \cdot s .$$

Sie wird in J, N · m oder W · s gemessen.

## Arbeitsverrichtung auf einer geneigten Ebene (Beispiel)

Neigungswinkel $\alpha$ in Grad	$F_2$ in N	$h$ in m	$F_2 \cdot h$ in N · m	$F_1$ in N	$s$ in m	$F_1 \cdot s$ in N · m
30	3,5	0,15	0,53	1,75	0,30	0,53
37	3,5	0,15	0,53	2,10	0,25	0,53
43	3,5	0,15	0,53	2,40	0,22	0,53
48	3,5	0,15	0,53	2,60	0,20	0,53

Abb. 3.5.2.1 Arbeit an der geneigten Ebene



## Bemerkungen

1. Zeichnung von Arbeitsdiagrammen wie bei V 3.5.1.
2. Zur Ausführung als Schülerexperiment vergleiche Bem. Nr. 3, V 3.4.21.

## 3.5.3. Ermittlung der Arbeit beim Spannen einer Feder [SE]

1. Schraubenfeder
2. Vertikalmeßstab
3. Hakenkörper (Wägesatz)

## Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment gleicht in der Anordnung V 3.2.1. Während aber dort das Hookesche Gesetz, die Eigenschaft der elastischen Schraubenfeder, betrachtet wurde, geht es hier um die zum Spannen der Feder aufzuwendende Arbeit. Die Schüler sollten den Begriff *mechanische Arbeit* und ihre Darstellung als *Fläche unter der Kraftkurve im F-s-Diagramm* bereits kennen. Dieses Experiment dient dann als Beispiel dafür, daß während des Arbeitsvorganges die Kraft nicht konstant bleibt. Da sie aber eine lineare Funktion des Weges ist, kann die Arbeit geometrisch oder mit elementaren Rechenoperationen ermittelt werden.

2. Wenn die Schüler bereits mit der Integralrechnung vertraut sind, kann dieses Experiment als Anwendungsbeispiel für die Berechnung der Arbeit nach der Gleichung

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds$$

genommen werden, weil die Gleichung für die Kraft als Funktion des Weges

$$F = \frac{F_1}{s_1} \cdot s$$

leicht gefunden werden kann (Abb. 3.5.3./1).

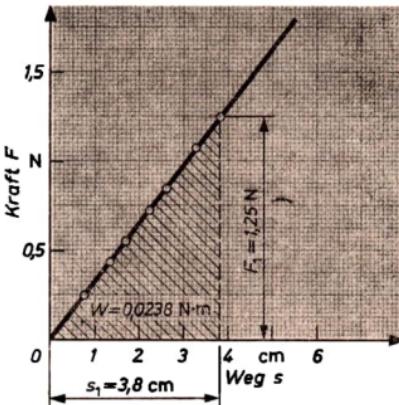


Abb. 3.5.3./1 Arbeit beim Spannen einer Feder als Fläche unter der Kraftkurve im Kraft-Weg-Diagramm

### Versuch

Die Versuchsanordnung gleicht der in V 3.2.1. (Abb. 3.2.1./1). Aus diesem Experiment ist bekannt, daß die elastische Verlängerung einer Schraubenfeder bis zum Erreichen der Elastizitätsgrenze der wirkenden Kraft proportional ist. Trägt man zusammengehörige Werte der Verlängerung  $s$  und der wirkenden Kraft  $F$  in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein, so liegen sämtliche Meßwerte auf einer, durch den Nullpunkt gehenden Geraden. Die Fläche des von dieser Geraden, der Wegachse und einer Ordinate begrenzten Dreiecks stellt die zum Spannen der Feder aufgewendete Arbeit dar (Abb. 3.5.3./1). Man kann sie berechnen nach der Gleichung

$$W = \frac{F_1 \cdot s_1}{2}$$

### Bemerkungen

1. Die zur Berechnung der Arbeit angegebene Gleichung gilt auch, wenn eine Schraubenfeder durch die Kraft  $F_1$  um  $s_1$  zusammengedrückt wird.
2. Die Schraubenfeder kann dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.
3. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt.

## 3.5.4. Arbeit und Leistung beim Ziehen eines Wagens [SE]

1. Handwagen	4. technischer Kraftmesser
2. Kiste mit Steinen (Mauerziegel) oder andere Last	5. Meßband (20 m)
3. Stoppuhr	

**Methodische Hinweise**

- Der besondere Wert dieses Experiments liegt darin, daß man auf besondere physikalische Unterrichtsmittel verzichtet und einen Vorgang des täglichen Lebens untersucht.
- Bei der Auswertung des Experiments sollte man darauf hinweisen, daß die aufgewandte Kraft, eine ebene und waagerechte Bahn vorausgesetzt, in erster Linie zur Überwindung der Reibung dient. Es handelt sich also um Reibungsarbeit.

**Versuch**

Eine Kiste mit Steinen wird auf einem Handwagen von einem Schüler auf dem Schulhof längs einer vorher in Metern abgesteckten Strecke gezogen. An einem an die Deichsel gebundenen technischen Kraftmesser wird die Zugkraft abgelesen. Bei genügend langer Deichsel — unter Umständen durch Strick verlängern — kann die Abweichung der Zugrichtung von der Waagerechten vernachlässigt werden. Die während des Zurücklegens der Strecke verflossene Zeit  $t$  wird mit einer Stoppuhr (Taschenuhr mit Sekundenzeiger) ermittelt.

Das Produkt aus Kraft und Weg liefert die *Arbeit*  $W$

$$W = F \cdot s.$$

Der Quotient aus Arbeit und Zeit ergibt die *Leistung*  $P$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t}.$$

**Bemerkung**

Man wiederhole den Versuch mehrmals und lasse den Wagen durch verschiedene kräftige Schüler ziehen. Auch ändere man die Länge der Fahrstrecke.

**3.5.5. Arbeit und Leistung beim Stangenklettern**

1. Kletterstange der Turnhalle	3. Stoppuhr
2. Meßband (20 m)	4. Personenwaage

**Methodische Hinweise**

- Das Experiment ist deswegen für die Schüler besonders eindrucksvoll, weil sie die Arbeit bzw. die Leistung bei einer turnerischen Übung, einem Vorgang des täglichen Lebens, bestimmen können.
- Nach der Massenbestimmung durch Wägung errechnet man die Körpergewichtskraft nach der Gleichung  $F_G = m \cdot g$ .

**Versuch**

Die Schüler, deren Körpergewichtskraft  $F_G$  bekannt sein muß, klettern eine Kletterstange bis zum Querbalken empor (Kopf in Balkenhöhe). Als Kletterhöhe  $h$  gilt die Differenz aus Stangenhöhe und Körperhöhe. Sie wird mit einem Meßband

bestimmt. Die Kletterzeit  $t$  wird mit der Stoppuhr ermittelt. Die Meßgenauigkeit einer Taschenuhr ist für diesen Versuch nicht ausreichend.

Das Produkt aus Körperfrequenzkraft und Kletterhöhe ergibt die verrichtete Arbeit

$$W = F_G \cdot h.$$

Der Quotient aus diesem Produkt und der Kletterzeit liefert die Leistung

$$P = \frac{F_G \cdot h}{t}.$$

Die Leistung wird in W angegeben:

$$1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 1 \text{ W}:$$

#### *Bemerkung*

Man wiederhole den Versuch mehrmals und wähle Schüler dazu aus, die sich in ihrer Körperfrequenzkraft, ihrer Größe und ihren Körperkräften möglichst unterscheiden.

### **3.5.6. Modellversuch zum Pronyschen Zaum [SE]**

1. Stufenrolle	3. Faden	5. Stoppuhr oder Taschenuhr
2. 2 Kraftmesser	4. Hakenkörper	mit Sekundenzähler

#### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment und die beiden folgenden (V 3.5.7. und V 3.5.8.) haben Bedeutung für die polytechnische Bildung. In der Praxis bestimmt man mit Hilfe des Pronyschen Zaumes die Abhängigkeit der Drehzahl eines Motors von der Belastung bzw. seinen Wirkungsgrad, das Verhältnis der abgegebenen Arbeit zur zugeführten.

#### *Versuch*

Die Stufenrolle gestattet in anschaulicher Weise die Durchführung eines Modellversuches zum Pronyschen Zaum nach Abbildung 3.5.6./1. Die Anordnung stellt einen sogenannten *Seilzaum* dar. Die große Rolle, auf die ein Körper mit der Gewichtskraft  $F_G$  einwirkt, verkörpert den Motor, die kleine Rolle, an der der Zaum angreift, die Motorachse (Radius  $r$ ). Im Ruhezustand zeigen beide Kraftmesser die gleiche Kraft  $F$ , die Spannkraft des Zaumes an. Bei laufendem „Motor“ zeigen beide Kraftmesser unterschiedliche Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  an. Ihre Differenz  $F_2 - F_1$  ist die Reibungskraft  $\Delta F$ . Die von der Kraft  $F_G$  verrichtete Arbeit ist demnach

$$W = \Delta F \cdot s.$$

Den Weg  $s$  errechnet man als Produkt aus dem Umfang der kleinen Rolle

$$u = 2 \cdot \pi \cdot r$$

und der Anzahl  $k$  der Umdrehungen.

Somit ist

$$W = \Delta F \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot k.$$

Bei  $k$  Umdrehungen in  $t$  Sekunden, findet man die Leistung

$$P = \Delta F \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{k}{t}.$$

Zum Bestimmen von  $t$  genügt eine Uhr mit Sekundenzeiger;  $k$  wird durch unmittelbares Auszählen der Umläufe ermittelt (Strichmarke beobachten).

#### Bemerkungen

1.  $F$  muß so gewählt werden, daß der Fallkörper nicht beschleunigt wird, sondern langsam mit konstanter Geschwindigkeit absinkt.
2. Man erhält den *Wirkungsgrad*  $\eta$  der „Maschine“, indem man die an den Seilzaum abgegebene Arbeit mit der in gleicher Zeit beim Absinken des Fallkörpers mit der Gewichtskraft  $F_G$  um die Höhe  $h$  zugeführten Arbeit vergleicht:

$$\eta = \frac{\Delta F \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot k}{F_G \cdot h}.$$

3. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik benutzt. (Vgl. Bem. Nr. 2, V 3.4.13.1.)

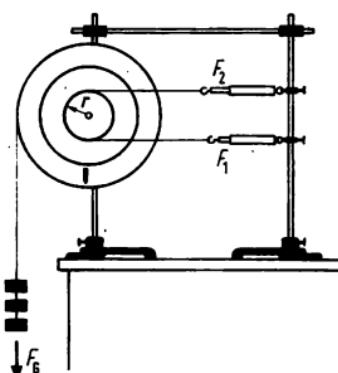


Abb. 3.5.6./1 Modell eines Seilzaumes

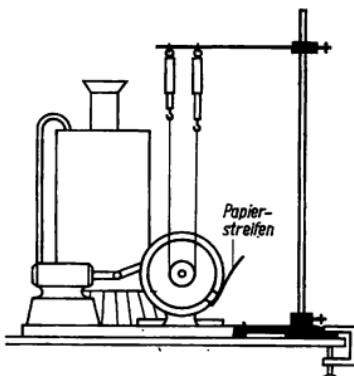


Abb. 3.5.7./1 Seilzaum an einer Modell-dampfmaschine

### 3.5.7. Pronyscher Zaum an einer Modell dampfmaschine [SE]

1. Modell dampfmaschine	3. Faden	5. Stoppuhr oder Taschenuhr mit Sekundenzeiger
2. 2 Kraftmesser	4. Meßschieber	

### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH, V 3.5.6.!
2. Dieses Experiment gleicht in der Anlage und in der Durchführung völlig dem Modellversuch V 3.5.6. Er findet bei den Schülern besonderes Interesse, weil es für sie reizvoll ist, die Leistung der von ihnen zur Verfügung gestellten Modell-dampfmaschine zu bestimmen.

### Versuch

Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 3.5.7./1 wiedergegeben. Zum Feststellen der Drehzahl benutzt man zweckmäßigerweise akustische Zeichen, die von einem an das Schwungrad gebundenen Papierstreifen durch Anschlag gegeben werden. Zur Zeitnahme genügt eine Taschenuhr mit Sekundenzeiger. Der Durchmesser der Schnurscheibe, an der der Seilzaum angreift, wird mit dem Meßschieber ausgemessen.

### Bemerkung

Bei hoher Drehzahl versagt die Methode des Auszählens. Man verwendet dann einen Drehzahlmesser.

## 3.5.8. Pronyscher Zaum an einem Elektromotor

1. Elektromotor (Experimentiermotor)
2. Backenbremse aus Holz ⑧, dazu erforderliches Material:
  - a) Holzleiste (2 cm × 1 cm × 50 cm)
  - b) Holzleiste (2 cm × 1 cm × 6 cm)
  - c) 2 Holzschrauben
3. Kraftmesser
4. Drehzahlmesser
5. Meßschieber

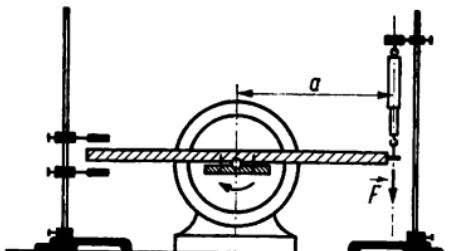


Abb. 3.5.8./1 Backenzaum am Elektromotor

### Methodischer Hinweis

Vergleiche MH, V.3.5.6.!.

### Versuch

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 3.5.8./1 dargestellt. Die als Zaum dienende Backenbremse lässt sich aus einer etwa 50 cm langen Holzleiste und einem mit zwei Holzschrauben daran befestigten Backenstück leicht herstellen. Die Aushöhlung muß der Motorachse angepaßt sein. Den Durchmesser der Welle des Motors bestimmt man mit einem Meßschieber. Die Drehzahl  $n$  wird mit einem Drehzahlmesser ermittelt.

Bedeutet  $F_R$  die an der Achse auftretende Reibungskraft,  $r$  den Radius der Motorachse,  $n$  die Drehzahl, d. h. die Anzahl der Umdrehungen je Sekunde, so beträgt die Motorleistung

$$P = F_R \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n.$$

Es sei  $F$  die angezeigte Kraft und  $a$  die Länge des Hebelarmes des Zaumes. Dann ist im Falle des Gleichgewichts

$$F_R \cdot r = F \cdot a,$$

und es ergibt sich

$$P = F \cdot 2 \cdot \pi \cdot a \cdot n.$$

#### *Bemerkungen*

1. Durch Einstellen der Stativklemme ist dafür zu sorgen, daß während des Versuchs der Kraftmesser senkrecht zur Holzleiste steht.
2. Zwei an ein Stativ geklemmte Holzstücke dienen als Anschläge, damit ein Mitdrehen des Zaumes verhütet wird.

## 4. Translatorische Bewegungen

### 4.0. Methodische Bemerkungen

4.0.1. Bei der gleichförmigen geradlinigen Bewegung führt man den Begriff der *Geschwindigkeit* ein. An eine Versuchsanordnung zur Herleitung der Gesetze dieser Bewegung muß man die Forderung stellen, daß sie unkompliziert und für die Schüler leicht zu übersehen ist und eine langsame Bewegung mit möglichst konstanter Geschwindigkeit demonstriert. Im Unterrichtsmittelangebot gibt es bereits eine ganze Reihe von Geräten, die diesen Forderungen entsprechen.

Das *Bandgerät* (Abb. 4.0.1./1) besteht aus einem Grundgerät von 2 m Länge und Ergänzungsschienen von 1 m und 2 m Länge. Dadurch kann es sowohl als Demonstrationsgerät auf dem Experimentiertisch und als Gerät für Schülerexperimente über die gesamte Länge des Fachunterrichtsraumes eingesetzt werden. Auch der *Schienenwagen* mit den 2 m langen Schienen (Abb. 4.0.1./2) erfüllt diese Forderungen. Durch seine Größe und durch die Vielseitigkeit seiner Einsatzmöglichkeiten kann er besonders für Demonstrationsexperimente empfohlen werden.

Zum Einsatz des Bandgerätes und des Schienenwagens muß ein leistungsfähiger *Experimentiermotor* mit Untersetzungsgetriebe und möglichst mit Drehzahlregelung zur Verfügung stehen. Der vom Staatlichen Kontor für Unterrichtsmittel angebotene Experimentiermotor (Abb. 4.0.1./3) entspricht diesen Anforderungen. Seine Drehzahl ist in weiten Grenzen regelbar. Durch ein Untersetzungsgetriebe kann der Drehzahlbereich von 40 Umdrehungen je Minute bis 1000 Umdrehungen je Minute

Abb. 4.0.1./1 Bandgerät mit angeschlossenem Demonstrationstachometer

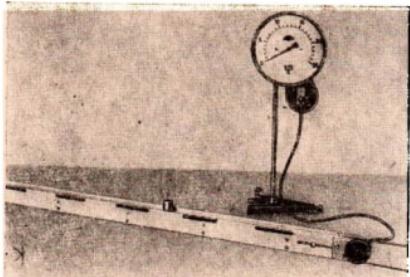
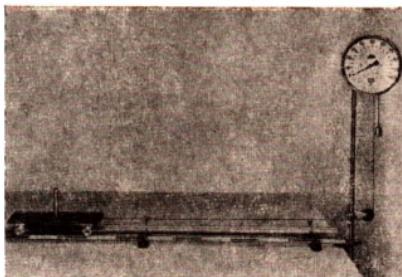


Abb. 4.0.1./2 Schienenwagen mit Demonstrationstachometer



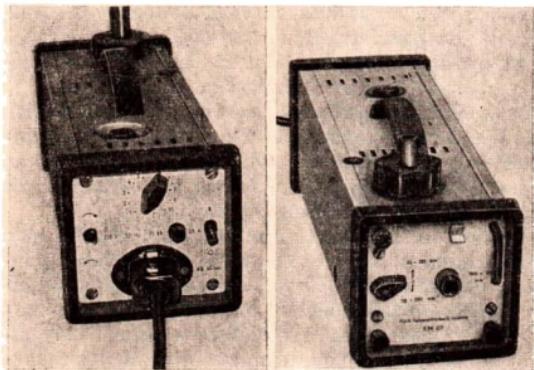
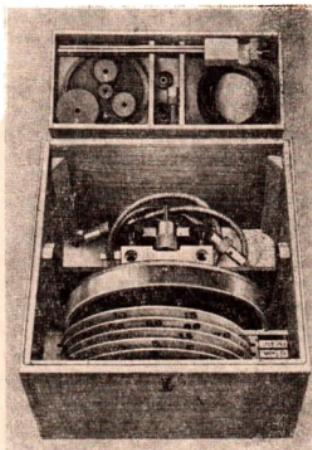
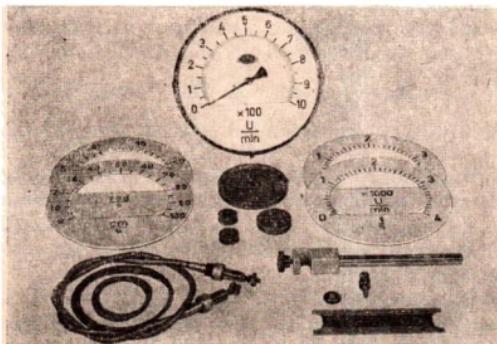


Abb. 4.0.1./3  
Experimentermotor

eingestellt werden. Er kann in beliebiger Lage an Stativen befestigt und benutzt werden. Durch verschiedene Zubehörteile kann er im Unterricht sehr vielseitig verwendet werden.

Eine wesentliche Bereicherung des Unterrichtsmittelangebots stellt auch das Demonstrationstachometer (Abb. 4.0.1./4) dar. Es kann in Verbindung mit dem Bandgerät und dem Schienenwagen u. a. m. benutzt werden. Es hat 3 Drehzahlbereiche, 3 Geschwindigkeitsmeßbereiche, 3 Bereiche zur Messung der Kreisfrequenz und einen Bereich zur Messung der Winkelgeschwindigkeit. Dadurch ist es ebenfalls universell verwendbar.

Abb. 4.0.1./4 Demonstrationstachometer:  
a) Einzelteile. b) im Aufbewahrungskasten



Der Reifenapparat liefert bei richtiger Justierung sehr exakte Meßwerte. Man kann mit ihm die meisten Gesetze der translatorischen Bewegung und der Drehbewegung in überzeugender Weise herleiten. Er sollte in keiner Unterrichtsmittelsammlung fehlen.

Um zu vermeiden, daß bei Experimenten zur translatorischen Bewegung die Aufmerksamkeit der Schüler durch die Rotation des Reifens von der Bewegung des Zeigers am Faden abgelenkt wird, wurde der früher übliche Reifen durch einen Metallzylinder ersetzt. Die Rotation dieses Körpers ist weniger auffällig.

Außerdem wurden einige Verbesserungen vorgenommen. So wurde für den Antrieb eine Dreistufenrolle mit den Radien 5 mm, 10 mm und 15 mm und eine Startvorrichtung vorgesehen. Zur Ausstattung gehören unter anderem ein kleiner Reifen, eine Drehstange, mehrere unterschiedliche zylindrische Körper und verschiedene Torsionsdrähte zur Untersuchung von Torsionsschwingungen.

Die besten Meßergebnisse im Bereich der Kinematik und Dynamik erreicht man bei der Verwendung einer Luftkissenbahn. Im V 4.1.8. wird eine Anleitung zur Herstellung einer solchen Bahn gegeben. Da der Körper, dessen Bewegung untersucht werden soll, auf einem Luftkissen schwebt, ist die auftretende Reibung vernachlässigbar klein. Die erzielte Genauigkeit der Meßwerte hängt bei entsprechender Präzision der Bahn in erster Linie von dem gewählten Meßverfahren ab. Die Experimente mit der Luftkissenbahn zeichnen sich besonders durch die Einfachheit der Anordnungen aus, da alle Maßnahmen zur Verringerung der Reibung bzw. zu ihrer Kompensierung entfallen.

In vielen Sammlungen sind noch Galileische Fallrinnen und Fallmulden nach Duff vorhanden. Deshalb wurden auch Versuchsbeschreibungen zu diesen Geräten aufgenommen. Die Galileische Fallrinne hat nicht nur geschichtliche Bedeutung. Sie ist ein Gerät, das wegen seines einfachen Aufbaues auch im heutigen Physikunterricht seine Daseinsberechtigung hat. Besonders in Verbindung mit elektrischen oder elektronischen Zeitmeßeinrichtungen liefert die Fallrinne sehr genaue Meßwerte. Bedenken, die erhoben werden könnten, weil die Bewegung nicht rein translatorisch ist, erscheinen dem Verfasser nicht stichhaltig, da sie die Zusammenhänge, die zur Herleitung des Weg-Zeit-Gesetzes und des Geschwindigkeit-Zeit-Gesetzes führen, nicht berühren.

Bei der Erarbeitung des *Geschwindigkeitsbegriffs* sind grundsätzlich alle Formulierungen zu vermeiden, in denen die Geschwindigkeit als Weg bezeichnet wird. Insbesondere darf die Geschwindigkeit nicht als der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg definiert werden. Sie muß von den Schülern, zunächst im Sinne der *Durchschnittsgeschwindigkeit*, von Anfang an als *Quotient aus Weg und Zeit* erkannt

werden und ist in den Einheiten  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ ,  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  oder  $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$  zu messen. Das Umrechnen der Einheiten  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$  in  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  und umgekehrt bereitet den Schülern erfahrungsgemäß oft

Schwierigkeiten und sollte deshalb gründlich geübt werden. Zur Zeitmessung genügt bei den meisten Experimenten das Metronom. Es hat bei bestimmten Experimenten gegenüber anderen Zeitmeßgeräten sogar Vorteile (Vgl. MB 1.0.3. und V 1.3.5.). An Stelle des Metronoms kann auch die Zentraluhr verwendet werden, wenn man mit ihr akustische Signale erzeugt.

Der *elektrische Kurzzeitmesser*, die *Demonstrationsstoppuhr* (Abb. 4.0.1./5), wird an eine Wechselspannung von 220 V angeschlossen. Sie ist außerdem mit Anschlüssen für eine Spannungsquelle (4 V-), dem Haltemagneten, der Kontaktplatte und einem Zählwerk versehen. Mit einem kleinen Hebel kann man den Zeiger auf Null stellen. Drückt man die Starttaste an ihrer Vorderseite, dann wird der Haltemagnet stromlos, und die Uhr wird in Gang gesetzt. Sie wird gestoppt, wenn die Kontaktplatte abgeklappt wird. Ist die Kontaktplatte nicht angeschlossen, so läuft die

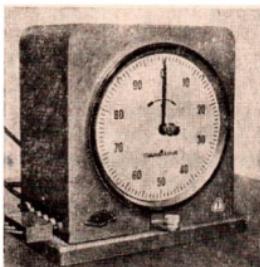


Abb. 4.0.1/5 Elektronischer  
Kurzzeitmesser  
(Demonstrationsstoppuhr)

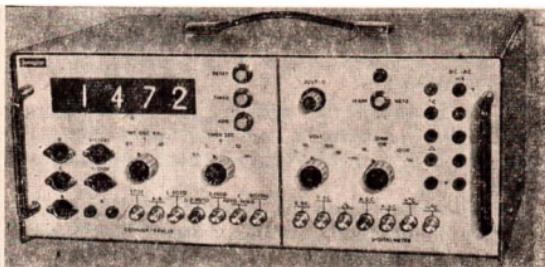


Abb. 4.0.1/6 Als elektronisches Impulszählgerät  
verwendbares  
„Digitales Vielfachmeßgerät“

Uhr nur solange man die Starttaste drückt. Sobald man sie losläßt, wird auch die Uhr gestoppt. Sie wirkt dann ähnlich wie eine gewöhnliche Stoppuhr. Man kann die gemessene Zeit mit einer Genauigkeit bis auf Hundertstel Sekunden ablesen. Da aber die vollen Sekunden nicht mitgezählt und angezeigt werden, muß man die Umläufe zählen. Man kann aber auch an die beiden Buchsen an der rechten Seite der Uhr über eine zusätzliche Spannungsquelle von etwa 4 V bis 12 V ein mechanisches Zählwerk (Postzählwerk) anschließen, das die Umläufe (Sekunden) zählt. **Elektronische Impulszählgeräte** (Abb. 4.0.1/6) registrieren die Anzahl elektrischer Impulse. Man kann sie sehr gut zur Zeitmessung verwenden, wenn man einen Impulsgenerator mit konstanter und bekannter Frequenz anschließt. Eine pulsierende Gleichspannung mit einer Frequenz von 100 Hz erhält man durch Vollweggleichrichtung einer Wechselspannung von 50 Hz. Im „Digitalen Vielfachmeßgerät“ im Digitalzähler Polydigit sind frequenzkonstante Impulsgeneratoren für Zeitmessungen eingebaut.

Bei Generatoren mit einer Frequenz von 100 Hz beträgt die Meßgenauigkeit etwa eine Hundertstel Sekunde. Wird eine größere Meßgenauigkeit gefordert, müssen Frequenzgeneratoren höherer Frequenz verwendet werden.

Bei Experimenten zur gleichförmigen geradlinigen Bewegung kann man erst nach einer Anlaufstrecke mit der Zeitmessung beginnen. Dafür ist die Gerätekombination mit dem Haltemagnet und der Kontaktplatte oder dem mechanischen Torschalter ungeeignet. Der Haltemagnet kann zwar zum Start der Kugel verwendet werden, aber der Start des Zeitmessers darf erst erfolgen, wenn die Geschwindigkeit der Kugel konstant bleibt. Für solche Experimente eignet sich eine *Start-Stopp-Einrichtung* mit zwei Lichtschranken (vgl. MB 4.0.2.).

Bei Schülerexperimenten wird im allgemeinen eine Handstoppuhr verwendet.

Die **Zentraluhr** (Abb. 4.0.1/7) ist vielseitig einsetzbar. Sie dient zur Zeitmessung im Bereich bis zu 60 s, zur Vorwahl fester oder beliebiger Zeitabschnitte bis 60 s, als Impulsgenerator mit akustischer Anzeige (an Stelle des Metronoms), in Verbindung mit dem digitalen Zählgerät Polydigit zu Zeitmessungen über 1 min und zu zeitintegrierenden Messungen als Timer und zum Schalten externer Stromkreise. Die Tasten auf der Oberseite des Gerätes haben folgende Funktionen:

- Die „Ein“-Taste ist der Netzschalter.
- Mit der Taste „Messen“ setzt man die Uhr in Gang. Durch erneutes Drücken wird sie wieder gelöst und die Uhr gestoppt.

#### 4.0.1.

Die Funktionen der Tasten „Programm“, „Signal“ und des Rasthebels sind bezüglich ihrer Stellungen voneinander abhängig.

- Mit dem „Rasthebel“ kann man feste Zeiten ( $\infty$ , 1 s, 5 s, 6 s, 10 s, 15 s, 30 s, 60 s) einstellen.
- Mit der Taste „Signal“ wird der eingebaute Summer eingeschaltet.
- Ist die Taste „Programm“ nicht gedrückt, ertönen bei gedrückter Taste „Signale“ periodisch in den mit dem Rasthebel eingestellten Intervallen akustische Signale.
- Bei gedrückter Taste „Programm“ wird nach dem mit dem Rasthebel eingestellten Zeitabschnitt die Uhr gestoppt. Ist dabei die Taste „Signal“ gedrückt, ertönt ein Dauersignal.

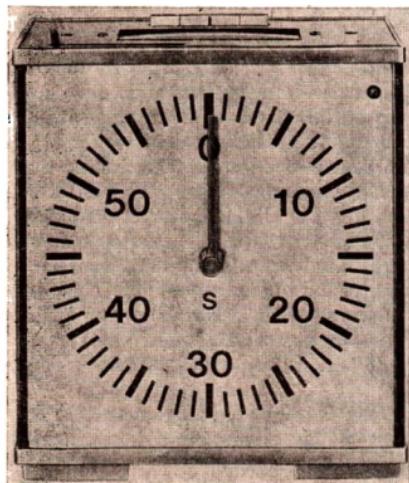
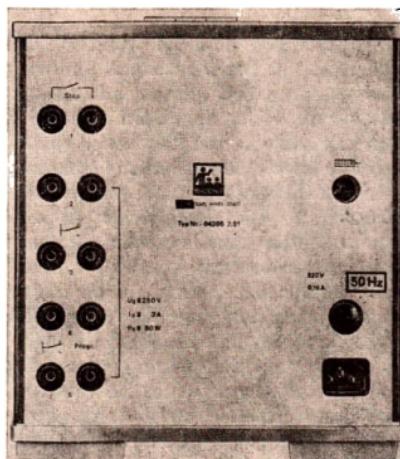


Abb. 4.0.1/7 Zentraluhr: a) Vorderseite,



b) Rückseite

Die Anschlußbuchsen und Anschlußelemente auf der Rückseite haben folgende Bedeutung:

- Dem Buchsenpaar ① kann eine stabilisierte Gleichspannung von 12 V (max. 0,5 A, kurzschlußfest) entnommen werden.
- Mit dem Buchsenpaar ② ist eine Start-Stopp-Fernbedienung möglich. Bei der Überbrückung dieser Buchsen wird die Uhr gestoppt.
- Am Buchsenpaar ③ ist ein Arbeitskontakt für einen externen Stromkreis angeschlossen. Ist die Taste „Programm“ nicht gedrückt, dann wird dieser Kontakt in den eingestellten Intervallen kurzzeitig geschlossen.
- Die Buchsenpaare ④ und ⑤ sind mit einem Ruhekontakt und einem Arbeitskontakt für einen externen Stromkreis verbunden. Bei gedrückter Taste „Programm“ wird dieser Stromkreis nach dem eingestellten Zeitabschnitt geöffnet bzw. geschlossen.

Für die externen Stromkreise betragen die maximale Schaltspannung 250 V, die maximale Schaltstromstärke 3 A und die maximale Schaltleistung 50 W.

- Die Diodenbuchse dient dem Anschluß der Zentraluhr an den Digitalzähler Polydigit. Für diesen Zweck wird mit dem Zubehör ein Verbindungskabel geliefert.

Für den Einsatz der Zentraluhr ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- Sie kann für Zeitmessungen als Stoppuhr (direkt oder ferngesteuert) benutzt werden, wobei auch eine akustische Kontrolle der abgelaufenen Zeit vorgenommen werden kann.
- Sie kann als Schaltuhr mit frei wählbaren Zeiten bis 60 s eingesetzt werden. Die Vorwahl beliebiger Zeiten bis zu 60 s ist möglich, indem die Festzeit 60 s mit dem Rasthebel eingestellt und der Zeiger um den entsprechenden Betrag von Null aus zurückgestellt wird.
- In Verbindung mit dem Digitalzähler Polydigit sind Impulsraten bzw. Drehzahlmessungen möglich. Dabei steuert die Taste „Messen“ der Zentraluhr die Torschaltung des Zählers.

Ist die Taste nicht gedrückt, so ist das Tor gesperrt und wird mit dem Drücken der Taste geöffnet. Bei nicht gedrückter Taste „Programm“ werden die mit dem Rasthebel eingestellten Einzelsignale gezählt.

Wird die Festzeit 60 s eingestellt, erhält man bei Zeitmessungen, die sich über längere Zeiten erstrecken, am Polydigit die Anzeige der abgelaufenen vollen Minuten. Dazu wird dort die Schablone „min“ eingesetzt.

Ist die Taste „Programm“ gedrückt, dann wird die Uhr nach Ablauf der vorge-wählten Festzeit gestoppt. Dabei wird auch die Torstufe des Polydigit automa-tisch gesperrt. Während des eingestellten Zeitabschnitts können Impulse von externen Signalquellen, z. B. einem Zeitmarkengeber, vom Zählrohradapter oder einer Lichtschranke gezählt, d. h. Impulsraten bzw. Drehzahlen o. ä. ge-messen werden.

## 4.0.2. Hinweise zur Benutzung des Digitalzählers Polydigit 1

### 4.0.2.1. Allgemeines

Der elektronische Digitalzähler Polydigit 1 ist das Zentralgerät für ein Programm von Geräten nach dem Prinzip der kom-plexen Bausteine für den Physikunter-richt. Es stellt eine selbständige Funk-tionsgruppe dar und kann mit anderen Baugruppen zu Gerätekombinationen mit erweitertem Funktionsbereich zusam-men-gestellt werden.

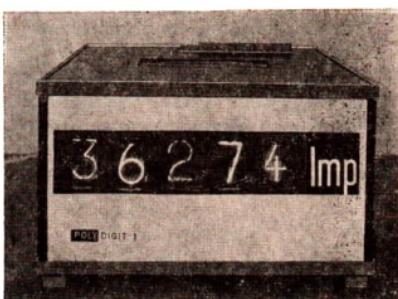


Abb. 4.0.2.1 Frontansicht des Digitalzählers Polydigit 1 mit fünf Zähl- und Anzeigendekaden

## 4.0.2.

Es ist geeignet für

- Zählungen von elektrischen Impulsen mit Frequenzen von 0 bis 150 kHz (bis 1,5 MHz durch eine einfache Erweiterung),
- Zeitmessungen von  $\frac{1}{100}$  s Genauigkeit,
- Frequenz- und Drehzahlmessungen von 0 bis 150 kHz und
- die Addition beliebiger Impulsfolgen. Mit passenden Wandlern können mechanische Objekte, Lichtimpulse, Kernteilchen u. a. gezählt werden.

### 4.0.2.2. Mechanischer Aufbau und Anwendung der Bedienungselemente

Der Digitalzähler weist gegenüber ähnlichen Geräten einige Besonderheiten in der mechanischen Gestaltung auf.

An der Frontseite (Abb. 4.0.2./1) sind die Anzeigeelemente zu erkennen. Es sind 3 bis 5 Ziffernanzeigeröhren, Komma-Glimmlampen und ein Leuchtfeld für die Symbole der Einheiten. Auf der Oberseite sind die Bedienungselemente, der Tragegriff und der Wechselschlitz für die Symbole der Einheiten angeordnet. Die Anschlußbuchse, die Einstellwellen und der Netzanschluß befinden sich an der Rückseite.

Durch das Lösen der versenkten Schrauben beiderseits des Trageriemens läßt sich die obere Gehäusewand entfernen. An diesem Teil ist auch das Lampengehäuse mit Mattglasscheibe und Schacht für die Einheitenschilder befestigt. Werden die beiden M3-Schrauben gelöst, die das Chassis mit dem Gehäuserahmen verbinden, so kann dieser entfernt werden und danach sämtliche Seitenwände. Bei erforderlichen Reparaturen ist das Gerät von allen Seiten zugänglich. Auch die Bodenplatte wird nur von zwei Schrauben gehalten.

Die Baugruppen des Gerätes sind auf dem Gehäuserahmen montiert. Fast alle Baugruppen sind mit 15poligen Steckverbindungen versehen und austauschbar. Die Abb. 4.0.2./2 zeigt die Anordnung der einzelnen Baugruppen.

Die elektrischen Verbindungen zwischen den Baugruppen sind zum Teil in gedruckter, zum Teil in herkömmlicher Verdrahtung ausgeführt.

Die Steckverbindungen und Wellen an der Rückwand des Gerätes haben folgende Funktionen (Abb. 4.0.2./3):

#### Eingangsbuchsen

- ① Kapazitiver Impuseingang des Zählers für Sinusschwingungen mit einer Frequenz  $> 1 \text{ kHz}$  und für Impulse mit steilen Flanken der Frequenz  $> 0$ . An dieser Buchse sind gleichzeitig zugänglich das Tor, die Rückstellung, die Spannungen  $+12 \text{ V}$  und  $-4 \text{ V}$  (gegen Masse).
- ② Direkter Impuseingang des Zählers für Sinusschwingungen mit einer Frequenz  $0 < f \leq 1000 \text{ Hz}$ , für Impulse mit flachen Flanken und Gleichspannungen mit langsamem Pegeländerungen. An dieser Buchse sind gleichzeitig zugänglich das Tor, die Rückstellung, die Spannungen  $+12 \text{ V}$  und  $-4 \text{ V}$  (gegen Masse).
- ③ Anschlußbuchse für den mechanischen Torschalter

#### Wellen

- ④ Potentiometerwelle zum Abgleich der Zeitbasis von 1,00 Sekunden
- ⑤ Potentiometerwelle zum Abgleich der Zeitbasis von 0,10 Sekunden

⑥ Schalter für die Komma-Glimmlampen, mit dem das Komma an jede beliebige Stelle gerückt oder ausgeschaltet werden kann

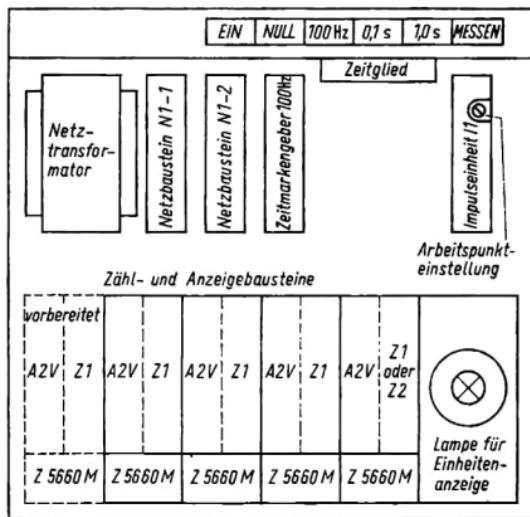


Abb. 4.0.2./2 Bestückungsplan

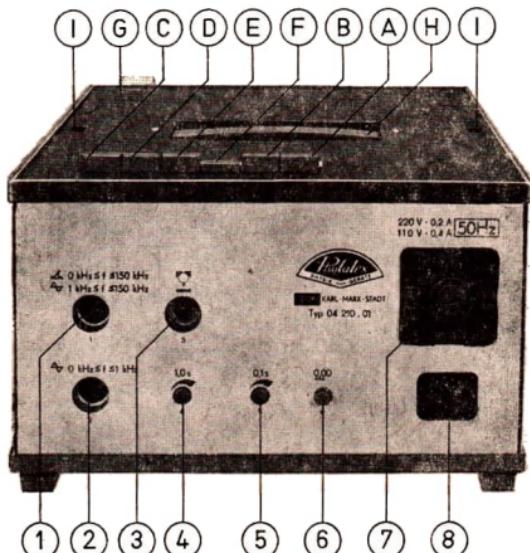


Abb. 4.0.2./3 Rückansicht des Digitalzählers Polydigit I

#### Netzanschluß

⑦ Kombiniertes Sicherungs- und Spannungswahl-Element  
 ⑧ Gerätesteckdose zum Anschluß des Digitalzählers an die Netzspannung

Auf der Oberseite des Gerätes sind sechs Tasten. Durch diese Anordnung ist die Bedienung von allen Seiten aus möglich, ebenso kann eine vor dem Gerät sitzende Person diese bequem erreichen. Die Elemente auf der Oberseite haben folgende Funktionen (Abb. 4.0.2./3):

(A) Netzschalter „Ein“. Bei gedrückter Taste ist der Digitalzähler eingeschaltet.

#### Funktionstasten

(B) Taste „Null“. Durch das Drücken dieser Taste wird der Zähler auf „0000“ zurückgestellt.

(C) Taste „Messen“. Durch das Drücken werden alle Meß- und Zählvorgänge ausgelöst bzw. ermöglicht.

#### Programmtasten

(D) Taste „100 Hz“. Bei gedrückter Taste liegen die 100-Hz-Zeitmarken des internen netzsynchronen Zeitmarkengebers am Zählereingang, so daß eine Zeitmessung möglich ist.

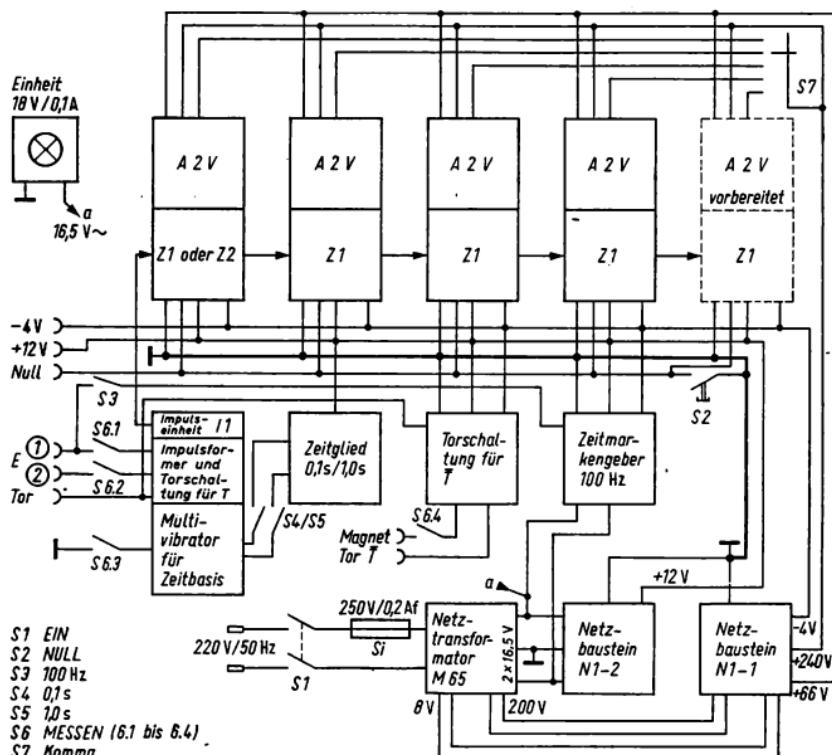


Abb. 4.0.2./4 Blockschaltbild des Digitalzählers Polydigit I



(E) Taste „1,0 s“. Bei gedrückter Taste ist das Tor eine Sekunde lang geöffnet, wenn die Zählung ausgelöst wird (Abgleichen erforderlich!).  
 (F) Taste „0,1 s“. Bei gedrückter Taste ist das Tor eine Zehntelsekunde lang geöffnet, wenn die Zählung ausgelöst wird (Abgleichen erforderlich!).

In der Abbildung sind außerdem zu erkennen:

(G) Wechselschild für die Symbole der Einheiten der Meßgrößen,  
 (H) Versenkbarer Tragegriff,  
 (I) Schrauben (versenkt) zum Öffnen des Gerätes.

Der Digitalzähler Polydigit 1 wird in der Grundausstattung mit drei oder vier Dekaden geliefert. Die Anschlüsse für zwei bzw. eine weitere sind vorbereitet. Sie können vom Lehrer selbständig nachgesetzt werden.

#### 4.0.2.3. Aufbau der Schaltung

Das Blockschaltbild des Digitalzählers Polydigit 1 zeigt die Abbildung 4.0.2./4. Die in gedruckter Schaltung ausgeführten Baugruppen sind vollständig transistorisiert. Gleiche Baugruppen (Zähl- und Anzeigebausteine) sind untereinander austauschbar.

Die Grundfunktion des Gerätes ist das Zählen von Einzelimpulsen beliebigen Ursprungs. Die Impulshöhe der Eingangsspannung kann dabei zwischen  $U_{\text{eff}} = 1 \text{ V}$  und  $U_{\text{max}} = 100 \text{ V}$  liegen.

Die Impulse gelangen über Buchse ① oder ② in das Gerät. Die verschiedenen Impulsformen werden vom Impulsbaustein I 1 verstärkt und in einheitliche Rechteckimpulse mit steilen Flanken geformt. Nach Durchlaufen einer Verstärker- und Entkopplungsstufe kommen sie in den Zähler. Er besteht aus maximal 5 Zähldekaden Z 1.

Jede Zähldekade besteht aus vier bistabilen Multivibratoren (Flip-Flop), die nach Abbildung 4.0.2./5 unterhalb der Strich-Punkt-Linie zusammengeschaltet sind. Bistabile Multivibratoren haben zwei stabile Schaltzustände (0: L); jeder Zustand kann beliebig lange gespeichert werden. Ein negativer Impuls am Eingang E kippt den Flip-Flop FF 1, ein zweiter Impuls bringt ihn in den ursprünglichen Zustand zurück. Sollen die Zahlen von 0 bis 9 dargestellt werden, so muß jeder zweite Impuls den Zustand des folgenden Multivibrators ändern. Vier Flip-Flop können maximal  $2^4 = 16$  verschiedene Zustände einnehmen, jedoch werden nur 10 davon benötigt. Beim zehnten Impuls wird von der rechten Seite des FF 4 der negative Impuls auf den FF 2 zurückgeführt, so daß alle Flip-Flop den gleichen Zustand haben wie vor dem ersten. Gleichzeitig bewirkt dieser Impuls das Schalten der nächsten Dekade usw. Aus der Tabelle kann man alle Zustände einer Dekade bei einem bestimmten Impuls entnehmen. „L“ bedeutet: am betreffenden Ausgang des Multivibrators liegt eine Spannung (9 V ... 12 V), „0“, es liegt keine Spannung an (0 ... 0,8 V).

Die Dekodierung des Zählerstandes und die Ansteuerung der entsprechenden Katode der Ziffernanzeigeröhre führt der Anzeigeverstärker A 2 V aus. Aus Abbildung 4.0.2./5 ist zu ersehen, daß alle Emitter der Transistoren für die ungeraden Ziffern an den linken Ausgang des FF 1 geschaltet sind und alle Transistoren für

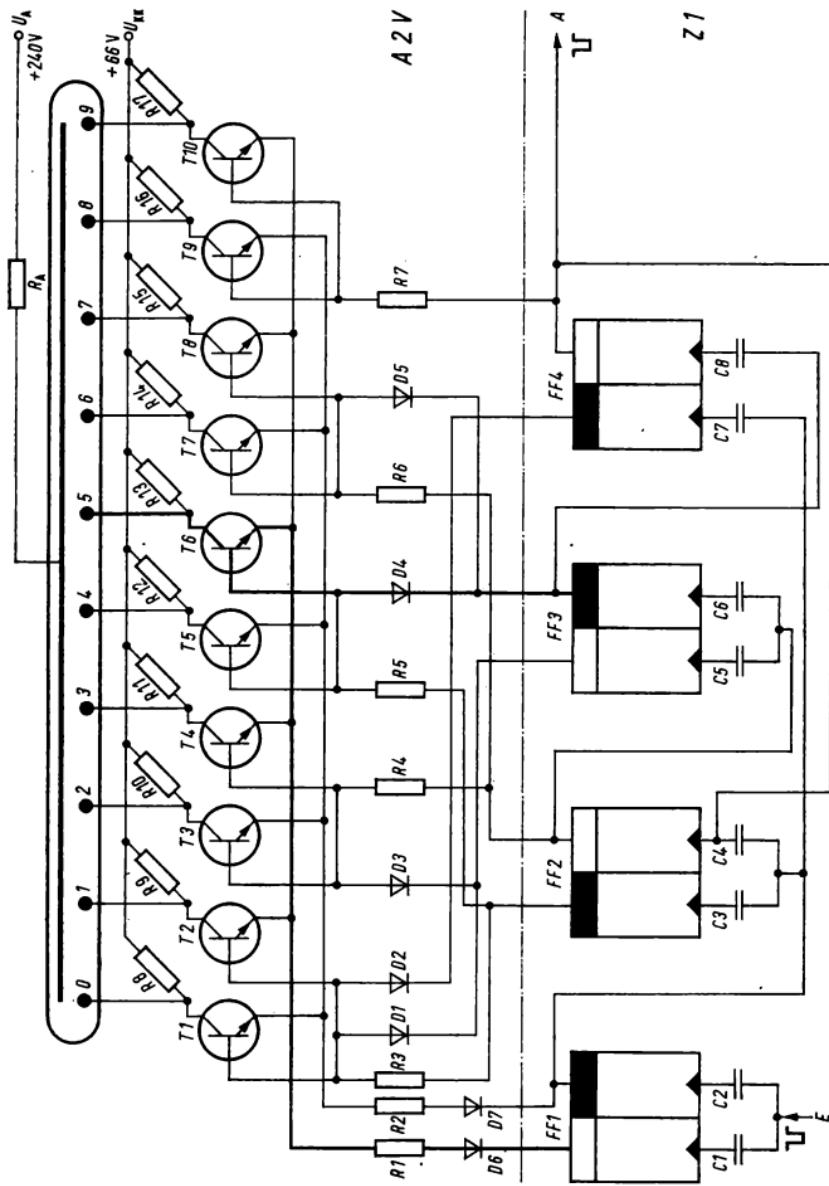


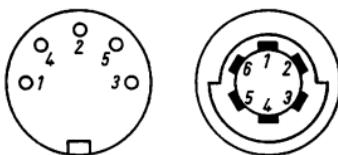
Abb. 4.0.2/5 Schaltung einer Zähl- und Anzagedekade (Ziffer 5 wird angezeigt, Stromweg dicker gezeichnet)

Impuls	FF 1	1 r	FF 1	2 r	FF 1	3 r	FF 1	4 r
0	L	0	L	0	L	0	L	0
1	0	L	L	0	L	0	L	0
2	L	0	0	L	L	0	L	0
3	0	L	0	0	L	0	L	0
4	L	0	L	0	0	L	L	0
5	0	L	L	0	0	L	L	0
6	L	0	0	L	0	L	L	0
7	0	L	0	L	0	L	L	0
8	L	0	L	0	L	0	0	L
9	0	L	L	0	L	0	0	L
10	L	0	L	0	L	0	L	0

die geraden Ziffern, einschließlich der Null, an den rechten Ausgang des FF 1. Durch diese Schaltung können im gezeichneten Zustand der Abbildung 4.0.2./5 die ungeraden Ziffern aufleuchten (Stromfluß möglich), jedoch nur der Transistor T 6 für Ziffer „5“ ist leitend, da auch seine Basis von der rechten Seite des FF 3 eine positive Spannung erhält. Die anderen vier Transistoren sind gesperrt. Die Ansteuerung der anderen Ziffern kann man sich durch Widerstände ersetzt. Die Ansteuerung der an-

deren Ziffern kann man sich in gleicher Weise erklären.  
Eine Zählung kann durch Drücken der Taste „Messen“ begonnen und durch Lösen dieser Taste beendet werden. Die elektronische Torschaltung, die auf dem Impulsbaustein I 1 vorgesehen ist, ermöglicht ebenfalls, die Zählung trägeheitslos zu beginnen oder zu beenden. Dieses elektronische Tor T erlaubt die Steuerung des Zählvorganges durch externe Schaltungen, durch andere Geräte oder mit einem Verlängerungskabel. Das Tor ist geschlossen, wenn eine Spannung von mindestens +5 V (gegen Masse) anliegt, anderenfalls ist es geöffnet. Meistens benutzt man für die Torsteuerung die Betriebsspannung des Zählgerätes von +12 V. Die drei Buchsen auf der Rückseite des Gerätes haben verschiedene Funktionen; Buchse ③ ist für den Spezialstecker des mechanischen Torschalters vorgesehen. An den Buchsen des Haltmagneten liegen das Tor und die Spannung von etwa +12 V an, ebenso an den beiden Kontakten des Magneten. Der zweipolige Stecker stellt die Negation  $\bar{T}$  der Torschaltung dar, d. h., bei geöffnetem Schalter können keine Impulse das Tor passieren, jedoch bei geschlossenem Schalter. Die Abbildung 4.0.2./6b gibt die Anschlüsse der Buchse ③ an.

Die Buchsen ① und ② unterscheiden sich nur durch den Anschluß des Zähler-einganges, alle anderen Kontakte sind gleich beschaltet. Die Bedeutung der Kontakte dieser Buchsen ist aus Abbildung 4.0.2./6a ersichtlich. Beider ersten Buchse



a



+

1 Impulseingang  
① kapazitiv  
② direkt  
2 +12 V  
3 Rückstellung  
4 Toreingang  
5 -4 V

1 +12 V  
2 frei  
3 Masse über „Messen“  
4 +12 V mit Kontakt 1  
5 Tor T mit Kontakt 1  
6 Tor  $\bar{T}$  mit Kontakt 4

Abb. 4.0.2./6 Beschaltung der Kontakte: a) der Buchsen ① und ②, b) der Buchse ③, Blick von außen auf die Buchsen

ist vor den Zählereingang ein Koppelkondensator geschaltet, Buchse ② stellt eine direkte Verbindung mit dem Zählereingang her. Die Symbolik auf dem Gerät gibt die Frequenzbereiche für die unterschiedlichen Impulsformen an.

Die eingebauten Zeitbasen von 1,0 s und 0,1 s arbeiten nach dem Prinzip des monostabilen Multivibrators. Mit ihnen kann eine externe Toröffnung im angegebenen Zeitintervall erfolgen. Da die Kapazität der verwendeten Elektrolytkondensatoren nicht über eine längere Zeit konstant bleibt, müssen vor jeder Verwendung diese Zeitbasen von neuem abgeglichen werden.

#### 4.0.2.4. Grundschaltungen bei digitalen Meßverfahren

##### Zählungen

Es sollen hier nur Stückzählungen behandelt werden. Die Zählerstatistik (Stichproben), wie sie in der Kernphysik auftreten, werden an anderer Stelle behandelt. Für die Ansteuerung der elektronischen Zählgeräte muß jedes Objekt, das zum Zähler gelangt, einen elektrischen Impuls auslösen, der durch einen Wandler erzeugt wird. Je nach Zählobjekt werden verschiedene Wandlerprinzipien benutzt:

- mechanische Schalter, die einen elektrischen Stromkreis öffnen oder schließen;
- ! Lichtschranken, die mit fotoelektrischen Bauelementen (z. B. Fotowiderstand, Fotodiode, Fotozelle) arbeiten;

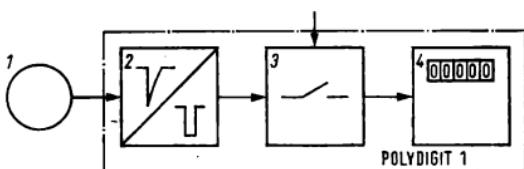


Abb. 4.0.2./7 Blockschaltbild für Stückzählungen  
 1 Wandler  
 2 Impulsformer  
 3 Torschaltung  
 4 Zähl- und Anzeigeeinheiten

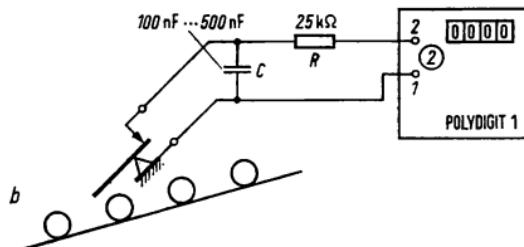
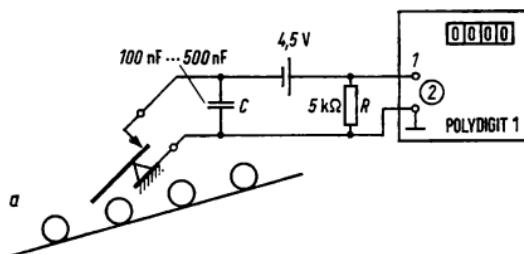


Abb. 4.0.2./8 Schaltungen für Stückzählungen mit mechanischen Schaltern  
 a) mit externer Batterie,  
 b) bei Verwendung der Betriebsspannung des Gerätes

- magnet-elektrische Wandler, die Induktions- oder Selbstinduktionsspannungen erzeugen;
- magnet-elektrische Wandler, die Änderungen des elektrischen Widerstandes durch äußere Magnetfelder (Feldplatten) oder den Hall-Effekt ausnutzen (Hall-Generatoren);
- akustische Wandler, die mit einem Mikrofon den Aufschlag kleiner Teile in elektrische Impulse umformen u. a.

Das Blockschaltbild für Stückzählungen gibt die Abbildung 4.0.2./7 an. Das Tor braucht hier nicht betätigt zu werden, da mit der Zählung des letzten Elementes der Vorgang abgeschlossen ist. Die Zeitdauer des Zählvorganges ist dabei ohne Bedeutung. Vor einer neuen Zählung muß der Zähler auf Null gestellt werden. Bei mechanischen Schaltern, besonders beim Schließen des Kontaktes, können Kontaktprellungen auftreten, die zu falschen Ergebnissen führen. Zur Unterdrückung dieser Prellungen schaltet man parallel zum Schalter einen Kondensator von etwa  $100 \text{ nF} \dots 500 \text{ nF}$  (probieren). Als Schalter verwendet man die mitgelieferten. Die Abbildungen 4.0.2./8a und b geben zwei Schaltungsbeispiele für eine derartige Anordnung wieder. Der Widerstand  $R$  muß unbedingt zur Strombegrenzung und zur Erzeugung des Spannungsimpulses in den Kreis geschaltet werden!

### Zeitmessungen

Das Blockschaltbild für die digitale Zeitmessung zeigt die Abbildung 4.0.2./9. Von einem frequenzkonstanten Generator werden Schwingungen erzeugt, die von einer Impulsformerstufe in Rechteck- oder Nadelimpulse umgewandelt werden (sogenannte Zeitmarken). Die Impulsfrequenz liegt am Eingang des Zählgerätes. Da die Frequenz  $f$  bekannt ist, kann man die Schwingungsdauer  $T$  ermitteln  $\left( T = \frac{1}{f} \right)$ .

Prinzipiell ist für die Zeitmessung jede Schwingung mit konstanter Frequenz geeignet. Werden von einer Schwingung  $n$  Perioden gezählt, so errechnet man die Zeit  $t$  zu

$$t = n \cdot T = n \cdot \frac{1}{f}.$$

Dieses Verfahren mit einer beliebigen Frequenz wird selten angewendet, da stets eine Umrechnung der Anzeige vorgenommen werden muß. Wählt man als Meßfrequenz  $10^4 \text{ Hz}$  ( $k = \text{ganze Zahl}$ ), kann man die Zeit direkt in Sekunden und dekadischen Teilen ablesen.

Als interne Meßfrequenz wird beim Polydigit 1 die Frequenz des technischen Wechselstromes von  $50 \text{ Hz}$  genutzt, die durch eine einfache Zweiweg-Gleichrichtung auf  $100 \text{ Hz}$  verdoppelt wird. Die letzte Stelle des Zählers zeigt also die Hundertstelsekunden an.

Eine Reihe von Experimenten ist meßtechnisch nur sinnvoll, wenn die Zeitmessung mit einer Genauigkeit von mindestens  $10^{-3}$  Sekunden erfolgt. Dazu ist der Digitalzähler durch Einbau des Zeitmarkengebers  $1000 \text{ Hz}$  und einer weiteren Zähldekade ( $150 \text{ kHz}$ ) auf fünfstellige Anzeige umzurüsten.

Sind diese Nachrüstbausteine nicht vorhanden, kann der UVG 1 oder UVG 2 als Zeitmarkengeber eingesetzt werden. Er wird an den Zählereingang (1), Kontakt 1, angeschlossen. Das erschwert allerdings die Versuchsdurchführung etwas, weil dieser durchstimmbare Generator erst geeicht werden muß. Dazu vergleicht man mit Hilfe eines Oszilloskopen die Generatorfrequenz mit einer Normalfrequenz. Diese

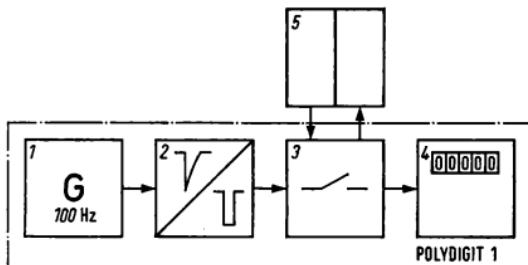


Abb. 4.0.2./9 Blockschaltbild für die digitale Zeitmessung mit dem internen Zeitmarkengenerator  
 1 interner Zeitmarkengenerator  
 2 Impulsformer  
 3 Torschaltung  
 4 Zähl- und Anzeigeeinheiten  
 5 äußere Torschaltung

liefert z. B. eine Stimmgabel (2000 Hz) oder (mit gewissen Einschränkungen) die Netzfrequenz. Ein Vergleich über die im Polydigit eingegebene Zeitbasis ist nicht ratsam. Die Meßfrequenz kann bis zu 150 kHz betragen. Das Meßprinzip und die Bedienung des Gerätes ändern sich dadurch nicht.

Die eigentliche Messung wird durch Öffnen und Schließen der Torschaltung eingeleitet und beendet. Das Tor kann durch verschiedene Vorgänge betätigt werden:

- mit der Taste „Messen“, wenn keine äußere Beschaltung der drei Buchsen erfolgt (manuelle Zeitmessung);
- durch das Anlegen einer Gleichspannung  $\leq +5$  V an die Buchsen ① oder ②, Kontakt 4; im einfachsten Fall wird die Betriebsspannung von +12 V (Kontakt 2) verwendet (z. B. bei einer Fernbedienung des Gerätes);
- durch einen Fallkörper oder eine rollende Stahlkugel mit dem mechanischen Torschalter;
- mit dem Auslösehebel des Wurfgerätes;
- durch einen Lichtempfänger als Teil einer Lichtschranke;
- durch einen bistabilen Multivibrator, der ebenfalls durch einen der genannten Vorgänge geschaltet werden kann.

Welcher Vorgang für die jeweilige Messung der geeignetste ist, ergibt sich aus dem betreffenden Experiment.

Als Zubehör zum Digitalzähler Polydigit 1 wird ein mechanischer Torschalter geliefert, der bei vielen Bewegungsvorgängen der Mechanik als Hilfsgerät für Kurzzeitmessungen eingesetzt werden kann. Der Anschluß dieses Schalters erfolgt über einen sechspoligen Spezialstecker, der in Buchse ③ eingeführt wird; der Torschalter — einschließlich Haltemagnet — ist damit betriebsbereit.

Der Fallkörper (oder die Stahlkugel) wird von dem Magneten M gehalten; gleichzeitig stellt er eine leitende Verbindung zwischen den beiden Kontakten A und B her und schließt das Tor des Zählers (Abb. 4.0.2./10). Drückt man die Taste „Messen“, so wird der Stromkreis des Haltemagneten M unterbrochen und der Fallkörper freigegeben — das Tor wird aber erst geöffnet, wenn der Körper den Kontakt zwischen A und B unterbricht, d. h.: Ein längeres Haftenbleiben am Magneten ist ohne Einfluß auf den Meßwert. Sobald das Tor geöffnet ist, gelangen die Zeitmarken zum Zähler. Mit dem Öffnen des Schalters S wird das Tor wieder geschlossen. Die Zeit zwischen dem Öffnen und Schließen des Tores kann am Zähler direkt abgelesen werden.

Die beiden Buchsen am Haltemagnet M gestatten das Parallelschalten eines Schalters S' zum Starten des Zählers bei anderen Versuchsanordnungen (z. B. Kontakte des Wurfgerätes).

Bei vielen Kurzzeitmessungen soll das Starten und Stoppen des Digitalzählers durch zwei Impulse erfolgen. Für diese Meßanordnung wird ein bistabiler Multivibrator benötigt, der das Tor steuert. Der bistabile Multivibrator kann durch Spannungsimpulse verschiedensten Ursprungs gekippt werden (Lichtempfänger, Lautsprecher-Mikrofon, mechanische oder elektromechanische Schalter, Induktionsspannungen usw.).

Fotoelektrische Wandler arbeiten wesentlich zuverlässiger als mechanische Schalter. Außerdem kann mit ihnen eine erheblich größere Meßgenauigkeit erreicht werden.

Die *Lichtschrankenanordnung* umfaßt 2 Leuchten, 2 Geber, 2 Bügel, 2 Muffen, 1 Schaltverstärker und 1 Impulsscheibe.

Sie dient zum

- Zählen,
- berührungslosen Auslösen bzw. Begrenzen von Meßvorgängen und
- Schalten externer Stromkreise.

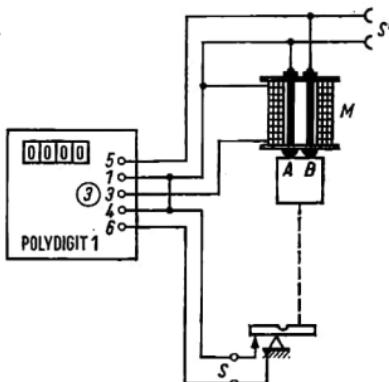


Abb. 4.0.2./10 Schematische Darstellung des mechanischen Torschalters mit Haltemagneten

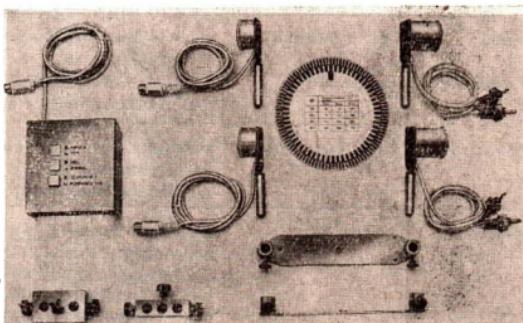


Abb. 4.0.2./11 Lichtschrankenanordnung zum Polydigit:  
Die Abbildung zeigt die Leuchten, die Geber, die Bügel und den Schaltverstärker.

Das geschieht durch Unterbrechen bzw. Freigabe eines Lichtstromes. Es kann mit einer oder mit zwei Lichtschranken gearbeitet werden. Es können folgende Experimente durchgeführt werden:

- Zählen von Impulsen, z. B. mechanische Schwingungen, Stückzählungen,
- Zeitmessungen, insbesondere Kurzzeitmessungen,
- Geschwindigkeitsmessungen, besonders Momentangeschwindigkeiten,
- Drehzahlmessungen (mit Hilfe der Impulsscheibe).

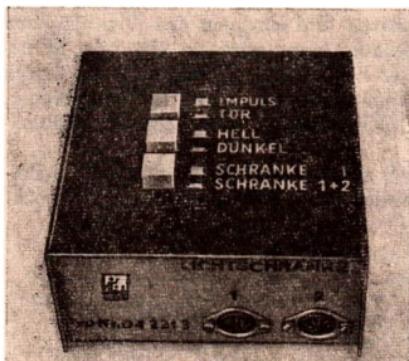


Abb. 4.0.2./12 Schaltverstärker, Frontseite

An der Frontseite des Schaltverstärkers können entweder ein Geber (an Buchse ①) oder zwei Geber (an Buchse ① und ② angeschlossen werden. Auf der Oberseite sind die Funktionstasten angeordnet. Die Symbolik zeigt, daß *beide* Tastenstellungen — nicht gedrückt/gedrückt — einen bestimmten Funktionszustand des Schaltverstärkers bedeuten.

Den einzelnen Tastenstellungen sind folgende Funktionen zugeordnet:

Taste	Tastenstellung	Funktion
Impuls	nicht gedrückt	Impuls — Ansteuerung des Zähleingangs des Digitalzählers Polydigit
Tor	gedrückt	Tor — Ansteuerung des Tores des Digitalzählers — außerdem wird gleichzeitig das Relais im Schaltverstärker betätigt.
Hell	nicht gedrückt	Hell — Das Signal wird ausgelöst, wenn Licht auf den Geber fällt.
Dunkel	gedrückt	Dunkel — Das Signal wird ausgelöst, wenn der Lichtstrom unterbrochen wird.
Schranke 1	nicht gedrückt	Schranke 1 — Die Funktionen werden von nur einer Lichtschranke, die an Buchse ① des Schaltverstärkers angeschlossen ist, ausgelöst.
Schranke 1 und 2	gedrückt	Schranke 1 und 2 — für den Betrieb mit zwei Lichtschranken zum Realisieren einer Meßstrecke, einer Teilerschaltung (Taste Dunkel) oder einer Oder-Schaltung (Taste Hell). Hierbei wird jeder zweite Lichteinfall vom Zähler registriert. Die Tastenstellungen Hell und Dunkel bewirken beim 2-Schrankenbetrieb nicht den Hell- bzw. Dunkelbetrieb der Schranken. Beide Tastenstellungen bedeuten Hellbetrieb.

An der Rückseite des Verstärkers befinden sich 5 Buchsen (Abb. 4.0.2./13). Über das linke Paar kann der Verstärker aus einer externen Spannungsquelle gespeist werden. Die drei rechten Buchsen sind mit den Umschaltkontakten eines einge-

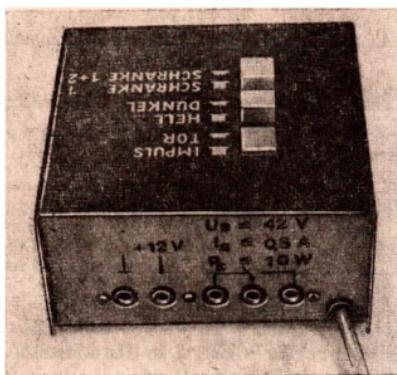


Abb. 4.0.2./13 Schaltverstärker, Rückseite

bauten Relais verbunden. In der rechten unteren Ecke ist das Anschlußkabel herausgeführt, das den Verstärker mit dem Polydigit verbindet. Über dieses Kabel werden die Verbindungen zum Tor und zum Eingang des Zählers hergestellt. Außerdem erfolgt darüber die Stromversorgung des Verstärkers. Der Anschluß an das Polydigit erfolgt über dessen Buchse ① oder Buchse ②.

Mit dem eingebauten Relais können externe Vorgänge geschaltet werden. Es ist z. B. möglich, über seine Kontakte den Stromkreis eines Haltemagneten zu öffnen oder zu schließen. Die Kontaktstellung des Relais ändert sich, wenn sich der Schaltzustand des Verstärkers ändert.

Die Leuchten sind mit 6,5 V/5 W-Lampen bestückt. Sie können von einem Stromversorgungsgerät für Niederspannung oder von einem Transformator gespeist werden.

Mit der Lichtschrankenanordnung wird eine Bedienungsanleitung ausgeliefert, in der eine Vielzahl von verschiedenen Schaltvarianten beschrieben ist. Von diesen Varianten werden hier nur die aufgeführt, die im Zusammenhang mit den in diesem Buche beschriebenen Experimenten von Bedeutung sind.

#### Zählen von Impulsen

Stellung der Funktionstasten	Funktion
Impuls Hell Schranke 1	Die nächste Ziffer wird angesteuert, wenn ein Hindernis den Lichtstrom unterbrochen hatte und wieder freigibt.
Impuls Dunkel Schranke 1	Die nächste Ziffer wird angesteuert, wenn der Lichtstrom unterbrochen wird.

Diese beiden Varianten können z. B. zu Drehzahlmessungen mit der Impulsscheibe angewendet werden.

## 4.0.2.

### Zeitmessung mit einer Lichtschranke

Stellung der Funktionstasten	Funktion
Tor Hell Schranke 1	Das Tor ist geöffnet, solange Licht auf den Geber fällt.
Tor Dunkel Schranke 1	Das Tor ist geöffnet, solange der Lichtstrom unterbrochen ist.

Die zweite Variante eignet sich besonders zur Bestimmung von *Momentangeschwindigkeiten*. Ist die „100 Hz-Taste“ des Polydigit gedrückt, dann wird z. B. die Zeit der Unterbrechung des Lichtstromes durch eine rollende Kugel in Hundertstelsekunden angezeigt. Die Momentangeschwindigkeit ergibt sich als Quotient aus dem Kugeldurchmesser und der ermittelten Zeit.

### Zeitmessung mit zwei Lichtschranken

Stellung der Funktionstasten	Funktion
Tor Dunkel Schranke 1 und 2	Bei der Freigabe des Lichtweges einer Schranke wird das Tor geöffnet und bei der nächsten Freigabe wieder geschlossen. Öffnen und Schließen kann von jeder Schranke aus wechselseitig erfolgen.

Diese Variante ist für die *Zeitnahme an einer Meßstrecke bei einer translatorischen Bewegung* geeignet. Ist die „100 Hz-Taste“ des Polydigit während dieses Vorganges gedrückt, wird die Zeit zwischen Öffnen und Schließen des Tores in Hundertstelsekunden angezeigt.

Soll beispielsweise die *Fallzeit* eines Körpers ermittelt werden, dann bringt man die erste Lichtschranke so an, daß ihr Lichtstrom durch den vom Haltemagnet in der Startstellung festgehaltenen Eisenkörper unterbrochen wird. Bei Beginn der Fallbewegung wird der Lichtstrom dieser Schranke freigegeben und das Tor der Zähleinrichtung geöffnet. Es schließt sich, wenn der fallende Körper die zweite Lichtschranke passiert.

Soll die *Momentangeschwindigkeit* des fallenden Körpers bestimmt werden, so schließt man an die Buchse ③ des Polydigit den Haltemagnet mit dem mechanischen Torzeitschalter an. Dieser mechanische Schalter wird für das Experiment selbst nicht benötigt. Er ist jedoch für die Verbindung zum Haltemagnet erforderlich. Die Tasten „Ein“ und „100 Hz“ bleiben ständig gedrückt. Die beiden Lichtschranken bringt man dicht über und dicht unter der Meßstelle in die Bahn des fallenden Körpers. Durch Drücken der Taste „Messen“ am Polydigit wird der Haltemagnet stromlos und der Fallvorgang ausgelöst. Das Tor des Zählers wird jedoch erst geöffnet, wenn der Körper die erste Schranke passiert hat und den Lichtstrom wieder freigibt. Es wird geschlossen, wenn sich der gleiche Vorgang an der zweiten Schranke wiederholt. Die Geschwindigkeit des fallenden Körpers ergibt sich dann als Quotient aus dem Abstand der beiden Lichtschranken und der dafür benötigten Zeit.



Sollte der Zählvorgang schon beim Drücken der Taste „Messen“ beginnen, ist der Lichtweg einer der beiden Schranken einmal kurzzeitig zu unterbrechen und der Versuch neu zu starten.

Genauere Meßergebnisse erhält man, wenn ein Polydigit mit dem Zeitmarkengeber 1000 Hz zur Verfügung steht. Bei der Verwendung des UVG 1 oder UVG 2 als Zeitmarkengeber (Anschluß an die Impulseingangsbuchse ②) darf die Taste „100 Hz“ nicht gedrückt werden.

Diese Variante eignet sich auch für die Untersuchung anderer translatorischer Bewegungen, wie beispielsweise die Bewegung einer rollenden Kugel oder die Bewegung eines Schienenwagens.

#### *Frequenz- und Drehzahlmessungen*

Das Grundprinzip der digitalen Frequenzmessungen beruht auf der Zählung der Perioden einer Schwingung in einer bestimmten Zeit. Die Abbildung 4.0.2./14 zeigt das Blockschaltbild für die digitale Frequenz- und Drehzahlmessung. Werden  $n$  Perioden in der Zeit  $t$  gezählt, so ist die Frequenz  $f$  der Schwingung

$$f = \frac{n}{t}.$$

Die Zeit  $t$  kann man unter Berücksichtigung der erforderlichen Genauigkeit beliebig wählen. Wegen der Zweckmäßigkeit (direkte Anzeige der Frequenz) wird aber meistens eine Sekunde oder das  $10^k$ -fache ( $k = \text{ganze Zahl}$ ) gewählt. Diese Zeit  $t$  wird auch als Zeitbasis bezeichnet. Im Digitalzähler Polydigit 1 sind zwei Zeitbasen (1,00 s und 0,10 s) vorgesehen. Die interne Zeitbasis ist mit der Torsteuerung verbunden. Drückt man die Programmtaste „0,1 s“ oder „1,0 s“, so ist das Tor nur diese Zeit geöffnet. Die Öffnung beginnt mit dem Drücken der Taste „Messen“. Werden längere Zeitbasen benötigt, so muß die Toröffnung manuell mit der Taste „Messen“ nach einer Stoppuhr vorgenommen werden. Es ist zweckmäßig, hier die Fernbedienung einzusetzen.

Auch die externe *Torsteuerung* ist möglich, indem man die Zentraluhr mit Hilfe des Adapterkabels mit der Buchse ③ des Polydigit verbindet.

Bei der Wahl der Zeitbasis ist neben der geforderten Meßgenauigkeit auch die Zählkapazität, d. h. die zur Verfügung stehende Anzahl von Dekaden, zu beachten. Soll zum Beispiel eine Frequenz in der Größenordnung von  $10^5$  Hz gemessen werden, so wird man bei einem vierstöckigen Zähler die Zeitbasis „0,1 s“ wählen und die Anzeige mit 10 multiplizieren. Nimmt man die Zeitbasis „1,0 s“, so erreicht man zwar eine größere Genauigkeit, jedoch muß der Überlauf dann mitgezählt werden. Die *Größe des Fehlers* wird durch die Genauigkeit der Zeitbasis bestimmt. Deshalb muß sie vor jeder Messung sorgfältig abgeglichen werden.

Bei der *Messung der Frequenz elektrischer Schwingungen* wird das Signal direkt der Buchse ① oder ②, Kontakt 1, zugeführt; eventuell ist noch eine Verstärkung auf eine Spannung von  $> 1$  V erforderlich. Soll die Frequenz von mechanischen oder akustischen Schwingungen bestimmt werden, so ist ein geeigneter Wandler erforderlich, zum Beispiel eine Induktionsspule, ein Mikrofon oder ein Lichtempfänger.

Für *Drehzahlmessungen* eignen sich fotoelektrische und induktive Geber. Mechanische Kontakte können nur bei kleinen Drehzahlen benutzt werden. In den meisten Fällen kann die zur Lichtschrankenanordnung gehörende *Impulscheibe* in Verbindung mit einer Lichtschranke benutzt werden.

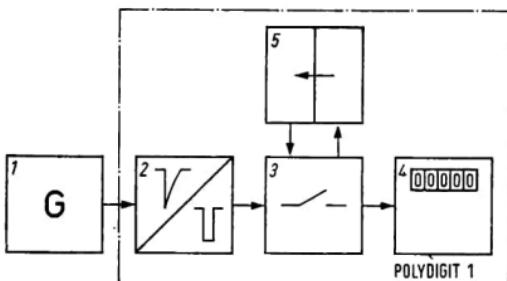


Abb. 4.0.2./14 Blockschaltbild für die digitale Frequenz- und Drehzahlmessung  
 1 Wandler bzw. Spannungsquelle  
 2 Impulsformer  
 3 Torschaltung  
 4 Zähl- und Anzeigeeinheiten  
 5 Zeitbasis

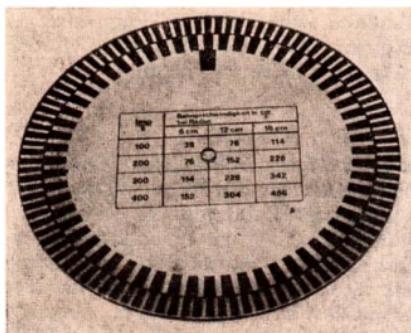


Abb. 4.0.2./15 Impulscheibe zur Drehzahlmessung

Auf der Impulscheibe sind drei Teilkreise angebracht (Abb. 4.0.2./15). Der äußere trägt 100, der zweite 60 und der innere nur eine schwarze Markierung. Der Lichtstrom der Lichtschranke durchsetzt einen der Teilkreise, und wenn sich die Scheibe dreht, wird er durch die schwarzen Markierungen unterbrochen. Dadurch entstehen im Schaltverstärker Impulse, die vom Polydigit gezählt werden. Damit besonders bei den beiden äußeren Teilkreisen scharf begrenzte Impulse entstehen, muß die am Geber der Lichtschranke angebrachte Blende vor die Lichteintrittsöffnung geschwenkt werden. Die 6 mm-Bohrung der Impulscheibe ermöglicht die Befestigung an den entsprechenden Wellen, z. B. am Experimentiermotor oder an der Radialkraftwaage.

In der Mitte der Impulscheibe ist eine Tabelle aufgedruckt, die für die Benutzung des äußeren Teilkreises einige zusammengehörige Werte für die Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Drehzahl und vom Bahnradius enthält.

Je nachdem, welcher Teilkreis für die Unterbrechung der Lichtschranke benutzt wird, entstehen 100, 60 oder nur 1 Impuls je Umdrehung. Der innere Teilkreis liefert also bei der Zeitbasis von 1 s sofort die Drehzahl je Sekunde. Die 60er Teilung ergibt bei der Zeitbasis von 1 s sofort die Drehzahl je Minute, während die 100er Teilung besonders für sehr langsame Rotationen gedacht ist. Die Anzahl der Impulse entspricht bei einer Zeitbasis von einer Sekunde Hundertstel Umdrehungen je Sekunde. Außerdem kann diese 100er Teilung z. B. in Verbindung mit dem Bandgerät zur Ermittlung der Bandgeschwindigkeit benutzt werden. Dazu wird die

Impulsscheibe an die Antriebswelle des Gerätes angeschraubt. 100 Impulse entsprechen dem Weg des Bandes, der gleich dem Umfang der Antriebswalze ist. Als Zeitbasisgeber für Zeiten länger als 1 s schließt man die Zentraluhr an das Polydigit an und wählt Zeitbasen von 10 s, 15 s, 30 s oder 60 s. Auch die manuelle Eingabe der Zeitbasis mit Hilfe der Taste „Messen“ ist möglich, wenn man die Taste durch Vergleich mit einer Stoppuhr betätigt.

#### *Direkte Geschwindigkeitsmessung*

Unter Verwendung der *Lichtschrankenanordnung* und einer selbst hergestellten *Blende* ist es auf einfache Weise möglich, das Polydigit zur direkten Geschwindigkeitsmessung einzusetzen. Die Blende besteht aus durchsichtigem Plast, auf dem in konstanten Abständen undurchsichtige, parallele Streifen aufgebracht sind. Das Prinzip der Geschwindigkeitsmessung besteht in folgendem: Die Blende wird auf dem Körper befestigt, dessen Geschwindigkeit bestimmt werden soll. Die Lichtschranke wird so angebracht, daß das Lichtbündel durch die dunklen, äquidistanten Streifen wiederholt unterbrochen wird. Das Zählgerät registriert die ausgelösten Impulse. Es zeigt somit den Weg an, den der Körper zurücklegt. Außerdem wird am Polydigit die Zeit vorgewählt, während der die Messung erfolgt. Dadurch wird vom Polydigit der Weg angezeigt, den der Körper in der vorgewählten Zeit zurücklegt. Der angezeigte Betrag entspricht somit der im vorgewählten Zeitintervall auftretenden Durchschnittsgeschwindigkeit. Durch geeignete Wahl der Streifenabstände und der Meßzeit wird erreicht, daß der angezeigte Zahlenwert dem Betrag der Geschwindigkeit in der Einheit Zentimeter je Sekunde oder Millimeter je Sekunde entspricht.

Im einfachsten Falle besteht die Streifenblende aus einem durchsichtigen Lineal, auf dem schwarze Papierstreifen von 5 mm Breite jeweils in 5 mm Abstand voneinander aufgeklebt sind. Bei einer vorgewählten Meßzeit von 1 s zeigt dann das Polydigit die Geschwindigkeit in der Einheit Zentimeter je Sekunde an.

Zur Erhöhung der *Meßgenauigkeit* empfiehlt es sich, mit geringeren Streifenabständen zu arbeiten. Beträgt der wirksame Streifenabstand 1 mm, die vorgewählte Zeit  $10^{-1}$  s, so wird die Geschwindigkeit ebenfalls in der Einheit Zentimeter je Sekunde angezeigt. Infolge der kurzen Meßzeit entspricht sie bei einer ungleichförmigen Bewegung weitestgehend der Augenblicksgeschwindigkeit.

Als einfache Verfahren zur Herstellung von Streifenblenden geringen Streifenabstandes bieten sich an:

- Herstellen eines Kontaktabzuges von einem durchsichtigen Lineal mit Millimeter-Einteilung, dessen Striche mit möglichst großem Kontrast aufgedruckt sind,
- Herstellen einer Vergrößerung von Gitter 1 des SEG Wellenoptik.

Bei geeigneter Wahl der Lampenspannung ist es sogar möglich, direkt mit einem durchsichtigen, bedruckten Lineal zu arbeiten.

In allen Fällen, in denen Blenden mit geringem Streifenabstand Verwendung finden, ist es erforderlich, die Blende des Gebers der Lichtschranke möglichst schmal zu wählen. Dazu empfiehlt es sich, aus schwarzem Papier einen Spalt von wenigen Zehntel Millimetern Breite zu schneiden. Dieser wird vertikal auf den Geber aufgeklebt — oder einfacher — hinter die verstellbare Blende geklemmt.

Der Geber wird mit dem Eingang 1 des Schaltverstärkers verbunden und dieser mit dem Polydigit. Um Fehlanzeigen zu vermeiden, ist es ratsam, die Taste „Messen“ kurz nach dem Eintreten der Streifenblende in die Lichtschranke zu drücken.

Dadurch wird weitgehend abgesichert, daß die Blende die Lichtschranke nicht schon vor dem Ablauf der vorgewählten Zeit verläßt.

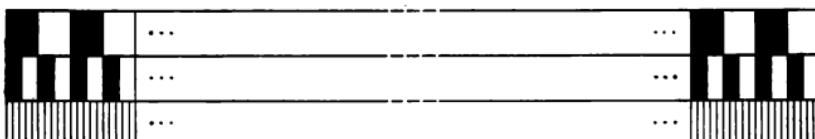
Der Einsatz des Verfahrens zur direkten Geschwindigkeitsmessung ist bei allen Anordnungen, außer denen mit rollenden Kugeln, möglich. Das Verfahren behindert den Bewegungsablauf in keiner Weise. In allen Fällen ergibt sich der unmittelbare methodische Vorteil der einfachen Auswertung. Das Meßprinzip kann man den Schülern mit wenigen Sätzen beschreiben, da es auf der Definition der Geschwindigkeit beruht. Beschreibung und Einsatz tragen sowohl zum tieferen Verständnis des Geschwindigkeitsbegriffes als auch zum besseren Erfassen des jeweils interessierenden Zusammenhangs bei.

Bei der Verwendung von Blenden mit geringen Streifenabständen ist darauf zu achten, daß der Abstand zwischen der Blende in der Lichtschranke und der Lichteintrittsöffnung des Gebers wenige Millimeter nicht übersteigt. Nur dadurch wird gewährleistet, daß die dunklen Streifen hinreichend scharfe Schatten liefern, die ein sicheres Ansprechen des Fototransistors garantieren.

#### Direkte Beschleunigungsmessung

Die oben beschriebene Möglichkeit der direkten Geschwindigkeitsmessung läßt sich bei nur geringfügig geänderter experimenteller Anordnung auch zur direkten **Beschleunigungsmessung** verwenden. Zu diesem Zweck ist es erforderlich, die Messung zu Beginn des Bewegungsvorganges vorzunehmen. Dazu wird der zeitliche Beginn der Beschleunigungsmessung mit der Auslösung des Bewegungsvorganges gekoppelt. Dazu wird zusätzlich der Haltemagnet an das Polydigit angeschlossen. Der zweipolige Stecker wird mit dem mechanischen Torschalter verbunden, der außerhalb der Versuchsanordnung ständig geschlossen bleibt. Es kann die gleiche Blende wie bei der Geschwindigkeitsmessung benutzt werden. Aus der Beziehung  $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$  folgt für  $t = 1 \text{ s}$ , daß zahlenmäßig  $s = \frac{a}{2}$  ist. Finden die für die

Geschwindigkeitsmessung empfohlenen Streifenabstände von 1 cm oder 1 mm Verwendung, so wird die Beschleunigung in  $1/2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  bzw.  $1/2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$  vom Polydigit angezeigt, wenn die Meßdauer 1 s beträgt. Um die Beschleunigung in  $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  zu erhalten, empfiehlt es sich, den Abstand von Streifenmitte zu Streifenmitte zu 0,5 cm zu wählen. Abbildung 4.0.2./16 zeigt eine Streifenblende, die sowohl für die Geschwindigkeits- als auch für die Beschleunigungsmessung ver-



obere Teilung:	bei 1 s	$v$ in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	bei 0,1 s	$v$ in $\text{dm} \cdot \text{s}^{-1}$
mittlere Teilung:	bei 1 s	$a$ in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$	bei 0,1 s	$a$ in $\text{dm} \cdot \text{s}^{-2}$
untere Teilung:	bei 1 s	$v$ in $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ $a$ in $2 \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$	bei 0,1 s	$v$ in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ $a$ in $2 \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$

Abb. 4.0.2./16 Streifenblende für direkte Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmessungen

wendbar ist. Bei sorgfältiger Justierung und bei Einstellung der Lampenspannung über einen Vorwiderstand ( $25\ \Omega$ ) leistet das auch ein durchsichtiges Lineal, da die Striche bei je 1 mm, 5 mm und 10 mm unterschiedliche Länge besitzen.

#### 4.0.2.5. Bedienung

Die folgenden Erklärungen beziehen sich auf die Abbildung 4.0.2./3. Das Gerät wird mit dem Netzschalter in Betrieb genommen; gleichzeitig erfolgt die Rückstellung des Zählers. Im Interesse einer langen Lebensdauer sollte das Gerät so lange eingeschaltet bleiben, wie es benötigt wird. Leuchten die Glimmröhren nicht auf oder verlöschen sie während des Betriebes, so kontrolliere man die Sicherung ⑦ an der Rückseite des Gerätes und wechsle sie gegebenenfalls gegen eine neue aus (nur G-Schmelzeinsatz 250 V/200 mA träge einsetzen!).

Mit der Taste „Null“ wird der Zähler vor der Messung zurückgestellt. Bei sämtlichen Messungen wird die Taste „Messen“ gedrückt. Durch sie wird die Messung eingeleitet oder ermöglicht (siehe Abbildung 4.0.2./4).

Mit den drei Programmtasten kann ein internes Programm gewählt werden. Bei gedrückter Taste „100 Hz“ gelangen netzsynchrone Zeitmarken dieser Frequenz während des Meßvorganges zum Zähler. Manuelle Zeitmessungen und Messungen mit dem mechanischen Torschalter werden mit der Taste „Messen“ ausgelöst, bei Messungen mit dem Wurfgerät, mit Relais oder mit elektronischen Lichtempfängern bleibt diese Taste gedrückt. Die Messung wird von den genannten Geräten selbst ausgelöst.

Der Abgleich der *Zeitbasis* von „1,0 s“ bzw. „0,1 s“ erfolgt auf folgende Weise: Außer der gewählten Zeitbasistaste wird die Taste „100 Hz“ gedrückt. Sodann betätigt man zügig die Taste „Messen“, die nach dem Stillstand des Zählers sofort wieder gelöst wird. Weicht die Anzeige von 100 bzw. 10 ab, so verstellt man die Potentiometerwelle ④ bzw. ⑤ an der Rückseite des Gerätes und wiederholt den Vorgang, bis größtmögliche Genauigkeit erreicht ist. Für die *Frequenzmessungen* wird die Taste „100 Hz“ gelöst, die Spannung, deren Frequenz gemessen werden soll, an Buchse ① oder ② gelegt und die Messung mit der Taste „Messen“ ausgelöst. Zwischen zwei Messungen sollte eine Zeit von etwa 20 s liegen, anderenfalls kommt es zu fehlerhaften Anzeigen.

*Geschwindigkeitsmessungen* werden ebenso wie die Frequenzmessungen durchgeführt, d. h., man drückt die Zeitbasis „1,0 s“ und startet die Messung mit der Taste „Messen“. Die Anzeige erfolgt in  $m \cdot s^{-1}$  oder  $cm \cdot s^{-1}$ .

Die Tabelle auf der Seite 160 stellt eine Kurzfassung für die wichtigsten Meßaufgaben dar, außerdem werden das einzustellende Schild der Einheitenymbole und die Stellung des Kommas angegeben. Die in Klammern stehenden Einheitenymbole (z. B.  $min^{-1}$ ) werden nicht mit dem Digitalzähler Polydigit 1 ausgeliefert, jedoch können diese in die beiden schwarzen Schablonen eingekratzt werden.

Bei der Inbetriebnahme und bei allen Messungen beachte man folgende allgemeinen Hinweise:

- Die maximale Eingangsspannung von 100 V (Spitzenwert) darf nicht überschritten werden, nötigenfalls ist ein Spannungsteiler zu verwenden.
- Für jeden Geber (oder Wandler) ist mit dem Potentiometer auf dem Baustein I 1 der optimale Arbeitspunkt einzustellen. Springende Ziffern beim Betätigen von Tasten, beim Anstecken von Zubehör u. ä. deuten auf einen falschen Arbeitspunkt der Eingangsstufe hin.

Tabelle

Meßaufgabe	Messen (C)	1,0 s (E)	0,1 s (F)	100 Hz (D)	Null ⑥	Komma	Einheiten- symbol- schild
Stückzählung	×				↓	ohne	schwarz od. Imp
Zeitmessungen (int. Zeitmarken)	↓			×		00,00	s
– bei Wurf- bewegungen	×			×		00,00	s
– mit Torschalter für Weg-Zeit- Gesetze	↑↓			×		00,00	s
– manuell	↑↑			×		00,00	s
– mit Licht- empfänger	×			×		00,00	s
Zeitmessungen (ext. Zeitmarken)	↓					nach Fre- quenz	s
Abgleichen der Zeitbasis „1,0 s“	↓	×		×		ohne	schwarz
Abgleichen der Zeitbasis „0,1 s“	↓		×	×		ohne	schwarz
Frequenzmessung (int. Zeitbasis)	↓	< 10 <sup>5</sup> Hz		> 10 <sup>5</sup> Hz		ohne 00,00	Hz kHz
Frequenzmessung (ext. Zeitbasis)	↓					nach Zeitb.	Hz kHz
Drehzahlmessung	↑↓					ohne	s <sup>-1</sup> (min <sup>-1</sup> )
Geschwindigkeits- messung	↓	×				ohne 00,00	* $\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$ * $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

Zeichenerklärung: ↓ = Messung starten, ↑ = Messung stoppen, × = Taste gedrückt,  
\*( ) = Selbstanfertigung von Schildern

- Die Taste „100 Hz“ darf nicht gedrückt werden, wenn andere Impulse am Zählereingang anliegen.
- Ist das Gerät starken Temperaturunterschieden ausgesetzt, so ist es erst in Betrieb zu nehmen, wenn es sich an die Raumtemperatur angepaßt hat (etwa zwei Stunden).
- Das Gerät darf nur geöffnet werden, wenn der Netzstecker gezogen ist.
- Die an den Buchsen ① und ② anliegenden Spannungen sind nur gering zu belasten, die maximal verfügbaren Stromstärken richten sich nach der Bestückung und sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Überlastungen und Kurzschlüsse führen zur Zerstörung der Regeltransistoren!

Bestückung (nur Zählerbausteine)	verfügbare Stromstärke für periphere Geräte	
	bei $U_1 = +12 \text{ V}$	bei $U_2 = -4 \text{ V}$
3 Dekaden Z 1	190 mA	25 mA
4 Dekaden Z 1	150 mA	20 mA
5 Dekaden Z 1	110 mA	15 mA
4 Dekaden Z 1, 1 × Z 2	80 mA	5 mA

- Das Gerät ist nur für eine Wechselspannung von 50 Hz geeignet, deshalb darf es nicht an Gleichspannung angeschlossen werden.
- Das Gerät ist vor Erschütterungen jeglicher Art, mechanischen Einwirkungen, extremen Temperaturen, hoher Luftfeuchtigkeit und aggressiven Dämpfen zu schützen.

#### 4.0.2.6. Einige Besonderheiten der digitalen Meßverfahren

Die digitalen Meßgeräte haben gegenüber den bisher hauptsächlich in der Schulephysik eingesetzten analogen Meßgeräten einige Vorteile: Die Anzeige des Meßergebnisses ist eindeutig, Ablesefehler und andere subjektive Meßfehler werden weitgehend ausgeschlossen, das Schätzen von Zwischenwerten und die Umrechnung entfallen. Die Quantisierung der Meßgröße kann entsprechend der geforderten Genauigkeit erfolgen, so daß die Fehler sehr klein werden. Prinzipiell lassen sich alle Gleichgrößen quantisieren, jedoch muß man abschätzen, ob der technische Aufwand ökonomisch vertretbar und methodisch sinnvoll ist.

Die meisten Zählungen und Messungen mit dem Polydigit 1 sind integrierend, d. h., der angezeigte Meßwert ist der zeitliche Mittelwert der Größe. Schwankungen der Impulsfolge während der Abfragezeit werden nicht im Meßwert berücksichtigt. Soll der Momentanwert der Größe ermittelt werden, sind kurze Abfragezeiten erforderlich — diese setzen jedoch eine Quantisierung in sehr kleinen Einheiten voraus (hohe Impulsfrequenz). Beide Forderungen lassen sich nicht gleichzeitig erfüllen, so daß man das günstigste Verhältnis von Abfragezeit und Quantisierung abwägen muß. Der Digitalzähler Polydigit 1 ist aus diesem Grunde im allgemeinen nicht für Messungen geeignet, bei denen eine kurzfristig ablaufende Zustandsänderung eines physikalischen Systems beobachtet werden soll. Hier liefert ein analoges Meßgerät eine größere Information (z. B. Beobachtung des Zeigerausschlages eines Drehspulmeßgerätes oder der Auslenkung des Leuchtflecks eines Oszilloskopfes). Der Digitalzähler ist für die Messung solcher Größen einzusetzen, die über einen längeren Zeitraum, mindestens über die Abfragezeit, konstant bleiben. Wie jede Messung, sind auch Messungen mit digitalen Geräten nicht fehlerfrei. So

können Linearitätsfehler bei der Analog-Digital-Umsetzung auftreten, d. h. die durch die Quantisierung erzeugte Impulsfrequenz ist nicht streng proportional der zu messenden Gleichgröße. Durch Einstreuungen aus dem Stromversorgungsnetz können ebenfalls Störimpulse zum Zähler gelangen.

Die Zählschaltungen arbeiten bis zur angegebenen oberen Frequenz fehlerfrei, auch verformte Impulse, die die Ansprechspannung der Eingangsstufe erreichen, werden registriert. Ein Fehler von einem Impuls muß jedoch durch die willkürliche Toröffnung bei allen Messungen und Zählungen berücksichtigt werden.

Aus der Abbildung 4.0.2./17 geht hervor, wie durch die unterschiedliche Lage der Toröffnung während des gleichen Zeitintervalls  $\Delta t$  sieben bzw. acht Impulse gezählt werden. Soll der relative Fehler einer Messung möglichst klein werden, so muß man eine große Anzahl Impulse zählen. Bei einer Zählrate von 10 Impulsen beträgt der relative Fehler  $\frac{\Delta z}{z} = 0,1$ , bei 100 Impulsen 0,01, bei 1000 Impulsen nur noch 0,001. Diese Tatsache muß vor allem bei der Messung kurzer Zeiten, kleiner Frequenzen, niedriger Drehzahlen usw. beachtet werden.

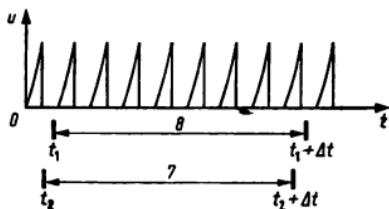


Abb. 4.0.2./17 Zur Entstehung des Zählfehlers durch die Toröffnung

4.0.3. Zum Verständnis der Gesetzmäßigkeiten der *gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung* sind klare Vorstellungen über die Begriffe *Momentangeschwindigkeit* und *Momentanbeschleunigung* erforderlich. Ihre Erarbeitung sollte deshalb besonders sorgfältig geschehen. Der Begriff *Momentangeschwindigkeit* kann durch eine Grenzwertbildung aus der durchschnittlichen Geschwindigkeit gewonnen werden (vgl. V 4.2.1.). In der Abiturstufe kann man sich hierbei auf die Kenntnisse der Infinitesimalrechnung (Differentialrechnung) stützen. Man sollte diese Kenntnis jedoch nicht einfach formal auf die Physik übertragen, sondern die dafür erforderlichen Zusammenhänge auch experimentell erarbeiten. Eine grafische Darstellung zur Herleitung des Grenzwertbegriffs (grafische Differentiation) kann die Anschaulichkeit erhöhen. Die Durchschnittsgeschwindigkeit wird als Anstieg der Sekante, als Differenzenquotient  $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ , und die *Momentangeschwindigkeit* als Anstieg der Tangente, als Differentialquotient  $v = \frac{ds}{dt}$ , im Weg-Zeit-

Diagramm dargestellt. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der *Beschleunigung*. Bei der Gewinnung des *Beschleunigungsbegriffes* bereitet es erfahrungsgemäß den Schülern Schwierigkeiten, daß die Zeiteinheit im Nenner in ihrem Quadrat auftritt. Man kann das Verständnis für diese Zusammenhänge dadurch erleichtern, daß man ausgehend von Beobachtungen am *Demonstrationstachometer* *Beschleunigungs berechnungen mit bestimmten Zahlenwerten* durchführt.

**Beispiel**1. Tachometerablesung  $v_1 = 6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 2. Ablesung nach 8 s  $v_2 = 22 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 

Geschwindigkeitszunahme

in 8 s . . .  $\Delta v = 16 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ Demnach beträgt die Beschleunigung  $a$ ,  
der Quotient aus der Geschwindigkeits-  
zunahme und der dazu  
erforderlichen Zeit

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{16 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{8 \text{s}} = 2 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}.$$

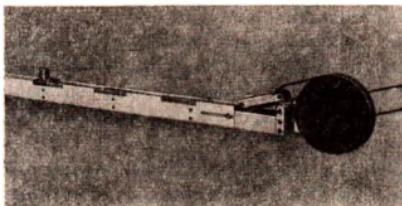


Abb. 4.0.2./18 Wickelapparat zur Darstellung gleichmäßig beschleunigter Bewegungen mit dem Bandgerät

Ahnlich wie bei der Definition der Geschwindigkeit sollte man bei der Definition der Beschleunigung besonderen Wert auf die Formulierung legen. Die Darstellung der Beschleunigung als Geschwindigkeitsänderung in der Zeiteinheit würde zur Vorstellung führen, daß die Beschleunigung eine Geschwindigkeit sei. Richtig muß es heißen: Die Beschleunigung ist der Quotient aus der Geschwindigkeitsänderung und der dafür benötigten Zeit. Daraus ergibt sich die Einheit: (Meter je Sekunde) je Sekunde bzw. Meter je Sekundenquadrat. Zur Behandlung der gleichmäßig beschleunigten Bewegung werden dieselben Experimentiergeräte benutzt wie für die gleichförmige geradlinige Bewegung. Das Bandgerät muß jedoch durch den *Wickelapparat* (Abb. 4.0.2./18) ergänzt werden, und statt des endlosen Leinenbandes wird auf der Doppel-T-Schiene des Bandgerätes ein etwa 7 m langes Filzband ausgelegt, das sich auf einen Dorn des Wickelapparates aufwickelt. Das Ende des Filzbandes vollführt dann eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Das Filzband wird dabei über eine gerippte Rolle geführt, an die das Demonstrationstachometer angeschlossen werden kann. Bei dem Gerät, das dem Verfasser zur Verfügung stand, füllten sich die Rillen dieser Antriebsrolle mit Staub, der durch Abnutzung des Filzbandes entstand, und es konnte die zum Antrieb des Tachometers erforderliche Kraft nicht mehr übertragen werden. Dieser Mangel läßt sich durch eine Veränderung der gerippten Rolle oder durch die Benutzung eines Leinenbandes statt des Filzbandes beheben.

Verwendet man die Galileische Fallrinne, so kann die Zeitmessung mit dem Metronom erfolgen. Die auf der Fallrinne aufgestellten Markierungstore zeigen sehr anschaulich die Zunahme der Wegstrecken (vgl. V 4.2.1.). Die Verwendung eines elektrischen Kurzzeitmessers in Verbindung mit dem Haltemagnet und der Kontaktplatte oder des Digitalzählers Polydigit mit Haltemagnet und mechanischem Torschalter oder mit Lichtschranken liefert genauere Meßwerte.

In der Abiturstufe empfiehlt es sich, als Zeitmeßeinrichtung einen elektronischen Impulszähler in Verbindung mit zwei Lichtschranken zu benutzen. Verschiebt man die erste Lichtschranke immer weiter auf die zweite zu, dann wird die Zeitdifferenz  $\Delta t$  immer kleiner, und die errechnete Geschwindigkeit kommt der Momentangeschwindigkeit immer näher. Bei langsamer Bewegung der Kugel oder bei der Verwendung hoher Impulsfrequenzen kann man mit nur einer Lichtschranke die Momentangeschwindigkeit einer rollenden Kugel bestimmen, indem man den Durchmesser der Kugel durch die vom Zählgerät angezeigte Zeit, die Zeit, während der die Kugel den Lichtstrom unterbrochen hat, dividiert. .

### 4.0.3.

Eine Vielzahl brauchbarer Meßwerte liefert der Reifenapparat. Durch die große Anzahl der Meßwerte wirken die Auswertung und ihr Ergebnis auf die Schüler sehr überzeugend.

Der Schienenwagen bietet den Vorteil, daß man auf ihm das Demonstrations-tachometer anbringen kann. Die Schüler können dann an der Tachometeranzeige das Wesen der beschleunigten Bewegung, die Geschwindigkeitszunahme, direkt erkennen. Die dabei ermittelten Meßwerte sind jedoch meist etwas ungenau.

**4.0.4.** Der freie Fall wird als eine der gleichmäßig beschleunigten Bewegungen behandelt. Die Schwierigkeiten, die früher die Zeitmessung bei schnell ablaufenden Bewegungen bereitete, sind gegenstandslos geworden, weil im elektrischen Kurzzeitmesser, der Demonstrationsstoppuhr und dem Digitalzähler Polydigit Zeitmeßgeräte zur Verfügung stehen, mit denen man auch schon bei relativ kurzen Fallstrecken brauchbare Meßwerte erhält und die Gesetze des freien Falles herleiten oder bestätigen bzw. die Fallbeschleunigung bestimmen kann. Zur Bestimmung der Fallbeschleunigung sind auch das Fadenpendel und das physische Pendel besonders für Schülerexperimente sehr gut geeignet (V 4.3.6. und V 4.3.7.). Die Bezeichnung „Erdbeschleunigung“ für „Fallbeschleunigung“ führt bei den Schülern leicht zu falschen Vorstellungen und sollte vermieden werden.

**4.0.5.** Im Abschnitt über zusammengesetzte Bewegungen sind einige Experimente beschrieben, die den Nachweis führen sollen, daß ein Körper, der gleichzeitig zwei oder mehrere Bewegungen ausführt, dasselbe Ziel erreicht, das er auch erreichen würde, wenn er die Bewegungen nacheinander ausführen würde. Diese Erkenntnis ist für die Behandlung der Wurfbewegungen nötig. In der Abiturstufe kann man die Funktionsgleichung der Wurfbahnen  $y = f(x)$  herleiten und mit der Differentialrechnung die Wurfhöhen als Extremwerte berechnen. Umgekehrt kann man mit Hilfe der Integralrechnung die Gesetze des lotrechten Wurfes herleiten, wenn die Fallbeschleunigung als bekannt vorausgesetzt wird. Auf die Wirkung des Luftwiderstandes wird hierbei nicht eingegangen. Deshalb weichen die Meßwerte von den errechneten etwas ab.

**4.0.6.** Zur Herleitung des zweiten Newtonschen Gesetzes sind die Experimente V 4.5.1 bis V 4.5.4. gedacht. Diese Versuchsanordnungen beruhen im Prinzip auf der Verlangsamung der Bewegung. Dadurch kann man ihre Gesetzmäßigkeiten leicht erfassen. Das wird erreicht, indem man einen Körper mit möglichst großer Masse durch eine Kraft mit kleinem Betrag in Bewegung setzt. Auf Körper mit großen Massen wirken aber große Gewichtskräfte, und diese haben wieder große Reibungskräfte bei der Bewegung zur Folge. Beim Schienenwagen (V 4.5.1.) und bei dem gleichmäßig beschleunigt absinkenden Körper (V 4.5.4.) muß die Reibungskraft für jede Belastung neu bestimmt und durch die Gewichtskraft eines zusätzlich aufgelegten Wägestückes kompensiert werden. Die Meßwerte sind aber besonders beim Schienenwagen trotzdem nicht immer sehr genau, weil die Reibungskraft entlang der Bahn des Wagens nicht konstant ist. Diese beiden Experimente haben aber den Vorzug, sehr übersichtlich zu sein. Sehr exakte Werte liefern V 4.5.2. und 4.5.3. Die physikalischen Zusammenhänge sind hierbei jedoch nicht so leicht zu übersehen wie bei den beiden anderen Experimenten. Zur Herleitung des zweiten Newtonschen Gesetzes  $a \sim F$  kann man es ohne Bedenken einsetzen, wenn aber das Kraftwirkungsgesetz  $F = m \cdot a$  damit bestätigt werden soll, setzt es bei



den Schülern ein höheres Abstraktionsvermögen und die Kenntnis des Grundgesetzes der Drehbewegung voraus. Es ist deshalb besonders für die Abiturstufe geeignet.

Die restlichen Experimente dieses Abschnitts dienen dem Nachweis der Änderung der Gewichtskraft eines beschleunigt aufwärts oder abwärts bewegten Körpers. Sie können dazu benutzt werden, die Änderung der Gewichtskraft der Kosmonauten beim Start und bei der Landung zu erklären.

**4.0.7.** Bei der Behandlung der *Reibung fester Körper* bieten sich viele Gelegenheiten, an Aufgaben der Technik und Vorgängen des täglichen Lebens anzuknüpfen. Meist sieht man in der Reibung ein lästiges Übel, weil durch den Reibungswiderstand der Wirkungsgrad einer Maschine herabgesetzt wird und ein Teil der aufgewendeten Energie für die praktische Nutzung verlorengeht. In anderen Fällen erweist sich die Reibung als unbedingt notwendig, um überhaupt eine Bewegung zu ermöglichen, denn auf einem völlig reibungsfreien Boden würde man ohne weiteres nicht von der Stelle kommen können. Es sei denn, daß zum Antrieb eine Rückstoßwirkung ausgenutzt wird (Raketenantrieb). Wesentlich ist die Erkenntnis, daß ein Körper auf einer horizontalen Bahn nur dann in gleichförmiger Bewegung gehalten werden kann, wenn dauernd eine Zugkraft vorhanden ist, die den Reibungswiderstand gerade überwindet. Von dem Einfluß des unter Umständen sehr beträchtlichen Luftwiderstandes wird in diesem Zusammenhang abgesehen.

Bei der Betrachtung des *Wirkungsgrades* von Maschinen unter Berücksichtigung der Reibung ist darauf hinzuweisen, daß die aufgewendete Reibungsarbeit in Wärme umgewandelt wird und daß unter Berücksichtigung dieser Energie das Gesetz der Erhaltung der Energie erfüllt ist (vgl. dazu die Versuche mit dem Prony-schen Zaum V 3.5.6. bis V 3.5.8.).

Der Schüler soll auch Verständnis dafür gewinnen, wie der Fortschritt der Physik dadurch gefördert worden ist, daß die Gesetze der Mechanik zunächst einmal für den idealisierten Fall reibungsfreier Vorgänge formuliert wurden. Unter diesem Gesichtspunkt ist auch der Gedankenversuch aufgenommen worden, der Stevin zur Erkenntnis des Gesetzes der geneigten Ebene geführt hat (vgl. V 4.6.8.).

Besonderes Interesse dürften V 4.6.2. und 4.6.3. finden, die eine bisher in den allgemeinbildenden Schulen noch nicht berücksichtigte Möglichkeit der Verminderung der Reibungskraft zeigen. V 4.6.2. kann gleichzeitig als Modellversuch zur Wirkungsweise eines Luftkissenfahrzeugs bezeichnet werden. Zur Auflockerung und Aktualisierung des Unterrichts sollten bei der Behandlung der Reibung auch Aufgaben aus der Technik, möglichst aus dem polytechnischen Unterricht bzw. aus der produktiven Arbeit der Schüler, herangezogen werden.

## 4.1. Die gleichförmige geradlinige Bewegung

### 4.1.1. Veranschaulichung einer gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit einer rollenden Kugel — Geschwindigkeit [SE]

1. Holzkugel, Stahlkugel oder Gummiball
2. Brettchen (Länge etwa 40 cm, an einer Schmalseite scharfkantig abgeflacht) ⑧
3. Holzkeil

4. mehrere Holzklötzchen
5. Brettchen
6. Maßstab
7. Stoppuhr oder Metronom oder elektronischer Zeitmesser

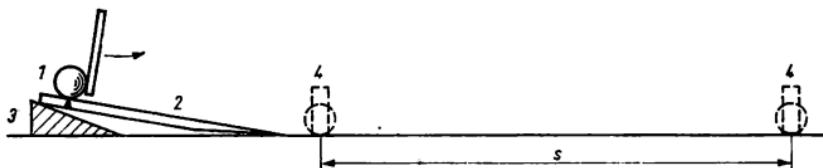


Abb. 4.1.1.1 Bestimmung der Geschwindigkeit einer gleichförmig rollenden Kugel

#### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment kann mit einfachen Mitteln ausgeführt werden und hat den Charakter eines Freihandversuches. Es ist vom Schüler leicht zu überblicken und eignet sich deshalb gut als Einführungsversuch.
2. Die Geschwindigkeit wird bei diesem Experiment im allgemeinen in der Einheit  $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$  ermittelt. Man sollte schon hier wie auch bei den folgenden Experimenten die ermittelten Werte in die Einheiten  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$  umrechnen lassen.
3. Bei der Ausführung als Demonstrationsversuch ist das Metronom der Stoppuhr vorzuziehen, weil die Zeitmarken, die Schläge des Metronoms, von allen Schülern wahrgenommen werden können. Statt des Metronoms kann auch die Zentraluhr verwendet werden, wenn man mit ihr akustische Signale erzeugt.

#### Versuch

Man lässt eine Kugel auf einer waagerechten, glatten Tischfläche mit einer bestimmten Geschwindigkeit rollen. Um jedesmal die gleiche Geschwindigkeit zu erhalten, lässt man die Kugel immer wieder von derselben Höhenmarke eines geneigten Brettes aus ablaufen. Die Auslösung der Bewegung erfolgt durch ruckartiges Fortziehen eines vor die Kugel gehaltenen Brettchens in der Bewegungsrichtung (Abb. 4.1.1.1). Durch zwei schmale Markierungsklötzchen, an denen die Kugel vorbeilaufen, wird auf dem Tisch eine Strecke  $\overline{AB} = s$  festgelegt. Die beim Zurücklegen der Strecke verfließende Zeit wird mit einer Stoppuhr gemessen. Die Division von  $s$  durch  $t$  führt zur Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  längs der Strecke  $\overline{AB}$ , gemessen in  $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ :

$$\bar{v} = \frac{s}{t}.$$

#### Bemerkungen

1. Wird die Zeit mit dem Metronom gemessen, so startet man die Kugel mit einem Schlag des Metronoms und verschiebt die beiden Markierungsklötzchen so weit, daß sie bei je einem Schlag des Metronoms passiert werden. So kann der Vorgang beliebig oft wiederholt werden.



Hat man das Metronom auf Sekundenschlag (Marke 60 auf der Skale des Metronom) eingestellt, so kann man die Laufzeit der Kugel in Sekunden angeben.

2. Statt des Ablaufbrettchens kann man besonders für Schülerexperimente ein Federstoßgerät (SEG Mechanik) verwenden.
3. Die Tischflächen der Experimentiertische sind im allgemeinen am Rande mit einer Rinne versehen, die als behelfsmäßige Laufrinne für dieses Experiment genutzt werden kann.
4. Statt der rollenden Kugel kann auch der Gleitkörper auf der Luftkissenbahn (vgl. V 4.1.8.) eingesetzt werden. Der Vorzug dieser Anordnung besteht darin, daß wesentlich geringere Geschwindigkeiten möglich sind, ohne daß der Charakter der gleichförmigen Bewegung verlorengeht. Dadurch werden Weg-Zeit-Messungen auf kurzen Strecken möglich. Somit können bei einem Bewegungsablauf zwei oder mehrere Weg-Zeit-Messungen an verschiedenen Stellen vorgenommen und so Voraussagen bezüglich der für bestimmte Wege erforderlichen Zeiten bestätigt werden.

#### 4.1.2. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit der Fallrinne — Geschwindigkeit [SE]

##### Zu Variante a

1. Fallrinne (etwa 2 m lang) mit kurzer Anlaufrinne ⑧
2. Holzkeil
3. Stahlkugel oder Holzkugel (Ø etwa 3 cm ... 4 cm)
4. Brettchen oder Startvorrichtung
5. Holzklotz
6. Markierungsbügel aus Blech
7. Metronom oder Zentraluhr

##### Zu Variante b

Geräte 1. bis 6., außerdem  
8. Stoppuhr oder elektronischer Zeitmesser

##### Zu Variante c

Geräte 1. bis 5., außerdem  
9. Polydigit mit zwei Lichtschranken

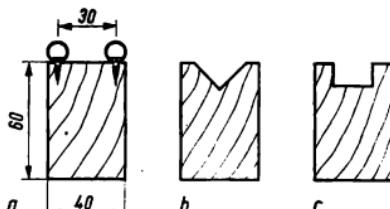


Abb. 4.1.2./1 Querschnitte durch verschiedene Ausführungsformen der Fallrinne

##### Methodische Hinweise

1. Zur Verwendung der Fallrinne vergleiche MB 4.0.1.!
2. Bei diesem Experiment ist die Reibungskraft bei der Bewegung der Kugel geringer als bei V 4.1.1. Die Meßergebnisse sind deshalb genauer.
3. Zur Zeitmessung in der Variante c vergleiche MB 4.0.2.!

##### Herstellung der Fallrinne

Fallrinnen sind vereinzelt noch in älteren Unterrichtsmittelsammlungen vorhanden. Aber auch die Selbstherstellung ist nicht schwierig. Auf einer 2 m langen Leiste aus Hartholz mit einem Querschnitt von 4 cm × 6 cm bringt man im Abstand von

30 mm parallel zueinander zwei Aluminiumrohre ( $\varnothing$  etwa 10 mm, als Material für UKW oder Fernsehantennen im Handel erhältlich) an. Die Befestigung erfolgt in Abständen von 50 cm mit kleinen Holzschrauben (Abb. 4.1.2./1 a).

Statt der Rohre können behelfsmäßig auch scharfkantige Rinnen mit V- oder U-Profil verwendet werden, die man in die Latte einfräsen läßt (Abb. 4.1.2./1b und c). Auch eine Gardinenschiene mit I-Profil, die man flach auf der Leiste befestigt, kann als Fallrinne verwendet werden. Auf der Vorderseite der Leiste bringt man eine Zentimeterskale an.

Die Ablaufrinne ist etwa 25 cm lang. Sie wird auf die gleiche Weise hergestellt wie die Fallrinne.

Als Startvorrichtung für die Kugel benutzt man wie in V 4.1.1. ein Brettchen oder eine Startvorrichtung nach Abbildung 4.1.2./2a oder bei der Verwendung einer Stahlkugel einen Haltemagneten. Die Markierungsbügel werden nach Abbildung 4.1.2./2b aus Blechstreifen gebogen.

#### Variante a

Der Aufbau des Gerätes ist in der Abbildung 4.1.2./3 dargestellt. Um die Reibung auszugleichen, gibt man der langen Fallrinne ein leichtes Gefälle. Dazu genügt meist schon ein Blatt Papier, das man mehrfach faltet und unterlegt. Die richtige Neigung wird durch Probieren gefunden. Die Kugel soll auch bei geringer Geschwindigkeit nicht zum Stillstand kommen, aber auch nicht beschleunigt werden. Das Metronom wird auf Sekundenschlag (Oberkante der verschiebbaren Pendelmasse auf die Marke 60 stellen) eingestellt.

Man läßt die Kugel mehrmals unter gleichen Bedingungen (gleiche Anlaufstrecke und Start jeweils beim Schlag des Metronoms) abrollen und stellt die Markierungsbügel so auf, daß die Kugel bei jedem Sekundenschlag des Metronoms eine Marke passiert. Die zusammengehörigen Meßwerte für die Zeit und den Weg werden in einer Tabelle zusammengefaßt und in ein rechtwinkliges Koordinatensystem eingetragen (Abb. 4.1.2./4).

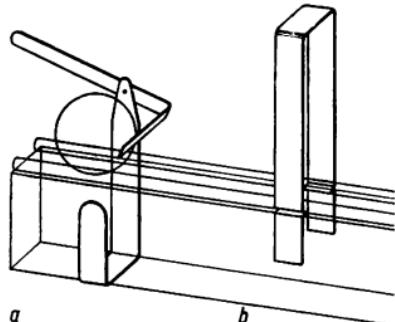
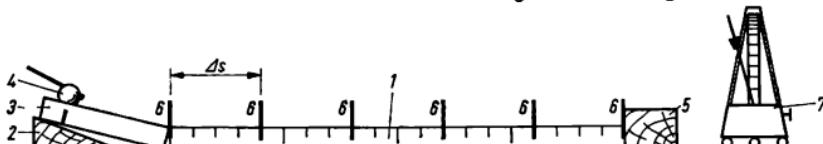


Abb. 4.1.2./2 a) Startvorrichtung und  
b) Markierungsbügel

Abb. 4.1.2./3 Versuchsanordnung  
zur Untersuchung der gleichförmigen  
geradlinigen Bewegung  
einer Kugel auf einer waagerechten Rinne



## Beispiel für die Abhängigkeit des Weges von der Zeit

Zeit $t$ in s	Weg $s$ in cm	$\Delta s$ in cm	$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$
0	0		
1	36,5	36,0	36,0
2	72,5	37,0	37,0
3	109,5	36,5	36,5
4	146,0	37,0	37,0
5	183,0		

Schließlich werden auch die für die Geschwindigkeit ermittelten Werte grafisch dargestellt (Abb. 4.1.2./5.).

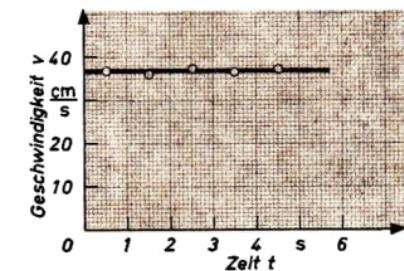
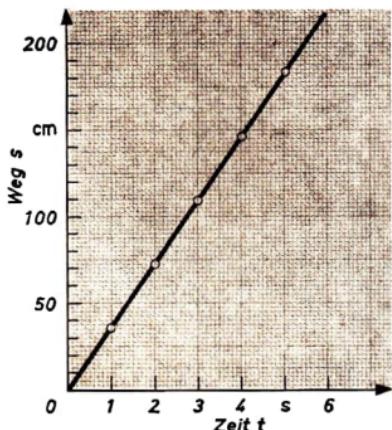


Abb. 4.1.2./5 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der untersuchten gleichförmigen geradlinigen Bewegung

Abb. 4.1.2./4 Weg-Zeit-Diagramm der untersuchten gleichförmigen geradlinigen Bewegung

Das Experiment zeigt:

In gleichen Zeitabschnitten werden gleiche Wegstrecken zurückgelegt.

Die Geschwindigkeit  $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$  ist konstant.

Das sind die Kennzeichen der gleichförmigen Bewegung.

### Variante b

Der Versuchsaufbau entspricht dem der Variante a. Die Markierungsbügel werden in gleichen Abständen (z. B. 20 cm) aufgestellt. Man lässt die Kugel unter gleichen Bedingungen mehrfach abrollen und bestimmt mit einer Stoppuhr

- die Zeitabschnitte, die zum Durchlaufen gleicher Wegstrecken benötigt werden (sie sind mit guter Näherung gleich),
- die Zeitabschnitte, die zum Durchlaufen verschiedener Wegstrecken benötigt werden.

### Die Quotienten aus Weg und Zeit

$$\bar{v} = \frac{s}{t}$$

sind nahezu konstant.

#### *Variante c*

Statt der Markierungsbügel werden Lichtschranken benutzt. Die erste Lichtschranke, die den Start der Zeitmessung am Polydigit auslöst, setzt man an den Anfang der horizontalen Rinne, die zweite Lichtschranke, die den Zählvorgang beendet, in 10 cm Entfernung. Sie wird nach jeder Messung jeweils um 10 cm weiter gerückt. Die Auswertung erfolgt wie bei der Variante b.

#### *Bemerkungen*

1. Ein Holzklotz, den man an das Ende der Rinne stellt, verhindert, daß die Kugel die Rinne verläßt und vom Tisch rollt.
2. Vergleiche Bem. Nr. 3, V 4.1.1.!

### **4.1.3. Geschwindigkeitsbestimmungen an gleichförmigen Bewegungen im Freien**

1. Markierungsstäbe
2. Meßband
3. Stoppuhr

#### *Methodische Hinweise*

1. Dieses Experiment zeigt eine Methode der Geschwindigkeitsbestimmung, die in der Praxis häufig angewandt wird. Nach diesem Prinzip werden z. B. Geschwindigkeiten von Fahrzeugen auf Teststrecken oder von Läufern bei sportlichen Wettkämpfen ermittelt.
2. Die Geschwindigkeit wird bei diesem Experiment im allgemeinen in der Einheit  $m \cdot s^{-1}$  ermittelt. Man sollte sie zur Übung auch in die Einheit  $km \cdot h^{-1}$  umrechnen lassen.
3. Die hier für ein Kraftfahrzeug ermittelte Geschwindigkeit sollte auch mit der Tachometeranzeige im Fahrzeug verglichen werden.
4. Man versäume nicht, die Schüler darauf hinzuweisen, daß man bei einer Fahrt mit der Eisenbahn aus den an Kilometersteinen abgelesenen Wegen und den zugehörigen Zeiten die durchschnittliche Geschwindigkeit des Zuges ermitteln kann.

#### *Versuch*

Auf dem Schulhof bzw. auf dem Sportplatz oder auf der Landstraße wird eine Versuchsstrecke abgesteckt und gemessen. Die Geschwindigkeitsmessungen erstrecken sich auf

- a) Fußgänger (ruhige Gangart, Wanderschritt),
- b) Läufer (ruhiger Dauerlauf),
- c) Radfahrer (gleichförmig, nicht zu schnelle Fahrt) und
- d) Kraftwagen oder Motorrad (mittlere Reisegeschwindigkeit).

Die Zeit wird mit der Stoppuhr (notfalls mit der Taschenuhr) gemessen, und zwar zweckmäßigerweise am Anfangspunkt der Meßstrecke bei „fliegendem Start“. Der Zeitnehmer steht an ihrem Ende. Das Durchlaufen der Startlinie wird durch rasches Senken eines hochgehaltenen Tuches gekennzeichnet. Die durchschnittliche Geschwindigkeit wird nach der Gleichung  $\bar{v} = \frac{s}{t}$  errechnet.

#### 4.1.4. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit dem Reifenapparat [SE]

1. Reifenapparat mit Zubehör
2. Zentraluhr

##### *Methodische Hinweise*

1. Experimente mit dem Reifenapparat zeichnen sich dadurch aus, daß die Bewegung langsam abläuft und dadurch gut beobachtet werden kann. Sie liefern bei richtiger Justierung der Geräte sehr genaue Meßwerte. Der Aufbau und die Justierung erfordern aber eine gewisse Zeit und sollten deshalb unbedingt vor dem Unterricht erfolgen.
2. Trotz der erforderlichen Justierung ist das Experiment für das Praktikum geeignet. Die Schüler werden dadurch zur Gewissenhaftigkeit erzogen.
3. Wird die ältere Ausführung des Reifenapparats verwendet, könnte es die Schüler verwirren, daß außer der geradlinigen Bewegung des Papierzeigers auch die Rotation des Reifens zu beobachten ist. Man lenkt ihre Aufmerksamkeit auf die Bewegung des Zeigers und verweist darauf, daß die Rotation zu einem späteren Zeitpunkt untersucht wird.

##### *Aufbau des Gerätes*

Auf einem Stativstab von 50 cm Länge wird die Kugelpfanne aufgeschraubt und von unten her das Bremsrohr darübergeschoben, so daß die Stifte der Kugelpfanne in die Schlüsse des Bremsrohrs eingepaßt werden (Abb. 4.1.4./1a). Danach wird der Ausheber aufgeschoben und festgeklemmt. Der so vorbereitete Stativstab wird in einem großen V-Fuß befestigt, so daß der rote Punkt am Bremsrohr vom Betrachter aus gesehen nach rechts zeigt. Nun lockert man die Klemmschraube, dreht den Hebel des Auslösers nach rechts unter den roten Punkt und hebt oder senkt den Ausheber so, daß der Stift der Kugelpfanne etwa 2 mm unter dem oberen Rand des Bremsrohrs steht (Abb. 4.1.4./1a). In dieser Stellung wird die Klemmschraube festgezogen. Nachdem man die Kugel in die Kugelpfanne gelegt hat, setzt man die Stufenrolle auf. Die Stufenrolle sitzt in dieser Stellung auf dem oberen Rand des Bremsrohrs auf. Sie wird frei beweglich, wenn man den Hebel des Auslösers nach links bewegt (Abb. 4.1.4./1b). Dadurch wird das Kugellager wirksam. Man erkennt es daran, daß die Stufenrolle pendelt. Nun wird der Rotationszylinder aufgesetzt.

Zur Montage des Meßstabes werden zwei 50 cm-Stativstäbe in die dafür vorgesehene Klemme geschraubt und darauf die 1 m-Skale festgeklemmt. Der so vorbereitete Meßstab wird mit einem weiteren 50 cm-Stativstab und einem großen V-Fuß aufgestellt (Abb. 4.1.4./2). Schließlich wird am rechten Ende des Meßstabes die Fein-

rolle befestigt, der Dederonfaden von der Stufenrolle abgewickelt, über die Feinrolle gelegt und in die Schlaufe an seinem Ende mit Hilfe des kleinen S-Hakens die Schnurkarte eingehängt. Nachdem man die Starteinrichtung festgestellt hat (der Hebel muß nach rechts zeigen), kann man an den Faden der Schnurkarte einen Hakenkörper anhängen. Das Stativ mit dem Meßstab muß nun so ausgerichtet werden, daß der Dederonfaden parallel zum Meßstab verläuft. Dabei soll der Faden mit dem Hakenkörper an der Tischkante herabhängen.

#### Versuch

Für dieses Experiment wird ein Hakenkörper von 20 g Masse verwendet. Von der Schnurkarte wird der Faden so weit abgewickelt, daß der Hakenkörper den Fußboden berührt. In dieser Stellung soll die Fadenmarke dicht vor der Nullmarke des Meßstabes stehen, und die Schnurkarte sollte etwa 15 cm unter der Feinrolle hängen. Nun verschiebt man das Stativ mit dem Rotationszylinder so weit nach links, daß der Hakenkörper etwa 10 cm über dem Fußboden hängt. Die Zentraluhr wird so eingestellt, daß sie akustische Impulse im 5 s-Rhythmus erzeugt. Damit ist das Gerät funktionsbereit.

Bewegt man den Hebel des Auslösers zügig nach rechts, wird durch die Gewichtskraft des Hakenkörpers dem Rotationszylinder ein Drehimpuls erteilt, und der Faden mit der Fadenmarke setzt sich in Bewegung. In dem Augenblick, in dem die Fadenmarke die Nullmarke des Meßstabs passiert, wird die Zentraluhr durch Druck auf die Taste „Messen“ in Gang gesetzt. Bei jedem Signal, das sie erzeugt, wird bei der jeweiligen Stellung der Fadenmarke ein Markierungspfeil von unten her auf den Meßstab gesteckt.

Bevor die Fadenmarke das Ende des Meßstabes erreicht, wird der Rotationszylinder mit der Hand abgebremst. Durch Drehen des Rändels der Stufenrollewickelt man den Faden wieder auf. Mit dem Feststellen der Stufenrolle ist das Gerät erneut meßbereit. Man wiederholt den Vorgang und korrigiert gegebenenfalls die Stellung der Markierungspfeile (Abb. 4.1.4./3).

Da nach dem Aufsetzen des Hakenkörpers auf den Fußboden der Vorgang antriebslos erfolgt, vollführt die Fadenmarke eine gleichförmige geradlinige Bewegung. Die Gewichtskraft der Schnurkarte dient dabei als Ausgleich der Reibungskraft. Zusammengehörige Werte für die Zeit und den von der Fadenmarke zurückgelegten Weg faßt man in einer Tabelle zusammen.

#### Beispiel für die Abhängigkeit des Weges von der Zeit

$t$ in s	$\Delta t$ in s	$s$ in cm	$\Delta s$ in cm	$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ in cm/s
0	5	0	20	4
5	5	20	20	4
10	5	40	20	4
15	5	60	20	4
20		80		

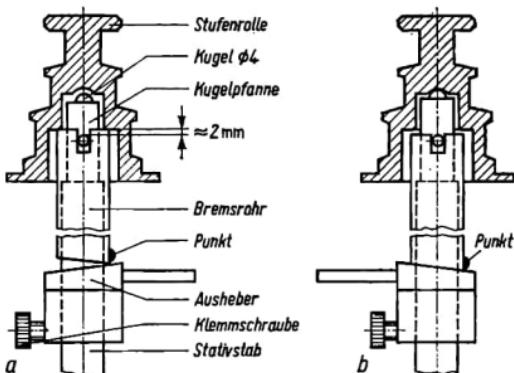


Abb. 4.1.4./1 Stativstab mit Stufenrolle und Starteinrichtung:  
a) Die Stufenrolle sitzt auf der Auflagefläche des Bremsrohres.  
b) Die Stufenrolle ist zur Bewegung freigegeben.

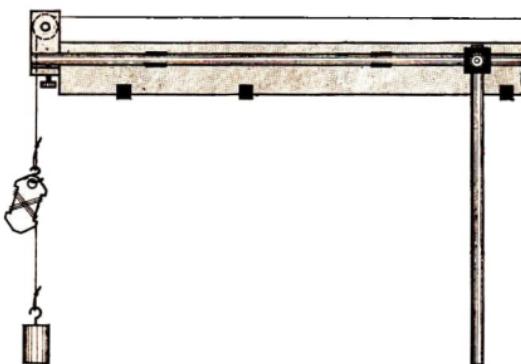


Abb. 4.1.4./2 Stativ mit Meßstab und Feinrolle

Trägt man sie außerdem in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein (Abb. 4.1.4./4), so erkennt man sowohl an der Tabelle wie auch an der grafischen Darstellung, daß der Gesamtweg  $s$  gleichmäßig zunimmt bzw. daß in gleichen Zeiten gleiche Wege zurückgelegt werden und daß die Geschwindigkeit konstant bleibt. Schließlich wird zur Vervollständigung der Auswertung noch ein Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm angefertigt (Abb. 4.1.4./5).

#### Bemerkungen

1. Beim Aufbau der Versuchsanordnung ist darauf zu achten, daß die untere Kugelpfanne völlig sauber ist und daß die Feinrolle frei in ihren Lagern läuft.
2. Die maximale Belastung der Feinrolle darf 1 N nicht übersteigen (maximal 100 g-Hakenkörper).
3. Daß die einzelnen Wege immer gerade 20 cm betragen, kann man erreichen, indem man den Abstand des Hakenkörpers vom Fußboden vor dem Start des Bewegungsvorganges entsprechend verändert.
4. Bei der Verwendung des Reifenapparats älterer Ausführung gestaltet sich das Experiment ähnlich. Statt des Hakenkörpers benutzt man hier zum Antrieb eine geschlitzte Scheibe, die

V 4.1.4.

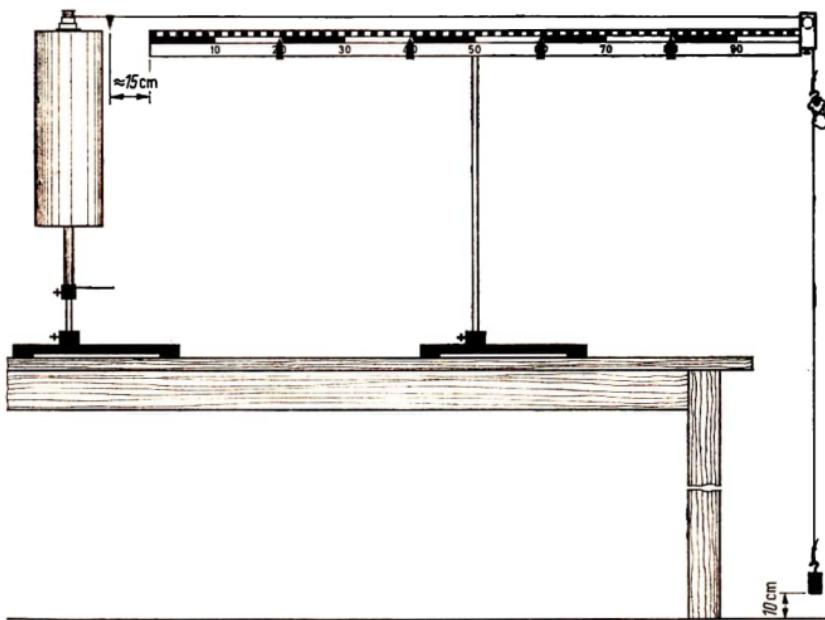


Abb. 4.1.4./3 Reifenapparat mit Rotationszylinder (Ausgangsstellung)

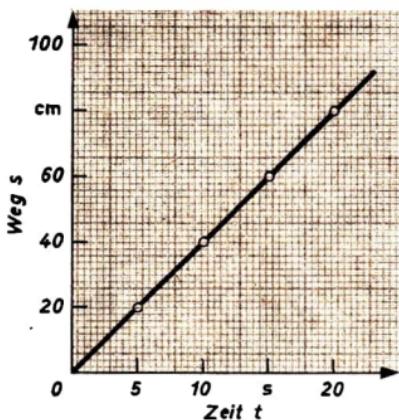


Abb. 4.1.4./4 Weg-Zeit-Diagramm

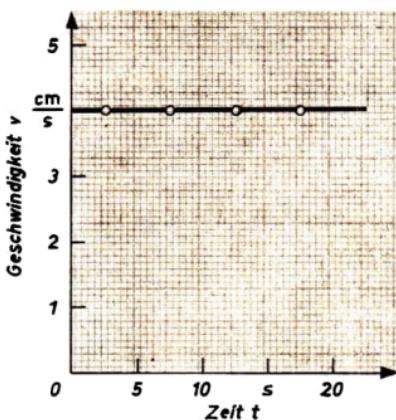


Abb. 4.1.4./5 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm

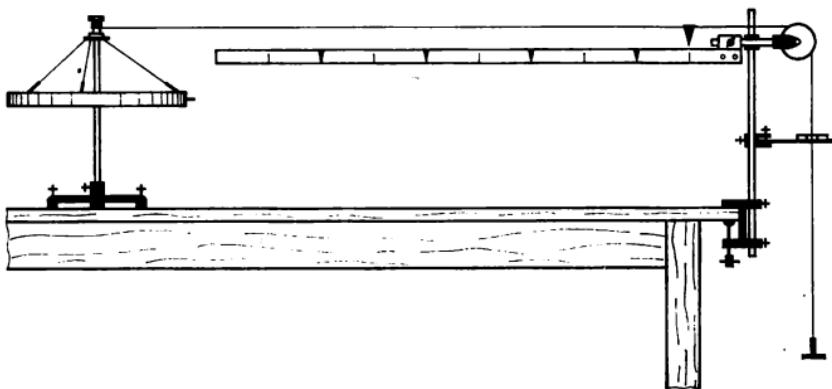


Abb. 4.1.4./6 Reifenapparat älterer Ausführung

auf die Auflagescheibe gelegt wird. Diese Scheibe wird durch einen Gabeleinsatz, durch den die Auflagescheibe hindurchgleitet, abgehoben (Abb. 4.1.4./6). Da der Vorgang hierbei langsamer abläuft, ist es zweckmäßig, 10 s-Intervalle zur Messung zu benutzen.

#### 4.1.5. Bestätigung der Gesetze der gleichförmigen Bewegung mit der Fallrinne nach Duff[SE]

1. Fallrinne nach Duff mit Ablaufrinne
2. Holzkeil
3. Stahlkugel oder Holzkugel ( $\varnothing$  etwa 3 cm)
4. Meßstab
5. Kreide
6. Holzklotz



Abb. 4.1.5./1 Nachweis, daß die Schwingungsdauer der Kugel konstant ist

Abb. 4.1.5./2 Fallrinne nach Duff:  
a) Seitenansicht,  
b) Querschnitt,  
c) Draufsicht

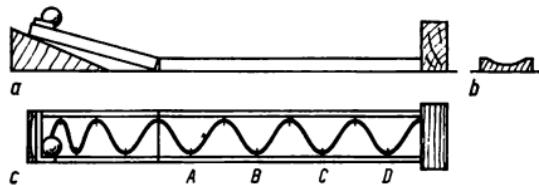
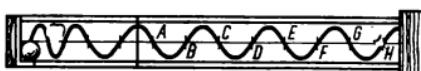


Abb. 4.1.5./3 Messungen an der Fallrinne mit Mittellinie



#### *Methodische Hinweise*

1. Der Vorzug dieses Experiments liegt in seiner Einfachheit. Da die Schwingungsdauer der in der flachen Rinne hin und her rollenden Kugel konstant ist, kann man auf die Messung der Zeit verzichten. Allerdings handelt es sich nicht um

eine reine gleichförmige geradlinige Bewegung, sondern um eine zusammengesetzte Bewegung. Darauf sollte man aber hier noch nicht eingehen.

2. Das Experiment kann sehr gut zur Wiederholung, zur Vertiefung und für Leistungskontrollen eingesetzt werden.

#### *Beschreibung des Gerätes*

Die Fallrinne nach Duff ist etwa 1 m lang und 10 cm breit. Ihr Querschnitt ist in der Abbildung 4.1.5./2b dargestellt. Die Mulde ist mattschwarz gestrichen. Die Ablaufrinne ist von gleicher Beschaffenheit. Sie ist etwa 30 cm lang. Um zu gewährleisten, daß stets die gleichen Startbedingungen herrschen, ist sie mit zwei Leisten als Anschlag für die Kugel versehen.

#### *Vorversuch*

Man legt die Rinne flach auf den Tisch, läßt die Kugel von Muldenrand zu Muldenrand hin und her rollen (Abb. 4.1.5./1) und zählt die Schwingungen laut mit. Man erkennt, daß die Schwingungsdauer konstant und von der Amplitude unabhängig ist.

#### *Versuch*

Man reibt die Kugel mit Kreide ein und läßt sie abrollen. Dabei hinterläßt sie eine wellenlinienförmige Kreidespur (Abb. 4.1.5./2). Die in gleichen Zeitabschnitten zurückgelegten Wegstrecken  $\overline{AB}$ ,  $\overline{BC}$ ,  $\overline{CD}$  usw. sind gleich, der Gesamtweg  $\overline{AB}$ ,  $\overline{AC}$ ,  $\overline{AD}$  usw. ist der Zeit proportional.

#### *Bemerkungen*

1. Um Verzögerungen der Kugel infolge Reibung zu kompensieren, kann man dem waagerechten Teil der Rinne eine geringe Neigung geben. Es genügt meist schon ein Stückchen Pappe oder ein mehrfach gefaltetes Stück Papier als Unterlage.
2. Um zu verhindern, daß die Kugel die Rinne verläßt und vom Tisch rollt, stellt man an das Ende der Rinne einen Holzklotz
3. Genauere Ergebnisse erhält man, wenn die Fallrinne mit einer Mittellinie versehen ist. Man mißt dann die Abschnitte zwischen den Schnittpunkten der Kreidespur mit der Mittellinie (Abb. 4.1.5./3). Die Zeiteinheit ist hierbei  $\frac{T}{2}$ .

### **4.1.6. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit dem Bandgerät [SE]**

#### *Zu Variante a*

1. Bandgerät	4. Hakenkörper oder Holzklötzchen
2. Experimentiermotor mit Zubehör	5. Haftmagnete oder Manigumstücke
3. Demonstrationstachometer mit Zubehör	6. Polydigit, Demonstrationsstoppuhr oder Stoppuhr

**Zu Variante b**

Geräte 1. bis 5., außerdem

7. Zentraluhr oder Metronom

**Methodische Hinweise**

1. Vergleiche MB 4.0.1.!
2. Das Bandgerät ähnelt in seinem Aufbau dem Transport- oder Förderband, das den Schülern aus dem täglichen Leben bekannt ist. Die Erklärung des Aufbaus und der Wirkungsweise des Bandgeräts bereitet deshalb keine Schwierigkeiten.
3. Um die Eigenart der gleichförmigen Bewegung besser zur Geltung zu bringen, kann man bei einer Wiederholung des Experiments die Drehzahl des Motors während des Ablaufs der Bewegung mehrfach verändern und so eine ungleichförmige Bewegung vorführen.
4. Bei diesem Experiment kann die konstante Geschwindigkeit sowohl durch Weg- und Zeitmessung als auch mit einem Tachometer gemessen werden.
5. Bei der Ausführung als Schülerexperiment kann das Bandgerät auf 8 m verlängert werden, so daß es von der Rückwand des Unterrichtsraumes bis zum Experimentiertisch reicht. Der Bewegungsvorgang kann dann von allen Schülern gut beobachtet werden. Die Zeitmessung erfolgt dabei am einfachsten nach Variante b mit einem Metronom oder der Zentraluhr mit akustischen Impulsen.
6. Um in der Unterrichtsstunde Zeit zu sparen, kann man die Tabellen auf einer Folie für den Tageslichtschreibprojektor vorbereiten. Zur Vereinfachung der grafischen Darstellung kann man die Millimeterraster- oder Zentimeterrasterfolie benutzen. Man überdeckt sie mit der Rollfolie und zeichnet die Funktionskurven auf dieser ein. Dadurch bleibt die Rasterfolie selbst unbeschriftet.
7. Bei der Ausführung als Schülerexperiment kann man den einzelnen Schülergruppen verschiedene Aufträge erteilen. So können sie z. B. die Wege bestimmen, die in 5 s, in 10 s oder in 15 s zurückgelegt werden. Die errechneten Geschwindigkeiten müssen übereinstimmen.

**Versuchsaufbau**

Den Versuchsaufbau zeigt die Abbildung 4.1.6./1. Der Antrieb erfolgt über einen Antriebsriemen durch den Experimentiermotor. Dazu wird dessen seitliche Achse mit einer zweistufigen Riemenscheibe versehen. Um eine möglichst geringe Geschwindigkeit zu erzielen, empfiehlt es sich, die niedrigste Drehzahl des Motors ( $n = 40 \text{ min}^{-1}$ ) einzustellen und den Riemen über die Riemenscheibe mit dem



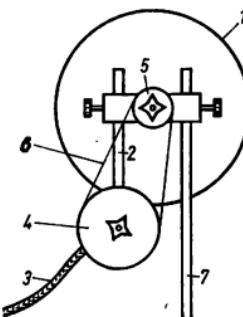
Abb. 4.1.6./1 Versuchsanordnung zur Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit dem Bandgerät

kleineren Durchmesser zu legen. Durch Veränderung der Drehzahl des Experimentermotors kann dann die Bandgeschwindigkeit in weiten Grenzen variiert werden. Sie soll etwa  $2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  betragen.

Zum Anschluß des Demonstrationstachometers ist die Welle des Antriebsteils am Bandgerät mit einer Kupplung für die biegsame Welle versehen. Am Tachometer verwendet man am besten den Meßbereich 0 bis  $25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Dazu muß am Ende der biegsamen Welle die Schnurlaufrolle 4 und an der Tachometerwelle die Rolle 1 befestigt werden (Abb. 4.1.6./2).

Abb. 4.1.6./2 Anschluß der biegsamen Welle an das Demonstrationstachometer

- 1 Tachometer (Rückseite)
- 2 Halter für die biegsame Welle
- 3 biegsame Welle
- 4 Schnurlaufrolle 4
- 5 Schnurlaufrolle 1
- 6 Gummiringen
- 7 Stativstab



*Variante a: Zeitmessung mit einer Stoppuhr*

Um die Bewegung des Bandes besser beobachten zu können, stellt man auf das Band einen kleinen Gegenstand, z. B. einen Hakenkörper oder ein Holzklötzchen. Mit einer Stoppuhr, am besten mit einer Demonstrationsstoppuhr, mißt man die Zeiten für verschiedene Wege. Der Beginn und das Ende des Weges werden durch Haftmagnete an der Schiene gekennzeichnet. Man läßt die Einstellung der Motor-drehzahl unverändert, nimmt den transportierten Körper vom Band und stellt ihn für jede Messung von neuem an den Anfang des Bandgeräts. Die Zusammenstellung der Meßwerte und ihre Auswertung erfolgt am besten in Form einer Tabelle.

Weg $s$ in cm	Wegdifferenz $\Delta s$	Zeit $t$ in s	Zeitdifferenz $\Delta t$	$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$
0	40	0	11,70	$\approx 3,4$
40	40	11,70	11,82	$\approx 3,4$
80	40	23,52	11,72	$\approx 3,4$
120	40	35,24	11,79	$\approx 3,4$
160	40	47,03		

Die Tabelle zeigt, daß in gleichen Zeitabschnitten gleiche Wegstrecken zurückgelegt werden, daß also die Geschwindigkeit konstant ist. Das kann aus der letzten Spalte abgelesen werden:

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \text{konstant}.$$

Auch das angeschlossene Demonstrationstachometer zeigt den konstanten Wert von etwa  $3,4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  an.

Den gleichen Wert erhält man auch, wenn man statt der Weg- und Zeitdifferenzen die Gesamtwege  $s$  durch die dazugehörigen Zeiten  $t$  dividiert. Es gilt somit auch

$$v = \frac{s}{t}.$$

Durch Umstellen der Gleichung erhält man die Bestimmungsgleichung für den Weg  $s = v \cdot t$ .

Die Abhängigkeit des Weges und der Geschwindigkeit von der Zeit werden wie im V 4.1.2. (Abb. 4.1.2./4 und Abb. 4.1.2./5) auch zeichnerisch dargestellt.

Das Experiment kann mit anderen Bandgeschwindigkeiten wiederholt werden.

#### *Variante b: Zeitmessung mit einem Metronom*

Wird ein Metronom zur Zeitmessung benutzt, so stellt man es auf Sekundenschlag ein. Während in der Variante a die Meßstrecke festgelegt und die dafür benötigte Zeit gemessen wurde, ist in der Variante b die Zeit zwischen zwei bestimmten Schlägen des Metronoms die unabhängige Variable, und man ermittelt als abhängige Variable den Weg, der in dieser Zeit (z. B. 10 s) von dem transportierten Körper zurückgelegt wird. Man kennzeichnet mit Haftmagneten die Stellen an der Schiene des Bandgeräts, die bei den Schlägen des Metronoms von dem transportierten Körper passiert werden. Ein Experiment ergab folgende Werte:

Zeit <i>t</i> in s	Zeitdifferenz <i>Δt</i> in s	Weg <i>s</i> in cm	Wegdifferenz <i>Δs</i> in cm	$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$
0	10	16	34	3,4
10	10	50	34	3,4
20	10	84	34	3,4
30	10	118	34	3,4
40	10	152	34	3,4

Die Auswertung erfolgt wie in der Variante a.

#### *Bemerkungen*

- Der Schalter zur Umkehrung der Drehrichtung des Experimentiermotors darf nur bei Stillstand betätigt werden.

2. Da die zu messenden Zeiten den Wert von 1 s überschreiten, ist es zweckmäßig, in der Variante a an den vorgesehenen Anschluß der Demonstrationsstoppuhr ein Zählwerk anzuschließen, das die vollen Sekunden registriert.
3. Zur Zeitmessung kann in der Variante a auch ein elektronischer Kurzzeitmesser, z. B. das Polydigit, mit Handstoppung oder mit Lichtschranken benutzt werden (vgl. MB 4.0.2.).

#### **4.1.7. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit dem Schienenwagen**

##### *Zu Variante a*

1. Schienenwagen mit Schienen und Schwellen
2. Haftmagnete oder Manigumstücke
3. Schnur
4. Metronom oder Zentraluhr
5. Haltemagnet
6. Morsetaste oder Ein-Taster
7. Stromversorgungsgerät für Niederspannung
8. Manipermagnet
9. Hakenkörper
10. Paketgummiringe

##### *Zu Variante b*

Geräte 1. bis 4., außerdem

11. Experimentiermotor mit Zubehör
12. Demonstrationstachometer mit Zubehör

##### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MB 4.0.1.!
2. Wegen der Größe des Wagens und der Möglichkeit, die durch Weg- und Zeitmessung ermittelte Geschwindigkeit mit der Anzeige des Demonstrations-tachometers vergleichen zu können, ist dieses Experiment besonders zur Demonstration geeignet.

##### *Versuchsaufbau*

Der Montage und Justierung der Schienen ist besondere Sorgfalt zu widmen. Man schraubt die Schienen an den Schwellen so an, daß der Wagen mit gleichbleibender und möglichst geringer Reibungskraft über die gesamte Schienenlänge bewegt werden kann. Mit Hilfe der Kreuzgriffschrauben justiert man die Schwellen waagerecht.

##### *Variante a: Kompensation der Reibungskraft und Start durch einen Impuls*

An die Bohrung in der Vorderkante des Wagens bindet man eine dünne, feste Schnur, führt sie über eine spitzengelagerte Feinrolle und belastet ihr Ende mit einem Hakenkörper (Abb. 4.1.7./1). Den Hakenkörper wählt man so groß, daß seine Gewichtskraft gerade die Reibungskraft kompensiert. Stößt man den Wagen an, so soll er mit gleichbleibender Geschwindigkeit weiterrollen. Über der Hinter-



Abb. 4.1.7./1 Versuchsaufbau zur Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit dem Schienenwagen. Die Reibungskraft wird durch die Gewichtskraft eines Hakenkörpers kompensiert.

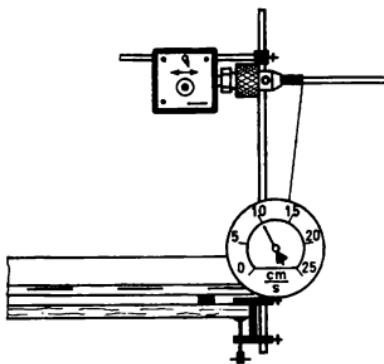


Abb. 4.1.7./2 Versuchsanordnung mit einem Experimentiermotor als Antrieb für den Schienenwagen

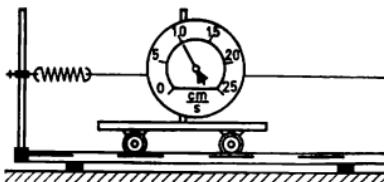


Abb. 4.1.7./3 Befestigung des Demonstrationstachometers auf dem Schienenwagen

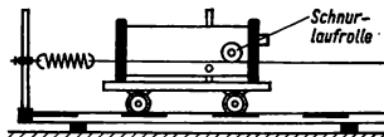


Abb. 4.1.7./4 Befestigung des Experimentiermotors auf dem Schienenwagen

kante des Schienenwagens befestigt man mit Paketgummiringen einen kräftigen Manipermagnet und am Ende der Schienen an einem Stativ einen Haltemagnet. Diesen schließt man über eine Morsetaste oder einen Ein-Taster an eine Gleichspannungsquelle von etwa 4 V bis 6 V an. Man wählt die Stromrichtung so, daß der Schienenwagen beim Schließen des Stromkreises durch die Abstoßung gleichnamiger Magnetpole einen Impuls erhält, sich in Bewegung setzt und mit kon-

stanter Geschwindigkeit bis an das Ende der Schienen rollt. Er führt eine geradlinige gleichförmige Bewegung aus. Man erteilt den Startimpuls gleichzeitig mit einem Schlag des Metronoms (Sekundenintervalle) und markiert die momentane Stellung z. B. der Vorderkante des Wagens nach jeweils einer gleichen Anzahl von Sekundenschlägen durch Haftmagnete oder Manigumstücke, die man an die Schienen heftet.

Die Gesetzmäßigkeiten der gleichförmigen geradlinigen Bewegung werden dann so wie im V 4.1.2., V 4.1.4. oder V 4.1.6. hergeleitet oder bestätigt.

### *Bemerkungen*

1. Statt des Haltemagnets kann man auch das Wurfgerät zur Erteilung des Startimpulses verwenden, wenn man den auf der Rückseite des Gerätes eingeschraubten Metallbolzen in die Abschlußplatte der Spannfeder einschraubt, so daß er aus dem Rohr herausragt.
2. Man kann auch bei der Variante a das Demonstrationstachometer dazwischen schalten. Die Kompensation der Reibungskraft ist dann oft etwas schwieriger und die Geschwindigkeit nicht immer konstant.

### *Variante b: Antrieb mit dem Experimentiermotor*

Die an der Stirnseite des Wagens festgebundene Schnur führt man über die Schnurlaufrolle des Demonstrationstachometers und befestigt ihr Ende in der Querbohrung eines kurzen Stativstabes, den man in das Bohrfutter des Experimentiermotors eingespannt hat (Abb. 4.1.7./2). Am Motor stellt man die niedrigste Drehzahl ( $40 \text{ min}^{-1}$ ) ein. Die Schnurwickelt sich in gleichmäßigen, nebeneinander liegenden Windungen auf den Stativstab, und der Wagen vollführt eine gleichförmige Bewegung. Das Demonstrationstachometer zeigt einen konstanten Wert an.

Dieser vom Tachometer angezeigte Wert der Geschwindigkeit kann mit dem Wert verglichen werden, den man wie in der Variante a durch Weg- und Zeitmessungen ermittelt.

### *Bemerkungen*

1. Das Demonstrationstachometer kann auch auf dem Schienenwagen angebracht werden. Er ist mit Gewindebohrungen zum Einschrauben von Stativstäben versehen. Der Tachometerantrieb erfolgt durch eine Schnur, die man an Stativen an den Enden der Schienen festbindet und einmal um die Schnurlaufrolle des Tachometers windet. Um eine gleichmäßige Fadenspannung zu erreichen, befestigt man das eine Fadenende mit einer Schraubenfeder am Stativ (Abb. 4.1.7./3). Das mitbewegte Tachometer ist vorteilhaft, weil man die Bewegung des Wagens und die Tachometeranzeige gleichzeitig gut beobachten kann.
2. Man kann auch den Antriebsmotor auf dem Wagen befestigen (Abb. 4.1.7./4). Die Schienen sind zur Stromzuführung eingerichtet, und auf dem Wagen sind Buchsen angebracht, die mit den Rädern Kontakt haben. Um Unfälle zu vermeiden, muß aber dringend abgeraten werden, die Schienen zur Stromzuführung zu benutzen (Netzspannung!). Man hängt das Geräteanschlußkabel an einem hohen Stativ etwa über der Schienenmitte auf, so daß es die Bewegung des Wagens möglichst nicht behindert. Der Antrieb erfolgt über eine Schnur, die so angebracht wird wie für das mitbewegte Demonstrationstachometer.

### 4.1.8. Untersuchung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung mit einer Luftkissenbahn

1. Luftkissenbahn ⑧, dazu erforderliches Material:
  - a) Aluminium-Winkelschiene (1,5 m bis 2 m lang; etwa 6 cm Schenkelänge; 1 mm Wanddicke)
  - b) Aluminium-Blechstreifen (1,5 m bis 2 m lang; 9 cm breit; 1 mm dick)
  - c) dreieckige Plast- oder Holzplatten (Kantenlängen 6 cm, 6 cm und 9 cm; 2 cm dick)
  - d) Nitrospachtel
  - e) Cenusil
2. Schwebekörper ⑨, dazu erforderliches Material:
  - a) 2 Plastplatten (12 cm × 5 cm × 4 mm)
  - b) 1 Plastplatte (12 cm × 3 cm × 1 cm)
  - c) Plastkleber
3. Zubehör ⑩, dazu erforderliches Material:
  - a) etwa 20 Laborstecker
  - b) 5 zylinderförmige keramische Magnete (2 cm Ø, 6 mm Höhe)
  - c) 1 ausgeglühte Stahlkugel (etwa 8 mm Ø)
  - d) 2 Messingstreifen (15 cm × 4 mm × 0,1 mm)
  - e) Eisendraht (1 mm Ø; 10 cm Länge)
  - f) 1 Plastplatte (5 cm × 25 mm × 1 mm)
  - g) Alleskleber
  - h) Lötzinn

(Die hieraus hergestellten Teile gehören zur Luftkissenbahn, werden aber bis auf f) zur Durchführung des vorliegenden Experiments nicht benötigt.)
4. Staubsauger mit flexilem Schlauch
5. Vertikalmeßstab (1,5 m bzw. 2 m) mit Schiebezeigern
6. Metronom oder Zentraluhr

#### Methodische Hinweise

1. Gegenüber allen vorangehend beschriebenen Verfahren treten bei der Luftkissenbahn die geringsten Abweichungen von der gleichförmigen Bewegung auf.
2. Die experimentelle Anordnung kann sowohl zur Veranschaulichung als auch zur Untersuchung der geradlinigen gleichförmigen Bewegung sowie zur Bestätigung der Gesetze dieser Bewegung dienen.

#### Herstellung der Luftkissenbahn

Die Aluminiumwinkelschiene, die keine Abweichungen von der vorgeschriebenen Form besitzen sollte, wird auf jeder Schenkelfläche mit 2 Reihen Bohrungen versehen. Ihre Anordnung geht aus Abbildung 4.1.8./1 hervor. Der Abstand zweier benachbarter Bohrungen beträgt in jeder Reihe 20 mm, ihr Durchmesser etwa 1,5 mm. Nach dem Bohren werden alle Bohrungen wieder mit Nitrospachtel verschlossen und die Schenkelflächen mit feinem Schmirgelpapier geglättet. Nachfolgend werden die Bohrungen mit einem Bohrer von 0,5 mm Ø wieder vorsichtig geöffnet. Infolge der geringen Festigkeit der Spachtelmasse kann das von Hand erfolgen.

In den Aluminium-Blechstreifen werden in etwa 15 cm Abstand von den Enden sowie je nach Länge an zwei bis drei dazwischenliegenden Stellen Löcher von 8 mm Ø

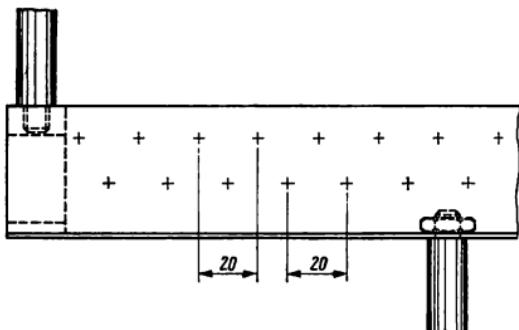


Abb. 4.1.8./1 Frontansicht  
der Luftkissenbahn

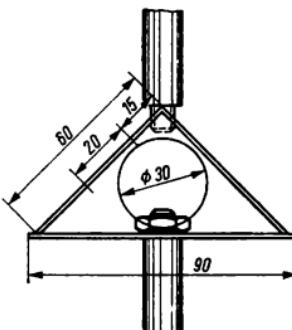


Abb. 4.1.8./2 Seitenansicht  
der Luftkissenbahn

gebohrt. Alle Bohrungen sollen auf der Mittellinie liegen, zwischen ihnen sollen jeweils gleiche Abstände bestehen. Auf jedes dieser Löcher wird mit Cenusil eine M 8-Mutter geklebt. Der so präparierte Blechstreifen wird mit den Muttern nach innen auf die Winkelschiene geklebt, so daß das Profil geschlossen ist.

Die beiden Plastplatten werden so bearbeitet, daß sie gerade in das Profil hineinpassen. Eine erhält eine Bohrung von etwa 30 mm  $\varnothing$ , in die der Schlauch des Staubsaugers straff hineinpassen muß. Beide Platten werden mit Cenusil in je ein Ende des Profils eingeklebt, so daß sie es fest verschließen (Abb. 4.1.8./2).

1 cm von jedem Ende der Bahn entfernt wird nach leichtem Anfeilen der oberen Kante eine Bohrung von 6 mm  $\varnothing$  etwa 20 mm tief vertikal nach unten eingebracht. In diese Bohrungen wird ein Gewinde M 8 eingeschnitten (Abb. 4.1.8./1). In diese Bohrungen können kurze Stativstäbe mit Gewinde eingeschräubt werden.

#### *Herstellung des Schwebekörpers*

Die drei Plastplatten werden nach dem erforderlichen Nacharbeiten der Kanten gemäß Abbildung 4.1.8./3 mit Plastkleber zusammengeklebt. Um den richtigen Winkel zwischen den beiden gleich großen Platten zu garantieren, erfolgt das auf der Luftkissenbahn. Gemäß Abbildung 4.1.8./3 wird die dicke Platte an fünf

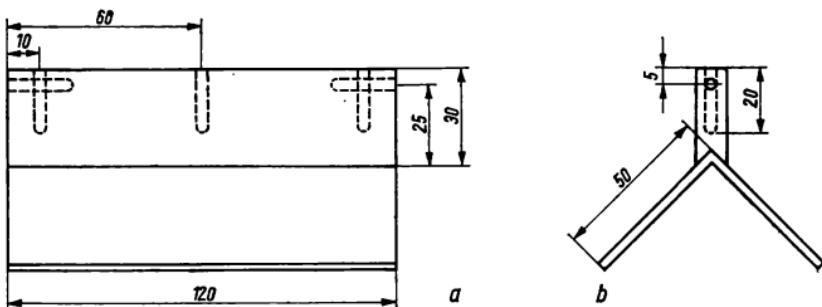


Abb. 4.1.8./3 Schwebekörper: a) Frontansicht, b) Seitenansicht

Stellen angebohrt: an den Seiten und auf halber Länge vertikal von oben nach unten und horizontal an beiden Seiten. Die Bohrungen sollen einen Durchmesser von 4 mm besitzen. Sie dienen zur Aufnahme der weiteren Zubehörteile.

#### Herstellung der Zubehörteile

Zur Befestigung eines Fadens am Schwebekörper dienen zwei Haken. Sie werden gemäß Abbildung 4.1.8./4 durch Einlöten von gebogenen Eisendrahtstücken in Laborstecker hergestellt. Zur Erzeugung eines weitgehend elastischen Stoßes finden Ringfedern Verwendung. Zu ihrer Herstellung werden die Messingstreifen gemäß Abbildung 4.1.8./5 so in je einen Laborstecker eingelötet, daß sie einen kreisförmigen Ring bilden.

Abb. 4.1.8./4 Laborstecker mit Haken



Abb. 4.1.8./5 Laborstecker mit Ringfeder

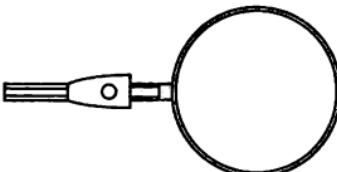


Abb. 4.1.8./6 Laborstecker mit Keramikmagnet

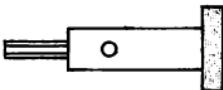
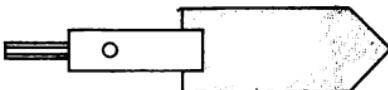


Abb. 4.1.8./7 Laborstecker mit ausgeglühter Stahlkugel



Abb. 4.1.8./8 Laborstecker mit Plastplatte als Blende zur Unterbrechung des Lichtstroms einer Lichtschranke



Nach Abbildung 4.1.8./6 werden 5 zylinderförmige Keramikmagnete so an Laborsteckern befestigt, daß ihre Symmetrieachsen übereinstimmen. Dabei ist bei allen Steckern auf die gleiche Lage der Pole zu achten.

An einem Laborstecker wird gemäß Abbildung 4.1.8./7 die Eisenkugel angelötet. Durch sie kann der Schwebekörper vom Haltemagneten in der Ausgangslage gehalten werden.

Entsprechend der Abbildung 4.1.8./8 wird die Plastplatte an einem Laborstecker befestigt. Sie kann auf den Schwebekörper aufgesteckt werden und die Unterbrechung des Lichtbündels bei der Lichtschranke bewirken.

Alle Zubehörteile sollten etwa die gleiche Masse besitzen. Sind nämlich die beiden Enden des Schwebekörpers ungleich belastet, so tritt aus der Seite mit der geringeren Belastung infolge des dort dickeren Luftkissens mehr Luft aus. Sie bedingt eine resultierende Kraft, die zur Seite der stärkeren Belastung gerichtet ist. Aus diesem

Gründe müssen nicht nur alle Belastungen symmetrisch zur Mitte erfolgen; immer dann, wenn am vorderen oder hinteren Ende ein Zubehörteil eingesteckt wird, sollte das auch am gegenüberliegenden Ende geschehen, gleichgültig, ob es dort benötigt wird oder nicht.

#### *Versuchsaufbau*

In die Bohrungen im unteren Teil der Luftkissenbahn werden 16 cm-Stativstäbe mit Gewinde eingeschraubt. Sie verbleiben künftig in der Bahn, damit sich die Muttern im Innern nicht durch häufiges Herausschrauben lösen.

Die Stativstäbe werden in Stativfüßen befestigt (Abb. 4.1.8./9), wobei auf eine möglichst waagerechte Anordnung der Bahn zu achten ist. Der flexible Schlauch wird mit seinem einen Ende in den Druckstutzen des Staubsaugers gesteckt, mit dem anderen in die große Bohrung der Luftkissenbahn. Nach dem Auflegen des Schwebekörpers wird der Staubsauger eingeschaltet. Durch Verstellen der Stellschrauben in den Stativfüßen wird die Bahn horizontal ausgerichtet. Der erfolgreiche Abschluß der Justierung ist daran zu erkennen, daß der Schwebekörper an jeder Stelle, an die man ihn bringt, in Ruhe verbleibt.

In die vertikale Bohrung des Schwebekörpers wird die Blende eingesteckt, deren Spitze als Ortsmarke dient. Über der Luftkissenbahn wird horizontal der Meßstab befestigt. Das geschieht durch Befestigen an den beiden vertikalen Stäben, die an den Enden der Bahn eingeschraubt sind. Die Schiebezeiger des Meßstabes werden in einem Abstand von jeweils etwa 30 cm angeordnet.

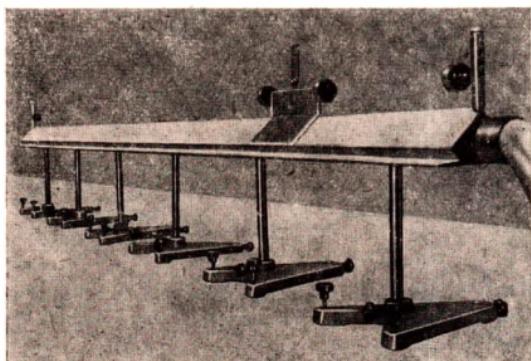


Abb. 4.1.8./9 Luftkissenbahn

#### *Versuch*

Mit dem Metronom oder der Zentraluhr werden akustische Impulse im Sekundenrhythmus erzeugt. Den Schwebekörper versetzt man von einem Ende der Bahn aus von Hand in eine langsame Bewegung. Es wird jeweils die Anzahl der Sekundenimpulse ermittelt, die zwischen dem Passieren zweier benachbarter Zeiger auftreten. Für gleiche Wege ergaben sich gleiche Zeiten. Die daraus berechnete Geschwindigkeit ist für die einzelnen Wege konstant.

**Bemerkungen**

1. Anstelle der Winkelschiene können zur Herstellung der Luftkissenbahn auch geschlossene Profile von dreieckigem oder quadratischem Querschnitt Verwendung finden. Die Anordnung erfolgt dabei so, daß eine Kante nach oben zeigt. Da gewisse Abweichungen von der Form vor allem bezüglich der Längenausdehnung nicht zu vermeiden sind, sollten Profile geringerer Wandstärke bevorzugt werden. Dadurch ist es möglich, die notwendig werdende Justierung mit den zur Verfügung stehenden Kräften vorzunehmen.  
Es können auch Schienen oder Profile aus Plast verwendet werden. Die Befestigung erfolgt dann mit einem Plastkleber.
2. Zur Verringerung der Geräuschbelästigung durch das Gebläse ist es sinnvoll, mit verringriger Spannung zu arbeiten. Das kann z. B. durch Anschließen des Staubsaugers an eine veränderliche Spannungsquelle geschehen. (Bereich von 0 bis 250 V). Der Druck vom Luftstromerzeuger reicht zur Bereitstellung eines genügend tragfähigen Luftkissens nicht aus.
3. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, muß dem Schwebekörper eine definierte Geschwindigkeit erteilt werden. Das ist mit dem oben angeführten keramischen Magneten und einem elektrischen Haltemagnet gemäß V 4.1.7., Variante a, möglich.
4. Im Falle reproduzierbarer Geschwindigkeiten ist an verschiedenen Stellen aufeinanderfolgend die direkte Geschwindigkeitsmessung (vgl. MB 4.0.2., Zeitmessung mit einer Lichtschranke) möglich. Die Meßgenauigkeit wird dadurch wesentlich vergrößert.

**4.2. Die gleichmäßig beschleunigte geradlinige Bewegung****4.2.1. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit der Fallrinne — Momentangeschwindigkeit und Beschleunigung [SE]**

1. Fallrinne (etwa 2 m lang) ⑧	5. Startvorrichtung
2. Fallrinne (etwa 1 m lang) ⑧	6. Holzklotz
3. Holzkeil	7. Markierungsbügel
4. Stahlkugel oder Holzkugel (Ø etwa 30 mm ... 40 mm)	aus Blech
	8. Metronom oder Zentraluhr

**Methodische Hinweise**

1. Zur Benutzung der Fallrinne vergleiche MB 4.0.1.!
2. Das Experiment ähnelt in der Ausführung V 4.1.2. Seine Vorteile sind auch hier der einfache und übersichtliche Versuchsaufbau und die leicht zu überschauenden physikalischen Zusammenhänge. Dadurch können in überzeugender Weise die Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung hergeleitet und der Begriff *Beschleunigung* eingeführt werden. Es sollte besonders dann unter den hierzu beschriebenen Experimenten ausgewählt werden, wenn die gleichförmig geradlinige Bewegung im V 4.1.2. untersucht wurde.
3. Ein weiterer Vorteil des Experiments ist die Möglichkeit, für jeden beliebigen Zeitpunkt der Bewegung die Momentangeschwindigkeit ermitteln zu können. Trotzdem sollte man aber nicht versäumen, den Begriff *Momentangeschwindigkeit* nach der unten beschriebenen Methode aus der durchschnittlichen Geschwindigkeit herzuleiten, indem man den Zeitabschnitt  $\Delta t$  immer kleiner werden läßt. Man bereitet damit die Gleichung  $v = \frac{ds}{dt}$  vor. Mit dem Polydigit

und zwei Lichtschranken können diese Zusammenhänge besonders eindrucksvoll demonstriert werden (vgl. MB 4.0.2.).

4. Mit dem Polydigit und einer Lichtschranke kann die Momentangeschwindigkeit der Kugel an einer beliebigen Stelle der Bahn bestimmt werden, wenn man dieses System so verwendet, daß es nur die Zeit mißt, während der Lichtstrom durch die rollende Kugel unterbrochen wird. Die Geschwindigkeit erhält man, wenn man den Durchmesser der Kugel durch die ermittelte Zeit dividiert (vgl. MB 4.0.2. Zeitmessung mit einer Lichtschranke).
5. Die Auswertung ist besonders einfach, wenn man die Neigung der Rinne so wählt, daß die Kugel in 4 s einen Weg von 160 cm durchläuft. Dann ergibt sich mit hinreichender Genauigkeit in 1 s ein Weg von 10 cm, in 2 s von 40 cm und in 3 s von 90 cm.
6. In der Abiturstufe können die Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung entweder aus dem Weg-Zeit-Gesetz durch Differentiation oder aus der konstanten Beschleunigung durch Integration hergeleitet werden. Herleitung durch Differentiation:

$$s = f(t) = \frac{a}{2} \cdot t^2$$

$$v = f'(t) = \frac{ds}{dt} = a \cdot t$$

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Herleitung durch Integration:

$$a = \text{konstant}$$

$$v = \int a \cdot dt = a \cdot t + C$$

Die Integrationskonstante  $C$  kann man als Anfangsgeschwindigkeit deuten.

Man kann folglich auch schreiben

$$v = a \cdot t + v_0.$$

Da bei diesem Experiment die Anfangsgeschwindigkeit gleich Null ist, erhält man das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz

$$v = a \cdot t.$$

Weiterhin gilt

$$s = \int v \cdot dt = \int a \cdot t \cdot dt = \frac{a}{2} t^2 + C.$$

In dieser Gleichung kann man die Integrationskonstante als Anfangsweg deuten. Das Ergebnis der Integration lautet demnach

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2 + s_0.$$

Ist der Anfangsweg wie bei diesem Experiment gleich Null, dann lautet das Weg-Zeit-Gesetz

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2.$$

### Versuchsanordnung

Die Herstellung der Fallrinne wurde in V 4.1.2. beschrieben. Durch einen untergelegten Keil gibt man der Rinne ein leichtes Gefälle, so daß die aufgelegte Stahl- oder Holzkugel beschleunigt herabrollt. Eine kürzere Rinne gleicher Bauart wird so an die geneigte Rinne angesetzt und nach Möglichkeit mit ihr verbunden, daß keine Lücke entsteht und der Lauf der Kugel nicht gestört werden kann.



Abb. 4.2.1./1 Versuchsanordnung zur Herleitung des Weg-Zeit-Gesetzes der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

#### 1. Teilversuch: Herleitung des Weg-Zeit-Gesetzes

Die Startvorrichtung wird so befestigt, daß die Ausgangsstellung der Kugel 10 cm vom Anfang der Rinne entfernt ist. Das Metronom wird auf Sekundenschlag eingestellt. Man gibt die Kugel bei einem Schlag des Metronoms frei und stellt die Markierungsbügel so auf, daß sie jeweils bei einem Sekundenschlag von der Kugel passiert werden. Man wiederholt das Experiment mehrfach und korrigiert dabei die Stellung der Bügel, bis völlige Übereinstimmung besteht. Zusammengehörige Werte von Zeit und Weg werden in eine Tabelle eingetragen und in einem rechtwinkligen Koordinatensystem grafisch dargestellt (Abb. 4.2.1./2). Um die Auswertung übersichtlich zu gestalten und zu erleichtern, kann man die Neigung der Fallrinne so einstellen, daß z. B. in einer Zeit von 4 s ein Weg von 160 cm zurückgelegt wird.

#### Beispiel für die Abhängigkeit des Weges von der Zeit

$t$ in s	$s$ in cm	$k = \frac{s}{t^2}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$	$\Delta s$ in cm
0	0	—	
1	10	10	$10 = 1 \cdot 10$
2	40	10	$30 = 3 \cdot 10$
3	90	10	$50 = 5 \cdot 10$
4	160	10	$70 = 7 \cdot 10$

Die grafische Darstellung zeigt, daß die Bildpunkte auf einer Parabel liegen. Dementsprechend läßt die Tabelle erkennen, daß der zurückgelegte Weg dem Quadrat der Zeit proportional ist; denn der Quotient

$$k = \frac{s}{t^2}$$

aus dem Weg  $s$  und dem Quadrat der Zeit  $t$  erweist sich als konstant. Es ergibt sich somit die Beziehung

$$s = k \cdot t^2.$$

Aus der letzten Spalte der Tabelle kann man ersehen, daß die in den einzelnen Zeitabschnitten zurückgelegten Wegstrecken im Gegensatz zur gleichförmigen Bewegung nicht gleich sind, sondern sich wie die ungeraden Zahlen der Folge der natürlichen Zahlen verhalten.

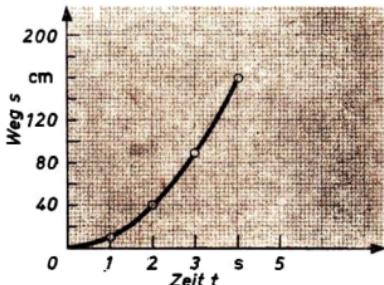


Abb. 4.2.1./2 Weg-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung



Abb. 4.2.1./3 Versuchsanordnung zur Herleitung des Geschwindigkeit-Zeit-Gesetzes

## 2. Teilversuch: Herleitung des Geschwindigkeit-Zeit-Gesetzes

Um den Begriff *Momentangeschwindigkeit* einzuführen, errechnet man nacheinander die durchschnittlichen Geschwindigkeiten  $\bar{v}$  für die Zeitabschnitte 0 bis 4 s, 1 s bis 4 s, 2 s bis 4 s und 3 s bis 4 s nach der Gleichung

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$\bar{v}_0 \dots 4 = \frac{160 \text{ cm}}{4 \text{ s}} = 40 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$\bar{v}_1 \dots 4 = \frac{150 \text{ cm}}{3 \text{ s}} = 50 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$\bar{v}_2 \dots 4 = \frac{120 \text{ cm}}{2 \text{ s}} = 60 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$\bar{v}_3 \dots 4 = \frac{70 \text{ cm}}{1 \text{ s}} = 70 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

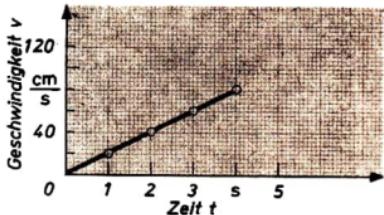


Abb. 4.2.1./4 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Die Rechnung zeigt, daß die durchschnittliche Geschwindigkeit immer größer wird, je kleiner man den Zeitabschnitt wählt. Man kann vermuten, daß man einen noch größeren Wert bekäme, wenn man nur die zweite Hälfte der 4. Sekunde oder einen noch kürzeren Zeitabschnitt der Rechnung zugrunde legen könnte. Diese Vermutung kann man experimentell bestätigen, indem man die Startvorrichtung so weit tiefer legt, daß die Kugel beim 4. Sekundenschlag den geneigten Teil der Rinne verläßt und auf der waagerechten Bahn weiterrollt. Man braucht dann nur



einen Markierungsbügel an der Stelle anzubringen, die von der Kugel nach der 5. Sekunde passiert wird (Abb. 4.2.1./3). Da die Kugel auf der waagerechten Bahn eine gleichförmige Bewegung vollführt, gibt der Zahlenwert des in einer Sekunde zurückgelegten Weges den Zahlenwert der Momentangeschwindigkeit am Ende der geneigten Bahn an.

Durch die weitere Verlegung des Startpunktes kann man auch die Momentangeschwindigkeit für die Zeitpunkte 3 s, 2 s und 1 s bestimmen. Die grafische Darstellung zusammengehöriger Werte der Zeit und der Geschwindigkeit (Abb. 4.2.1./4) zeigt, daß die Punkte auf einer Geraden liegen. Aus der Tabelle entnimmt man, daß der Quotient konstant ist. Somit ist zu jedem Zeitpunkt die erreichte Endgeschwindigkeit  $v$  der Laufzeit  $t$  proportional. Es gilt

$$v = a \cdot t.$$

**Beispiel für die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Zeit**

$t$ in s	$\Delta t$ in s	$v$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$\Delta v$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$
0	1	0	20	20
1	1	20	20	20
2	1	40	20	20
3	1	60	20	20
4	1	80		

Aus beiden Darstellungsarten folgt, daß die Geschwindigkeit der herabrollenden Kugel linear mit der Zeit zunimmt. Der Quotient aus  $\Delta v$  und  $\Delta t$  heißt **Beschleunigung**. Die Einheiten der Beschleunigung sind  $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$  und  $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ . Bei der behandelten Bewegung ist die Beschleunigung konstant (Abb. 4.2.1./5); die Bewegung ist **gleichmäßig beschleunigt**.

Bei einer Änderung des Gefälles bleiben die durch die grafischen Darstellungen und die Tabellen gewonnenen Gesetzmäßigkeiten erhalten; es ändern sich lediglich die Faktoren  $k$  und  $a$ . Aus dem Vergleich der Tabellen ersieht man, daß jeweils

$$k = \frac{a}{2}$$

ist. Man kann demnach die gewonnenen Gleichungen in folgender Form schreiben:

$$\text{Weg-Zeit-Gesetz:} \quad s = \frac{a}{2} \cdot t^2,$$

$$\text{Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz:} \quad v = a \cdot t,$$

$$\text{Beschleunigung-Zeit-Gesetz:} \quad a = \text{konst.}$$

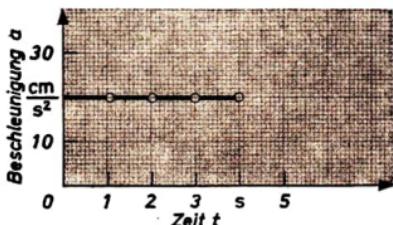


Abb. 4.2.1./5 Beschleunigung-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

#### Bemerkungen

1. Außer einer mechanischen Startvorrichtung eignet sich bei der Verwendung einer Stahlkugel sehr gut ein Haltemagnet, den man über einen Taster an eine Spannungsquelle anschließt. Steht keine Startvorrichtung zur Verfügung, kann die Bewegung auch dadurch ausgelöst werden, daß man ein Brettchen vor die Kugel hält und beim Schlag des Metronoms in der Bewegungsrichtung der Kugel wegzieht. Um die Schüler auf den Beginn der Bewegung vorzubereiten, zählt man einige Schläge des Metronoms mit („Zwei“, „Eins“, „Null“), bis man bei „Null“ die Bewegung auslöst.
2. Die Tatsache, daß bei einer Änderung der Steigung der Weg proportional dem Quadrat der Zeit bleibt und sich lediglich die Beschleunigung  $a$  ändert, berechtigt zu der Annahme, daß die gleiche Abhängigkeit des Weges von der Zeit auch für eine Steigung von  $90^\circ$ , also für den freien Fall, gilt.
3. Wird zur Zeitmessung eine elektrische oder elektronische Anlage benutzt (vgl. MB 4.0.1.), dann wiederholt man den Vorgang mehrmals und verschiebt dabei die zweite Lichtschranke bzw. den Torschalter so weit, bis jeweils ein Sekundenintervall dazwischen liegt. Die Meßwerte sind bei dieser Methode erheblich genauer als bei der Benutzung des Metronoms.
4. Um zu verhindern, daß die Kugel die Rinne verläßt und vom Tisch rollt, legt man an das Ende der Rinne einen Holzklotz.

#### 4.2.2. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit dem Reifenapparat [SE]

1. Reifenapparat mit Zubehör
2. Zentraluhr oder Metronom

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1 bis Nr. 3, V 4.1.4.!
2. Dieses Experiment sollte besonders dann unter den hier beschriebenen zur Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ausgewählt werden, wenn auch die gleichförmige geradlinige Bewegung mit dem Reifenapparat (V 4.1.4.) untersucht wurde.
3. Vergleiche MH Nr. 6, V 4.2.1.!
4. Zum Aufbau des Gerätes vergleiche V 4.1.4.!

## 1. Teilversuch

## Herleitung des Weg-Zeit-Gesetzes

Wie im V 4.1.4. wird auch hier ein Hakenkörper von 20 g Masse verwendet. Auch hier wird die Zentraluhr auf akustische Impulse im 5 s-Abstand eingestellt. In der Startstellung steht die Fadenmarke genau über der Nullmarke des Meßstabes, das Schnurkärtchen hängt wenige Zentimeter unter der Feinrolle und der Hakenkörper dicht unter dem Schnurkärtchen. Es werden vorerst also nur wenige Zentimeter Faden abgewickelt.

Mit einem Signal der Uhr gibt man durch zügiges Umstellen des Ausheberhebels nach links die Bewegung frei und steckt bei jedem 5 s-Signal an der Stelle, an der

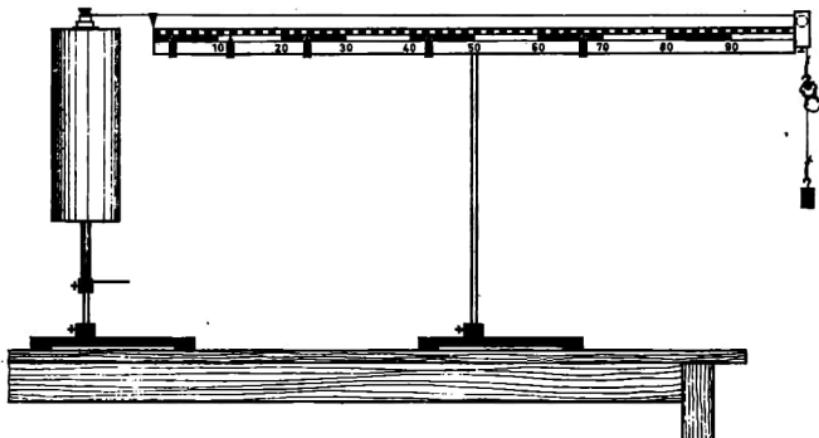


Abb. 4.2.2./1 Versuchsanordnung zur Herleitung des Weg-Zeit-Gesetzes der gleichmäßig beschleunigten Bewegung (Ausgangsstellung)

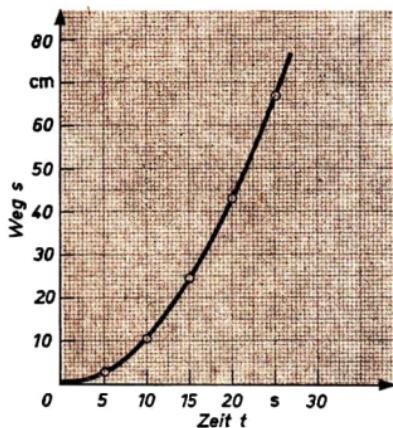


Abb. 4.2.2./2 Weg-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

sich die Fadenmarke jeweils befindet, einen Markierungspfeil auf den Meßstab. Bevor die Fadenmarke das Ende des Meßstabes erreicht, wird der Rotationszylinder mit der Hand abgebremst. Durch Drehen des Rändels der Stufenrolle wickelt man den Faden wieder auf und legt den Hebel wieder nach rechts. Damit ist das Gerät wieder meßbereit (Abb. 4.2.2./1). Man wiederholt den Vorgang und korrigiert gegebenenfalls die Stellung der Markierungspfeile. Die Meßwerte werden in einer Tabelle zusammengefaßt und rechnerisch und grafisch ausgewertet.

*Beispiel einer Meßreihe*

$t$ in s	$s$ in cm	$\Delta s$ in cm	$k = \frac{s}{t^2}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$
0	0	$2,7 = 1 \cdot 2,7$	—
5	2,7	$8,0 \approx 3 \cdot 2,7$	0,108
10	10,7	$13,8 \approx 5 \cdot 2,7$	0,107
15	24,5	$18,5 \approx 7 \cdot 2,7$	0,109
20	43,0	$24,2 \approx 9 \cdot 2,7$	0,108
25	67,2		0,108

Die grafische Darstellung (Abb. 4.2.2./2) zeigt, daß die Bildpunkte auf einer Parabel liegen. Dementsprechend läßt die Tabelle erkennen, daß der zurückgelegte Weg dem Quadrat der Zeit proportional ist; denn der Quotient

$$k = \frac{s}{t^2}$$

erweist sich als konstant. Es ergibt sich somit die Beziehung

$$s = k \cdot t^2.$$

Aus der dritten Spalte der Tabelle kann man erkennen, daß die in den einzelnen Zeitschnitten zurückgelegten Wegstrecken im Gegensatz zur gleichförmigen geradlinigen Bewegung nicht gleich sind, sondern sich wie die ungeraden Zahlen der Zahlenreihe verhalten.

*2. Teilversuch: Herleitung des Geschwindigkeit-Zeit-Gesetzes*

Zur Ermittlung der Geschwindigkeiten zu bestimmten Zeitpunkten muß jeweils zu diesem Zeitpunkt die beschleunigende Kraft ausgeschaltet werden. Das erreicht man, indem man genau an diesen Stellen den Hakenkörper auf einen Stelltisch auftreffen läßt. Von diesem Augenblick an vollführt die Fadenmarke eine gleichförmige geradlinige Bewegung. Ihre Geschwindigkeit bleibt konstant und kann aus



der Wegstrecke  $\Delta s$ , die im nächsten Zeitabschnitt  $\Delta t$  zurückgelegt wird, nach der Gleichung

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

errechnet werden. Dazu wird der Faden etwa 30 cm von der Schnurkarte abgewickelt. Zum Einstellen des Stelltisches wickelt man den Faden nur so weit auf die Stufenrolle auf, daß die Fadenmarke genau über der entsprechenden Meßstelle steht, und hebt den Stelltisch, bis er den Hakenkörper berührt (Abb. 4.2.2./3).

Die Meßergebnisse werden wieder in einer Tabelle erfaßt und rechnerisch und grafisch ausgewertet.

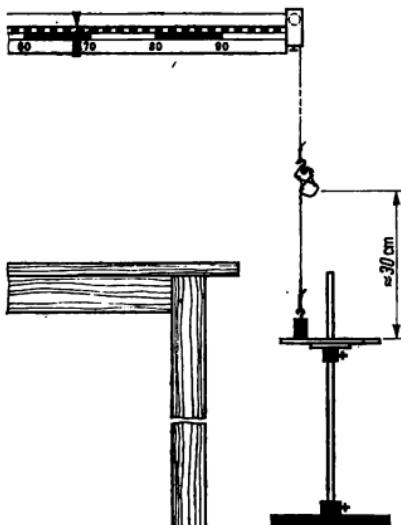


Abb. 4.2.2./3 Einstellen des Stelltisches für die Meßstelle 68 cm

#### Beispiel einer Meßreihe

$t$ in s	$\Delta t$ in s	$\Delta s$ in cm	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$\Delta v$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$
0	5	—	0	1,08	0,216
5	5	5,4	1,08	1,06	0,212
10	5	10,7	2,14	1,06	0,212
15	5	16,0	3,20	1,08	0,216
20	5	21,4	4,28	1,02	0,204
25		26,5	5,30		

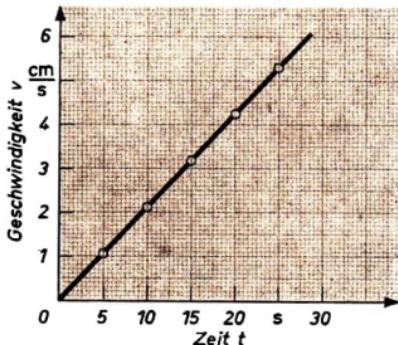


Abb. 4.2.2./4 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

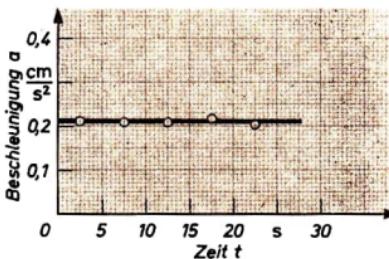


Abb. 4.2.2./5 Beschleunigung-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Aus der grafischen Darstellung (Abb. 4.2.2./4) und aus der Tabelle ist ersichtlich, daß die Geschwindigkeit der Zeit direkt proportional ist

$$v \sim t.$$

Der Quotient  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  ist als *Beschleunigung a* definiert.

Somit ist  $v = a \cdot t$ , und für die *Momentangeschwindigkeit v* nach der Zeit  $t$  gilt dann  $v = a \cdot t$ ,

das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung. Vergleicht man den Mittelwert der ermittelten Beschleunigung

$$a = 0,212 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$$

mit dem im ersten Teilversuch ermittelten Proportionalitätsfaktor  $k = 0,108 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ , so erkennt man, daß

$$k = \frac{a}{2} \text{ ist.}$$

Somit lautet das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2.$$

Aus der letzten Spalte der Tabelle ist zu ersehen, daß die Beschleunigung  $a$  konstant ist. Das kann auch als Beschleunigung-Zeit-Diagramm dargestellt werden (Abb. 4.2.2./5).

#### Bemerkungen

1. Vergleiche V 4.1.4., Bem. Nr. 1 und 2!
2. Bei der Verwendung des Reifenapparats, älterer Ausführung läuft das Experiment in der gleichen Weise ab. Im 2. Teilversuch wird statt des Stelltisches ein Gabeleinsatz benutzt, der die geschlitzte Scheibe abhebt (vgl. V 4.1.4., Bem. Nr. 4).

3. Infolge des langsamten Bewegungsablaufs beim Reifenapparat ergibt sich ein methodischer Vorzug aus der Möglichkeit, das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz unter Verwendung der direkten Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe des Polydigit, einer Lichtschranke und einer selbstgefertigten Streifenblende herzuleiten. Das ist durch wenige Versuchsabläufe mit hoher Meßgenauigkeit möglich.

Die Streifenblende kann man als Kontaktabzug eines Lineals mit Millimeterteilung oder aus einem Streifen Projektionsfolie, auf den man parallele Linien mit 1 mm Abstand zeichnet, herstellen (vgl. MB 4.0.2., Direkte Geschwindigkeitsmessung).

Die Blende wird so an dem waagerecht verlaufenden Teil des Fadens befestigt, daß sie sich nach Ablauf des ersten Zeitintervalls gerade in die Lichtschranke hineinbewegt hat (Abb. 4.2.2./6).

Die Lichtschranke wird an den Eingang „Lichtschranke 1“ des Schaltverstärkers angeschlossen und an ihre Lampe 6 V Gleichspannung gelegt. Der Meßverstärker wird mit Hilfe der Funktionstasten auf „Impuls“, „Dunkel“ und „Schranke 1“ geschaltet und an den Digitalzähler Polydigit angeschlossen (Abb. 4.2.2./7). Das Polydigit wird eingeschaltet und die Taste „1,0 s“ gedrückt (vgl. MB 4.0.2., Zählen von Impulsen).

Während des Versuchsablaufs wird mit dem Ertönen des ersten Signals die Geschwindigkeitsmessung durch Drücken der Taste „Messen“ ausgelöst. Am Polydigit wird die Geschwindigkeit in mm je s angezeigt. Durch Abtrennen einer Stelle durch das Komma erhält man die Angabe in  $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ .

Danach verschiebt man die Streifenblende so längs des Fadens, daß sie sich bei Beendigung des zweiten Intervalls in der Lichtschranke befindet. Der Versuchsaufbau wird wiederholt und die Zeitmessung beim Ertönen des zweiten Signals vorgenommen. Ebenso verfährt man an den weiteren Meßstellen.

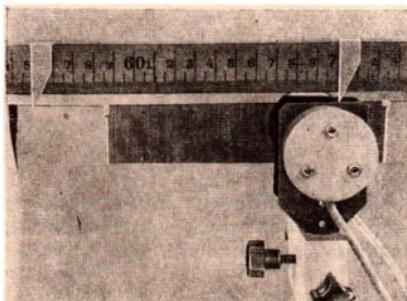


Abb. 4.2.2./6 Befestigung der Streifenblende am Faden des Reifenapparats

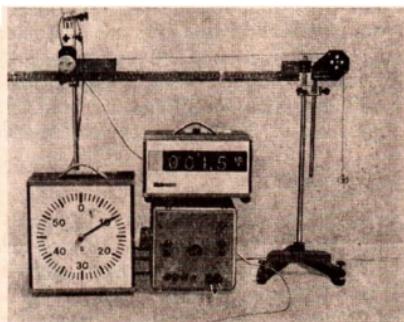


Abb. 4.2.2./7 Versuchsanordnung zur direkten Geschwindigkeitsmessung mit einer Streifenblende, einer Lichtschranke und dem Digitalzähler Polydigit

#### 4.2.3. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit der Luftkissenbahn

1. Luftkissenbahn ⑥ (vgl. V 4.1.8.)
2. Schwebekörper ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
3. Blende ⑨ (vgl. V 4.1.8.)
4. Stecker mit Kugel ⑩ (vgl. V 4.1.8.)
5. Staubsauger mit flexiblem Schlauch
6. Polydigit mit 1000 HZ-Generator
7. Lichtschrankenanordnung
8. Haltemagnet mit mechanischem Torschalter
9. Stromversorgungsgerät für Niederspannung
10. Vertikalmeßstab (1,5 m bzw. 2 m) mit Schiebezeigern

##### *Methodische Hinweise*

1. Die Luftkissenbahn ermöglicht infolge der nahezu reibungsfreien Bewegung sehr geringe Beschleunigungen und damit sehr langsame, visuell gut verfolgbare Bewegungsabläufe. Das Experiment ist deshalb auch zur Einführung der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung und zur Durchführung halbquantitativer Untersuchungen geeignet.
2. Infolge der nahezu ohne Abweichungen verlaufenden gleichmäßig beschleunigten Bewegung und der hohen Meßgenauigkeit des Polydigit in Verbindung mit der Lichtschrankenanordnung ergeben sich bei diesem Versuchsaufbau experimentelle Ergebnisse mit einem maximalen relativen Fehler von wenigen Prozent.
3. Zur Untersuchung des Weg-Zeit-Gesetzes können an sich beliebige Wegstrecken vorge wählt werden. Um das systematische Vorgehen zu betonen, empfiehlt es sich jedoch, entweder linear oder quadratisch anwachsende Wege zu verwenden. Letztere können aus halbquantitativen Voruntersuchungen resultieren. In beiden Fällen ist infolge der hohen Meßgenauigkeit bereits durch bloßes Vergleichen der Meßwerte der gesetzmäßige Zusammenhang erkennbar.

##### *Versuchsaufbau*

Der Versuchsaufbau erfolgt analog zu V 4.1.8. Durch Verstellen der Stellschrauben in den Stativfüßen wird eine schwache Neigung der Bahn vorge wählt, die bewirkt, daß sich der Schwebekörper von selbst in Bewegung setzt und sich nach etwa 10 s bis 20 s über die gesamte Bahn bewegt hat.

Die Blende wird in die mittlere Bohrung des Schwebekörpers gesteckt. Die Lichtschranke bringt man so an einem Stativ an, daß beim Bewegungsablauf der Lichtweg für die Zeitspanne des Blendendurchgangs unterbrochen wird (Abb. 4.2.3./1). Der Geber wird mit dem Schaltverstärker (Anschluß 1) und dieser mit dem Polydigit verbunden. Die Leuchte verbindet man mit dem Stromversorgungsgerät (6 V). Am Schaltverstärker wird noch eine Taste gedrückt.

In die linke horizontale Bohrung des Schwebekörpers wird der Stecker mit Stahlkugel eingeführt, die rechte Seite wird durch Einsticken eines gleich schweren Steckers belastet. Am linken Ende der Bahn ist der Haltemagnet am eingeschraubten Stativstab befestigt. Er wird an das Polydigit angeschlossen. Den freibleiben-

den Stecker des Haltemagnets führt man in den mechanischen Torschalter ein. Diesen Schalter befestigt man so an einem Stativ, daß er beim Vorbeigleiten des Schwebekörpers geöffnet wird.

Dicht unter der Luftkissenbahn wird der Meßstab mit Schiebezeigern befestigt.

### 1. Teilversuch: Ermittlung des Weg-Zeit-Gesetzes

Zur experimentellen Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Weg und Zeit werden mittels der Zeiger bestimmte Wegstrecken markiert, die sich alle vom Startpunkt des Schwebekörpers aus bis hin zum Ort des jeweiligen Zeigers erstrecken.

Vor der Messung werden am Polydigit die Taste „Ein“ und „100 Hz“ gedrückt. Der Schwebekörper wird an den Haltemagnet gebracht und der Torschalter so aufgestellt, daß er nach Passieren der ersten Wegstrecke vom Schwebekörper betätigt wird. Nach Einschalten des Staubsaugers werden durch Drücken der Taste „Messen“ der Bewegungs- und der Meßvorgang ausgelöst. Das Polydigit zeigt die Zeit an, die der Schwebekörper für das Zurücklegen der ersten Wegstrecke benötigt. Nach dem Ablesen wird der Schalter wieder geschlossen, die Taste „Messen“ durch erneutes Drücken wieder in die Ausgangslage gebracht, der Schwebekörper wieder zur Ausgangslage zurückgeschoben und der Zähler durch Drücken der Taste „Null“ zurückgestellt. Der Torzeitschalter wird an die zweite Meßstelle gebracht und der Meßvorgang wiederholt. Die Tabelle 1 zeigt die auf diese Weise erhaltenen Meßergebnisse.

*Tabelle 1: Beispiel einer Meßreihe*

$s$ in cm	$t$ in s	$t^2$ in $s^2$	$\frac{s}{t^2}$ in $\frac{cm}{s^2}$
10	3,29	10,82	0,92
40	6,69	44,76	0,89
90	10,13	102,62	0,88
160	13,53	183,06	0,87

Die Auswertung ergibt, daß der zurückgelegte Weg dem Quadrat der Zeit proportional ist.

### 2. Teilversuch: Ermittlung des Geschwindigkeit-Zeit-Gesetzes

An der ersten Meßstelle wird jetzt statt des Torschalters die Lichtschranke aufgestellt. Dadurch wird erreicht, daß die auf dem Schwebekörper aufgesteckte Blende kurz vor dem Ablauf der im ersten Teilversuch ermittelten Zeit in die Lichtschranke eintritt und sie kurzzeitig danach wieder verläßt.

Der mechanische Torschalter bleibt fortwährend geschlossen, am Schaltverstärker werden die Tasten „Tor“ und „Dunkel“ gedrückt.

Die Messung der Durchlaufzeit der Blende erfolgt auf folgende Weise: Durch Drücken der Taste „Messen“ am Polydigit wird der Bewegungsvorgang ausgelöst und der Zähler in Meßbereitschaft versetzt. Nach dem Durchgang der Blende durch die Lichtschranke zeigt das Polydigit die Durchlaufzeit an. Nachfolgend werden der

Schwebekörper sowie die Tasten des Polydigit und der Zählerstand wieder in Ausgangsposition gebracht und die Lichtschranke an der zweiten Meßstelle aufgestellt. Auf diese Weise werden aufeinanderfolgend die Durchlaufzeiten der Blenden an den verschiedenen Meßstellen ermittelt.

In der Tabelle 2 sind in der 1. Spalte die im 1. Teilversuch für die vorgegebenen Strecken ermittelten Zeiten eingetragen. Die 2. Spalte enthält die experimentell gewonnenen Durchlaufzeiten der Blende. In der 3. Spalte ist der Quotient aus der Streifenbreite (2,5 cm) und der Durchlaufzeit eingetragen. Infolge des kurzen Weges entspricht er bis auf geringfügige Abweichungen der Augenblicksgeschwindigkeit nach dem Ablauf der Zeiten in der 1. Spalte. Der Vergleich der Zahlenwerte in der 1. und der 3. Spalte zeigt, daß die Endgeschwindigkeit der Zeit proportional ist,  $v \sim t$ .

Tabelle 2: Beispiel einer Meßreihe

$t$ in s	Durchlaufzeit der Blende $t_b$ in s	Streifen- breite $b$ in cm	$v$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$\frac{v}{t}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$
3,29	0,41	2,5	6,10	1,85
6,69	0,21	2,5	11,90	1,78
10,13	0,14	2,5	17,86	1,74
13,53	0,11	2,5	22,73	1,68

Bei der Wiederholung der Experimente mit einer anderen Neigung der Luftkissenbahn wird diese Beziehung bestätigt. Der für jede Neigung konstante Quotient  $\alpha = \frac{v}{t}$  erweist sich als Maß für die Geschwindigkeitsänderung. Er wird deshalb

Beschleunigung genannt.

Ein Vergleich mit dem entsprechenden Quotienten beim Weg-Zeit-Gesetz zeigt in jedem Falle, daß der dort auftretende Quotient gleich der halben Beschleunigung ist. Deshalb nimmt das Weg-Zeit-Gesetz die Form an:  $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ .

#### Bemerkungen

1. Im Falle des 2. Teilversuchs kann die Quotientenbildung entfallen, wenn entsprechend der Bemerkung 3 im V 4.2.2. das Verfahren zur direkten Geschwindigkeitsmessung Anwendung findet. Dazu wird anstelle der einfachen Blende eine Streifenblende mit 1 mm wirksamem Streifenabstand auf dem Schwebekörper befestigt (Abb. 4.2.3./2).
2. An dem Polydigit wird die Meßzeit 1 s oder 0,1 s vorgewählt. An den Schaltverstärker schließt man an der Buchse 2 die zweite Lichtschranke an. Sie wird ebenfalls beleuchtet, bleibt aber außerhalb des Versuchsaufbaus. Das Starten des Schwebekörpers erfolgt in gleicher Weise durch Drücken der Taste „Messen“. Kurz danach wird sie durch erneutes Drücken in die Ausgangslage gebracht. Der Zähler wird auf Null zurückgestellt. Nun wird genau zu dem Zeitpunkt auf die Taste „Messen“ gedrückt, zu dem der Schwebekörper an der Meßstelle angelangt ist. Das Polydigit ermittelt die Anzahl der Streifen, die sich in der vorgewählten Zeit durch die Lichtschranke hindurchbewegt haben, und zeigt somit für dieses Zeitintervall die Durchschnittsgeschwindigkeit in  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$  oder  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  an. Sie ist nahezu gleich der Endgeschwindigkeit.

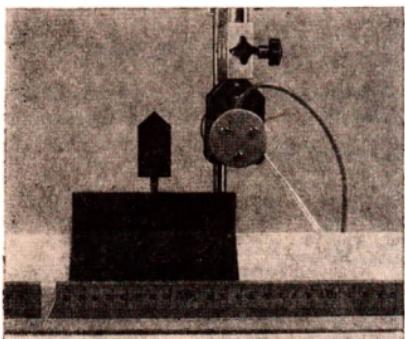


Abb. 4.2.3./1 Schwebekörper mit Blende

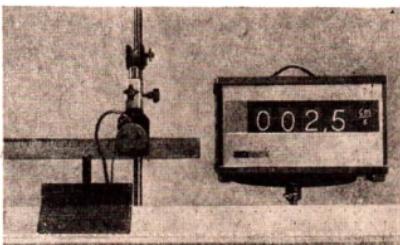


Abb. 4.2.3./2 Durchsichtiges Plastlineal mit Millimeterteilung als Streifenblende zur direkten Geschwindigkeitsmessung

#### 4.2.4. Bestätigung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit der Fallrinne nach Duff[SE]

1. Fallrinne nach Duff
2. Holzkeil
3. Stahlkugel oder Holzkugel ( $\varnothing$  etwa 3 cm)
4. Meßstab
5. Kreide
6. Holzklotz

##### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MH Nr. 1 und Nr. 2, V 4.1.5.!
2. Das Experiment sollte besonders dann durchgeführt werden, wenn die Fallrinne nach Duff auch schon zur Bestätigung der Gesetze der gleichförmigen Bewegung verwendet wurde (V 4.1.5.). Ist das nicht geschehen, dann ist es ratsam, in einem Vorversuch (vgl. Vorversuch in V 4.1.5.) nachzuweisen, daß die Schwingungsdauer der Kugel konstant ist.

##### *Versuch*

Durch Unterschieben eines Keils gibt man der Rinne eine leichte Neigung. Man reibt die Kugel ein und läßt sie vom Rand der Rinne aus abrollen. Dabei zeichnet sie eine Wellenlinie auf. Sie braucht gleiche Zeiten, um von A bis B, von B bis C usw. zu gelangen, nämlich jeweils eine volle Schwingungsdauer  $T$ . Die Entferungen von A bis B, von B bis C usw. werden gemessen. Sie verhalten sich wie die ungeraden Zahlen der Zahlenreihe. Der Weg der Kugel vom Ursprung A aus gemessen ( $\overline{AB}$ ,  $\overline{AC}$ ,  $\overline{AD}$  usw.) ist dem Quadrat der Zeit proportional (Abb. 4.2.4./1).

## V 4.2.4.

### Bemerkungen

1. Damit die Kugel die Rinne nicht verlässt und vom Tisch rollt, legt man an das Ende der Rinne einen Holzklotz.
2. Es gibt auch Fallrinnen, die mit einer Startvorrichtung und einer eingezzeichneten Mittellinie versehen sind. Bei ihnen misst man die Abschnitte zwischen den Schnittpunkten der Kreidespur mit der Mittellinie (Abb. 4.2.4./2). Die Zeiteinheit ist hier  $\frac{T}{2}$ .



Abb. 4.2.4./1  
Versuchsanordnung zur  
Bestätigung der Gesetze der  
gleichmäßig beschleunigten  
Bewegung mit der Fallrinne  
nach Duff:  
a) Seitenansicht, b) Draufsicht

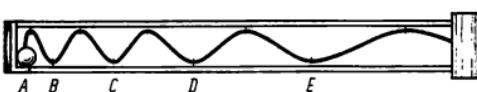


Abb. 4.2.4./2 Fallrinne mit  
Startvorrichtung und  
eingezzeichneter Mittellinie

### 4.2.5. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit dem Bandgerät [SE]

1. Bandgerät (Schienenlänge 7 m bis 8 m)
2. Wickelapparat
3. Experimentiermotor mit Zubehör
4. Hakenkörper oder Holzklotzchen
5. Manigumstücke oder Haftmagnete
6. Metronom oder Zentraluhr
7. Demonstrationstachometer mit Zubehör

### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.1.!
2. Diese Variante zur Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung sollte besonders dann gewählt werden, wenn auch die gleichförmige geradlinige Bewegung mit dem Bandgerät untersucht wurde.
3. Das Zustandekommen der Beschleunigung kann man den Schülern etwa auf folgende Weise erklären:

Die Drehzahl des Motors und damit auch die des Aufwickeldorns bleiben konstant. Für jede Umdrehung des Aufwickeldorns wird die Zeit  $\Delta t$  gebraucht. Beim Aufwickeln des Filzbandes vergrößert sich der Radius der Wicklung bei jeder Umdrehung um den Betrag  $\Delta r$ , um die Dicke des Filzbandes. Der Umfang der Wicklung wächst jeweils um den Betrag

$$\Delta U = 2 \cdot \pi \cdot \Delta r.$$

Da der Zuwachs des Umfangs dem Zuwachs des Weges in der Zeit  $\Delta t$  entspricht, wächst auch die Geschwindigkeit in dieser Zeit um einen konstanten Betrag.

$$\Delta v = 2\pi \frac{\Delta r}{\Delta t}. \text{ Die Beschleunigung beträgt } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta r}{\Delta t^2}.$$

- Schließt man an das Bandgerät ein Demonstrationstachometer an, dann kann man den Unterschied zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit und der Momentangeschwindigkeit erläutern. Die Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  bestimmt man durch Weg- und Zeitmessung, die Momentangeschwindigkeit wird vom Demonstrationstachometer angezeigt.
- Die große Länge des Bandgerätes wirkt sich besonders bei Schülerexperimenten günstig aus. Man kann den einzelnen Schülergruppen unterschiedliche Aufgaben stellen, z. B. Bestimmung des Weges und der Durchschnittsgeschwindigkeit für die Zeitspanne von 0 bis 10 s, von 10 s bis 20 s, von 20 s bis 30 s usw. Die von den einzelnen Gruppen ermittelten Werte werden zur Herleitung der Gesetze zusammengefaßt.
- Vergleiche MH Nr. 6, V 4.2.1.!

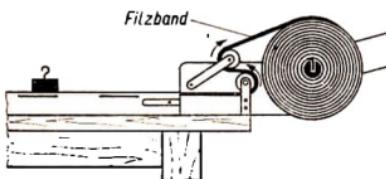
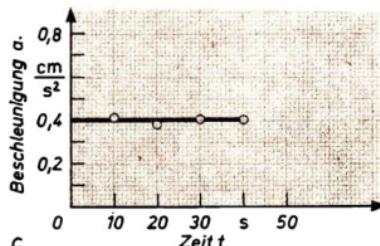
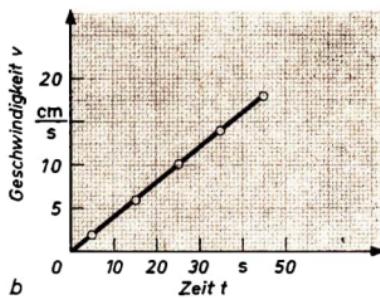
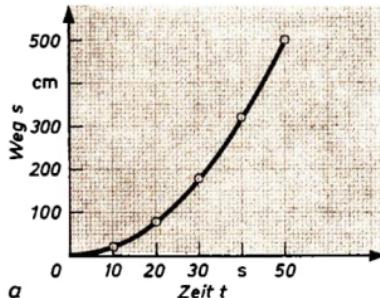


Abb. 4.2.5./1 Wickelapparat zur Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung



#### Versuchsaufbau

Für dieses Experiment sollte das Bandgerät möglichst mit einer Schienenlänge von 7 m bis 8 m benutzt werden. Statt des Antriebsteils wird der Wickelapparat an der Schiene befestigt und das dazugehörige 7 m lange Filzband auf dem Bandgerät ausgelegt. Auf das Ende des Bandes wird das Endstück für den zu transportierenden Körper aufgeschoben und festgeklemmt. Der Anfang des Bandes wird, wie in der Abbildung 4.2.5./1 dargestellt, um die Rollen gelegt und von der Seite her in den Schlitz des Wickeldorns eingeschoben. Um die Schnurlaufrolle des Wickeldorns wird der Antriebsriemen des

Abb. 4.2.5./2 Diagramme der Bewegung des Endstückes am Filzband: a) Weg-Zeit-Diagramm, b) Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm, c) Beschleunigung-Zeit-Diagramm

Experimentiermotors gelegt. Am Motor stellt man eine niedrige Drehzahl ein. Auf den Gewindezapfen der gerippten Rolle des Wickelapparates kann man eine Schnurlaufrolle aufschrauben und mit einem Antriebsriemen das Demonstrations-tachometer anschließen. Am besten eignet sich der Meßbereich 0 bis  $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Den Experimentiermotor und das Tachometer fixiert man in der richtigen Lage zum Bandgerät durch Befestigen mit Stativmaterial.

Das Metronom wird auf Sekundenschlag eingestellt und die Ausgangsstellung des Endstückes durch ein kleines Manigumdreieck gekennzeichnet. Um die Bewegung des Endstückes besser beobachten zu können, stellt man ein Holzklötzchen oder einen Hakenkörper darauf.

#### Versuch

Gleichzeitig mit einem Schlag des Metronoms schaltet man den Motor ein und beginnt mit „Null“ zu zählen. Bei jedem 5. oder 10. Schlag des Metronoms markiert man die augenblickliche Stellung des Endstückes möglichst genau durch ein Manigumdreieck. Die Meßwerte trägt man in eine Tabelle ein und wertet sie wie in V 4.2.2. rechnerisch und zeichnerisch aus (Abb. 4.2.5./2).

Ein Experiment lieferte folgende Werte:

$t$ in s	$s$ in cm	$\Delta s$ in cm	$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta \bar{v}$ in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{a} = \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t}$ in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$
0	0	$20 \approx 1 \cdot 20$	2,0		
10	20	$61 \approx 3 \cdot 20$	6,1	4,1	0,41
20	81	$99 \approx 5 \cdot 20$	9,9	3,8	0,38
30	180	$139 \approx 7 \cdot 20$	13,9	4,0	0,40
40	319	$179 \approx 9 \cdot 20$	17,9	4,0	0,40
50	498				

Bei der Fehlerdiskussion sollen die Schüler erkennen, daß die Abweichungen von den erwarteten Werten in erster Linie auf Ungenauigkeiten in der Bestimmung des Weges zurückzuführen sind.

#### Bemerkungen

1. Wenn das Experiment mit einer geringeren Länge des Bandgerätes ausgeführt werden muß, schiebt man das Endstück auf dem Filzstreifen so weit, daß es noch auf den Schienen liegt. Das überschüssige Stück des Streifens läßt man vom Ende des Bandgerätes herunterhängen. Das Filzband muß vom Wickeldorn ganz abgerollt sein.
2. Zur Wiederholung des Experiments muß das Band jedesmal wieder abgewickelt werden. Dazu nimmt man vorübergehend den Antriebsriemen von der Schnurlaufrolle des Motors.
3. Sollte sich das Filzband aus dem Schlitz des Wickeldorns herausziehen, dann klemmt man es mit einem Holz- oder Metallstift (Holzspießer oder Nagel), den man zusätzlich in die Bohrung des Dorns hineinschiebt, fest.

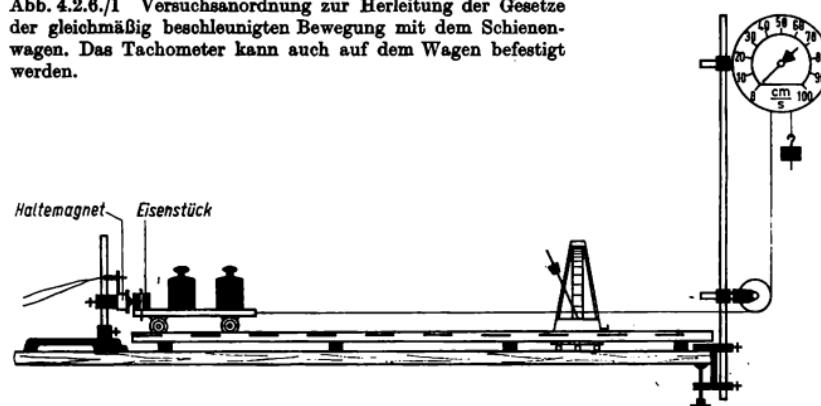
#### 4.2.6. Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung mit dem Schienenwagen [SE]

1. Schienenwagen mit Schienen und Schwellen
2. Haftmagnete oder Manigumstücke
3. Schnur
4. Haltemagnet
5. Morsetaste oder Aus-Taster
6. Stromversorgungsgerät für Niederspannung SV 59/50 oder SVG
7. quaderförmiges Eisenstück (z. B. Kreuzmuffe aus Eisen)
8. Hakenkörper
9. Handelswägestücke
10. Paketgummiringe
11. Demonstrationstachometer mit Zubehör
12. Metronom oder Zentraluhr

##### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MB 4.0.1., MB 4.0.3. und MH Nr. 2, V 4.1.7.!
2. Dieses Experiment hat gegenüber den Experimenten V 4.2.1. bis V 4.2.4. den Vorzug, daß am Demonstrationstachometer zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Momentangeschwindigkeit abgelesen werden kann. Es sollte zur Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung besonders dann ausgewählt werden, wenn die gleichförmige geradlinige Bewegung mit dem Experiment V 4.1.7. untersucht wurde.
3. Die Befestigung des Tachometers auf dem Schienenwagen (Abb. 4.1.7./3) macht zwar etwas mehr Mühe, weil eine zusätzliche Schnur gespannt werden muß, ist aber trotzdem vorteilhafter, weil man die Bewegung des Wagens und die Tachometeranzeige gleichzeitig gut beobachten kann.
4. Vergleiche MH Nr. 6, V 4.2.1.!

Abb. 4.2.6./1 Versuchsanordnung zur Herleitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung mit dem Schienenwagen. Das Tachometer kann auch auf dem Wagen befestigt werden.



### *Versuch*

Die Versuchsanordnung ähnelt der nach V 4.1.7. Dort ist auch das Justieren der Schiene beschrieben. Während der Schienenwagen aber im V 4.1.7. durch den Haltemagnet einen Impuls erhält und dadurch in Bewegung gesetzt wird, soll er hier durch den Haltemagnet festgehalten und beim Start ohne Impuls losgelassen werden. Statt des permanenten Magneten wird deshalb hier ein unmagnetisches Eisenstück an der Hinterkante des Wagens mit Gummiringen befestigt (Abb. 4.2.6./1). Den Haltemagnet schließt man über den Ruhekontakt einer Morsetaste oder über einen Aus-Taster an eine Gleichspannungsquelle von 4 V an.

Damit der Vorgang möglichst langsam abläuft, belastet man den Wagen mit einigen Handelswägestücken von insgesamt etwa 2 kg bis 3 kg Masse. Auch sie werden mit Gummiringen auf dem Wagen befestigt.

Die Schnur führt man über eine spitzengelagerte Feinrolle und über die Schnurlaufrolle des Demonstrationstachometers. Ihr Ende belastet man mit einem Hakenkörper, dessen Gewichtskraft etwas größer ist, als sie zur Kompensation der Reibung erforderlich wäre.

Unterbricht man den Stromkreis, so wird der Haltemagnet stromlos, und der Wagen vollführt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Drückt man die Starttaste gleichzeitig mit einem Schlag des Metronoms und kennzeichnet die augenblickliche Stellung der Vorderkante des Wagens nach jeweils ein oder zwei Schlägen durch Haftmagnete oder Manigumstückchen an der Schiene, dann kann man so wie im V 4.2.1. oder V 4.2.2. die Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung herleiten oder bestätigen.

Durch die Benutzung des Tachometers besteht zusätzlich die Möglichkeit, jeweils nach Ablauf eines 1 s- oder 2 s-Intervalls die Momentangeschwindigkeit abzulesen, tabellarisch zu erfassen und grafisch darzustellen.

Vergrößert man die beschleunigende Kraft, indem man einen größeren Hakenkörper an die Schnur hängt, so erfolgt die Bewegung mit größerer Beschleunigung.

### *Bemerkungen*

1. Auch hier besteht die Möglichkeit, das Tachometer wie im V 4.1.7. auf dem Schienenwagen zu befestigen (vgl. Abb. 4.1.7./3).
2. Es empfiehlt sich, den Wagen vor dem Ende der Schienen abzustoppen. Als Puffer eignet sich das als Federstoßgerät benutzte Wurfgerät.

## **4.3. Der freie Fall**

### **4.3.1. Vergleich der Fallbewegung im luftverdünnten Raum**

1. Glasrohr zum Vergleich der Fallbewegungen verschiedener Körper im luftverdünnten Raum
2. Luftpumpe mit Glasschliffstück zum Ansatz eines Vakumschlauchs oder einer Wasserstrahlpumpe
3. Vakumschlauch

### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment erweckt als Überraschungsversuch stets das ungeteilte Interesse der Schüler. Es wird häufig übersehen, daß es für die Schüler im allgemeinen

nicht selbstverständlich ist, daß eine Vogelfeder ebenschnell fällt wie ein Metallstück, wenn man den Luftwiderstand ausschaltet. Es ist deshalb zweckmäßig, dieses Experiment vor der experimentellen Untersuchung der Fallbewegung auszuführen.

### *Versuch.*

Das Glasrohr zum Vergleich der Fallbewegungen verschiedener Körper enthält meist ein Stückchen Blei und eine kleine Vogelfeder. Man zeigt den Schülern, daß der Glashahn geöffnet ist, daß also Luft in der Röhre sein muß. Man hält sie lotrecht, die beiden Gegenstände in ihr liegen im unteren Ende. Dreht man das Rohr plötzlich um, dann fällt das Metallstück darin nach unten, und die Feder schwebt langsam hinterher (Abb. 4.3.1./1). Bei hinreichender Verdünnung der Luft in der Röhre fallen die beiden Körper nahezu gleich schnell.



### *Bemerkungen*

1. Man kann das oben beschriebene Gerät auch selbst herstellen, indem man ein etwa 1 m langes Glasrohr mit einem Durchmesser von etwa 4 cm mit zwei geeigneten Gummistopfen verschließt, einen davon durchbohrt und mit einem Hahnrohr versieht. Als Fallkörper benutzt man beispielsweise ein Metallstückchen (Schraube), ein Stückchen Papier und eine Vogelfeder.
2. Das Hahnkücken des Glashahns sollte von Zeit zu Zeit gefettet werden, damit es nicht festklebt. Zur Aufbewahrung ist der Hahn stets zu öffnen.
3. Wenn man auf eine Münze oder auf eine kreisförmige Metallscheibe eine Papierscheibe mit etwas kleinerem Durchmesser legt und beide Körper in waagerechter Lage frei fallen lässt, so erreichen sie den Boden in der gleichen Zeit. Bei diesem Versuch spielen jedoch Strömungsercheinungen eine wesentliche Rolle, er ist deshalb für den hier beschriebenen Zusammenhang nicht geeignet.

Abb. 4.3.1.1 Glaströhre zum Vergleich der Fallbewegungen verschiedener Körper im luftverdünnnten Raum

#### 4.3.2. Bestätigung des Weg-Zeit-Gesetzes des freien Falls mit einer Fallschnur

1. Fallschnur ⑧, dazu erforderliches Material:  
a) Schnur                    b) Bleikugeln ( $\varnothing$  etwa 2 cm) mit Bohrung oder Schraubenmuttern

### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment kann als Einführungsversuch zum freien Fall zur Problemstellung ausgeführt werden. Es ist aber auch zur Wiederholung und Leistungskontrolle geeignet. Hierzu führt man es ohne Kommentar vor und lässt die Schüler ihre Beobachtung beschreiben und die physikalischen Zusammenhänge erklären.

### *Herstellung der Fallschnur*

An das eine Ende einer festen Schnur bindet man eine Bleikugel. Die anderen Kugeln werden längs der Schnur so verteilt und befestigt, daß sich ihre Abstände

## ● V 4.3.2.

von der ersten Kugel wie die Quadrate der natürlichen Zahlen verhalten. Die Abbildung 4.3.2./1 zeigt die Abstände für eine 3 m lange Schnur. Die Befestigung der Kugeln ist aus dem Nebenbild zu ersehen. Man kann die Schnur in der Bohrung noch mit einem Holzstift (Streichholz) verkeilen.

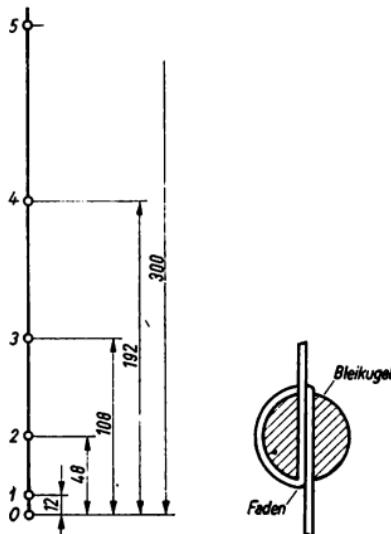
### *Versuch*

Man läßt die Schnur frei herabhängen, so daß die unterste Kugel den Boden gerade berührt. Läßt man die Schnur los, so hört man die Kugeln in gleichen Zeitabständen aufschlagen, woraus man auf die Gültigkeit des Weg-Zeit-Gesetzes der gleichmäßig beschleunigten Bewegung für den freien Fall schließen kann.

### *Bemerkungen*

1. Besonders eindrucksvoll ist es, wenn man zum Vergleich das Experiment mit einer Schnur wiederholt, an die die Kugeln in gleichen Abständen geknüpft sind.
2. Eine Schnurlänge von 3 m ist als Mindestlänge anzustreben. Mit einer längeren Schnur und größeren Abständen ist die Gleichheit der Intervalle deutlicher zu erkennen.
3. Ist bei einem elastischen Fußbodenbelag der Aufschlag der Kugeln nicht laut genug, kann man durch eine geeignete Unterlage, z. B. durch eine leere Kiste, den Schall verstärken.

Abb. 4.3.2./1 Verteilung der Bleikugeln an einer Fallschnur;  
Nebenbild: Befestigung der Kugeln



## 4.3.3. Bestätigung des Weg-Zeit-Gesetzes des freien Falls durch Vergleich der Fallzeiten beim Fall aus verschiedenen Höhen

1. Bleikugeln  
Steine oder dergleichen
2. Meßband
3. Metronom

### *Methodische Hinweise*

1. Das Experiment zeigt, daß für den freien Fall das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung gilt. Das ist die gleiche Erkenntnis, die auch V 4.3.2. bringt. Während dort die Gleichheit der Zeitabschnitte aus dem Gesamteindruck des Geräusches der rasch nacheinander auftreffenden Kugeln geschlossen wurde, wird sie hier durch den Vergleich mit den Schlägen des Metro-

noms festgestellt. Während man sich bei dem Experiment mit der Fallschnur mit einer Fallhöhe von etwa 3 m begnügt, wird bei dem hier beschriebenen Experiment eine Höhe von 9 m benötigt. Man wird das Experiment deshalb meist im Treppenhaus ausführen müssen.

2. Obwohl der Vergleich der Fallzeiten mit den Schlägen des Metronoms keine exakte Methode zur Zeitmessung darstellt, kann das Experiment für den Unterricht empfohlen werden, weil es in erkenntnistheoretischer Hinsicht sehr wertvoll ist.

Es zeigt, daß zum Experimentieren nicht immer besondere Spezialgeräte erforderlich sind.

### *Versuch*

Man wählt die Zeiteinheit so, daß in ihr möglichst genau ein Weg von 1 m durchfallen wird. Das ist bei 0,45 s der Fall. Dazu muß das Metronom auf 132 Schläge je Minute eingestellt werden.

Man läßt einen geeigneten Körper aus einer Höhe von 1 m, von 4 m, von 9 m fallen. Gibt man ihn genau im Augenblick eines Takschlags frei, so hört man mit hinreichender Genauigkeit beim 1., beim 2. bzw. beim 3. darauffolgenden Takschlag das Auftreffen auf dem Boden.

Da sich die Fallhöhen wie die Quadrate der Zeiten verhalten, wird durch das Experiment bestätigt, daß der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist.

### *Bemerkungen*

1. Zur Erhöhung der Aufmerksamkeit zählt man vor dem Loslassen des Fallkörpers einige Schläge des Metronoms mit.
2. Um Unfälle zu vermeiden, darf bei einer harten Unterlage, z. B. bei einem Steinboden, keine Stahlkugel als Fallkörper benutzt werden, da sie vom Steinboden zurückprallt.

### **4.3.4. Bestimmung der Fallbeschleunigung durch Messung der Fallzeit eines aus 5 m Höhe fallenden Körpers**

1. Bleikugel, Stein
2. Meßband
3. Metronom

### *Methodische Hinweise*

1. Dieses Experiment kann erst ausgeführt werden, wenn der Nachweis erbracht ist, daß der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist.
2. Man könnte die Fallzeit auch mit einer Stoppuhr messen. Es ist aber dann nötig, mehrere Messungen durchzuführen und das arithmetische Mittel der Fallzeiten zu berechnen, weil der subjektive Fehler beim Stoppen extrem kurzer Zeiten relativ groß ist. Bei der Benutzung eines Metronoms kann bereits nach einem Versuch das Zusammentreffen des Aufschlags mit dem Schlag des Metronoms mit ausreichender Sicherheit festgestellt werden.

### *Versuch*

Von einem Fenster, einem Balkon oder im Treppenhaus läßt man aus genau 5 m Höhe einen geeigneten Körper fallen und vergleicht die Fallzeit mit dem Zeitin-

tervall eines auf Sekundenschlag eingestellten Metronoms. Läßt man den Körper genau bei einem Schlag des Metronoms los, so hört man gleichzeitig mit dem nächsten Schlag das Auftreffen auf dem Boden.

Aus dem Weg-Zeit-Gesetz für den freien Fall

$$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$$

folgt dann für die Fallbeschleunigung

$$g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

*Bemerkung*

Vergleiche Bemerkung Nr. 1 und Nr. 2, V 4.3.3.!

#### **4.3.5. Bestimmung der Fallbeschleunigung mit elektronischer Zeitmessung [SE]**

1. Polydigit
2. mechanischer Torschalter
3. Haltemagnet
4. Fallkörper aus Eisen (quaderförmig oder Kugel)
5. Auffangbeutel
6. Meßstab

*Methodischer Hinweis*

1. Zur Berechnung der Fallbeschleunigung wird das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung benutzt. Es ist deshalb erforderlich, nachzuweisen, daß der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist. Das kann ähnlich wie im 1. Teilversuch von V 4.2.2. dadurch geschehen, daß man für verschiedene Fallhöhen nachweist, daß

$$s \sim t^2$$

ist.

2. Durch den Einsatz einer elektrischen Start-Stopp-Einrichtung und einer elektronischen Zeitmessung können die Fallzeiten mit einer sehr großen Genauigkeit bestimmt werden. Deshalb erhält man schon bei relativ kleinen Fallhöhen brauchbare Meßwerte. Weil aber die Genauigkeit des Ergebnisses mit zunehmender Höhe wächst, wird man sie trotzdem möglichst groß wählen. Steht ein 1000 Hz-Zeitmarkengeber zur Verfügung (vgl. MB 4.0.2.), genügen bereits wenige Zentimeter.

Um Fehlmessungen auszuschließen, ist es zweckmäßig, schon vor dem Experiment zu wissen, welches Meßergebnis zu erwarten ist. In der folgenden Tabelle und in der Abbildung 4.3.5./1, in einem Weg-Zeit-Diagramm, sind dazu zusammengehörende Wertepaare dargestellt.

Steht im Polydigit nur der 100 Hz-Zeitmarkengeber zur Verfügung, ist es ratsam, die in der Tabelle enthaltenen Fallhöhen im Experiment vorzugeben. Man

erhält dann Meßwerte für die Fallzeit, bei denen sich die fehlenden Tausendstelsekunden auf die Genauigkeit des zu errechnenden Wertes der Fallbeschleunigung nicht wesentlich auswirken.

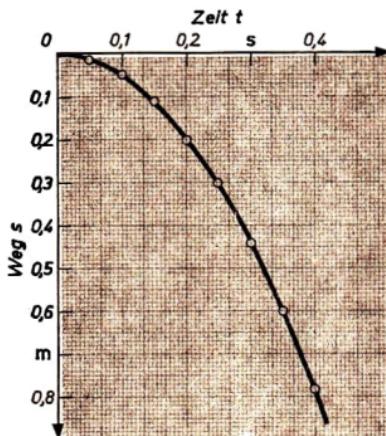


Abb. 4.3.5./1  
Weg-Zeit-Diagramm des freien Falls

#### Zusammengehörende Wertepaare für Fallzeit und Fallhöhe

$t$ in s	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
$s$ in m	0,012	0,049	0,110	0,196	0,306	0,441	0,600	0,785	0,993

3. Es ist nicht notwendig, den Schülern den gesamten Aufbau der Schaltung zu erklären. Zum Verständnis müssen sie etwa folgendes wissen:

Drückt man die Starttaste (Taste „Messen“), dann wird der Haltemagnetstromlos und läßt den Fallkörper los. Gleichzeitig wird die elektronische Stoppuhr eingeschaltet. Trifft der Fallkörper auf den mechanischen Schalter, dann wird der Stromkreis unterbrochen und damit die Uhr gestoppt. Je nach der Altersstufe kann man weitere Einzelheiten über die elektronische Zeitmessung hinzufügen.

#### Versuch

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 4.3.5./2 dargestellt. Der Meßstab wird so am Stativ befestigt, daß sich seine Nullmarke in der Höhe des mechanischen Torschalters befindet. Zur Veränderung der Fallhöhe wird nur der Haltemagnet gehoben oder gesenkt. Alle übrigen Teile der Versuchsanordnung bleiben unverändert. Der Haltemagnet muß sich stets genau lotrecht über dem Torschalter befinden, damit der Fallkörper im Fallen diesen Schalter betätigt. Die Fallhöhe ist der Abstand der Unterkante des Fallkörpers vom Torschalter. Haltemagnet und Torschalter werden an die Buchse ③ des Polydigit angeschlossen. Nach dem Einschalten des Gerätes stellt man mit einem Schraubenzieher das Komma ein und setzt in das rechte Fenster die Folie mit der Einheit „s“ ein. Mit Hilfe der „Null-“ Taste stellt man das Zählwerk auf Null. Schließlich wird durch Drücken der Taste

„100 Hz“ der Zeitmarkengeber an den Zähleingang gelegt. Nachdem man sich davon überzeugt hat, daß am mechanischen Torschalter der Kontakt geschlossen ist, wird der Fallkörper angehängt und die Fallhöhe  $s$  ermittelt.

Durch kurze Betätigung der Taste „Messen“ wird der Haltemagnet stromlos, und der Fallkörper fällt ab. Das Polydigit zeigt die Fallzeit an. Durch erneutes Schließen des Torschalterkontakte wird der Haltemagnet wieder wirksam und kann den Fallkörper festhalten. Will man aus mehreren Messungen den Mittelwert der Fallzeit ermitteln, wiederholt man die Messung, ohne vorher das Zählwerk auf Null zu stellen. Das Zählgerät addiert die Fallzeiten der nacheinander ausgeführten Experimente, so daß man nach zehn Versuchen in der angezeigten Fallzeit das Komma nur um eine Stelle nach links verschieben muß, um das arithmetische Mittel zu erhalten.

Fallhöhen und Fallzeiten werden in einer Tabelle zusammengefaßt. In die dritte Spalte trägt man den Quotienten  $\frac{s}{t^2}$  als Proportionalitätsfaktor  $k$  des Weg-Zeit-

Gesetzes ein. Er erweist sich als konstant. Die Fallbeschleunigung entspricht  $2k$ . Sie kann nach der Gleichung

$$a = \frac{2s}{t^2}$$

errechnet werden.

#### Bemerkung

Bei der Benutzung der Falleinrichtung dürfen am Polydigit die Tasten „1,0 s“ und „0,1 s“ nicht gedrückt werden, da sonst der Impulsbaustein zerstört würde.

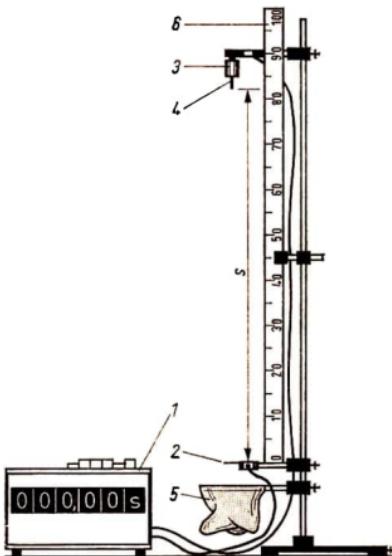


Abb. 4.3.5./2 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Fallbeschleunigung

#### 4.3.6. Bestimmung der Fallbeschleunigung mit dem physischen Pendel nach Whiting [SE]

1. Holzleiste (Länge etwa 1 m, Querschnitt etwa 1 cm  $\times$  3 cm) mit einer Bohrung am Ende ⑨
2. zylindrischer oder kegelförmiger Fallkörper ⑩
3. Meßstab
4. Stoppuhr
5. Schreibpapier, Kohlepapier, Reißzwecken, Faden, Streichhölzer, Klebstoff oder Klebestreifen, kleine Nägel

**Methodische Hinweise**

1. Zur Berechnung der Fallbeschleunigung wird das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung benutzt. Man kann deshalb dieses Experiment erst ausführen, wenn man nachgewiesen hat, daß der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist. Dazu sind die Versuche V 4.3.2. und V 4.3.3. geeignet.
2. Das Experiment ermöglicht die Bestimmung der Fallbeschleunigung mit einfachen Mitteln. Interessant daran ist, daß das Pendel, das man zur Zeitmessung benutzt, gleichzeitig die Aufzeichnung des Fallweges bewirkt.

**Herstellung des Fallkörpers**

Den Fallkörper stellt man aus einem etwa 5 cm langen Rundholz her, an das man eine Kreisscheibe aus Blech ( $\varnothing$  etwa 5 cm) schraubt und das man mit einem passenden Stück Bleirohr umgibt (Abb. 4.3.6./1a). Man kann auch einen kegelförmigen Körper verwenden, den man aus Blei gießt oder aus beliebigem Metall dreht (Abb. 4.3.6./1b).

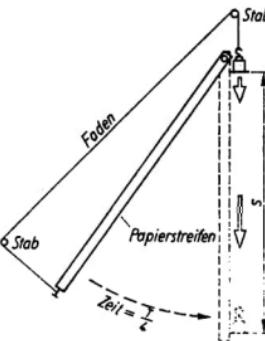
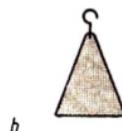
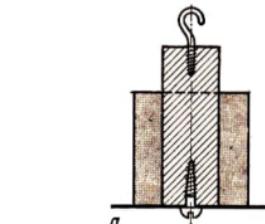
Abb. 4.3.6./1 Fallkörper zum Whitingschen Versuch:  
a) zylindrische Form, b) Kegelform

**Versuch**

Man befestigt an einer schmalen Längsfläche der Leiste mit Reißzwecken einen langen Streifen Papier mit darübergelegtem Kohlepapier. Um die erforderliche Länge zu erhalten, klebt man mehrere Streifen aneinander. Man steckt die Leiste auf einen Lagerzapfen und schraubt diesen an ein Stativ, so daß die Leiste frei schwingen kann. Mit einer Stoppuhr bestimmt man ihre Schwingungsdauer.

Den Fallkörper hängt man an einen dünnen Faden so auf, daß er die lotrecht herabhängende Leiste an der mit dem Papierstreifen versehenen Seite in der Nähe des Aufhängepunktes gerade berührt. Den Faden führt man über einen waagerechten Stab, der weiter oben am selben Stativ befestigt ist, und von da über einen weiteren Stab an einem zweiten Stativ, seitlich vom ersten. Das Fadenende versieht man mit einer Schlinge, die über einen kleinen Nagel gestreift wird, den man in die Endfläche der Leiste eingeschlagen hat, so daß die Leiste zur Seite gezogen wird. Vorher hat man durch einen leichten Druck die Ausgangsstellung des Fallkörpers als schwarzen Strich auf dem weißen Papier markiert (Abb. 4.3.6./2).

Abb. 4.3.6./2 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Fallbeschleunigung mit dem Whitingschen Pendel. Die Stativen sind nicht mitgezeichnet.



Um die Fallbewegung erschütterungsfrei auszulösen, brennt man den Faden an irgendeiner Stelle durch. Der Fallkörper fällt herab. Im gleichen Augenblick schwingt die Leiste in die Ruhelage zurück und schlägt gegen den herabfallenden Körper. Dabei wird auf dem Papier durch einen zweiten Kohlestrich das Ende einer Strecke  $s$  markiert, die in einem Viertel der Schwingungszeit  $T$ , also in der Zeit  $\frac{T}{4}$ , durchfallen wird. Das Weg-Zeit-Gesetz

$$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$$

liefert dann für die ermittelten Meßwerte die Fallbeschleunigung

$$g = \frac{32 s}{T^2}.$$

#### *Bemerkungen*

1. Die Schwingungsdauer wird bestimmt, indem man die Zeit für eine größere Anzahl von Schwingungen abstoppt und durch die Anzahl der Schwingungen dividiert.
2. Es ist darauf zu achten, daß der Faden und die Leiste in einer lotrechten Ebene liegen. Nach Markierung des Ausgangspunktes darf sich der Fallkörper nicht mehr verschieben. Man läßt von einem Helfer den Faden fest gegen den oberen Stab drücken, während man die Ausgangsмарke anbringt und die Leiste in die Endschlinge hängt.

### **4.3.7. Bestimmung der Fallbeschleunigung mit dem Fadenpendel [SE]**

1. Pendelkörper (Bleikugel mit Öse)	3. Stoppuhr
2. Meßstab oder Meßband	4. Faden, Reißnägel

#### *Methodische Hinweise*

1. Das Experiment ist besonders als Schülerexperiment geeignet.
2. Trotz des geringen Aufwandes liefert das Experiment genaue Ergebnisse. Um den relativen Fehler der Längenmessung klein zu halten, verwendet man lange Pendel.

#### *Versuch*

An einem Stativ befestigt man ein Fadenpendel und mißt seine Länge möglichst genau. Es ist dies die Entfernung zwischen dem Aufhängepunkt und dem Schwerpunkt des Pendelkörpers. Seine Schwingungsdauer ermittelt man als arithmetisches Mittel aus einer Vielzahl von Schwingungen, indem man z. B. die Zeit für fünfzig Schwingungen stoppt und durch 50, die Anzahl der Schwingungen, dividiert.

Die Schwingungsdauer  $T$  eines Fadenpendels ist bei kleinen Amplituden

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Löst man die Gleichung nach  $g$  auf, so erhält man

$$g = \frac{4\pi^2 \cdot l}{T^2}.$$

**Bemerkungen**

1. Extrem lange Stativstäbe sind für das Experiment nur dann geeignet, wenn man sie verstrebkt, so daß sie nicht mitschwingen können.
2. Wenn man das Pendel an der Decke des Experimentierraumes befestigen kann, in Altbauten gelingt dies gewöhnlich mit Hilfe eines Reißnagels, erhält man infolge der großen Pendellänge sehr genaue Werte.

**4.4. Zusammengesetzte Bewegungen****4.4.1. Zusammensetzung zweier gleichförmiger Bewegungen — Veranschaulichung an der Wandtafel**

1. Tafeldreieck	3. Faden, kleine Nägel
2. Tafellineal oder Holzleiste	4. Plastringe (Schnurlaufringe für Zuggardinen)

**Methodischer Hinweis**

Dieser Versuch kann als Veranschaulichung der Bewegung eines Schwimmers, der einen Fluß durchquert, dienen und eignet sich als Vorversuch zur Erklärung der Wurfbewegung.

**Versuch**

In der Nähe des rechten Winkels eines Tafeldreiecks und in den linken Rand der Wandtafel schlägt man je einen kleinen Nagel ein. In der Höhe des Nagels, den man in den Tafelrand geschlagen hat, drückt ein Helfer ein Tafellineal fest an die Tafel. Es dient beim Experiment als Gleitschiene. An ihr verschiebt man das Zeichendreieck von links nach rechts und mit ihm ein Stück Kreide, das man in der Nähe der oberen Ecke des Dreiecks festhält. Dabei wird der Weg der Kreide als Strecke aufgezeichnet (Abb. 4.4.1./1). Bewegt man die Kreide bei ruhendem Dreieck entlang der Kathete nach unten, entsteht die senkrechte Strecke. Nun steckt man die Kreide in eine Fadenschlaufe, führt den Faden über den Nagel im Dreieck und bindet das andere Ende an den Nagel im Tafelrand. Beim Verschieben des Dreiecks vollführt dann die Kreide beide Bewegungen gleichzeitig. Die resultierende Bewegung ist eine gleichförmige geradlinige, die sich aus den beiden gleichförmigen geradlinigen Komponenten zusammensetzt. Die Geschwindigkeitsvektoren der beiden Komponenten haben gleiche Beträge.

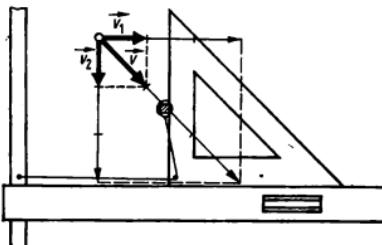


Abb. 4.4.1./1 Überlagerung zweier geradliniger gleichförmiger Bewegungen mit den gleichen Geschwindigkeiten

## V 4.4.1.

Führt man den Faden so, wie es die Abbildungen 4.4.1./2a und 4.4.1./2b zeigen, dann entstehen zusammengesetzte Bewegungen, deren Komponenten unterschiedliche Geschwindigkeiten haben.

### Bemerkungen

1. Um die Reibung zu verringern, führt man den Faden zur Umlenkung durch kleine Plastringe.
2. Statt des Tafellineals kann man auch eine Holzleiste verwenden, die man mit kleinen Nägeln an dem Rand der Wandtafel anheftet.

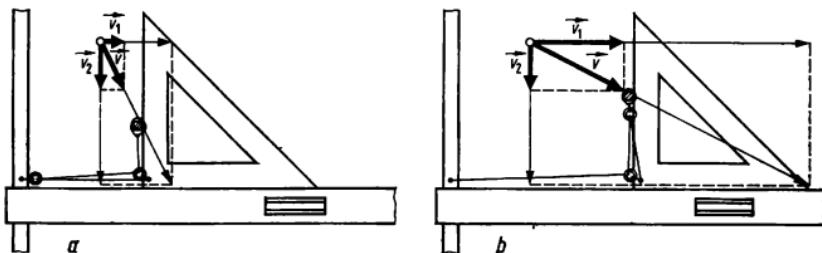


Abb. 4.4.1./2 Überlagerung zweier gleichförmiger, geradliniger Bewegungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten: a) Der Betrag der Geschwindigkeit der horizontalen Komponente verhält sich zu dem der vertikalen wie 1:2. b) Der Betrag der Geschwindigkeit der horizontalen Komponente verhält sich zu dem der vertikalen wie 2:1.

## 4.4.2. Zusammensetzung zweier gleichförmiger Bewegungen — Veranschaulichung mit einer rollenden Kugel

1. Gerät zur Veranschaulichung der Zusammensetzung zweier gleichförmiger Bewegungen (Hammerstoßgerät) mit Holzkugel

### Methodischer Hinweis

Vergleiche MH, V 4.4.1.!

### Versuch

Das Hammerstoßgerät ist in der Abbildung 4.4.2./1 dargestellt. Zwei gleiche Hämmer sind an einem Holzgestell so angebracht, daß sie in senkrecht zueinander stehenden Ebenen schwingen können.

Legt man vor das Gerät eine Holzkugel, hebt einen der Hämmer leicht an und läßt ihn los, dann erteilt er der Kugel einen Kraftstoß. Sie rollt auf der horizontalen Tischfläche in der Stoßrichtung fort. Ihre Geschwindigkeit hängt von der Stärke des Kraftstoßes ab, also davon, wie hoch der Hammer gehoben wurde. Erfolgt der Stoß durch den anderen Hammer, bewegt sich die Kugel rechtwinklig zur ursprünglichen Richtung.

Hebt man beide Hämmer und läßt sie gleichzeitig los, dann erhält die Kugel beide Kraftstoße gleichzeitig und vollführt eine Bewegung, die sich aus zwei Bewegungen zusammensetzt (Abb. 4.4.2./2).

**Bemerkungen**

1. Auch wenn die Hämmer verschieden hoch gehoben werden, muß man sie zur gleichen Zeit loslassen, weil die Schwingungsdauer von der Amplitude weitgehend unabhängig ist.
2. Das Hammerstoßgerät kann mit geringem Aufwand selbst hergestellt werden.

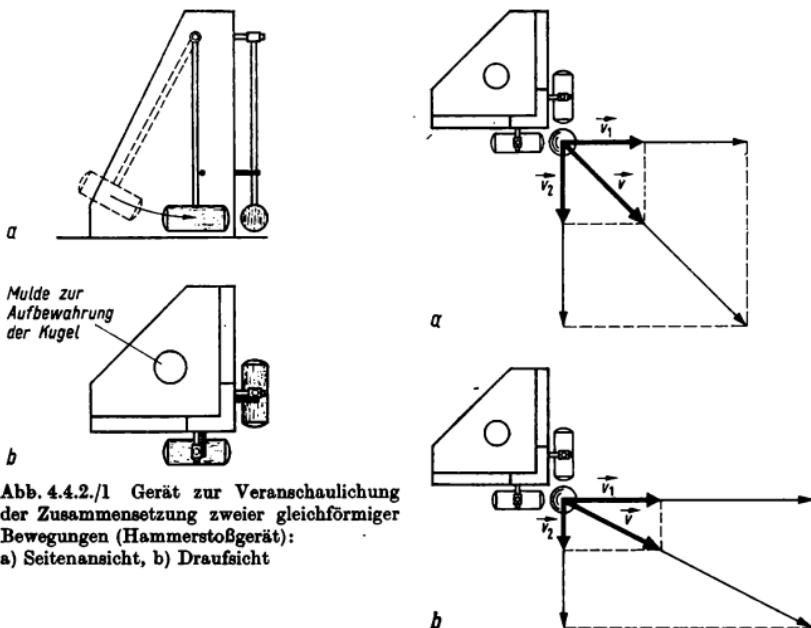


Abb. 4.4.2/1 Gerät zur Veranschaulichung der Zusammensetzung zweier gleichförmiger Bewegungen (Hammerstoßgerät):  
a) Seitenansicht, b) Draufsicht

Abb. 4.4.2/2 Zusammensetzung von Bewegungen mit dem Hammerstoßgerät: a) Die beiden Komponenten haben gleiche Geschwindigkeiten. b) Die beiden Komponenten haben unterschiedliche Geschwindigkeiten.

### 4.4.3. Zusammensetzung einer gleichförmigen und einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung [SE]

1. Reißbrett
2. Federstoßeinrichtung mit Stahlkugel
3. Schraubzwinge
4. Schreibpapier, Kohlepapier, Klebstoff, Reißnägel
5. Holzklotz

**Methodische Hinweise**

1. Dieses Experiment kann als Vorversuch zum Stoffkomplex horizontaler, schräger und lotrechter Wurf ausgeführt werden. Bei ihm ist die Bewegung der Kugel leichter zu beobachten als beim freien Fall. Die Auswertung wird dadurch erleichtert, daß die Kugel ihre Bahn selbsttätig aufzeichnet.

2. Wenn man bei allen Stoßrichtungen die gleiche Federspannung des Stoßgerätes anwendet, erhält die Kugel jedesmal den gleichen Kraftstoß und hat deshalb auch immer die gleiche Anfangsgeschwindigkeit. Das erleichtert die Auswertung. Es ist aber zweckmäßig, in einem Teilversuch mit gleicher Stoßrichtung die Abhängigkeit von der Anfangsgeschwindigkeit zu zeigen.

*Versuch*

Auf ein Reißbrett legt man einen großen Bogen Papier und darauf einen Bogen Kohlepapier. Beide Bogen heftet man mit Reißnägeln an. Am linken Rand des Brettes befestigt man mit einer Schraubzwinge die Federstoßeinrichtung.

Man legt das Brett zuerst horizontal auf den Tisch, so daß die Schraubzwinge über die Tischkante ragt und die flache Auflage nicht stört. Erteilt man der Kugel mit dem Federstoßgerät einen Impuls, dann rollt sie geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit über das Brett zum Punkt B (Abb. 4.4.3./1). Die Kugel vollführt eine gleichförmige geradlinige Bewegung.

Nun neigt man das Brett, indem man einen Holzklotz unterlegt. Man hält die Kugel im Punkt A vor die Federstoßeinrichtung und läßt sie los. Sie rollt mit zunehmender Geschwindigkeit zum Punkt C. Durch die Neigung des Brettes vollführt sie eine gleichmäßig beschleunigte geradlinige Bewegung.

Erteilt man bei schräggestelltem Brett der Kugel einen Kraftstoß mit der Federstoßeinrichtung, so vollführt sie beide Bewegungen gleichzeitig und gelangt auf einer parabolischen Bahn von A nach D. Durch das Kohlepapier zeichnet die Kugel ihren Weg selbst auf. Damit die Bahnkurve kräftig aufgezeichnet wird, wiederholt man das Experiment mehrmals unter gleichen Bedingungen. Je nach der erteilten Anfangsgeschwindigkeit und der Neigung des Brettes verläuft die Bahn flacher oder steiler.

Zur Auswertung nimmt man das Kohlepapier ab und untersucht die aufgezeichnete Bahn (Abb. 4.4.3./1). Man trägt auf der waagerechten Geraden  $\overline{AB}$  gleiche Strecken ab und zeichnet die Ordinaten bis zur Bahnkurve ein. Die Längen dieser Ordinaten verhalten sich wie die Quadratzahlen. Das ist charakteristisch für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Man erkennt, daß die Kugel beide Bewegungen gleichzeitig ausgeführt hat.

Man wiederholt das Experiment mit verschiedenen Einstellwinkeln der Stoßeinrichtung. Die Auswertung zeigt die Abbildung 4.4.3./2. Wieder durchläuft die Kugel eine parabolische Bahn. Auch bei der Einstellung eines negativen Winkels ergibt sich eine Parabel. Ihr Scheitel liegt jedoch nicht im Bereich der aufgezeichneten Bahnkurve (Abb. 4.4.3./3).

Schließlich stellt man einen Winkel von  $90^\circ$  ein. Hierbei fällt der abfallende Ast der Bahn mit dem aufsteigenden zusammen, es entsteht eine Gerade (Abb. 4.4.3./4). Man kann beim Lauf der

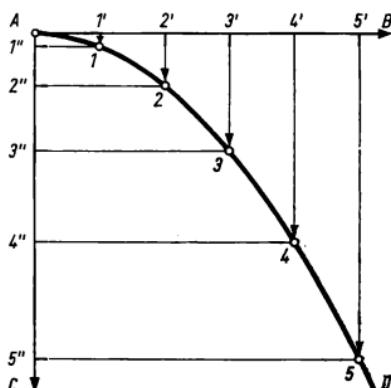


Abb. 4.4.3./1 Bahnkurve beim Einstellwinkel  $0^\circ$ . Die beiden Bewegungskomponenten stehen senkrecht aufeinander.

Kugel beobachten, daß die Geschwindigkeit allmählich abnimmt, im Gipfpunkt gleich Null ist und auf dem Rückweg wieder zunimmt.

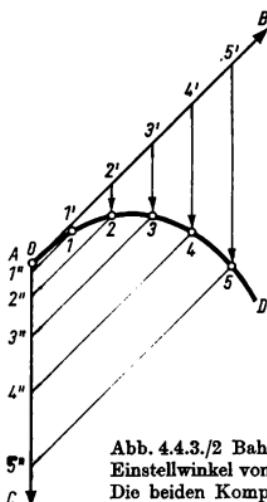


Abb. 4.4.3/2 Bahnkurve beim Einstellwinkel von  $45^\circ$ . Die beiden Komponenten bilden einen Winkel von  $135^\circ$ .

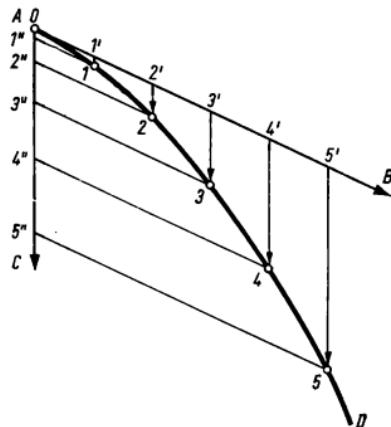


Abb. 4.4.3/3 Bahnkurve bei einem negativen Einstellwinkel. Der Scheitel der Parabel liegt außerhalb des Bereichs der aufgezeichneten Bahnkurve.

#### Bemerkungen

1. Die Federstoßrichtung und die zugehörige Kugel können dem SEG Mechanik entnommen werden. Auch das Wurfgerät eignet sich dazu.
2. Die Auswertung vereinfacht sich, wenn man kariertes Papier verwendet. Um die gesamte Fläche des Reißbrettes belegen zu können, klebt man mehrere Bogen zusammen. Bei der Ausführung als Demonstrationsexperiment deckt man über das Kohlepapier weißes Papier, damit die Kugel besser beobachtet werden kann.
3. Man kann das Reißbrett auch schwarz bespannen und die Kugel mit Kreide einreiben.
4. Statt des Reißbrettes und der rollenden Kugel kann auch der im 11. Teil, im V 1.3.6. beschriebene Luftkissentisch mit Schwebekörper verwendet werden. Der Luftkissentisch wird nur wenig geneigt auf die Schreibfläche des Tageslichtschreibprojektors gelegt und der Schwebekörper leicht mit dem Finger angestoßen. Die Bahnkurve kann in der Projektion auf der Wandtafel mit Kreide nachgezeichnet werden.

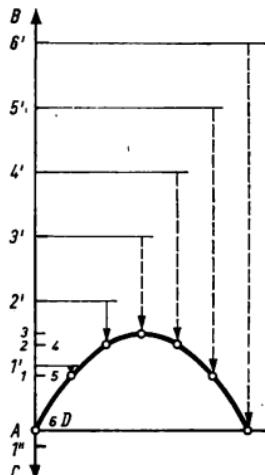


Abb. 4.4.3/4 Bahnkurve bei einem Einstellwinkel von  $90^\circ$ . Zur besseren Übersicht sind die Teilbewegungen getrennt neben die Bahnkurve gezeichnet.

#### 4.4.4. Der horizontale Wurf — Punktweise Aufnahme der Wurfkurve

1. Wurfgerät mit Zubehör
2. Brett (Länge etwa 1 m, Breite etwa 15 cm)
3. Meßstab
4. Schreibpapier, Kohlepapier, Klebstoff, Reißzwecken

##### Methodischer Hinweis

Als Vorversuch ist V 4.4.3. geeignet (vgl. MH Nr. 1, V 4.4.3.!). Dort gewinnt man die Erkenntnis, daß der gestoßene Körper zwei Bewegungen, eine gleichförmige geradlinige und eine gleichmäßig beschleunigte geradlinige, gleichzeitig vollführt. Nach dem Weg-Zeit-Gesetz dieser Bewegungen kann man die Koordinaten des Wurfkörpers für jeden beliebigen Zeitpunkt berechnen. Für die Wurfweite gilt die Gleichung

$$x = v_0 \cdot t$$

und für die Fallhöhe

$$y = \frac{g}{2} \cdot t^2.$$

Faßt man beide Gleichungen zusammen, dann kann man die Abhängigkeit der Wurfweite von der Fallhöhe erkennen:

$$x = v_0 \cdot \sqrt{\frac{2y}{g}}.$$

Löst man die Gleichung nach  $y$  auf,

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{v_0^2} \cdot x^2,$$

so zeigt diese Gleichung, wie die Fallhöhe  $y$  vom Abstand  $x$  des Wurfgeräts abhängt. Beide Beziehungen kann man mit den zwei Varianten des folgenden Experiments bestätigen.

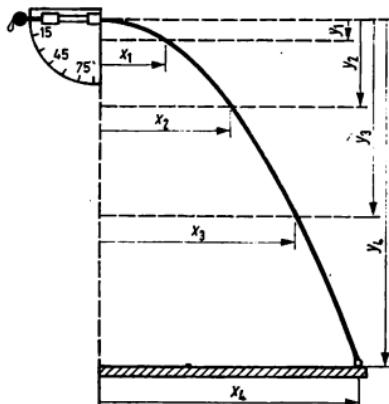


Abb. 4.4.4.1 Versuchsanordnung zur punktweisen Aufnahme der Wurfkurve (Nachweis, daß die Wurfweite eine Funktion der Fallhöhe ist). Die Stativen wurden nicht mitgezeichnet.

##### Variante a: Registrierung der Aufschläge auf einem waagerechten Brett

Den Versuchsaufbau zeigt die Abbildung 4.4.4.1. Das Wurfgerät wird etwa 90 cm hoch über der Tischplatte an einem Stativ befestigt und auf  $0^\circ$  gestellt. Das Brett bespannt man mit Schreibpapier und legt Kohlepapier darüber. Um die erforderlichen Längen zu erhalten, klebt man jeweils mehrere Bogen aneinander. Der Belag wird mit Reißnägeln befestigt. Es werden Wurfweiten in verschiedenen waagerechten Ebenen bestimmt. Dazu lagert man das Brett mit Hilfe zweier Stativen waagerecht in der Wurfrichtung derart, daß es mit einer Schmalseite an das Wurfgerät stößt. Das Wurfgerät wird bis zur ersten Kerbe gespannt, als Wurfkörper wird die Stahlkugel benutzt. Wenn sie nach dem Auslösen des Gerätes auf das Brett auftrifft, wird die Aufschlagstelle als schwarzer Fleck registriert.

Man bestimmt für verschiedene Fallhöhen  $y$  aus mindestens je 12 Würfen den Mittelwert der Wurfweite  $x$ . Wählt man Fallhöhen, die sich wie die Quadratzahlen verhalten, z. B. 5 cm, 20 cm, 45 cm und 80 cm, so nimmt die Wurfweite jedesmal um den gleichen Betrag zu. Die Auswertung kann grafisch erfolgen (Abb. 4.4.4./2).

*Variante b: Registrierung der Aufschläge auf einem lotrechten Brett*

Das Brett mit der Papierbespannung wird in vertikaler Lage an einem Stativ befestigt (Abb. 4.4.4./3). Man kennzeichnet zuerst die Höhe der Rohrmündung auf dem Papier. Von dieser Marke aus werden die Fallhöhen gemessen. Man registriert die Treffer in verschiedenen Entfernungen vom Wurfgerät. Dazu stellt man das Brett nacheinander im Abstand von 10 cm, 20 cm, 30 cm usw. auf und führt unter gleichen Bedingungen (gleiche Federspannung) jedesmal mindestens 12 Würfe aus. Danach entfernt man das Kohlepapier und misst die mittleren Fallhöhen nach. Es zeigt sich mit guter Annäherung, daß sich die Fallhöhen wie die Quadratzahlen verhalten. Die Auswertung kann auch grafisch erfolgen.

*Bemerkungen*

1. Wenn man in der Variante a die Höhe des Brettes verändert, muß man darauf achten, daß es dabei nicht seitlich verschoben wird, damit der Rand des Brettes stets genau lotrecht unter der Rohröffnung liegt. Seine horizontale Lage kann man überprüfen, indem man mit dem Maßstab die Höhen der Ecken über der Tischplatte vergleicht.
2. Beide Varianten eignen sich sehr gut als Praktikumsversuche. Als Schülerexperiment in gleicher Front eignet sich besonders die Variante a. Statt des Wurfgeräts benutzt man das Federstoßgerät des SEG „Mechanik“. Es wird in waagerechter Lage am Rand des Schülerischen festgeklemmt. Die Stativen, die das Experimentierbrett des SEG tragen, stehen auf dem Fußboden.

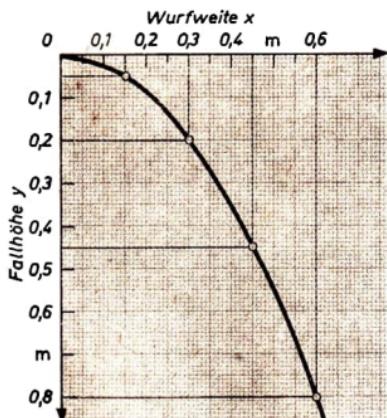


Abb. 4.4.4./2 Skizze zur grafischen Auswertung des Experiments

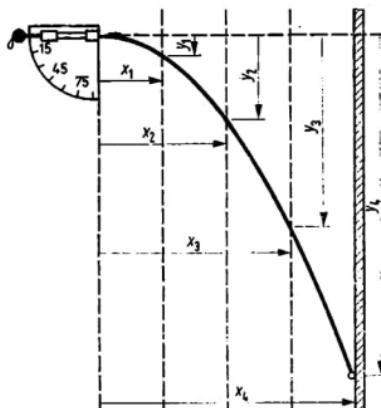


Abb. 4.4.4./3 Versuchsanordnung zum Nachweis, daß die Fallhöhe vom Abstand des Wurfgeräts abhängt. Die Stativen wurden nicht mitgezeichnet.

#### 4.4.5. Vergleich der Fallzeiten beim freien Fall und beim horizontalen Wurf

1. Brettchen (Länge etwa 20 cm, Breite etwa 10 cm)
2. 2 kleine Kugeln (Murmeln)
3. Pappe, Nägel, leichte Hammer

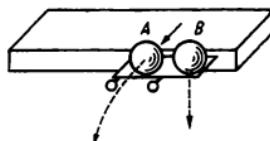


Abb. 4.4.5./1 Abwurfvorrichtung zum Vergleich der Fallzeiten

##### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment kann entweder vor V 4.4.4. zur Problemstellung oder danach zur Bestätigung ausgeführt werden. Zur Wiederholung und Leistungskontrolle führt man es ohne Kommentar aus und fordert die Schüler auf, ihre Beobachtung zu beschreiben und zu erklären.

##### Versuch

Man schlägt zwei Nägel seitlich in ein Brettchen und klemmt es mit einer Kreuzmuffe an einem Stativ fest. Über die Nägel legt man einen Pappstreifen von etwa 3 cm  $\times$  8 cm und auf diesen die beiden Kugeln (Abb. 4.4.5./1). Führt man nun in waagerechter Richtung einen Schlag mit einem leichten Hammer gegen die Kugel A, so beschreibt sie die Bahn eines waagerecht geworfenen Körpers, während die Kugel B lotrecht herunterfällt.

Man kann das Experiment mit verschiedenen Abwurfhöhen wiederholen. Stets beobachtet man, daß beide Kugeln trotz der unterschiedlichen Wege gleichzeitig auf dem Experimentiertisch auftreffen.

##### Bemerkung

Um zu verhindern, daß die Kugeln von der Pappe herunterrollen, drückt man mit ihnen kleine Vertiefungen in die Pappe oder schneidet kleine runde Löcher ein.

#### 4.4.6. Der schräge Wurf — Abhängigkeit der Wurfweite vom Wurfwinkel [SE]

##### Zu Variante a

Geräte 1. bis 4. wie in V 4.4.4.

##### Zu Variante c

1. Glasrohr mit Schlauchansatz und Spitze ④
2. Rundholz (Ø 13 mm, Länge etwa 10 cm) mit Bohrung für das Glasrohr

##### Zu Variante b

Geräte 1. bis 5. wie in V 4.4.3.

3. Schlauch
4. Schraubquetschhahn
5. flache Wanne
6. Becherglas

##### Methodische Hinweise

1. Die Tatsache, daß unter einem Wurfwinkel von  $45^\circ$  bei einer vorgegebenen Energie im schrägen Wurf die größtmögliche Weite erzielt wird, ist besonders

im Leistungssport von Bedeutung. Sie spielt z. B. bei den Wurfdisziplinen (Kugelstoßen, Schlagballweitwurf, Speerwurf, Diskuswurf u. a. m.) und beim Weitsprung neben anderen Gesetzmäßigkeiten eine Rolle. Darauf sollte man hinweisen. Durch den Luftwiderstand und die Form der Sportgeräte bzw. durch die Körperhaltung ergeben sich Abweichungen, die hier nicht behandelt werden können.

2. In höheren Klassenstufen kann man die Gleichung für die Wurfweite

$$x_w = \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin 2\alpha$$

herleiten und mit diesem Experiment bestätigen.

Ergänzt man die Versuchsanordnung durch einen Vertikalmeßstab mit Schiebezeigern, kann man auch die Bestimmungsgleichung für die Wurfhöhe

$$y_h = \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin^2 \alpha$$

bestätigen. Als Anfangsgeschwindigkeiten  $v_0$  setzt man die in der Bedienungsanleitung zum Wurfgerät angegebenen Werte ein:

1. Stufe	$1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	2. Stufe	$2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
3. Stufe	$3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	4. Stufe	$4,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3. Die Variante b ist besonders für Schülerexperimente geeignet. Bei dieser Variante wird zwar kein Wurf ausgeführt, die von der Kugel erreichte Weite ist jedoch in der gleichen Weise vom Einstellwinkel abhängig wie beim Wurf (vgl. MH Nr. 1 und Nr. 2, V 4.4.3.).

4. In der Variante c zerfällt der Strahl im abfallenden Ast in einzelne Tropfen, so daß exakte Messungen nicht möglich sind. Außerdem erkennt man bei diesem Experiment, daß die Wurfkurve besonders im abfallenden Ast von der Parabelform abweicht und daß eine *ballistische Kurve* entsteht. Das kann man auf folgende Weise eindrucksvoll zeigen: Man konstruiert an der Wandtafel eine Wurfparabel, die in ihren Ausmaßen etwa der Wurfkurve des Wasserstrahls entspricht. Dann nähert man das Strahlrohr der Tafel für einige Augenblicke so, daß der Wasserstrahl in der Richtung der Parabel an der Tafel entlangstreicht. Der Strahl zeichnet eine Wurfkurve auf, die im abfallenden Ast von der Parabel abweicht.

#### Variante a: Benutzung des Wurfgerätes

Die Versuchsanordnung zeigt Abbildung 4.4.6./1. Das Brett wird wie in V 4.4.4. mit Schreibpapier und Kohlepapier bespannt. Man lagert es waagerecht in der Höhe der Rohröffnung des Wurfgerätes.

Nacheinander stellt man Wurfwinkel von  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  und  $75^\circ$  ein und führt bei jeder Einstellung etwa 10 Würfe aus. In der Nähe der Einschläge notiert man auf dem Papier jeweils den zugehörigen Wurfwinkel. Das Trefferbild zeigt, daß komplementäre Winkel etwa gleiche Wurfweiten ergeben. Die größte Weite erzielt man bei  $45^\circ$ .

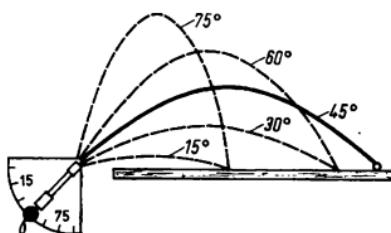


Abb. 4.4.6./1 Anordnung zur Untersuchung des schrägen Wurfes mit einem Wurfgerät. Die Stative wurden nicht mitgezeichnet.

*Variante b: Benutzung des Federstoßgerätes*

Die Versuchsanordnung ähnelt der in V 4.4.3. Das Federstoßgerät befestigt man an der linken unteren Ecke des Reißbrettes (Abb. 4.4.6./2). Man stellt die gleichen Wurfwinkel ein wie in der Variante a und führt bei jeder Einstellung mehrere Würfe aus. Die aufgezeichneten Bahnkurven vermitteln die gleiche Erkenntnis wie das Trefferbild der Variante a.

*Variante c: Benutzung eines Wasserstrahls*

Das Strahlrohr und seine Halterung können mit geringer Mühe selbst hergestellt werden. Man schließt das Rohr über einen Schlauch an die Wasserleitung an. Mit einem Schraubquetschhahn regelt man die Wasserzufuhr. Das Wasser wird in einer flachen Wanne aufgefangen. Um nachweisen zu können, daß die Wurfweiten bei komplementären Winkeln gleich sind, stellt man in die Wanne ein Becherglas, mit dem man das Wasser auffängt. Die Drehachse des Strahlrohrs und die Öffnung des Becherglases sollen in einer gemeinsamen waagerechten Ebene liegen (Abb. 4.4.6./3).



Abb. 4.4.6./2 Versuchsanordnung mit einem Federstoßgerät

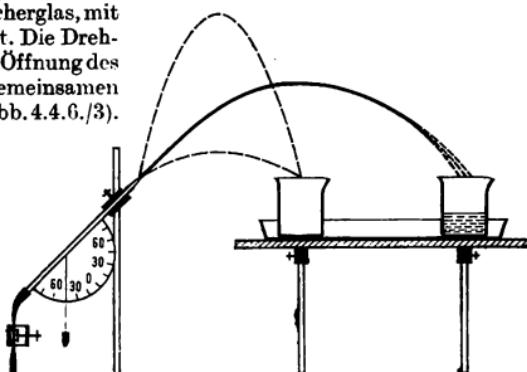


Abb. 4.4.6./3 Untersuchung des schrägen Wurfes mit einem Wasserstrahl

*Bemerkungen*

1. Damit in der Variante a die Treffer der Steilwürfe von denen der Flachwürfe unterschieden werden können, dreht man nach dem Überschreiten des Winkels von  $45^\circ$  das Wurfgerät ein wenig nach der Seite. Die Trefferbilder der Komplementärwinkel liegen dann nebeneinander.
2. Man kann die Versuchsdurchführung der Variante a vereinfachen, indem man auf das Brett mit der Papierbespannung verzichtet und statt dessen einen kleinen Pappkarton aufstellt, der den Wurfkörper auffängt. Der obere Rand des Kartons soll in der gleichen Höhe sein wie die Rohröffnung des Wurfgerätes. Zusammengehörige Flach- und Steilwürfe führt man unmittelbar nacheinander aus, ohne den Karton zu verschieben.
3. Zur Herstellung des Stahlrohres siehe 3/4/5 Teil, MB 1.0.7.! Die Öffnung der Spitze sollte nur einen Durchmesser von 1 mm bis 2 mm haben. Zur Ermittlung des Einstellwinkels kann man einen Winkelmaß und ein kleines Lot mit Alleskleber am Strahlrohr befestigen (Abb. 4.4.6./3). Man legt ein Stück Gummi herum und spannt das Strahlrohr in eine Drehklemme.



#### 4.4.7. Veranschaulichung von Wurfbahnen mit einem Wurfbahnmodell

1. Wurfbahnmodell ⑧,  
dazu erforderliches Material:  
a) Holzleiste (Länge etwa 1,5 m)  
b) Glas- oder Keramikperlen oder Schraubenmuttern  
c) Faden

##### *Methodischer Hinweis*

Das Modell veranschaulicht die Entstehung einer Wurfbahn durch Zusammensetzung einer gleichförmigen geradlinigen mit einer gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung. Das Modell kann das Experiment nicht ersetzen, es sollte deshalb in Verbindung mit einem Experiment (V 4.4.3., V 4.4.4., V 4.4.6.) eingesetzt werden.

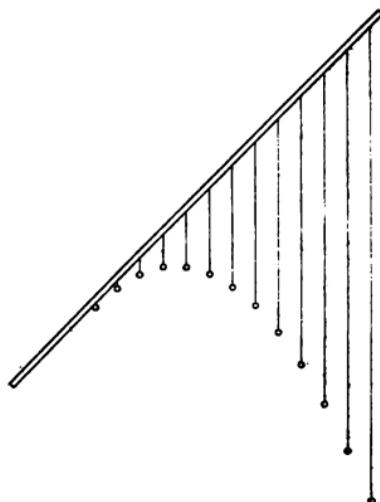


Abb. 4.4.7./1 Wurfbahnmodell

##### *Herstellung des Modells*

Man markiert auf der Leiste einen Nullpunkt durch einen Farbstrich und bohrt in Abständen von je 1 cm Löcher. In diesen befestigt man Fäden, die man am unteren Ende mit einer Glas- oder Keramikperle belastet. Die Längen der Fäden müssen sich wie die Quadrate der ganzen Zahlen verhalten. Den ersten Faden macht man 1 cm lang, den zweiten 4 cm usw.

##### *Einsatz des Modells*

Die Perlen befinden sich bei jeder Lage der Leiste auf einer Parabel (Abb. 4.4.7./1). Die Richtung der Leiste gibt die Richtung der gleichförmigen geradlinigen Bewegung an, der Abstand der Löcher die hierbei in den einzelnen Zeitabschnitten zurückgelegten Wegstrecken. Die Richtung der Fäden entspricht der Richtung der Fallbewegung, die Fadenlängen entsprechen den durchfallenen Gesamtwegen. Man kann mit dem Modell

- die Lage des Scheitels der Parabel bei verschiedenen Wurfwinkeln zeigen,
- veranschaulichen, daß bei gegebener Anfangsgeschwindigkeit die größte Wurfweite bei  $45^\circ$  erreicht wird und
- nachweisen, daß man näher gelegene Ziele sowohl durch einen Flachwurf wie auch durch einen Steilwurf erreichen kann.

##### *Bemerkung*

Geeignete Glas- oder Keramikperlen gibt es als Spielwaren zum Basteln von Perlenketten.

### 4.4.8. Der lotrechte Wurf nach oben [SE]

1. Wurfgerät mit Stahlkugel
2. Polydigit
3. Haltemagnet
4. mechanischer Schalter
5. Zielplatte
6. Meßstab

#### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment sollte erst ausgeführt werden, wenn den Schülern bekannt ist, daß der lotrechte Wurf eine Zusammensetzung einer gleichförmigen geradlinigen Bewegung nach oben und des freien Falles ist. Sie sollten die dafür geltenden Gesetze

$$s = s_1 + s_2 = v_0 \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2,$$

$$v = v_1 + v_2 = v_0 - g \cdot t,$$

$$t_y = t_3 \quad (\text{Fallzeit} = \text{Steigzeit})$$

und  $v_B = v_0$  (Auftrittsgeschwindigkeit  
= Anfangsgeschwindigkeit)  
kennen und ihren Inhalt erfaßt haben.

2. In der Abiturstufe können die Gesetze des lotrechten Wurfes entweder aus dem Weg-Zeit-Gesetz durch Differenziation oder aus der konstanten Beschleunigung durch Integration hergeleitet werden.

Herleitung durch Differenziation:

$$s = f(t) = v_0 \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2$$

$$v = f'(t) = \frac{ds}{dt} = v_0 - g \cdot t$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -g.$$

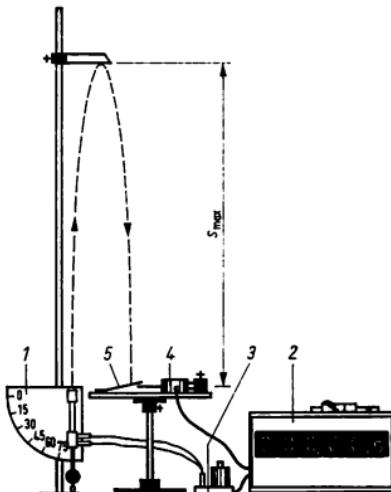


Abb. 4.4.8./1 Versuchsanordnung zum lotrechten Wurf nach oben

Das negative Vorzeichen der Fallbeschleunigung  $g$  gibt an, daß sie zur Wurfbewegung entgegengesetzt gerichtet ist.

Herleitung durch Integration:

$$a = -g$$

$$v = \int a \cdot dt = \int (-g) \cdot dt = -g \cdot t + c.$$

Die Integrationskonstante  $c$  ist die Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$ . Man kann folglich auch schreiben

$$v = -g \cdot t + v_0. \quad \text{Weiterhin gilt}$$

$$s = \int v \cdot dt = \int (-g \cdot t + v_0) \cdot dt = -\frac{g}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t + c.$$

In dieser Gleichung ist die Integrationskonstante der Anfangsweg  $s_0$ . Somit lautet das Ergebnis der Integration

$$s = -\frac{g}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0.$$

Aus dem Mathematikunterricht ist den Schülern außerdem bekannt, daß an den Extremstellen der Stammfunktion die Nullstellen der ersten Ableitung liegen. Auf das Weg-Zeit-Gesetz des lotrechten Wurfes bezogen bedeutet das, daß beim Erreichen der Maximalhöhe die Geschwindigkeit Null ist. Man erhält demzufolge als Extremwert der Funktion  $s = f(t)$  die Wurf- oder Gipfelhöhe:

$$0 = v_0 - g \cdot t_s$$

$$t_s = \frac{v_0}{g} \quad \text{und} \quad s_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}.$$

In diesen Gleichungen ist  $t_s$  die Steigzeit und  $s_{\max}$  die Gipfelhöhe.

3. Zu den auftretenden Energieumwandlungen vergleiche V 5.1.6.!
4. Das Wurfgerät ist mit einem elektrischen Kontakt ausgerüstet, der beim Abschuß der Kugel geöffnet wird. Dadurch ist es möglich, zur Bestimmung der Wurfdauer den Digitalzähler Polydigit einzusetzen.

### Versuch

Der Aufbau der Versuchsanordnung geht aus der Abbildung 4.4.8./1 hervor. Die Kontaktbuchsen des Wurfgerätes verbindet man durch zwei Verbindungsleiter mit dem Buchsenpaar am Haltemagnet. Den Torschalter befestigt man in einer Kreuzmuffe und legt ihn auf den Stelltisch. Die Auftreff-Fläche wird durch die Zielplatte, die in der Kerbe des Kipphabes am Torschalter liegt, vergrößert. Haltemagnet und Torschalter werden an die Buchse 3 des Polydigit angeschlossen. Das Polydigit wird eingeschaltet, auf Null gestellt und die Tasten „100 Hz“ und „Messen“ gedrückt. Diese Tasten bleiben während des gesamten Versuchsablaufs gedrückt. Das Wurfgerät wird ein wenig geneigt, so daß der Wurfkörper in der Höhe der Rohrmündung auf die Zielplatte auftrifft. In einem Vorversuch überprüft man, ob durch die auftreffende Stahlkugel der Kontakt des Torschalters geöffnet wird, und verringert gegebenenfalls durch Verdrehen der Schraube mit dem kleinen Magneten die Haltekraft des Schalters.

Im Versuch wird beim Auslösen des Wurfgeräts der Zähler gestartet und beim Auftreffen der Kugel auf die Zielplatte wieder gestoppt. Das Experiment wird mehrfach ausgeführt und der Gipelpunkt der Wurfbewegung mit einem Schiebezeiger markiert. Die Gipfelhöhe  $s_{\max}$  bestimmt man mit einem Maßstab.

Für die Fallzeit  $t_f$  gilt:

$$t_f = \frac{t_w}{2}.$$

$t_w$  ist hierbei der Mittelwert der im Experiment bestimmten Wurfdauer.

Setzt man in das Weg-Zeit-Gesetz des freien Falles für den Weg  $s$  die Gipfelhöhe  $s_{\max}$  ein, so kann man auch auf diese Weise die Fallzeit  $t_f$  bestimmen. Die beiden Werte müssen angenähert übereinstimmen.

Nach dem Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz des freien Falles kann man die Auftreffgeschwindigkeit  $v_E$  berechnen, wenn man für  $t$  die Fallzeit  $t_f$  einsetzt:

$$v_E = g \cdot t_f.$$

Schließlich kann man aus der Gleichung für die Gipfelhöhe

$$s_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}$$

die Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  berechnen:

$$v_0 = \sqrt{2g \cdot s_{\max}}.$$

Da beim lotrechten Wurf die Auftreffgeschwindigkeit  $v_E$  gleich der Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  ist, müssen auch diese beiden Werte angenähert gleich sein. Bei einem Experiment wurde gemessen:

$$s_{\max} = 0,95 \text{ m} \quad \text{und} \quad t_w = 0,89 \text{ s}.$$

Daraus folgt:

$$t_F = \frac{t_w}{2} = 0,45 \text{ s} \quad \text{und} \quad t_F = \sqrt{\frac{2 \cdot s_{\max}}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,95 \text{ m}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}} = 0,44 \text{ s}$$

bzw.

$$v_E = g \cdot t_F = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,45 \text{ s} = 4,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

und

$$v_E = \sqrt{2g \cdot s_{\max}} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,95 \text{ m}} = 4,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Für beide Größen ergaben sich Werte mit guter Übereinstimmung.

### Bemerkungen

1. Bei dieser Versuchsanordnung dürfen die Tasten „1,0 s“ und „0,1 s“ nicht betätigt werden, da sonst der Impulsbaustein zerstört wird.
2. Bei Schülerexperimenten wird die Wurfdauer mit einer Stoppuhr bestimmt.
3. Die experimentell bestimmten Werte für die Anfangsgeschwindigkeit sind im allgemeinen kleiner als die im Lehrmittelbeiblatt des Wurfgerätes angegebenen ( $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $4,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), weil ein Teil der Energie des Wurfkörpers durch den Luftwiderstand in Wärme umgewandelt wird.

## 4.5. Kraft und Bewegung

### 4.5.1. Herleitung des zweiten Newtonschen Gesetzes mit dem Schienenwagen[SE]

1. Schienenwagen mit Schienen und Schwellen
2. Schnur
3. Eisenstück (z. B. Kreuzmuffe aus Eisen)
4. Hakenkörper
5. Handelswägestück
6. Paketgummi
7. Demonstrationstachometer mit Zubehör
8. Polydigit
9. Haltemagnet
10. mechanischer Torschalter

*Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MB 4.0.6., MH Nr. 2, V 4.1.7. und MH Nr. 2 und Nr. 3, V 4.2.6.!
2. Mit diesem Experiment weist man nach, daß bei konstanter Masse  $m$  die Beschleunigung  $a$  der beschleunigenden Kraft  $F$  proportional ist. Die Masse ist als Quotient aus Kraft und Beschleunigung definiert.

Durch Umformen der Gleichung  $m = \frac{F}{a}$  erhält man das Grundgesetz der Mechanik

$$F = m \cdot a.$$

*Versuch*

Der Versuchsaufbau entspricht dem im V4.2.6. (Abb. 4.2.6./1). Statt des Metronoms wird zur Zeitmessung das Polydigit mit Haltemagnet und Torschalter benutzt. Um zu erreichen, daß der Bewegungsvorgang möglichst langsam abläuft, vergrößert man die Masse des Schienenwagens durch Handelswägestücke von etwa 2,5 kg Masse. Die Reibung kompensiert man durch Hakenkörper. Stößt man den Schienenwagen leicht an, so soll er gleichförmig bis an das Ende der Schienen rollen. Das Tachometer müßte dabei einen angenähert konstanten Geschwindigkeitsbetrag anzeigen.

Vergrößert man die Belastung am Ende der Schnur durch einen weiteren Hakenkörper von 10 g ( $F_G \approx 0,1 \text{ N}$ ), 20 g ( $F_G \approx 0,2 \text{ N}$ ) und schließlich 30 g ( $F_G \approx 0,3 \text{ N}$ ), so vollführt der Wagen nach dem Drücken der Taste „Messen“ eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Bestimmt man dabei die Zeit für eine vorgegebene Strecke von etwa 1,6 m, so kann man nach dem Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$$

die Beschleunigung berechnen. Es ist

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

Zur Kontrolle kann man auch die vom Tachometer angezeigte Momentangeschwindigkeit am Ende der Bewegung zur Berechnung der Beschleunigung benutzen. Dafür gilt die Gesetzmäßigkeit

$$a = \frac{v}{t}.$$

Dieser Wert ist jedoch nicht so genau wie der aus dem Weg-Zeit-Gesetz berechnete. Die Meßwerte stellt man in einer Tabelle zusammen.

*Tabelle zum Nachweis der Proportionalität von Beschleunigung und Kraft bei konstanter Masse*

Kraft $F$ in N	Zeit $t$ in s	Beschleunigung $a$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\frac{F}{a}$ in kg
0,1	10,38	0,0297	3,37
0,2	7,30	0,0600	3,33
0,3	6,00	0,0889	3,38

Die Gültigkeit des zweiten Newtonschen Gesetzes, die Proportionalität zwischen der Beschleunigung  $a$  und der Kraft  $F$

$$a \sim F$$

erkennt man an der letzten Spalte der Tabelle. Der Quotient der beiden Größen ist angenähert konstant.

#### ***Bemerkungen***

1. Zur Schaltung von Polydigit, Haltemagnet und Torschalter vergleiche V 4.3.5. Die Tasten „1,0 s“ und „0,1 s“ dürfen bei dieser Versuchsanordnung nicht betätigt werden, weil sonst der Impulsbaustein zerstört wird.
2. Das Experiment kann auch ohne Tachometer ausgeführt werden. Dadurch verringert sich die Reibung, und die Meßergebnisse werden genauer.

### **4.5.2. Herleitung des zweiten Newtonschen Gesetzes mit der Luftkissenbahn**

1. Luftkissenbahn ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
2. Schwebekörper ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
3. Stecker mit Haken ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
4. Streifenblende ⑧ (vgl. MB 4.0.2., Direkte Beschleunigungsmessung)
5. Stecker mit Eisenkugel ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
6. 2 Stecker
7. mehrere Metallstücke mit zentraler Bohrung (etwa 100 g) zur Belastung des Schwebekörpers ⑧
8. Staubsauger mit flexilem Schlauch
9. Polydigit
10. Lichtschrankenanordnung
11. Haltemagnet mit mechanischem Torschalter
12. Stromversorgungsgerät für Niederspannung
13. spitzengelagerte Rolle
14. dünner Faden (2 m)
15. Wägestücke mit Haken (1 g, 2 g, 2 g, 5 g) ⑧

#### ***Methodische Hinweise***

1. Vergleiche MH Nr. 2, V 4.5.1.
2. Da die Schüler das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten geradlinigen Bewegung kennen, ist es möglich und sinnvoll, ihnen mit wenigen Worten das Prinzip der direkten Beschleunigungsmessung zu erläutern (vgl. MB 4.0.2., Direkte Beschleunigungsmessung).

#### ***Versuchsaufbau***

Die Luftkissenbahn wird, wie in V 4.2.3. beschrieben, aufgestellt und mit Haltemagnet versehen, jedoch horizontal ausgerichtet. In den Schwebekörper wird auf der linken Seite der Stecker mit Stahlkugel, auf der rechten der Stecker mit Haken eingesteckt. In die mittlere obere Bohrung des Schwebekörpers steckt man die Streifenblende. Er wird in Ausgangsstellung gebracht und an dem Haken der Faden

befestigt. Am rechten Ende der Luftpissenbahn ist am vertikalen Stab die Rolle angebracht. Über diese Rolle wird der Faden gelegt und mit einem Wägestück von 2 g belastet. Man wählt die Lage der Rolle so, daß der Faden parallel zur Luftpissenbahn verläuft und das Wägestück an der Tischkante vorbei bis auf den Fußboden absinken kann.

Die Lichtschranke wird an einem Stativ befestigt, so daß sich die Streifenblende durch sie hindurchbewegen kann. Dabei soll der Abstand zwischen Blende und Geber so gering wie möglich sein. Die Öffnung des Gebers wird durch einen vertikalen Spalt von wenigen zehntel Millimetern Breite verkleinert. Er wird aus schwarzem Papier geschnitten und hinter die verstellbare Blende geklemmt. Das Stativ muß so stehen, daß sich die Blende bereits in der Lichtschranke befindet und sie somit nach Auslösung des Bewegungsvorganges fast vollständig durchdringt (Abb. 4.5.2./1).

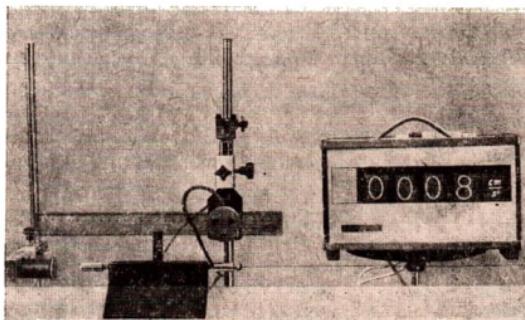


Abb. 4.5.2./1 Versuchsanordnung zur direkten Beschleunigungsmessung. Als Streifenblende dient ein Lineal mit Millimeterteilung.

Den Haltemagnet verbindet man mit dem Polydigit. Den freibleibenden zweipoligen Stecker steckt man in den mechanischen Torschalter, der außerhalb des Versuchsaufbaus ständig geschlossen bleibt. Die Lichtschranke wird an die Buchse ① des Schaltverstärkers angeschlossen, der Schaltverstärker an das Polydigit.

Am Polydigit wird eine Zeit von 1 s vorgewählt. Nach dem Einschalten schiebt man den Schwebekörper an den Haltemagnet heran.

### Versuch

Der Staubsauger wird eingeschaltet und damit das Luftpissen erzeugt. Danach drückt man die Taste „Messen“ am Polydigit. Nachdem sich die Streifenblende aus der Lichtschranke herausbewegt hat, wird der Staubsauger wieder ausgeschaltet. Dadurch kommt der Schwebekörper zum Stehen.

Das Polydigit zeigt die Beschleunigung in  $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$  an (vgl. MB 4.0.2., Direkte Beschleunigungsmessung).

Der Schwebekörper wird wieder an den Haltemagneten herangezogen. Nach erneutem Drücken auf die Taste „Messen“ und Drücken der Taste „Null“ ist die Versuchsanordnung wieder in Ausgangsposition. Jetzt wird die beschleunigende Kraft durch Anhängen eines doppelt so großen Wägestückes verdoppelt und das Experiment wiederholt usw. Tabelle 1 zeigt die Versuchsergebnisse.

*Tabelle 1: Beispiel für Versuchsergebnisse zum Newtonschen Grundgesetz*  
 $m = 240 \text{ g}$

$F$ in N	$a$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$	$\frac{F}{a}$ in $\text{N} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$
0,02	8,0	0,25
0,04	16,8	0,24
0,06	25,0	0,24
0,08	33,4	0,24
0,10	41,2	0,24

Sie belegen die Proportionalität zwischen Kraft und Beschleunigung

$$F \sim a.$$

Nachfolgend wird die Masse des Schwebekörpers durch Auflegen von Wägestücken verdoppelt. Durch Variieren der beschleunigenden Kraft gewinnt man in analoger Weise die in Tabelle 2 dargestellten Versuchsergebnisse.

*Tabelle 2: Beispiel einer Meßreihe*

$m = 480 \text{ g}$

$F$ in N	$a$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$	$\frac{F}{a}$ in $\text{N} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$
0,02	4,1	0,49
0,04	8,3	0,48
0,06	12,4	0,48
0,08	16,6	0,48
0,10	20,5	0,49

Dabei zeigt sich wiederum die Proportionalität zwischen Kraft und Beschleunigung. Der Quotient besitzt jedoch einen größeren Wert. Dieser charakterisiert die Eigenschaft des Schwebekörpers, der Bewegungsänderung einen Widerstand entgegenzusetzen. Der Vergleich mit der jeweiligen Masse des Schwebekörpers in den Tabellen 1 und 2 lässt die zahlenmäßige Übereinstimmung erkennen. Der Quotient aus Kraft und Beschleunigung ist die Masse des beschleunigten Körpers

$$m = \frac{F}{a}.$$

Damit ist auch das Grundgesetz der Mechanik  $F = m \cdot a$  bestätigt.

#### *Bemerkungen*

1. Die Ermittlung der Beschleunigung kann auch auf herkömmliche Weise durch Weg-Zeit-Messungen erfolgen (vgl. V 4.5.1.).
2. Zur Vergrößerung der Masse des Schwebekörpers können auch beliebige andere Wägestücke dienen, die z. B. paarweise an einem kurzen Faden befestigt und über den Schwebekörper gehängt werden. Ebenso können sie mit Klebeband an ihm befestigt werden.
3. Die Folie mit der Einheit der Beschleunigung „ $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ “ kann selbst hergestellt werden.

### 4.5.3. Herleitung des zweiten Newtonschen Gesetzes mit dem Reifenapparat [SE]

1. Reifenapparat mit Zubehör (ältere oder neue Ausführung)
2. Metronom oder Zentraluhr
3. Hakenkörper (10 g, 20 g, 50 g)

#### Methodische Hinweise

1. Der Reifenapparat ist sehr gut gelagert, so daß nur eine geringe Reibung auftritt. Bei guter Justierung wird die Gesamtreibung der Anordnung durch die am Fadenende angebrachte Schnurkarte ausgeglichen. Man kann dadurch die Beschleunigung nahezu beliebig klein wählen und erhält trotzdem sehr genaue Meßwerte, deren Auswertung zum zweiten Newtonschen Gesetz  $F \sim a$  führt.
2. Um die Unterrichtsstunde rationell zu gestalten, ist zu empfehlen, die Tabelle auf der Folie des Tageslichtschreibprojektors vorzubereiten. Die Schüler haben während der Ausführung des Experiments genügend Zeit, die Tabelle abzuziehen. Die Meßergebnisse werden im Verlauf des Experiments eingetragen und ausgewertet.
3. In der Abiturstufe kann das Experiment zur Bestätigung des Grundgesetzes der Drehbewegung

$$M = J \cdot \alpha$$

benutzt werden. Für die Trägheitsmomente sind folgende Werte zu erwarten:

für den Rotationszylinder  $0,00893 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,

für den kleinen Reifen

$(\varnothing 25 \text{ cm}, m = 0,6 \text{ kg}) \quad 0,00846 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,

für einen großen Reifen der älteren

Ausführung  $(\varnothing 50 \text{ cm}, m = 1,2 \text{ kg}) \quad 0,0750 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,

für zwei übereinander gelegte Reifen

dieser Ausführung  $0,1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ .

Außerdem kann die Drehstange in Verbindung mit den zylindrischen Wägestücken verwendet werden. Ihre Trägheitsmomente errechnen sich nach der Gleichung

$$J = m \cdot r^2.$$

4. Diese Versuchsanordnung kann in der Abiturstufe auch für den Praktikumsversuch zur Bestätigung des Grundgesetzes der Mechanik

$$F = m \cdot a$$

eingesetzt werden. Aus methodischen Gründen ergeben sich allerdings für die Herleitung dieses Gesetzes gewisse Bedenken, weil die ermittelte Konstante aus dem Quotienten von Kraft und Beschleunigung nicht der Masse identisch ist. Man sollte die Schüler darauf hinweisen, daß der Rotationszylinder oder der rotierende Reifen bei diesem Vorgang ebenso wirkt wie eine *Äquivalentmasse*. Es ist die Masse, die man direkt am Faden anbringen müßte, um die gleiche Trägheitswirkung zu erzielen wie mit dem Rotationszylinder oder dem Reifen. Bei der Verwendung der mittleren Stufe der Stufenrolle ( $r = 1 \text{ cm}$ ) ergeben sich folgende Äquivalentmassen:

für den Rotationszylinder  $89 \text{ kg}$ ,

für den kleinen Reifen  $86 \text{ kg}$ ,

für einen großen Reifen  $750 \text{ kg}$ ,

für zwei große Reifen  $1500 \text{ kg}$ .

### V 4.5.3.

#### Versuch

Der Apparat wird nach der Abbildung 4.2.2./1 aufgebaut und justiert (vgl. dazu V 4.1.4.). Zum Antrieb benutzt man zuerst einen Hakenkörper mit 20 g Masse. Ihm entspricht eine Antriebskraft von 0,196 N. Die Fadenmarke muß beim Start genau über der Nullmarke des Meßstabes stehen. Durch Aufstecken eines Markierungspfeils legt man auf dem Meßstab einen Weg von beispielsweise 0,8 m fest. Man stellt das Metronom auf Sekundenschlag bzw. die Zentraluhr auf akustische Impulse im Sekundenrhythmus ein und gibt die Bewegung bei einem Signal frei. Dabei beginnt man mit „Null“ zu zählen und bestimmt die Anzahl der Sekunden, bis die Fadenmarke das Ende der Meßstrecke passiert. Man wiederholt das Experiment mit Hakenkörpern von 30 g, 40 g und 50 g Masse.

Die Ergebnisse werden in einer Tabelle zusammengefaßt und ausgewertet. Die Beschleunigung errechnet man nach der Gleichung

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

Bei einem Experiment mit dem Rotationszylinder ergaben sich folgende Werte:

Hakenkörper		Weg	Zeit		Beschleunigung	
<i>m</i>	<i>F</i> G	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>t</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	$\frac{F}{a}$
in g	in N	in m	in s	in s <sup>2</sup>	in $\frac{m}{s^2}$	in $\frac{N \cdot s^2}{m}$
20	0,196	0,8	27	729	$2,19 \cdot 10^{-3}$	89,4
30	0,294	0,8	22	484	$3,31 \cdot 10^{-3}$	88,8
40	0,392	0,8	19	361	$4,43 \cdot 10^{-3}$	88,5
50	0,490	0,8	17	289	$5,54 \cdot 10^{-3}$	88,5

Man erkennt, daß der Quotient aus der Antriebskraft *F* und der Beschleunigung *a* konstant ist:

$$\frac{F}{a} = \text{konstant}.$$

Somit ist die Antriebskraft *F* der Beschleunigung *a* proportional

$$F \sim a.$$

Das zeigt auch die grafische Darstellung (Abb. 4.5.3./1).

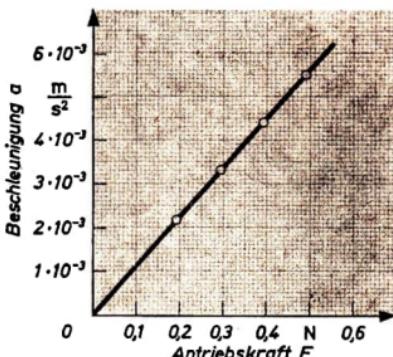


Abb. 4.5.3./1 Grafische Darstellung der Abhängigkeit der Beschleunigung von der Antriebskraft



### Bemerkungen

- Das Experiment sollte auch mit anderen Rotationskörpern wiederholt werden, um die Allgemeingültigkeit der Gesetzmäßigkeit nachzuweisen.
- Zur Zeitmessung kann auch das Polydigit benutzt werden, die Genauigkeit der Zeitmessung auf Hundertstelsekunden ist jedoch bei diesem Experiment nicht erforderlich.
- In der Abiturstufe kann die Auswertung weitergeführt werden, indem man nachweist, daß der Proportionalitätsfaktor

$$\frac{F}{a} = 89 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

einer Masse von 89 kg entspricht. Das ist die Äquivalentmasse, die man anstelle des Rotationszylinders am Faden anbringen müßte, um die gleiche Trägheitswirkung zu erzielen (vgl. MH Nr. 4).

Wiederholt man das Experiment mit einem anderen Rotationskörper, so erhält man als Proportionalitätsfaktor angenähert dessen Äquivalentmasse. Damit ist das Grundgesetz der Mechanik

$$F = m \cdot a$$

bestätigt.

### 4.5.4. Herleitung des Grundgesetzes der Mechanik mit einem gleichmäßig beschleunigt absinkenden Körper [SE]

- Feinrolle
- Wägesatz mit Hakenkörpern
- Polydigit
- Haltemagnet
- mechanischer Torschalter
- Meßstab
- Faden
- Filz- oder Schaumstoffmatte

### Methodische Hinweise

- Auf den Bewegungsablauf wirken sich nur die Reibung und das Trägheitsmoment der Feinrolle aus. Da dieser Einfluß verhältnismäßig gering und nahezu konstant ist, kann er recht gut kompensiert werden. Dadurch erhält man brauchbare Meßwerte. Der Versuchsaufbau ist übersichtlich und erfordert nur einen geringen Aufwand an Geräten.
- Zur Erklärung der Wirkungsweise der Versuchsanordnung muß man darauf hinweisen, daß sich die Gewichtskräfte der beiden gleich großen Körper an den Fadenenden aufheben und nur die Gewichtskraft des zusätzlich angehängten Hakenkörpers eine Beschleunigung bewirkt.
- Bei einer exakten Auswertung müßten auch die Trägheitskräfte (vgl. MH Nr. 1 und Nr. 3, V 4.5.5.) berücksichtigt werden, die in beschleunigten Systemen wirken. Bei den in diesem Experiment auftretenden kleinen Beschleunigungen können sie aber vernachlässigt werden.

4. Man kann im Unterricht Zeit sparen, wenn man die Tabelle auf einer Folie für den Lichtschreibprojektor vorbereitet. Man legt sie unter die Rollfolie des Projektors und trägt auf der letzteren nach jeder Messung die Meßwerte ein. Die vorbereitete Tabelle kann dann aufbewahrt und wieder verwendet werden.

*Vorbereitung des Versuchsaufbaus*

In einer Höhe von etwa 1 m über dem Experimentiertisch befestigt man an einem Stativ eine gut gelagerte Feinrolle (Abb. 4.5.4./1). Man legt einen schmiegsamen festen Faden über sie und knüpft an seine Enden Schlaufen, in die man die gleiche Anzahl Hakenkörper, z. B. je 500 g, einhängt. Erteilt man den rechten Hakenkörpern einen schwachen Impuls nach oben, dann verschieben sich beide Lasten, kommen aber infolge der Reibung in der Rolle nach kurzer Wegstrecke zur Ruhe. Zur Kompensation der Reibung belastet man das linke Fadenende zusätzlich mit kleinen Hakenkörpern, bis bei einem schwachen Impuls eine gleichförmige Bewegung ausgeführt wird, die Hakenkörper also mit gleichbleibender Geschwindigkeit langsam absinken. Bei dem hier beschriebenen Versuch war eine zusätzliche Masse von 15 g zur Kompensation der Reibung erforderlich.

Am unteren Ende des Stativs befestigt man den Haltemagnet und daneben, so daß er von den absinkenden Hakenkörpern getroffen wird, den Torschalter. Den Haltemagnet und den Torschalter schließt man mit den dazugehörigen Leitungen an das Polydigit an, schaltet es ein und drückt die Taste „100 Hz“. Der Haltemagnet hält die am rechten Fadenende befestigten Körper fest. Mit einem Meßstab bestimmt man schließlich die Länge der Meßstrecke  $s$  (Abb. 4.5.4./1). Sie soll etwa 0,8 m bis 1 m betragen.

*1. Versuchsserie: Abhängigkeit der Beschleunigung von der wirkenden Kraft*

Als Antriebskraft, die die Beschleunigung bewirkt, benutzt man die Gewichtskraft eines Hakenkörpers von 10g, das man gemeinsam mit dem Massensatz in die Fadenschlaufe einhakt. Es übt eine Kraft von 0,0981 N aus. Drückt man kurzzeitig auf die Taste „Messen“ des Polydigit, dann wird der Haltemagnet stromlos und gibt den Massensatz frei. Gleichzeitig wird damit auch die Zeitmessung in Gang gesetzt. Der am linken Fadenende befestigte Massensatz sinkt gleichmäßig beschleunigt ab, während sich der am rechten Ende befestigte nach oben bewegt. Sobald die absinkenden Körper den Torschalter berühren und abklappen, wird der Kontakt unterbrochen und das Zählgerät gestoppt. Das Polydigit zeigt die für den Bewegungsvorgang benötigte Zeit an.

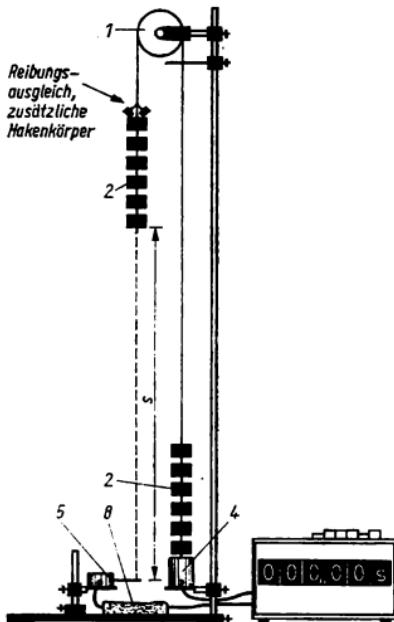


Abb. 4.5.4./1 Versuchsanordnung zur Herleitung des Grundgesetzes der Mechanik

Nach dem Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$$

kann man die beim Experiment auftretende Beschleunigung

$$a = \frac{2s}{t^2}$$

berechnen.

Man wiederholt das Experiment mit verschiedenen Antriebskräften und trägt die Werte für  $F$ ,  $s$ ,  $m$ ,  $t$  und  $a$  in eine Tabelle ein. Die Gesamtmasse  $m$  errechnet man als Summe aller an der Bewegung beteiligten Massen, die der aufsteigenden und absinkenden Hakenkörper, die Masse des Hakenkörpers, der zur Kompensation der Reibung dient, und die Masse des zusätzlichen Hakenkörpers.

Die durch den Wechsel des zusätzlichen Hakenkörpers bedingte Änderung der Gesamtsumme ist so gering, daß sie auf die Reibung keinen wesentlichen Einfluß hat.

Zusätzlicher Hakenkörper		Meßstrecke $s$	Masse $m$	Zeit $t$	Beschleunigung $a$	$\frac{F}{a}$
$m$ in g	$F$ in N	in m	in kg	in s	in $\frac{m}{s^2}$	in kg
10	0,098	0,8	1,025	4,12	0,094	1,04
20	0,196	0,8	1,035	2,90	0,180	1,03
30	0,294	0,8	1,045	2,38	0,282	1,04

Die Tabelle zeigt, daß der Quotient aus der Kraft  $F$  und der Beschleunigung  $a$  annähernd konstant ist,

$$\frac{F}{a} = \text{konstant}.$$

Daraus kann man schließen, daß die Beschleunigung bei konstanter Masse der beschleunigenden Kraft proportional ist (2. Newtonsches Gesetz),

$$a \sim F.$$

Die Masse  $m$  ist als Quotient aus der Kraft  $F$  und der Beschleunigung  $a$  definiert. Durch Umformen der Gleichung

$$m = \frac{F}{a}$$

erhält man das *Grundgesetz der Mechanik* in der Form

$$F = m \cdot a.$$

## 2. Versuchreihe: Bestätigung des Grundgesetzes der Mechanik

Man kann die Richtigkeit des Grundgesetzes bestätigen, indem man die beschleunigende Kraft konstant hält und von Messung zu Messung die Massen an den beiden Fadenenden verändert. Durch das Abnehmen von Hakenkörpern verändert

sich die Meßstrecke  $s$ . Man muß sie deshalb neu messen und bei der Berechnung der Beschleunigung  $a$  berücksichtigen.

Übersichtlicher aber wird die Auswertung, wenn man durch Heben oder Senken des Haltemagnets vor jedem Experiment die Meßstrecke auf den gleichen Wert einstellt.

Zusätzlicher Hakenkörper		Meßstrecke	Masse	Zeit	Beschleunigung	
$m$ in g	$F$ in N	$s$ in m	$m$ in kg	$t$ in s	$a$ in $\frac{m}{s^2}$	$m \cdot a$ in $\frac{kg \cdot m}{s^2}$
20	0,196	0,8	0,635	2,28	0,308	0,196
20	0,196	0,8	0,835	2,60	0,236	0,197
20	0,196	0,8	1,035	2,90	0,190	0,197

Die Tabelle zeigt, daß das Produkt aus Masse und Beschleunigung angenähert konstant ist und mit der beschleunigenden Kraft übereinstimmt.

#### Bemerkungen

1. Voraussetzung zum Gelingen des Versuchs ist eine gut gelagerte Feinrolle. Bevor man sie am Stativ anbringt, überzeugt man sich davon, daß sie nicht zu viel Spiel zwischen den Lagerspitzen hat oder zwischen diesen eingepreßt ist. Wenn erforderlich, stellt man die Lagerung neu ein und ölt das Lager.
2. Die Kompensation der Reibung muß besonders gewissenhaft vorgenommen werden. Da es schwierig ist zu entscheiden, ob sich die absinkenden Körper gleichförmig bewegen, kann zur Ermittlung der Reibungskraft auch folgende Methode empfohlen werden: Man hängt an den linken der beiden gleichen Körper einen Hakenkörper mit einer Masse von beispielsweise 40 g ( $F_G = 0,392$  N) und bestimmt die dadurch hervorgerufene Beschleunigung. Nach der Gleichung  $F = m \cdot a$  berechnet man daraus die wirksame beschleunigende Kraft. Der Differenzbetrag zur Gewichtskraft des Hakenkörpers ist dann die Reibungskraft.
3. Auch die Rolle ist an der Bewegung beteiligt und müßte in der Auswertung berücksichtigt werden. Das Trägheitsmoment der üblichen Feinrollen aus Aluminium oder Plast ist jedoch so klein, daß man es vernachlässigen kann. Bei größeren Rollen bestimmt man die Masse (ohne Schere) durch Wägung und setzt die Hälfte der ermittelten Größe als mit beschleunigte Masse ein.
4. Statt des zusätzlichen Hakenkörpers zur Erzeugung der beschleunigenden Kraft kann man die geschlitzten Scheiben des Zubehörs zum Reifenapparat älterer Ausführung verwenden. Man legt sie auf den Satz Körper.
5. Damit die absinkenden Hakenkörper nicht auf die Tischplatte aufprallen und dabei aushaken, legt man auf die Aufstreffstelle eine Filz- oder Schaumstoffmatte. Auch ein Viskose-Tafelschwamm ist dafür geeignet.
6. Bei diesem Experiment dürfen die Tasten „1,0 s“ und „0,1 s“ am Polydigit nicht betätigt werden, da sonst der Impulsausstein zerstört wird.
7. Wird der Versuch als Schülerexperiment ausgeführt, verwendet man eine einfache Stoppuhr. Der leichtere Körper wird dicht über der Tischplatte festgehalten und zum Start losgelassen, ohne ihm einen Kraftstoß zu erteilen.



## 4.5.5. Änderung der Gewichtskraft eines beschleunigt absinkenden oder aufsteigenden Körpers — Die Trägheitskraft

1. Feinrolle
2. 2 Kraftmesser (1 N)
3. 2 Hakenwägesätze oder Hakenwägestücke des SEG Mechanik
4. Faden

### *Methodische Hinweise*

1. In beschleunigten Bezugssystemen treten *Trägheitskräfte* auf, die der beschleunigenden Kraft entgegen wirken. Erfolgt die Beschleunigung in der Richtung der Gravitationskraft, dann verringert sich die Gewichtskraft des beschleunigten Körpers, erfolgt sie in der entgegengesetzten Richtung, dann vergrößert sie sich (D'Alembertsches Prinzip).
2. Die Gravitationskraft und die *Gewichtskraft* sind nicht identisch. Man sollte den Schülern klarmachen, daß auf der Erdoberfläche z. B. außer der Gravitationskraft auf einen Körper noch andere Kräfte einwirken können. So wird durch die Erdrotation eine Zentrifugalkraft hervorgerufen, und bei beschleunigten Bewegungen wirkt die oben beschriebene Trägheitskraft. Die Resultierende all dieser Kräfte ist die Gewichtskraft. Diese muß also weder in ihrem Betrag noch in ihrer Richtung mit der Gravitationskraft übereinstimmen.
3. Die quantitative Auswertung des Experiments erfordert relativ viel Zeit und ist deshalb für den Unterricht in der allgemeinbildenden Schule wenig geeignet, deshalb seien hier nur einige Hinweise dazu gegeben. Auch die Kraftmesser müssen bei diesem Experiment mit beschleunigt werden. Ihre Massen sind also in der Rechnung zu berücksichtigen. Bezeichnet man die Masse der aufsteigenden Körper mit  $m_1$ , die der absinkenden mit  $m_2$  und die Beschleunigung mit  $a$ , dann errechnet man die Gewichtskraft der aufsteigenden Körper nach der Gleichung

$$F_{G1} = m_1 \cdot (g + a)$$

und die der absinkenden Körper nach

$$F_{G2} = m_2 \cdot (g - a).$$

Die beschleunigende Kraft ergibt sich als Differenz der beiden Gewichtskräfte. Es gilt

$$F_{G2} - F_{G1} = (m_2 - m_1) \cdot g - (m_2 + m_1) \cdot a.$$

4. Das Experiment kann zur Erklärung der Änderung der Gewichtskraft der Kosmonauten beim Start und bei der Landung genutzt werden.

### *Vorversuch*

Man hängt einen Körper mit einer Masse von 50 g an einen Kraftmesser und beschleunigt ihn mit der Hand nach oben oder nach unten. Man beobachtet eine Zu- oder Abnahme der Gewichtskraft (Abb. 4.5.5./1).

### *Hauptversuch*

Die Versuchsanordnung ähnelt der im V 4.5.4. Auf die Einrichtung zur Messung der Zeit und auf den Ausgleich der Reibungskraft kann hier verzichtet werden. Die Hakenkörper von je 50 g Masse hängen an Kraftmessern (Abb. 4.5.5./2). Um

eine möglichst lange Laufstrecke für die Bewegung zur Verfügung zu haben, befestigt man die Rolle so am Stativ, daß die Hakenkörper an der Tischkante vorbei bis zum Fußboden gleiten können. Die Gewichtskraft eines zusätzlichen 20 g-Hakenkörpers ruft die Beschleunigung hervor.

Man hält zunächst die Rolle fest. Die Kraftmesser zeigen die Gewichtskräfte der angehängten Körper im Ruhezustand

$$F_{G1} = 0,5 \text{ N} \quad \text{und}$$

$$F_{G2} = 0,7 \text{ N} \quad \text{an (Abb. 4.5.5./2a).}$$

Gibt man die Rolle frei, dann sinkt der Körper mit der größeren Gewichtskraft ab, während der andere nach oben beschleunigt wird. Die Kraftmesser zeigen an, daß die Gewichtskraft des absinkenden Körpers um etwa 0,05 N kleiner und die des aufsteigenden Körpers um etwa 0,03 N größer geworden ist (Abb. 4.5.5./2b).

*Bemerkung*

Um zu verhindern, daß der absinkende Hakenkörper hart auf dem Fußboden aufstößt, empfiehlt es sich, den aufsteigenden Körper zusammen mit dem Kraftmesser dicht unter der Rolle mit der Hand abzufangen.

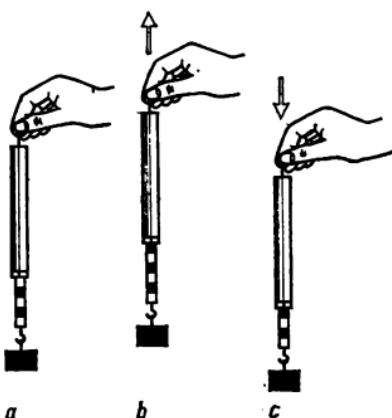


Abb. 4.5.5./1 Änderung der Gewichtskraft eines Körpers bei der Beschleunigung nach oben und nach unten:  
a) im Ruhezustand,  
b) bei Beschleunigung nach oben,  
c) bei Beschleunigung nach unten

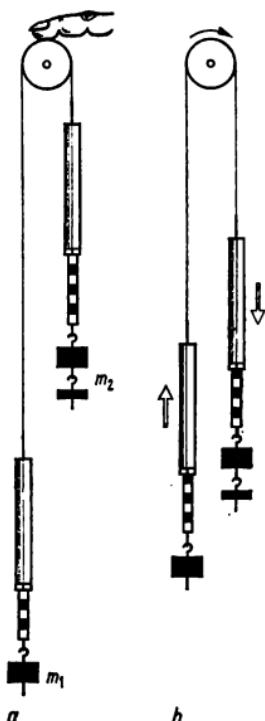


Abb. 4.5.5./2 Änderung der Gewichtskraft zweier Körper bei Beschleunigung: a) im Ruhezustand, b) bei beschleunigter Bewegung

## 4.5.6. Änderung der Gewichtskraft beim Kniebeugen und -strecken

### 1. Personenwaage

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MH Nr. 1 bis Nr. 3, V 4.5.5.!
2. Man kann das Ergebnis dieses Experiments auch vom Standpunkt eines ruhenden Beobachters aus interpretieren. Im Ruhezustand halten sich die Gewichtskraft und die Federkraft der Waage das Gleichgewicht. Damit z. B. eine Beschleunigung nach unten zustande kommen kann, muß auf den Körper eine nach unten gerichtete Kraft einwirken. Das ist beim Kniebeugen die Resultierende aus der Gewichtskraft und der nunmehr kleineren Federkraft der Waage.

#### *Versuch*

Steht man still auf der Waage, so zeigt sie die Gewichtskraft an. Geht man in die Kniebeuge, so zeigt die Waage, so lange die Bewegung anhält, eine deutliche Verminderung der Gewichtskraft an, die aufhört, wenn man in der Kniebeuge verharrt. Beim Wiederaufrichten ist eine Zunahme der Gewichtskraft zu beobachten. Je schneller man die Bewegungen ausführt, desto größer sind die Abweichungen von der Gewichtskraft im Ruhezustand.

## 4.5.7. Scheinbare Schwerelosigkeit gleichzeitig fallender Körper

1. Kleine Waagschale
2. 2 Metallscheiben (geschlitzte Scheiben eines Wägesatzes)
3. schmaler Streifen Seidenpapier, Faden
4. Filz- oder Schaumstoffmatte

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MH Nr. 1 und Nr. 2, V 4.5.5.!
2. Dieses Experiment kann zur Erklärung des sogenannten schwerelosen Zustandes in einem Raumschiff beim antrieblosen Flug, z. B. zwischen Mond und Erde, benutzt werden.

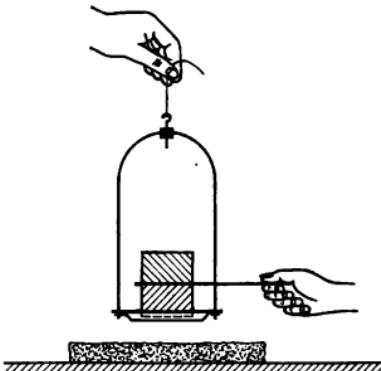


Abb. 4.5.7./1 Versuchsanordnung zum Nachweis der scheinbaren Schwerelosigkeit gleichzeitig fallender Körper

### *Versuch*

Auf eine kleine Waagschale legt man übereinander zwei Metallscheiben und zwischen sie das Ende eines schmalen Streifens aus Seidenpapier. Die Schale hält man an einem Faden mit der Hand (Abb. 4.5.7./1).

Will man den Papierstreifen nach der Seite wegziehen, dann wird entweder die Schale mit den Scheiben nach der Seite gezogen oder der Papierstreifen reißt. Läßt man den Faden los, so kann man während des Fallens der Körper den Streifen leicht zwischen ihnen herausziehen.

### *Bemerkungen*

1. Um den Aufprall der Schale mit den Metallscheiben zu mildern, legt man eine Filz- oder Schaumstoffmatte unter. Auch ein Viskose-Tafelschwamm kann dazu benutzt werden.
2. Besonders eindrucksvoll ist das Experiment, wenn man Körper mit möglichst großen Massen, z. B. halbe Mauerziegel, verwendet. An Stelle der Waagschale benutzt man dann eine Holz- oder Blechscheibe, die man an drei Fäden aufhängt.

## 4.6. Reibung

### 4.6.1. Reibungsarten (Vorversuch) [SE]

1. Holzklotz  
(etwa 4 cm  $\times$  9 cm  $\times$  12 cm) mit Haken
2. Kraftmesser (1N, 3N)
3. Glastäbchen oder Glasrörchen  
(einheitlicher Durchmesser)
4. Glasperlen oder Stahlkugeln  
(einheitlicher Durchmesser)
5. Glasplatte oder Plastplatte als Unterlage
6. Öl

### *Methodische Hinweise*

1. Bei diesem Experiment sollen möglichst anschaulich die Begriffe *Haftreibung*, *Gleitreibung*, *Rollreibung* und *Flüssigkeitsreibung* eingeführt werden. Gleichzeitig kann bereits eine grobe Einteilung nach der Wirksamkeit der einzelnen Arten bei sonst gleichen Bedingungen (Größe der Berührungsfläche, Normalkraft und Beschaffenheit der Flächen) vorgenommen werden.
2. Ein Beispiel für die Haftreibung ist das „Kleben“ des Zeigers bei Meßinstrumenten, z. B. beim Aneroidbarometer. Es wird durch leichtes Klopfen gegen das Glas überwunden.
3. Im Zusammenhang mit dem Experiment zur Rollreibung auf Glastäbchen kann man auf den Transport der Obelisken im frühlingsgeschichtlichen Ägypten, auf die Erfindung des Rades und auf die Anwendung in Wälzlagern (Walzenlager und Nadellager) hinweisen. Beim Experiment zur Rollreibung auf Glas- oder Stahlkugeln kann man die Anwendung in Kugellagern erwähnen.
4. Als Anwendung für Flüssigkeitsreibung kann das Ölen von Lagern und gleitenden Maschinenteilen genannt werden. Beim Rodeln und beim Schlittschuh-

laufen handelt es sich ebenfalls um Flüssigkeitsreibung; denn unter dem Druck der Kufen schmilzt das Eis auch bei Temperaturen unter 0 °C, und es entsteht ein dünner Wasserfilm.

5. Zur Reibungsverminderung durch ein Luftkissen vergleiche V 4.6.2.!

### 1. Teilversuch: Haftreibung

Man preßt den Holzklotz kräftig gegen die Unterlage, damit er sie möglichst mit der gesamten Grundfläche gut berührt. Dann zieht man behutsam in horizontaler Richtung mit dem Kraftmesser (3 N) und steigert die Kraft allmählich, bis sich der Klotz in Bewegung setzt (Abb. 4.6.1./1). Der maximale Betrag der Kraft, bei der der Klotz gerade noch in Ruhe verharrt, wird als maximaler Betrag der Haftreibungskraft notiert.

Abb. 4.6.1./1 Bestimmung des Betrages der Reibungskraft mit einem Kraftmesser



### 2. Teilversuch: Gleitreibung

Nachdem man die Haftreibung überwunden hat, zieht man den Klotz langsam mit konstanter Geschwindigkeit über die Unterlage. Der Kraftmesser zeigt den Betrag der Gleitreibungskraft an.

### 3. Teilversuch: Rollreibung

Man legt quer zur Bewegungsrichtung parallel zueinander eine Reihe von Glässtäbchen oder Glasröhrchen und legt den Holzklotz darauf. Der Betrag der Rollreibungskraft ist erheblich kleiner als die Beträge der Kräfte im 1. und 2. Teilversuch. Um zu demonstrieren, wie in frühgeschichtlichen Zeiten schwere Lasten transportiert wurden, nimmt man jeweils die hinter dem Holzquader frei gewor denen Stäbchen auf und legt sie vor den Klotz auf die Unterlage.

Verwendet man statt der Stäbchen Glas- oder Stahlkugeln, die man auf der Unterlage verteilt, dann kann man feststellen, daß der Betrag der Rollreibungskraft noch geringer ist.

### 4. Teilversuch: Flüssigkeitsreibung

Verteilt man auf die Unterlage einige Tropfen Öl, dann kann man feststellen, daß der Betrag der Reibungskraft auf dem Ölfilm bedeutend geringer ist als der Betrag der Gleitreibungskraft im 2. Teilversuch.

### Bemerkung

Damit bei allen Teilversuchen, von der Reibungsart abgesehen, die gleichen Bedingungen bestehen, benutzt man bei allen Teilversuchen dieselbe Fläche des Holzklotzes. Als Unterlage ist auch der Sprelacartbelag des Experimentiertisches geeignet.

#### 4.6.2. Verminderung der Reibung durch ein Luftkissen — Modell eines Luftkissenfahrzeugs

1. Modell eines Luftkissenfahrzeugs @, dazu erforderliches Material:
  - a) Plastdose (Bonbonschachtel) (Ø etwa 8 cm)
  - b) Plast- oder Gummischlauch (lichte Weite etwa 3 mm, Länge etwa 50 cm)
  - c) Zellglas-Klebestreifen
  - d) Alleskleber
2. Kraftmesser 3 N
3. Handelswägestück 200 g, 500 g
4. Faden

##### *Methodischer Hinweis*

Das Modell eines Luftkissenfahrzeugs ist besonders von technischer Bedeutung. Es erweckt das ungeteilte Interesse der Schüler und regt sie zum eigenen Experimentieren an. Man sollte nicht versäumen, die Bedeutung von Luftkissenfahrzeugen für unwegsames, sumpfiges Gelände und die Bedeutung von Luftkissenlagern für schwere rotierende Maschinenteile zu erwähnen.

##### *Herstellen des Modells*

In den Boden einer Plastdose bohrt man mit einem Bohrer von 1 mm Durchmesser regelmäßig verteilt etwa 15 bis 20 Löcher (Abb. 4.6.2./1). In eine Bohrung in der Seitenwand wird ein dünner weicher Plast- oder Gummischlauch eingepaßt. Das Loch sollte so knapp bemessen sein, daß der Schlauch möglichst dicht sitzt. Er wird mit einem geeigneten Alleskleber mit der Dose verklebt. Den Deckel der Dose verklebt man mit dem Unterteil am besten mit einem Zellglas-Klebestreifen. Die Verbindung muß luftdicht sein. Schließlich bindet man um die Mantelfläche der Dose einen Bindfaden, in den man einen Kraftmesser einhakt.

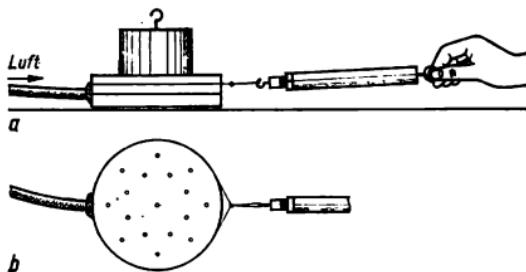


Abb. 4.6.2./1 Modell eines Luftkissenfahrzeugs:  
a) Seitenansicht,  
b) Ansicht von unten

##### *Versuch*

Man legt die Dose auf eine ebene glatte Unterlage, z. B. auf den Sprelacartbelag des Experimentierisches oder auf eine Glasplatte. Man belastet die Dose mit einem Wägestück von 200 g und versucht, sie mit dem Kraftmesser in Bewegung zu setzen. Man stellt im allgemeinen fest, daß eine relativ große Kraft dazu erforderlich ist.

Bläst man aber kräftig und beständig Luft durch den Schlauch in die Dose, dann genügt schon eine geringe Kraft zur Fortbewegung. Das ist auch bei einer Belastung mit einem Wägestück von 500 g noch der Fall.

**Bemerkung**

Man kann das Modell auch an den Preßluftschlauch eines Druckkessels anschließen. Damit aber die Dose nicht platzt, darf man das Ventil nur wenig öffnen.

### 4.6.3. Verminderung der Reibung durch ein Luftkissen

1. Luftkissenbahn ® (vgl. V 4.1.8.)
2. Schwebekörper ® (vgl. V 4.1.8.)
3. 2 Stecker mit Haken ® (vgl. V 4.1.8.)
4. Staubsauger mit flexiblem Schlauch
5. spitzengelagerte Rolle
6. dünner Faden (2 m)
7. Wägestücke mit Haken (1 g, 2 g ... 50 g) ®

**Methodische Hinweise**

1. Vergleiche MH V 4.6.2.!
2. Das Experiment demonstriert in überzeugender Weise die Wirkung des Luftkissens. Mit seinem Erzeugen sinkt die Reibung um viele Größenordnungen. Es läßt in überzeugender Weise die Vorzüge (Energieeinsparung, Verschleißminde rung) und Nachteile (Notwendigkeit der Erzeugung des Luftkissens, Gebundenheit an bestimmte Bahnen bzw. Flächen) im Hinblick auf technische Anwendungen erkennen.

**Versuchsaufbau**

Die Luftkissenbahn wird wie in V 4.1.8. beschrieben aufgestellt und horizontal ausgerichtet. Der Schwebekörper wird in der Nähe des linken Endes auf die Bahn gestellt. Auf beiden Seiten werden in die horizontalen Bohrungen die Stecker mit Haken eingesteckt. Am rechten Haken wird der Faden befestigt und über die am rechten Ende der Bahn angebrachte feste Rolle geführt. Bahn und Rolle werden so angeordnet, daß die an das Ende des Fadens angehängten Wägestücke beim Bewegen des Gleitkörpers an der Tischkante vorbei in Richtung Fußboden fallen (Abb. 4.6.3./1).

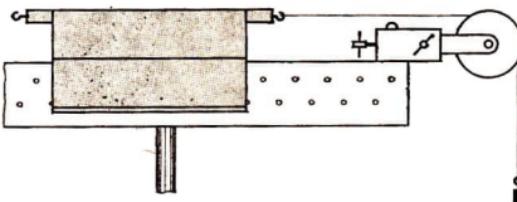


Abb. 4.6.3./1 Schwebekörper auf der Luftkissenbahn

#### 1. Versuch

Es wird die Gleitreibungskraft für den Schwebekörper ermittelt. Das geschieht durch aufeinanderfolgendes Anhängen von Wägestücken am Fadenende. Die Gleitreibungskraft ist in dem Falle gleich der Gewichtskraft der angehängten Wägestücke,

## V 4.6.3.

in dem ein leichtes Anstoßen des Schwebekörpers zu einer etwa gleichförmigen Bewegung längs der Bahn führt.

### 2. Versuch

Durch Anhängen eines Wägestücks von 1 g unterliegt der Schwebekörper einer Kraft von etwa 0,01 N. Nachfolgend wird der Staubsauger eingeschaltet. Der Schwebekörper bewegt sich beschleunigt längs der Luftkissenbahn. Die Reibung ist so gering, daß trotz der kleinen Kraft kein Einfluß auf den Bewegungsvorgang festzustellen ist.

### Bemerkung

Zur Durchführung des Experiments ist auch der im 1. Teil im V 1.3.6. beschriebene Luftkissentisch geeignet. Die Beobachtung der Bewegungsvorgänge erfolgt hierbei in der Projektion. Zur Bereitstellung der Kraft kann ein Federkraftmesser dienen.

## 4.6.4. Herleitung der Bestimmungsgleichung für den Betrag der Reibungskraft der Gleitreibung — Die Reibungszahl [SE]

1. Holzklotz mit Bohrungen und Ösen
2. Satz Hakenkörper
3. Kraftmesser
4. Reibungsflächen aus Plast und Metall

### Methodische Hinweise

1. Zur Unterscheidung der Reibungsarten sollten vor diesem Experiment V 4.6.1. und V 4.6.2. bzw. V 4.6.3. ausgeführt werden.
2. Die in diesem Experiment zur Bestimmung der Gleitreibungszahl beschriebenen Methoden können auch zur Ermittlung der Haftreibungszahl angewandt werden. In der Praxis ist aber die Reibungskraft der Gleitreibung meist von größerem Interesse.
3. Zur Erklärung der Reibung genügt es nicht, auf den Einfluß wahrnehmbarer Unebenheiten hinzuweisen. Man sollte auch die Deutung auf molekularer Grundlage (Verzahnungstheorie) vornehmen. Die molekulare Betrachtungsweise stellt die Verbindung her von der aufgewendeten mechanischen Energie zur Bewegungsenergie der Moleküle. Erst durch diese Deutung wird verständlich, daß durch Reibung Wärme entsteht.

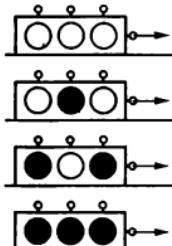


Abb. 4.6.4./1 Holzklotz zur Untersuchung der Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft vom Betrag der Normalkraft

**1. Teilversuch: Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft von der Normalkraft**

Zuerst bestimmt man mit dem Kraftmesser die Gewichtskraft des Holzklotzes. Da sie senkrecht zur Reibungsfläche wirkt, nennt man sie *Normalkraft*. Dann ermittelt man den Betrag der Reibungskraft für die Gleitreibung, indem man den Klotz langsam mit gleichbleibender Geschwindigkeit über die Tischfläche zieht. Man wiederholt die Messung mehrfach, nachdem man die Normalkraft vergrößert hat. Das wird dadurch erreicht, daß man in die Bohrungen des Klotzes Hakenkörper einsetzt (Abb. 4.6.4./1). Zusammengehörige Beträge der Normalkraft und die Reibungskraft werden in eine Tabelle eingetragen. Da die Werte stark streuen, kann man bei dieser Messung für einen Hakenkörper mit der Masse 100 g als Gewichtskraft 1 N einsetzen.

Masse <i>m</i> in g	Normalkraft <i>F<sub>N</sub></i> in N	Reibungskraft <i>F<sub>R</sub></i> in N	$\frac{F_R}{F_N}$
75	0,75	0,16	0,21
125	1,25	0,27	0,22
175	1,75	0,40	0,23
225	2,25	0,52	0,23

Die Tabelle zeigt, daß der Quotient aus den Beträgen der Reibungs- und der Normalkraft angenähert konstant ist.

$$\frac{F_R}{F_N} = \text{konstant}.$$

Aus weiteren Versuchen folgt, daß die Beträge von Reibungskraft und Normalkraft einander proportional sind:

$$F_R = \text{konstant} \cdot F_N \quad \text{oder} \\ F_R \sim F_N.$$

**2. Teilversuch: Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft von der Größe der Berührungsfläche**

Bei diesem Experiment hält man die Normalkraft konstant und verandert die Größe der Berührungsfläche, indem man den Klotz in verschiedenen Lagen benutzt (Abb. 4.6.4./2).

Man erkennt, daß der Betrag der Reibungskraft für alle Lagen des Klotzes gleich, also von der Größe der Berührungsfläche unabhängig ist.

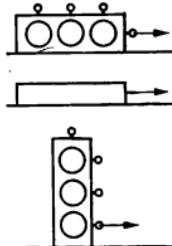


Abb. 4.6.4./2 Verschiedene Lagen des Holzklotzes zur Untersuchung der Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft von der Größe der Fläche

**3. Teilversuch: Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft von der Oberflächenbeschaffenheit**

Bei diesem Teilversuch hält man die Normalkraft und die Größe der Beruhrlungsflache konstant und verändert die Beschaffenheit der Beruhrlungsflache. Das erreicht man dadurch, daß man eine glatte, eine rauhe Plastplatte oder eine Blechplatte unter den Klotz legt und mitbewegt (Abb. 4.6.4./3). Die geringe Veränderung der Normalkraft durch die Gewichtskraft der Platten kann dabei vernachlässigt werden.

Beschaffenheit der Reibungsfläche	Normalkraft $F_N$ in N	Reibungskraft $F_R$ in N	$\frac{F_R}{F_N}$
Plast, glatt	1,75	0,27	0,15
Aluminium, glatt	1,75	0,38	0,22
Plast, rauh	1,75	0,45	0,26
Holz, gehobelt	1,75	0,25	0,14

Bei diesem Experiment ist der Quotient aus  $F_R$  und  $F_N$  nicht konstant. Sein Wert ist um so größer, je rauher die Beruhrlungsflache ist. Er hat damit den Charakter einer Materialkonstanten.

Er wird als *Reibungszahl*  $\mu$  bezeichnet.

$$\mu = \frac{F_R}{F_N}$$

Für den Betrag der Reibungskraft ergibt sich demnach die Gleichung

$$F_R = \mu \cdot F_N .$$

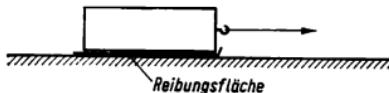


Abb. 4.6.4./3 Benutzung von Reibungsflächen mit verschiedener Oberflächenbeschaffenheit

**Bemerkungen**

- Der Holzklotz, die dazu passenden Hakenkörper und die Reibungsflächen können dem SEG Mechanik entnommen werden.
- Wenn im 2. Teilversuch die Werte für  $\frac{F_R}{F_N}$  stärker voneinander abweichen, dann ist das auf Unterschiede der Oberflächenbeschaffenheit zuruzufuhren (Langsfaser, Querfaser, Hirnholz).
- Beim 3. Teilversuch kann auch die Beschaffenheit der Unterlage verändert werden. Bei der Verwendung der SEG Mechanik nimmt man das Experimentierbrett als Unterlage. Es hat eine rauhe und eine glatte Fläche.

**4.6.5. Bestätigung der Proportionalität der Beträge der Reibungskraft und der Normalkraft [SE]**

- Mehrere gleichartige Holzklotze (z. B. aus dem SEG Mechanik)
- Kraftmesser
- Faden

### Methodischer Hinweis

Der Versuch ist besonders als Schülerexperiment geeignet, wenn V 4.6.4. als Demonstrationsexperiment vorgeführt wurde. Wegen seiner Übersichtlichkeit ist er aber auch als Demonstrationsexperiment geeignet. Wenn man ihn entsprechend dem 3. Teilversuch von V 4.6.4. ergänzt, kann man mit ihm auch die Gleichung für den Betrag der Reibungskraft herleiten.

#### 1. Teilversuch: Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft von der Normalkraft

Man bestimmt den Betrag der Reibungskraft für Gleitreibung, indem man einen Holzklotz mit gleichbleibender Geschwindigkeit mit einem Kraftmesser über die Tischplatte zieht. Wiederholt man das Experiment, nachdem man einen zweiten, einen dritten gleichartigen Klotz auf den ersten gelegt hat, dann stellt man fest, daß sich der Betrag der Reibungskraft verdoppelt bzw. verdreifacht (Abb. 4.6.5./1). Der Betrag der Reibungskraft ist also der Gewichtskraft bzw. der Normalkraft (Kraft, die senkrecht zur Berührungsfläche wirkt) proportional:

$$F_R \sim F_N.$$

#### 2. Teilversuch: Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft von der Größe der Berührungsfläche

Um die Berührungsfläche während des Experiments vergrößern zu können, legt man zuerst alle Klötze übereinander, nimmt bei jeder weiteren Messung je einen Klotz herunter und hängt ihn an, so daß er auf der Unterlage gleitet (Abb. 4.6.5./2). Man erkennt, daß der Betrag der Reibungskraft von der Größe der Berührungsfläche unabhängig ist.

### Bemerkung

Die Auswertung des 1. Teilversuchs kann so erfolgen wie in V 4.6.4. Sie sollte durch eine grafische Darstellung ergänzt werden.

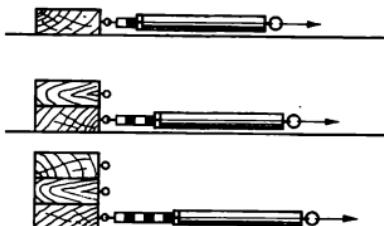


Abb. 4.6.5./1 Versuchsanordnung zur Untersuchung der Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft von der Normalkraft

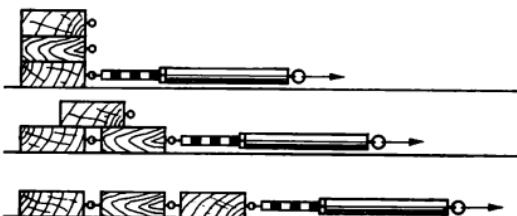


Abb. 4.6.5./2 Versuchsanordnung zur Untersuchung der Abhängigkeit des Betrages der Reibungskraft von der Größe der Berührungsfläche

#### 4.6.6. Haft- und Gleitreibung bei Gleitversuchen auf der geneigten Ebene [SE]

1. Experimentierbrett für die geneigte Ebene
2. Holzklotz mit Bohrungen
3. Hakenkörper
4. Meßstab

##### Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist besonders als Schülerexperiment geeignet. Trotz des geringen Aufwandes an Geräten — sogar auf die Messung der Kraft kann verzichtet werden — liefert das Experiment brauchbare Meßwerte.
2. Kann man sich bei der Herleitung der Gleichung zur Berechnung der Reibungszahl noch nicht auf die Kenntnis der Winkelfunktionen stützen, so muß die Herleitung nach der bekannten Methode unter Benutzung der Ähnlichkeit der beiden rechtwinkligen Dreiecke erfolgen.
3. Verwendet man die in V 4.6.4. beschriebenen Reibungsflächen, dann kann dieses Experiment auch zur Bestimmung der Reibungszahlen für verschiedene Stoffe und Beschaffenheiten der Reibungsflächen dienen.

##### 1. Teilversuch: Bestimmung der Reibungszahl für Haftreibung

Das obere Ende des Experimentierbretts wird mit einem Achszapfen an einem Stativ befestigt. Durch Heben des Achszapfens neigt man das Brett mit dem darauf ruhenden Holzklotz vorsichtig, Erschütterungen vermeidend, bis sich der Klotz gerade in Bewegung setzt. In dieser Lage klemmt man den Achszapfen am Stativ fest (Abb. 4.6.6./1). Der hierbei gemessene Neigungswinkel der geneigten Ebene heißt **Reibungswinkel**.

Ist  $F_G$  die Gewichtskraft des Gleitkörpers, dann ist die auf die geneigte Ebene ausgeübte Normalkraft

$$F_N = F_G \cdot \cos \alpha$$

und die Haftreibungskraft

$$F_H = \mu \cdot F_G \cdot \cos \alpha.$$

Die Hangabtriebskraft  $\vec{F}_H$ , deren Betrag im betrachteten Fall gleich dem der Reibungskraft  $\vec{F}_R$  sein muß, kann man nach der Gleichung

$$F_H = F_G \cdot \sin \alpha$$

berechnen. Folglich gilt auch

$$\mu \cdot F_G \cdot \cos \alpha = F_G \cdot \sin \alpha$$

oder  $\mu = \tan \alpha$ .

Die **Reibungszahl ist also gleich dem Tangens des Reibungswinkels**. Für den Tangens des Reibungswinkels kann man das Verhältnis der Höhe  $h$  zur Basis  $b$  der geneigten Ebene einsetzen und erhält für die Haftreibungszahl

$$\mu = \frac{h}{b}.$$

Die Gewichtskraft des Gleitkörpers ist in dieser Gleichung nicht enthalten. Durch Einsetzen eines Hakenkörpers in eine Bohrung des Holzklotzes kann man sich davon überzeugen, daß der Reibungswinkel und damit auch die Reibungszahl von

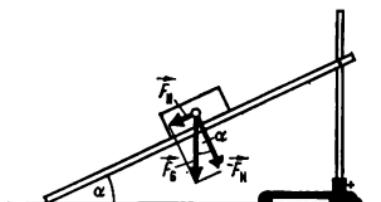


Abb. 4.6.6./1 Bestimmung der Reibungszahl durch Bestimmung des Reibungswinkels

der Gewichtskraft des Gleitkörpers unabhängig sind. Mit zunehmender Gewichtskraft nehmen Normalkraft und Hangabtriebskraft gleichermaßen zu.

### 2. Teilversuch: Bestimmung der Reibungszahl für Gleitreibung

Zur Bestimmung der Gleitreibungszahl verringert man den im ersten Teilversuch ermittelten Neigungswinkel der geneigten Ebene um einen geringen Betrag so weit, daß der Holzklotz, nachdem man ihn durch einen leichten Stoß in Bewegung gesetzt hat, langsam mit gleichbleibender Geschwindigkeit weitergleitet. Die Reibungszahl wird nach derselben Gleichung berechnet wie im 1. Teilversuch. Sie ist von der Größe der Reibungsfläche des Gleitkörpers unabhängig.

### 4.6.7. Haft- und Gleitreibung an einem geneigten Stab [SE]

1. Stativstab (Länge 50 cm)
2. Krampen aus Stahl, Kupfer, Aluminium, Glas
3. Meßstab oder Lineal mit Meßteilung

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1 und Nr. 2, V 4.6.6.!
2. Das Experiment gleicht im prinzipiellen Aufbau dem unter V 4.6.6. beschriebenen. Statt der geneigten Ebene wird hier ein geneigter Stab benutzt.

#### Versuch

Ein Ende eines Stativstabes wird mit einer Drehklemme an einem Stativ befestigt. Sein anderes Ende ruht auf dem Tisch (Abb. 4.6.7./1). Man hängt eine Krampe (Abb. 4.6.7./2) über den Stab und vergrößert seinen Neigungswinkel, bis die Haftreibung überwunden wird und die Krampe herabgleitet. Nach der Gleichung

$$\mu = \frac{h}{b}$$

kann man die Haftreibungszahl berechnen.

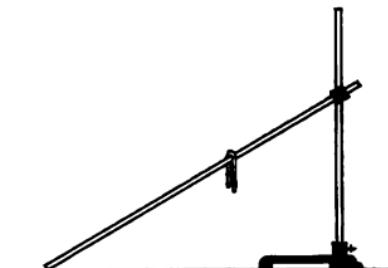


Abb. 4.6.7./1 Bestimmung der Reibungszahl an einem geneigten Stab



Abb. 4.6.7./2 Form der Krampen

Zur Bestimmung der Gleitreibungszahl lockert man die Befestigung des Stabes in der Klemme, so daß man ihn leicht um seine Längsachse drehen kann, ohne seine Neigung zu verändern. Wiederholt man das Experiment und dreht dabei den Stab, dann gleitet die Krampe schon bei einem kleineren Neigungswinkel herab. Man erkennt, daß die Gleitreibungskraft kleiner ist als die Haftreibungskraft. Die Gleitreibungszahl errechnet man nach derselben Gleichung wie die Haftreibungszahl. Man wiederholt das Experiment mit Krampen aus anderen Materialien.

#### ***Bemerkungen***

1. Krampen aus Stahl, Kupfer, Aluminium und Glas können dem SEG „Mechanik“ entnommen werden.
2. Weitere Varianten ergeben sich, wenn man statt des Stativstabes einen Holzstab, einen Glasstab oder ein Glasrohr verwendet. Die Krampen kann man durch Kreuzmuffen ersetzen.

### **4.6.8. Haftreibungszahl einer Kette**

1. Kette
2. Maßstab

#### ***Methodische Hinweise***

1. Wenn der Versuch auch keine exakten Messungen erlaubt, so ist er doch interessant, weil zu seiner Auswertung nur Längenmessungen erforderlich sind. Wenn man ihn zur Wiederholung oder zur Leistungskontrolle einsetzt, läßt man die Schüler die Zusammenhänge selbst finden und die Gleichung zur Berechnung der Reibungszahl selbst herleiten.
2. In oberen Klassen kann man eine Betrachtung des Gedankenexperiments von *S. Stevin* anschließen oder praktisch ausführen. Es kann auch zur Problemstellung für die Behandlung der geneigten Ebene eingesetzt werden.

Der Gedankenversuch hat folgenden Inhalt:

Eine Kette, deren Enden zusammengeknüpft sind, ist über ein Prisma gelegt (Abb. 4.6.8./1). Stevin fragte sich, was eintreten würde, wenn keine Reibung vorhanden wäre. Müßte dann nicht durch die Gewichtskraft des längeren Kettenstücks AB eine Bewegung zustande kommen? Bei der Bewegung würde aber in jedem Augenblick wieder der Anfangszustand hergestellt werden. Die Kette müßte dann dauernd in Bewegung bleiben und beschleunigt um das Prisma rotieren. Diese Folgerung erschien Stevin widersinnig. Obwohl ihm der Erhaltungssatz der Energie noch nicht bekannt war, kam er zu der Überzeugung, daß die Kette auch dann im Gleichgewicht sein müßte, wenn sie sich völlig reibunglos bewegen könnte. Da nun das frei herabhängende symmetrische Kettenstück ADC für sich im Gleichgewicht ist, kann das Gleichgewicht des Ganzen nicht gestört werden, wenn man sich den Teil ADC entfernt denkt. Dann halten sich aber die Gewichtskräfte der Kettenstücke AB und BC das Gleichgewicht. Damit ergibt sich, daß sich auf der geneigten Ebene im Falle des Gleichgewichtes die Kraft zur Last wie die Höhe zur Länge der geneigten Ebene verhalten muß.

**Versuch**

Eine Kette wird längs auf den Tisch gelegt, so daß ein Stück über die Tischkante hängt (Abb. 4.6.8./2). Bei einer bestimmten Länge dieses Stückes gleitet die Kette in beschleunigter Bewegung vom Tisch herab.

Das Experiment kann zur Bestimmung der Reibungszahl der Haftreibung ausgewertet werden. Bezeichnet man die Gewichtskraft des auf dem Tisch liegenden Kettenstückes mit  $F_1$ , dann ist die zum Einleiten des Gleitens zu überwindende Reibungskraft

$$F_R = \mu \cdot F_1.$$

Sie ist beim Einsetzen der Bewegung gleich der Gewichtskraft  $F_2$  des herabhängenden Teils der Kette; also ist

$$F_R = F_2$$

und deshalb

$$\mu = \frac{F_2}{F_1}.$$

$F_1$  und  $F_2$  verhalten sich wie die entsprechenden Längen  $l_1$  und  $l_2$  der Kettenstücke. Daraus folgt

$$\mu = \frac{l_2}{l_1}.$$

**Bemerkung**

Für das Experiment eignet sich jede beliebige Metallkette, z. B. auch eine gleichmäßig gegliederte Schmuckkette (Halskette). Auch Plastikketten, wie man sie beispielsweise zur Befestigung von Stöpseln in Waschbecken verwendet, können benutzt werden.

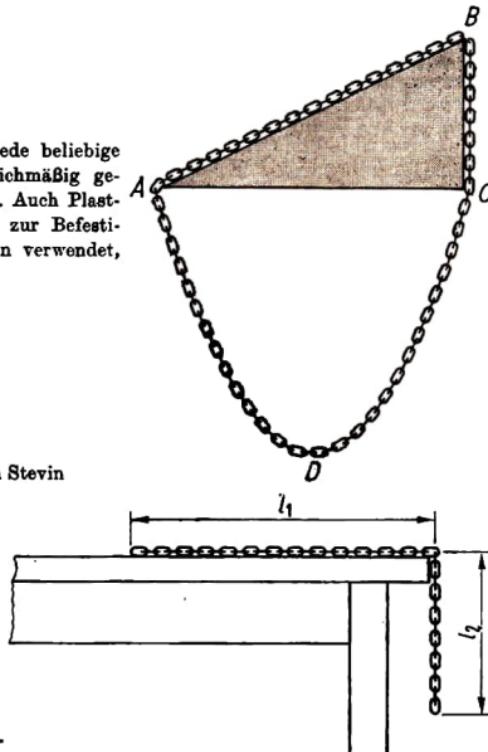


Abb. 4.6.8./1 Gedankenversuch von Stevin

Abb. 4.6.8./2 Bestimmung der Haftreibungszahl einer Kette

#### 4.6.9. Bestimmung der Reibungszahl aus dem Böschungswinkel (Schüttwinkel) eines Sandhaufens [SE]

##### Zu Variante a

1. Trockener Sand (Seesand)
2. Trichter
3. Millimeterpapier
4. Vertikalmeßstab

##### Zu Variante b

Gerät 1., außerdem

5. Gerät zur Bestimmung der Reibungszahl von Sand ⑧, dazu erforderliches Material:
  - a) kreisförmiges Brettchen ( $\varnothing$  etwa 15 cm)
  - b) dünnes Holzstäbchen (Länge etwa 15 cm)
  - c) Klebstoff
6. flache Schale
7. Schiebezeiger
8. Lineal oder Zeichendreieck mit Meßteilung

##### Methodische Hinweise

1. Bei diesem Experiment liegen dieselben Verhältnisse vor wie bei der Reibung auf der geneigten Ebene (vgl. V 4.6.6.). Zur Herleitung der Gleichung für die Reibungszahl kann auf die Beschreibung dieses Experiments verwiesen werden.
2. Der Böschungswinkel hat beispielsweise beim Aufschütt von Abraumhalden und beim Aufschütt eines Bahndamms Bedeutung.

##### Variante a

Man befestigt einen Trichter an einem Stativ und lässt aus ihm etwa auf die Mitte eines Bogens Millimeterpapier feinen, trockenen Sand auslaufen. Es bildet sich ein kegelförmiger Haufen, dessen Böschungswinkel  $\alpha$  unabhängig von der Höhe des

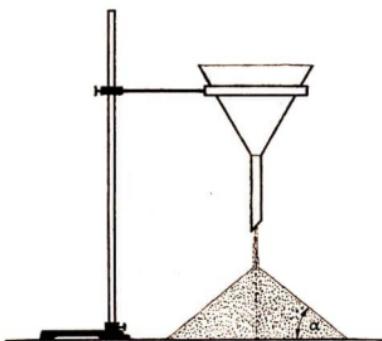


Abb. 4.6.9/1  
Böschungswinkel eines Sandhaufens

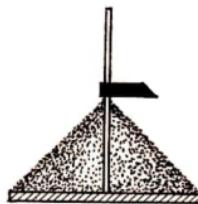


Abb. 4.6.9/2  
Sandkegel auf einer kreisförmigen Platte

Sandhaufens ist (Abb. 4.6.9./1). Mit einem Vertikalmeßstab bestimmt man die Höhe des Kegels, und auf dem Millimeterpapier liest man den Durchmesser seiner Bodenfläche ab. Da das Verhältnis der Höhe des Kegels zum Radius seiner Bodenfläche gleich dem Tangens des Böschungswinkels ist, kann man die Reibungszahl nach der Gleichung

$$\mu = \frac{h}{r}$$

errechnen.

#### Variante b

Man kann den Böschungswinkel in anschaulicher Weise mit einem kleinen Gerät bestimmen, das man mit geringer Mühe selbst herstellen kann. In eine kreisförmige Holz- oder Papp scheibe bohrt man in der Mitte ein Loch und befestigt darin ein Holzstäbchen. Dieses Gerät stellt man in eine flache Schale und überschüttet es mit feinem, trockenem Sand. Faßt man es am Stäbchen und hebt es hoch, so bleibt auf ihm ein Sandhaufen in Form eines Kegels zurück (Abb. 4.6.9./2). Um seine Höhe zu ermitteln, kennzeichnet man seine Spitze an dem Stäbchen mit einem Schiebezeiger. Die Reibungszahl ermittelt man wie in der Variante a.

#### Bemerkung

Zum Vergleich kann man das Experiment auch mit Kies oder anderen körnigen oder auch mit pulverförmigen Stoffen ausführen. Für trockenen Seesand kann man einen Böschungswinkel von etwa  $39^\circ$  erwarten. Daraus ergibt sich eine Haftreibungszahl von 0,8.

## 4.6.10. Haftreibung und Gleitreibung an einem waagerecht gelagerten Stab [SE]

### 1. Zeigestock, Meßstab oder anderer Stab

#### Methodischer Hinweis

Das Überraschungsmoment dieses Versuchs kann man nutzen, um das Interesse der Schüler für die physikalischen Ursachen des Vorganges zu wecken. Das Experiment eignet sich deshalb zur Einführung in das Stoffgebiet Reibung. Es ist aber auch zur Wiederholung und zur Leistungskontrolle geeignet. Die Schüler müssen dann nach Denkanstößen des Lehrers die Zusammenhänge selbst erkennen.

#### Versuch

Man legt einen Zeigestock waagerecht mit seinen Enden auf die ausgestreckten Zeigefingern und nähert die Finger einander allmählich. Dabei beobachtet man, daß diese nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd unter dem Stab gleiten und schließlich unter dessen Schwerpunkt zusammentreffen. Diese überraschende Erscheinung ist folgendermaßen zu erklären:

Der Zeigestock ist in der Nähe seiner Enden auf den beiden Zeigefingern gelagert. Auf die Finger drücken die parallelen Kräfte  $F_1$  und  $F_2$ , deren Summe gleich der Gewichtskraft  $F_G$  des Stabes ist, die man sich in seinem Schwerpunkt angreifend

#### ● V 4.6.10.

denken kann (Abb. 4.6.10./1). Die auf den Finger der linken Hand drückende Kraft  $F_1$  hat einen kleineren Betrag als die Kraft  $F_2$ . Deshalb ist auch die dort wirkende Haftreibungskraft kleiner als die auf den Finger der rechten Hand wirkende. So gleitet der linke Finger unter dem Stab auf die Mitte zu. Während der Bewegung wirkt an ihm Gleitreibung. Je näher der Finger dem Schwerpunkt kommt, desto größer wird der Anteil der Gewichtskraft  $F_G$ , der auf den Finger drückt. Damit wächst auch der Betrag der Gleitreibungskraft. Er erreicht schließlich den Wert des Betrages der Haftreibungskraft im rechten Auflagepunkt und übersteigt ihn. Dann wird dort die Haftreibung überwunden, und der rechte Finger gleitet unter dem Stab auf die Mitte zu. Dieser Wechsel wiederholt sich mehrmals, bis beide Finger unter dem Schwerpunkt des Stabes zusammentreffen.

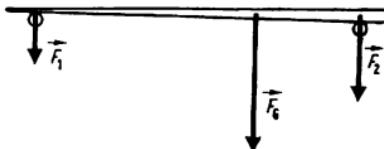


Abb. 4.6.10./1 Kräfte an den Auflagepunkten eines waagerecht gelagerten Stabes

## 5. Mechanische Energie, Impuls und Kraftstoß

### 5.0. Methodische Bemerkungen

5.0.1. Der Begriff der Arbeit und seine Definition als Produkt aus Kraft und Weg treten im Unterricht schon zeitig bei der Behandlung der kraftumformenden Einrichtungen auf. Die wichtigsten hierfür in Frage kommenden Experimente (V 3.5.1. bis V 3.5.8.) wurden beschrieben. Aufgabe einer weiterführenden Betrachtung ist es — zunächst in Beschränkung auf die Mechanik —, auch den Energiebegriff einzuführen.

*Mechanische Energie* wird als *Vermögen, mechanische Arbeit zu verrichten*, dargestellt. Man charakterisiert die Arbeit als *Vorgang*, als *Prozeßgröße*, und die Energie als *Zustand*, als *Erhaltungsgröße*.

Zum Begriff der potentiellen Energie gelangt man am einfachsten und anschaulichsten, wenn man von der Arbeit ausgeht, die man beim Hochheben eines Körpers auf ein höheres Niveau gegen die Schwerkraft verrichten muß. Die Betrachtung des umgekehrten Vorganges, des Herabfallens des gehobenen Körpers auf das Ausgangsniveau, führt zum Begriff der kinetischen Energie und zu der Erkenntnis, daß sich eine Form der Energie in eine andere umwandeln kann. Beim freien Fall läßt sich der Ausdruck für die kinetische Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

aus dem Ausdruck für die potentielle Energie

$$E_{\text{pot}} = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$$

mit Hilfe der Beziehung

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot h$$

herleiten. Bei einer beliebigen Bewegung erfordert die mathematische Umformung des Ausdrückes für  $E_{\text{pot}}$  in den mathematischen Ausdruck  $E_{\text{kin}}$  die Kenntnis der Anfangsgründe der Differential- und Integralrechnung; erst nach deren Einführung können demnach Energieumwandlungen bei beliebigen Bewegungen im Unterricht mathematisch behandelt werden.

Beim Einführen des Energiebegriffs muß der Physiklehrer von vornherein darauf bedacht sein, die universelle Bedeutung des Satzes von der Erhaltung der Energie deutlich zu machen. Es ist selbstverständlich, daß dieses Ziel nur schrittweise erreicht werden kann. Man wird dabei stets an besonders wirkungsvolle Experimente anknüpfen und sie, soweit es möglich ist, auch quantitativ auswerten.

Für die qualitativ-experimentelle Behandlung der Umwandelbarkeit potentieller Energie in kinetische und umgekehrt stehen eine Reihe einfach durchzuführender,

## 5.0.1.

leichtverständlicher Versuche zur Verfügung (vgl. V 5.1.1. bis V 5.1.3., V 5.1.6. und V 5.1.8.). Dagegen ist es schwieriger, den Satz von der Erhaltung der Energie experimentell unter Verwendung schulmäßiger Mittel quantitativ zu bestätigen. Die Einflüsse der Reibung, die man bei allen Versuchsanordnungen in Kauf nehmen muß, werden stets die abgegebene Energie gegenüber der zugeführten als zu klein erscheinen lassen. Trotzdem haben messende Versuche zum Erhaltungssatz ihren hohen didaktischen Wert, weil sie den Schülern zeigen, daß die Abweichungen des beobachteten vom berechneten Energiedurchgang um so geringer werden, je besser es gelingt, bei der Ausführung der Versuche die Reibung zu verringern. Man sollte den Schülern klarmachen, daß gerade die Tatsache, daß die von einer kraftumformenden Einrichtung abgegebene Energie stets kleiner ist als die zugeführte, ein Beweis für die Gültigkeit des Satzes von der Erhaltung der Energie ist, weil eben unvermeidlich ein Teil der mechanischen Energie durch die Reibung in Wärmeenergie umgewandelt wird. Diese Überlegungen führen dann zum Begriff des *Wirkungsgrades*.

Es ist deshalb zu empfehlen, die Energieumwandlungen hier nicht unter der Beschränkung auf rein mechanische Vorgänge zu behandeln. Erst dann kann man die physikalischen Zusammenhänge richtig erkennen, wenn man außer den mechanischen auch die thermischen Vorgänge betrachtet.

Bei zwei Experimenten dieses Abschnittes wird auch die Umwandlung von potentieller Energie in *kinetische Energie der Drehbewegung*, in *Rotationsenergie*, gezeigt.

**5.0.2.** In Verbindung mit dem Energieerhaltungssatz wird im Unterricht häufig auch der Impulserhaltungssatz behandelt. Der Umstand, daß es sich dabei ebenfalls um einen Erhaltungssatz handelt, darf bei den Schülern nicht die irrite An- sicht aufkommen lassen, als habe man es auch beim Impuls mit einer Energieart zu tun. Der Energieerhaltungssatz hat universellen Charakter für alle Gebiete der Physik. Der Satz von der Erhaltung des Impulses bezieht sich nur auf rein mechanische Vorgänge. In diesem Bereich allerdings gilt er uneingeschränkt und bildet die Grundlage für das Verständnis vieler Bewegungsvorgänge, insbesondere des Stoßes. Experimentell bietet die Behandlung des Impulses keine nennenswerten Schwierigkeiten, auch eine quantitative Darstellung ist mit schulischen Mitteln durchaus möglich.

Die Termini *Impuls*, *Kraftstoß* und *Bewegungsgröße* werden in der Fachliteratur nicht einheitlich benutzt, so daß es für einen Leser oft schwierig ist, sich zurechtzufinden. Der Begriff Impuls wird mit zwei verschiedenen Bedeutungen gebraucht. Ursprünglich verstand man darunter das Produkt aus Kraft und Zeitdifferenz  $F \cdot \Delta t$ . Auch in neuerer Literatur wird er noch mit dieser Bedeutung verwendet. Häufiger aber benutzt man ihn für das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit  $m \cdot v$ , das von Newton als Bewegungsgröße eingeführt worden war. In den folgenden Ausführungen werden diese Begriffe dem vorherrschenden Gebrauch entsprechend ange- wandt. Danach gilt:

Die vektorielle Größe *Impuls* ist als Produkt aus der Masse und der Geschwindigkeit definiert, wobei die Vektoren  $\vec{p}$  und  $\vec{v}$  die gleiche Richtung und gleichen Rich- tungsinn haben,

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}.$$

Die *Bewegungsgröße* ist der Betrag  $p$  des Impulses  $\vec{p}$ ,

$$p = m \cdot v.$$

Unter Änderung der Bewegungsgröße versteht man

$$\Delta p = m \cdot \Delta v.$$

Der Kraftstoß ist definiert als Produkt aus der konstanten Kraft  $\vec{F}$  und der kurzen Zeitdauer  $\Delta t$  des Stoßes,

$$\vec{S} = \vec{F} \cdot \Delta t.$$

Bei zeitlicher Änderung der Kraft gilt:

$$\vec{S} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot dt = \vec{p}_2 - \vec{p}_1.$$

Die Einheit des Impulses und der Bewegungsgröße ist  $\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und die Einheit des Kraftstoßes  $\text{N} \cdot \text{s}$ . Die Zahlenwerte beider Größen stimmen für ein abgeschlossenes System mit dem Anfangsimpuls Null überein. Man kann ihre Einheiten ineinander umwandeln

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

Impuls und Kraftstoß sind bei der Erörterung von Raumflugproblemen von Bedeutung (vgl. dazu auch Teil 3/4/5, V 5.4.1. bis V 5.4.3.).

## 5.1. Mechanische Energie

### 5.1.1. Umwandlung der kinetischen Energie einer rollenden Kugel in Verschiebungsarbeit [SE]

1. Fallrinne (etwa 2 m lang) mit kurzer Ablaufrinne ⑧
2. Holzkeil
3. Stahlkugel (Ø etwa 3 cm ... 4 cm)
4. Haltemagnet
5. Stromversorgungsgerät für Niederspannung SV 59/50
6. Holzklotz

#### Methodischer Hinweis

Das Experiment ist ein Vorversuch zur Einführung des Energiebegriffs. Man kann es zu einem quantitativen Experiment erweitern, wenn man nach V 4.6.4. oder V 4.6.5. die Gleitreibungszahl des Klotzes ermittelt und nach der Gleichung

$$W = F \cdot s$$

die von der Stahlkugel beim Verschieben des Klotzes verrichtete Arbeit berechnet. Als Kraft ist die Reibungskraft  $F_R$  einzusetzen:

$$W = \mu \cdot F_G \cdot s.$$

#### Versuch

Die Versuchsanordnung ist die gleiche wie bei V 4.1.2. (Abb. 5.1.1./1). Auf die waagerecht gelagerte Rinne wird ein Holzklotz gelegt, den die rollende Kugel nach dem Auftreffen vor sich her schiebt.

### ● V 5.1.1.

Die auf die Ablaufrinne gelegte Kugel besitzt potentielle Energie, die sich beim Herabrollen in kinetische Energie und beim Verschieben des Klotzes in Arbeit umwandelt.

Verändert man die Länge der Anlaufstrecke bei gleichbleibendem Neigungswinkel oder die Neigung der Ablaufrinne, dann ändert sich auch die kinetische Energie der Kugel und die Länge  $s$  der Verschiebungsstrecke.



Abb. 5.1.1./1 Umwandlung der kinetischen Energie einer rollenden Kugel in Verschiebungsarbeit

#### *Bemerkung*

Da bei diesem Experiment keine Zeitmessung erforderlich ist, braucht man zum Start keinen besonderen Schalter einzubauen. Man schaltet das Stromversorgungsgerät ab.

### 5.1.2. Energieumwandlung am Fadenpendel und am Federschwinger

1. Hakenkörper (50 g und 100 g)
2. 2 gleichartige Schraubenfedern
3. Faden

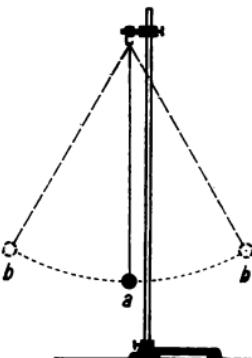


Abb. 5.1.2./1 Fadenpendel

#### *Methodische Hinweise*

1. Federschwinger und Fadenpendel sind die einfachsten Beispiele für die Energieumwandlung in einem schwingenden System. Die Energie des Systems setzt sich in jedem Augenblick zusammen aus potentieller und kinetischer Energie. Mit diesem Experiment soll den Schülern der Schwingungsvorgang, die ständige Umwandlung potentieller Energie in kinetische und umgekehrt sowie die Tatsache, daß zu jedem Zeitpunkt die Summe beider Energieformen konstant ist, erklärt werden. Von der Umwandlung kinetischer Energie in Wärmeenergie (Dämpfung) wird vorerst abgesehen.

2. Bei der dritten Versuchsanordnung, dem horizontalen Federschwinger, könnte die Meinung auftreten, daß hier das Fadenpendel und der Federschwinger miteinander verquickt werden. Wenn man den Faden möglichst lang wählt, werden die Federschwingungen praktisch nicht beeinflußt. Man kann sich leicht davon überzeugen, wenn man die Schwingungsdauer beider Systeme miteinander vergleicht.

### Versuch

An den drei schwingungsfähigen Systemen werden in einzelnen Phasen die Energieformen und ihre Umwandlung ineinander erläutert.

1. *Das Fadenpendel* (Abb. 5.1.2./1): Es wirkt nur die Schwerkraft. Die potentielle Energie ist durch die Höhenlage des Pendelkörpers und seine Gewichtskraft gegeben. Man berechnet sie nach der Gleichung

$$E_{\text{pot}} = G \cdot h = m \cdot g \cdot h.$$

Die kinetische Energie ist durch die Masse des Pendelkörpers und seine Geschwindigkeit bestimmt. Für sie gilt die Gleichung

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

2. *Der vertikale Federschwinger* (Abb. 5.1.2./2): Die wirkenden Kräfte sind die Schwerkraft und die Spannkraft der Feder.

Die potentielle Energie ist durch die Höhenlage des Pendelkörpers und die Verformung der Feder gegeben. In der Mittellage  $a$  heben sich die nach unten gerichtete Gewichtskraft des Pendelkörpers und die nach oben gerichtete Spannkraft der Feder gegenseitig auf. Die kinetische Energie ist wie beim Fadenpendel durch die Masse und die Geschwindigkeit bestimmt.

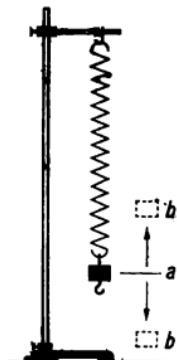


Abb. 5.1.2./2  
Vertikaler  
Federschwinger

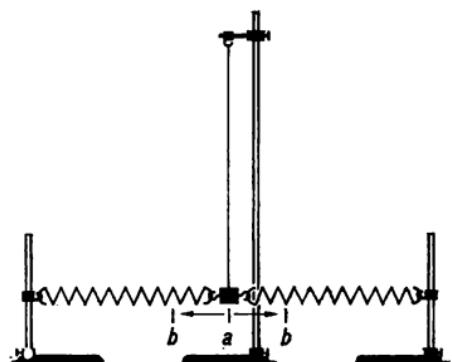


Abb. 5.1.2./3 Horizontaler Federschwinger. Zur Verdeutlichung sind die Ausschläge im Bild größer dargestellt, als sie bei der gezeichneten Fadenlänge sein würden.

## ● V 5.1.2.

3. *Der horizontale Federschwinger* (Abb. 5.1.2./3): Es wirken nur elastische Kräfte. Die potentielle Energie ist in den gespannten Federn gespeichert; die kinetische Energie ergibt sich auch hier aus Masse und Geschwindigkeit des Pendelkörpers. Das störende Durchhängen der Feder wird vermieden, indem man die schwingende Masse an einem möglichst langen Faden aufhängt.

Die Beträge jeder Energieform schwanken periodisch zwischen zwei Extremwerten. Es gehören zusammen:

Minimum an potentieller und Maximum an kinetischer Energie beim Durchgang durch die Ruhelage a, Maximum an potentieller und Minimum an kinetischer Energie in den Umkehrpunkten b.

### *Bemerkungen*

1. Beim horizontal schwingenden Federschwinger empfiehlt es sich, den Drahtkaken im Hakenkörper mit einem Holzkeil (Streichholz) festzuklemmen.
2. Die für dieses Experiment benötigten Schraubenfedern können dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.

## 5.1.3. Umwandlung potentieller Energie in kinetische an einer hüpfenden Stahlkugel [SE]

### *Zu Versuch 1*

1. Stahlkugel ( $\varnothing$  2 mm ... 5 mm)
2. Glaswürfel oder dicke Spiegelglasplatte
3. flache Wanne oder Deckel einer Schachtel
4. Pinzette
5. beiderseits offener Glaszylinder  
( $\varnothing$  etwa 5 cm, Höhe 30 cm ... 60 cm)
6. Bretttchen (10 cm  $\times$  10 cm  $\times$  1 cm)
7. Meßstab
8. schwarzes Papier, Federklammer oder Büroklammer
9. Bleischrot

### *Zu Versuch 2*

Geräte 1. bis 8., außerdem  
10. Stoppuhr

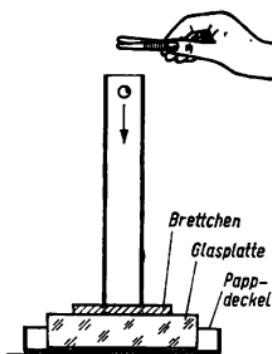


Abb. 5.1.3./1 Auf einem Glasblock hüpfende Stahlkugel

Abb. 5.1.3./2 Deformierung der Kugel und des Glasblockes



### *Methodische Hinweise*

1. Das Experiment überrascht durch die hohe Elastizität der Stahlkugel und der Glasplatte, die sich darin äußert, daß die Kugel bei sorgfältiger Ausführung des Experiments etwa 30 Sekunden bis 1 Minute lang hüpfte. Es ist deshalb sehr gut als Einführungsversuch zur Erarbeitung des Energiebegriffs, des Satzes von der Erhaltung der Energie u. a. m. geeignet.

2. Der Versuch 2 liefert in der beschriebenen Form nur angenäherte Werte für  $g$ . Er ist aber dennoch wertvoll für den Unterricht wegen des ihm zugrunde liegenden Prinzips der Messung kleiner Zeiten. Die geringe Dauer einer einzelnen Bewegung wird bestimmt aus der Gesamtdauer einer Reihe gleichartiger Bewegungen, die kurz aufeinander folgen.

#### *Versuchsanordnung*

Man sägt in ein Brettchen ein Loch, so daß der Glaszyylinder hineinpaßt (Abb. 5.1.3./1). Mit dem so gewonnenen Fuß stellt man ihn auf die waagerecht auf dem Tisch in einer flachen Wanne oder auf dem Deckel einer Schachtel liegende Glasplatte. Die Unterlage soll ein Fortrollen der beim Versuch verwendeten Stahlkugeln verhüten. Die Glasplatte muß mit ihrer Unterlage möglichst fest auf der Tischplatte aufliegen und darf nicht wackeln, da sonst die „Energieverluste“ beim Springen der Stahlkugel erheblich größer sind.

#### *Versuch 1*

a) Läßt man eine mit einer Pinzette gehaltene Stahlkugel innerhalb des Zylinders von der Höhe des oberen Randes aus auf die Glasplatte fallen, so springt sie fast bis zur Ausgangshöhe zurück. Der Vorgang wiederholt sich mehrfach, wobei die Sprunghöhen ständig abnehmen, bis die Kugel schließlich auf der Platte zur Ruhe kommt. Im Idealfall würde die Bewegung stets in derselben Vertikalen verlaufen, praktisch weicht die Kugel jedoch fast nach jeder Reflexion zur Seite ab. Der Glaszyylinder verhindert ein Herunterspringen der Kugel von der Glasplatte.

Der Versuch zeigt die wechselnden Umwandlungen zwischen potentieller und kinetischer Energie beim freien Fall und beim lotrechten Wurf nach oben. Aber auch beim Aufprall der Kugel auf die Glasplatte tritt die Umwandlung dieser beiden Energieformen ineinander auf. Die Kugel und die Fläche der Glasplatte werden deformiert (Abb. 5.1.3./2). Die kinetische Energie der Kugel führt zur elastischen Verformung. Im Stahl der Kugel und im Glas der Platte treten Spannungen auf wie in einer zusammengedrückten Schraubenfeder. Die kinetische Energie wandelt sich in potentielle um. Beim Entspannen wird die Kugel fast bis zur ursprünglichen Höhe zurückgeschleudert. Je größer die Masse der Glasplatte ist und je besser man sie lagert, desto geringer ist die Energieabgabe bei einer einzelnen Reflexion. In der Nähe der oberen Umkehrpunkte kann man die Bewegung der Kugel mit dem Auge verfolgen, da sich hier die Geschwindigkeit langsam ändert.

b) Aus dem Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Sprunghöhen kann man den Anteil der mechanischen Energie berechnen, der bei der Reflexion erhalten bleibt. Als Hilfsmittel für die Messung der Sprunghöhe stellt man eine Meßmarke her. Dazu schneidet man einen schmalen Streifen aus schwarzem Papier, legt ihn um den Zylinder und hält die Enden mit einer Federklammer zusammen. Diesen leicht verschiebbaren Ring bringt man zunächst dicht unter dem oberen Glasrohrende an und mißt mit einem Meßstab die Höhe seiner Oberkante über der Glasplatte. Mit der Pinzette hält man die Kugel in dieser Höhe und läßt sie fallen. Dann verschiebt man den Ring so, daß die Kugel bei waagerechter Blickrichtung gerade über seinem oberen Rand erscheint, wenn sie nach der Reflexion den Scheitelpunkt der Bewegung erreicht. Die beiden Höhen werden miteinander verglichen.

Bei einer Glasplatte von 20 mm Dicke wurden für eine Kugel von 5 mm Durchmesser zwei aufeinanderfolgende Sprunghöhen von 30,7 cm und 28,3 cm beobachtet. Somit bleiben bei der Reflexion 92% der mechanischen Energie erhalten.

c) Entsprechende Versuche mit Bleischrotkugeln zeigen, daß beim Aufschlagen keine merkliche Reflexion eintritt. Beim unelastischen Stoß gegen die Glasplatte wird die Bewegungsenergie der Kugel in Wärmeenergie umgewandelt.

### Versuch 2

Man kann das Experiment zu einer angenäherten Bestimmung der Fallbeschleunigung ausgestalten.

In der Abbildung 5.1.3./3 ist die jeweilige Höhe der Kugel in Abhängigkeit von der Zeit schematisch dargestellt. Die einzelnen Aufschläge sind in der Abbildung nummeriert; der erste Aufschlag hat die Ordnungszahl 0. Bei jedem einzelnen Sprung ist die Steigzeit nahezu gleich der Fallzeit. Von Sprung zu Sprung nehmen die Sprunghöhen nach einer Exponentialfunktion ab. Beschränkt man sich auf eine geringe Zahl von Sprüngen, so kann man näherungsweise lineare Abhängigkeit annehmen. Bezeichnet man die erste Fallhöhe  $h_a$  und die Steighöhe nach dem sechsten Aufschlag mit  $h_b$ , dann ist die mittlere Steighöhe

$$h_m = \frac{h_a + h_b}{2}.$$

Man wiederholt das Experiment und mißt mit einer Stoppuhr die Zeit  $t$ , die zwischen den Reflexionen 0 und 5 vergangen ist. In dieser Zeit steigt die Kugel fünfmal auf und fällt fünfmal herab; die mittlere Steig- bzw. Fallzeit ist daher  $t_m = \frac{t}{10}$ .

Die Dauer der Umkehrung des Impulses bei der Reflexion ist so gering, daß sie unberücksichtigt bleiben kann. Aus  $h_m$  und  $t_m$  ergibt sich als Mittelwert für die Fallbeschleunigung

$$g = \frac{2 \cdot h_m}{t_m^2}.$$

Man erhält dabei einen Wert, der in der Größenordnung von  $(9,8 \pm 0,3) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  liegt.

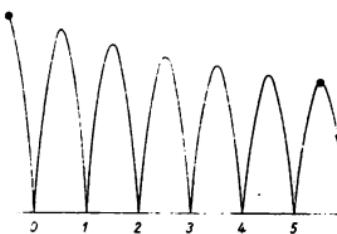


Abb. 5.1.3./3 Schematische Darstellung aufeinanderfolgender Sprünge

### Bemerkungen

- Der „Energieverlust“ bei den einzelnen Reflexionen wird besonders gering, wenn man eine möglichst dicke Glasplatte auf eine dicke Eisenplatte (Richtplatte) aufkittet.
- Statt der Glasplatte eignet sich auch ein Glaswürfel.



### 5.1.4. Wechselseitige Umwandlung von potentieller und kinetischer Energie auf einer Luftkissenbahn

1. Luftkissenbahn ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
2. Schwebekörper ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
3. Stecker mit Ringsfeder ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
4. Stecker mit Blende ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
5. Staubsauger mit flexiblem Schlauch
6. Vertikalmeßstab (1,5 m bzw. 2,0 m) mit Schiebezeigern

#### *Methodischer Hinweis*

Der Vorzug des Experiments besteht in dem sehr langsamen Bewegungsablauf, in dem großen Wirkungsgrad der Energieumwandlungen und in den geringen Reibungsverlusten.

#### *Versuch*

Die Aufstellung der Luftkissenbahn erfolgt wie in V 4.2.3. Über der Bahn wird horizontal der Meßstab angebracht. Am rechten Ende der Luftkissenbahn befestigt man am vertikal eingeschraubten Stativstab den Stecker mit Ringsfeder (Abb. 5.1.4./1). Der Schwebekörper, in dessen mittlere Bohrung der Stecker mit Blende eingesteckt wurde, wird an das obere linke Ende der Luftkissenbahn gebracht und der Staubsauger eingeschaltet.

Der Schwebekörper gleitet mit zunehmender Geschwindigkeit die Luftkissenbahn hinab. Dabei nimmt seine potentielle Energie ab, die kinetische Energie zu. Am unteren Ende wird er abgebremst, wobei seine kinetische Energie infolge der zunehmenden Verformung der Feder in potentielle Energie umgewandelt wird. Beim nachfolgenden Entspannen wird sie wieder in kinetische Energie des Schwebekörpers zurück verwandelt. Dadurch bewegt er sich die Bahn hinauf, wobei die kinetische Energie ab- und die potentielle zunimmt. Dieser Vorgang wiederholt sich viele Male.

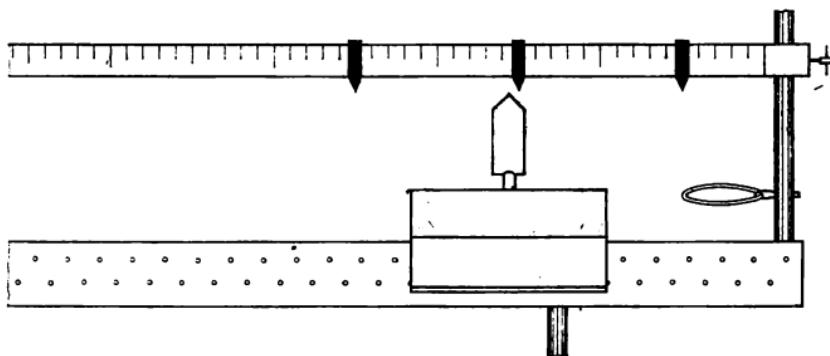


Abb. 5.1.4./1 Versuchsanordnung zur Luftkissenbahn

*Bemerkungen*

1. Die maximale Entfernung des Schwebekörpers von der Ringfeder ist seiner potentiellen Energie proportional. Aus zwei aufeinanderfolgend auftretenden maximalen Entfernungen läßt sich der Wirkungsgrad der Energieumwandlungen berechnen.
2. Anstelle der mechanischen Abfederung am Bahnende kann auch eine magnetische Verwendung finden. Dazu werden in den vertikal eingeschraubten Stativstab am rechten Ende der Bahn und in die rechte waagerechte Bohrung im Schwebekörper je ein Stecker mit keramischen Magneten (vgl. V 4.1.8.) eingesteckt.

**5.1.5. Umwandlung potentieller Energie in Rotationsenergie am Reifenapparat [SE]**

1. Reifenapparat mit Zubehör (ältere oder neue Ausführung)

*Methodische Hinweise*

1. Diese Versuchsbeschreibung bezieht sich auf die Benutzung der älteren Ausführung des Reifenapparats. Infolge des größeren Trägheitsmoments dieses Rotationskörpers ist seine Rotationsenergie erheblich größer als die der Rotationskörper der neuen Ausführung. Bei der Verwendung des neuen Reifenapparats ist die Beschreibung sinnvoll zu übertragen.

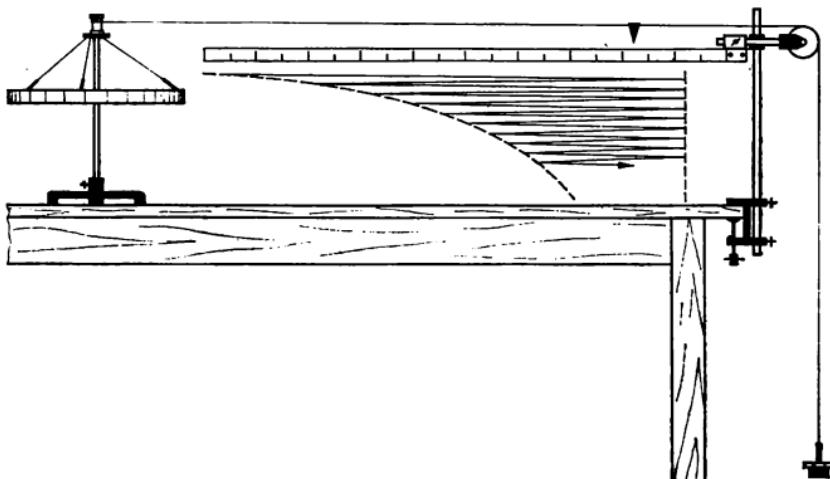


Abb. 5.1.5./1 Versuchsanordnung zur Beobachtung der Umwandlung potentieller Energie in Rotationsenergie am Reifenapparat. Unter dem Maßstab ist der Weg des Papierzeigers eingezeichnet. (Zur Verwendung des neuen Reifenapparats vergleiche Abb. 4.2.2./1.)

2. Auch bei diesem Experiment wandelt sich wie in den vorangehenden eine Form mechanischer Energie in eine andere um. Es handelt sich hier um die potentielle Energie des gehobenen Körpers und die kinetische Energie der Rotation, die Rotationsenergie des Reifens,

$$E_{\text{rot}} = \frac{J}{2} \cdot \omega^2.$$

Setzt man für das Trägheitsmoment des Reifens

$$J = m \cdot r^2$$

und für die Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = \frac{v}{r},$$

so erhält man

$$E_{\text{rot}} = \frac{m \cdot r^2}{2} \cdot \frac{v^2}{r^2}$$

oder

$$E_{\text{rot}} = \frac{m}{2} \cdot v^2.$$

Hierbei ist  $m$  die Masse des Reifens und  $v$  die Bahngeschwindigkeit des Reifens.

### Versuch

Die Versuchsanordnung ist die gleiche wie in V 4.2.2. (Abb. 4.2.2./1). Als Antriebskraft dient die Gewichtskraft eines 50 g-Wägestücks. Auf das Metronom kann verzichtet werden. Man stellt den Papierzeiger auf die Nullmarke des Maßstabes und gibt die Bewegung frei. Allmählich wird der Reifen in Drehung versetzt, der Fadenwickelt sich ab, und der Papierzeiger vollführt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Wenn der Faden vollständig abgewickelt ist (der Papierzeiger sollte dann kurz vor dem Ende des Maßstabes angekommen sein), hat der Reifen seine größte kinetische Energie erreicht. Er dreht sich weiter, der Fadenwickelt sich in entgegengesetzter Richtung auf die Trommel, und das Wägestück auf dem Gewichtsteller wird wieder gehoben. In gleichem Maße wie das Wägestück an potentieller Energie gewinnt, wird der Reifen langsamer, er verliert an Rotationsenergie. Wenn er zur Ruhe kommt, hat das Wägestück nahezu seine ursprüngliche Lage erreicht, der Papierzeiger hat sich bis auf einen geringen Abstand der Nullmarke genähert. Seine Lage, sein Umkehrpunkt, wird durch einen Reiter auf dem Maßstab gekennzeichnet. Nun beginnt der Vorgang von neuem und wiederholt sich so lange, bis sich die gesamte Energie durch Reibung in Wärme umgewandelt hat (Abb. 5.1.5./1).

Wie im V 5.1.4. kann der Wirkungsgrad der Anlage ermittelt werden.

Die Abhängigkeit des Papierzeigers von der Zeit kann grafisch dargestellt werden. Zur Zeitmessung benutzt man ein Metronom oder die Zentraluhr. Man erhält ein Diagramm, das der Abbildung 5.1.3./3 ähnelt.

### 5.1.6. Energieumwandlungen beim lotrechten Wurf nach oben [SE]

1. Wurfgerät mit Zubehör
2. Meßstab
3. Balkenwaage (z. B. Hornschalenwaage)
4. Wägesatz

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 5.0.1.!
2. Bei diesem Experiment werden die in der Bedienungsanleitung zum Wurfgerät angegebenen Anfangsgeschwindigkeiten  $v_0$  zur Berechnung der kinetischen Energie des Wurfkörpers benutzt. Sie gelten nur, wenn die Stahlkugel als Wurfkörper verwendet wird. Für Körper mit größerer Masse haben die Anfangsgeschwindigkeiten kleinere Beiträge.

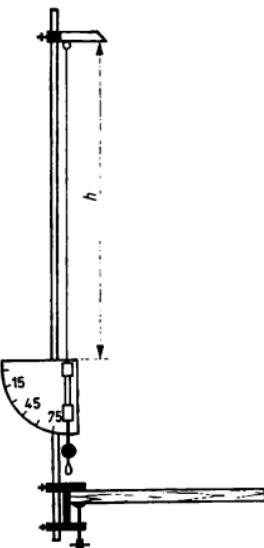


Abb. 5.1.6./1 Versuchsanordnung zum Vergleich der kinetischen mit der potentiellen Energie beim lotrechten Wurf nach oben

3. Die Stahlkugel hat einen relativ kleinen Luftwiderstand, so daß nahezu die gesamte kinetische Energie des Wurfkörpers in potentielle Energie umgewandelt wird. Man sollte aber trotzdem den Schülern bewußtmachen, daß ein geringer Teil der kinetischen Energie durch den Luftwiderstand in Wärmeenergie umgewandelt wird.

#### Versuch

Mit einer Balkenwaage bestimmt man die Masse der Stahlkugel. Das Wurfgerät wird an einem Stativ befestigt und auf einen Wurfwinkel von  $90^\circ$  eingestellt (Abb. 5.1.6./1). Als Wurfkörper wird die Stahlkugel benutzt. Die Wurfhöhe  $h$  markiert man mit einem Schiebezeiger am Stativ und bestimmt sie mit einem Meßstab. Die Anfangsgeschwindigkeiten des Wurfkörpers entnimmt man der Bedienungsanleitung. Sie betragen je nach der Federspannung

$1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $4,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Beim Verlassen des Wurfgerätes hat die Kugel die kinetische Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2.$$

Die potentielle Energie der Kugel im Gipfelpunkt berechnet man nach der Gleichung

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h.$$



Die Ergebnisse einer Meßreihe sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Masse der Stahlkugel: 3,9 g

$v_0$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v_0^2$ in $\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$	$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2$ in N · m	$h$ in m	$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ in N · m	$E_{\text{pot}}$ in % ( $E_{\text{kin}} = 100\%$ )
1,5	2,25	$4,38 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	78
2,5	6,25	$12,2 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-2}$	$11,5 \cdot 10^{-3}$	94
3,5	12,25	$23,9 \cdot 10^{-3}$	$60 \cdot 10^{-2}$	$23,0 \cdot 10^{-3}$	96
4,6	21,16	$41,3 \cdot 10^{-3}$	$102 \cdot 10^{-2}$	$39,1 \cdot 10^{-3}$	95

Die letzte Spalte weist aus, wieviel Prozent der kinetischen Energie in potentielle umgewandelt wurden.

#### Bemerkung

In der Bedienungsanleitung zum Wurfgerät sind nur vier Beträge für  $v_0$  angegeben. Das vom Verfasser benutzte Gerät hat jedoch fünf Kerben. Für die fünfte Kerbe wurde eine Anfangsgeschwindigkeit von etwa  $5,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ermittelt.

### 5.1.7. Energieumwandlungen am Maxwell'schen Rad

1. Maxwell'sches Rad ⑧, dazu erforderliches Material:
  - a) Kreisscheibe aus Hartholz ( $\varnothing$  etwa 15 cm, Dicke etwa 2 cm) mit zentrischer Bohrung ( $\varnothing$  etwa 10 mm) oder Metallscheibe (Rad eines Tretrollers oder Kinderwagens)
  - b) Rundholz (Länge etwa 20 cm,  $\varnothing$  etwa 10 mm, in die zentrische Bohrung der Scheibe passend)
2. fester Faden

#### Methodische Hinweise

1. Bei der kinetischen Energie handelt es sich in diesem Experiment um Rotationsenergie. Eine quantitative Auswertung des Experiments kann nur erfolgen, wenn der Begriff Trägheitsmoment bekannt ist.
2. Eine Abwandlung des Maxwell'schen Rades ist als Spielzeug unter dem Namen „Jo-Jo“ bekannt. Es besteht aus zwei gleichartigen Kreisscheiben, die in einem Abstand von nur wenigen Millimetern auf einer Welle befestigt sind. Die Aufhängung besteht aus einem dünnen Faden, der sich auf die Welle zwischen den Scheiben aufspult.

#### Versuch

In die zentrische Bohrung einer Kreisscheibe oder eines Rades wird ein etwa 20 cm langes Rundholz als Welle fest eingefügt, so daß es auf beiden Seiten gleich weit herausragt. Das Rundholz wird zu beiden Seiten der Scheibe mit je einer Durchbohrung versehen. Durch diese führt man die Enden eines etwa 1 m langen Fadens

und verknötet sie. An dem Faden hängt man das Rad bifilar an ein Stativ (Abb. 5.1.7./1).

Durch Drehen der Welle spult man den Faden auf. Dabei hebt sich das Rad und erhält potentielle Energie. Läßt man es los, so sinkt es herab und führt dabei eine beschleunigte Drehbewegung aus. Ist der Faden abgelaufen,wickelt er sich infolge der Trägheit des Rades von neuem auf die Welle. Das Rad steigt nahezu bis zur früheren Höhe empor. Der Vorgang wiederholt sich mehrere Male, bis das Rad durch Energieabgabe infolge Reibung zur Ruhe kommt. Bei dem Vorgang wandeln sich (von der Reibung abgesehen) abwechselnd potentielle Energie und kinetische Energie (Rotationsenergie) ineinander um.

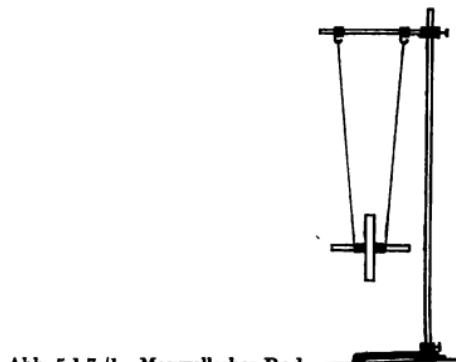


Abb. 5.1.7./1 Maxwell'sches Rad

### 5.1.8. Bestimmung der kinetischen Energie eines fallenden Körpers mit einem Kraftmesser [SE]

1. Kombinierter Zug- und Druckkraftmesser (30 N) mit Zubehör (Druckstab, Druckteller, Kardanhalterung)
2. Wägestücke (100 g)
3. Meßstab
4. Kork
5. Bindfaden

#### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment zeigt, daß ein fallender Körper beim Auftreffen auf die Unterlage eine große Kraftwirkung hervorrufen kann und ermöglicht mit grober Annäherung einen Vergleich der potentiellen Energie des Körpers mit der Arbeit, die er beim Spannen der Feder des Kraftmessers verrichtet. Es kann aber auch zur Einführung des Begriffs Kraftstoß gezeigt werden.

Die quantitative Auswertung ist mit großen Fehlern behaftet. Man erkennt lediglich, daß die Spannarbeit der Feder des Kraftmessers in der gleichen Größenordnung liegt wie die potentielle Energie des gehobenen Körpers. Die Fehler sind deshalb so groß, weil ein erheblicher Teil der potentiellen Energie des Wägestücks

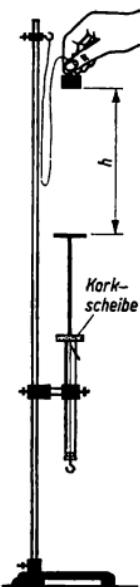


Abb. 5.1.8./1  
Versuchsanordnung  
zur Bestimmung der  
kinetischen Energie  
eines fallenden  
Wägestücks

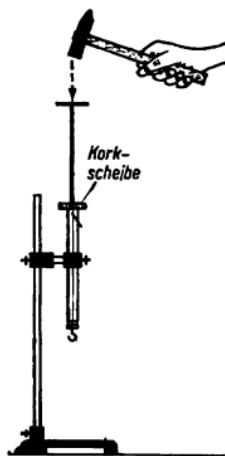


Abb. 5.1.8./2  
Versuchsanordnung  
zur Bestimmung der  
Energie eines  
Hammerschlags

zur Überwindung der Trägheit und zur Beschleunigung des Drucktellers und der Windungen der Feder benötigt wird.

### Versuch

Der Kraftmesser wird mit einem Druckstab und einem Druckteller versehen und lotrecht an einem Stativ befestigt. Die Schrauben der kardanischen Aufhängung werden festgezogen, so daß der Kraftmesser starr in dieser Lage fixiert ist. Ein Korkscheibchen versieht man mit einer Bohrung, so daß es mit geringer Reibung auf dem Druckstab verschoben werden kann. Man schiebt es nach unten, bis es auf dem Kraftmesser aufliegt (Abb. 5.1.8./1). Der Kraftmesser wird mit der Justierhülse auf Null gestellt.

Läßt man das Wägestück aus einer Höhe von einigen Dezimetern auf den Druckteller fallen, dann nimmt der Kraftmesser den Stoß auf. Die auf dem Druckstab verschobene Korkmarke zeigt an, wie tief der Stab in die Hülse des Kraftmessers hineingestoßen wurde. Man mißt diese Wegstrecke  $s$  mit einem Lineal oder Meßstab. Drückt man den Stab noch einmal hinein, bis die Korkscheibe aufliegt, dann kann man an der Skale die maximal wirksame Kraft, die Federkraft  $F_E$ , ablesen. Bei einem Experiment wurden folgende Werte gemessen:

Masse des fallenden Körpers

$m = 100 \text{ g}$

Fallhöhe

$h = 0,3 \text{ m}$

vom Kraftmesser angezeigte maximale Kraft

$F'_E = 11 \text{ N}$

Wegstrecke, um die der Korkzeiger verschoben wurde

$s = 4,8 \text{ cm}$

Die potentielle Energie des gehobenen Körpers betrug demnach

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 0,1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,3 \text{ m} = 0,3 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

## V 5.1.8.

Die Spannarbeit der Feder betrug

$$W_F = \frac{1}{2} F_E \cdot s = \frac{11 \text{ N}}{2} \cdot 0,05 \text{ m} = 0,28 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Somit wurden etwa 93% der potentiellen Energie des gehobenen Körpers zum Spannen der Feder genutzt.

### Bemerkungen

1. Um das fallende Wägestück nach dem Auftreffen auf den Druckteller abzufangen, bindet man es an eine Schnur, die man am Stativ befestigt.
2. Mit der gleichen Versuchsanordnung kann man auch die Energie eines Hammerschlages bestimmen. Das Wägestück wird durch einen kleinen Hammer ersetzt, mit dem man einen leichten Schlag auf den Druckteller ausführt (Abb. 5.1.7./2).

## 5.2. Impuls und Kraftstoß

### 5.2.1. Bestimmung der Stoßkraft und der Stoßdauer beim Fall einer elastischen Kugel auf eine harte Unterlage [SE]

1. Billardkugel (Ø etwa 50 mm)	3. Kerze, Streichhölzer	6. Meßschieber
2. eiserne Richtplatte	4. Balkenwaage	7. Stechzirkel
oder Marmorplatte	5. Wägesatz	8. Meßstab

### Methodischer Hinweis

1. Zu den Begriffen *Impuls* und *Kraftstoß* vergleiche MB 5.0.2.!
2. Das Experiment ist deshalb interessant, weil es mit relativ einfachen Mitteln die Möglichkeit bietet, die zur Abplattung der Elfenbein- oder Plastikugel erforderliche Kraft und die Stoßdauer zu ermitteln.  
Die Vorgänge sind eigentlich etwas komplizierter als in der folgenden Darstellung, weil sich ja auch die Unterlage beim Stoß elastisch verformt. Die Gesamtarbeit bei der Verformung beider Körper hat jedoch den gleichen Betrag wie die in der vereinfachten Darstellung zur Verformung der Kugel erforderliche Arbeit. Die Vereinfachung ist also berechtigt.

### Bestimmung der Stoßkraft

Man beruht eine eiserne Richtplatte oder eine Marmorplatte in einer Kerzenflamme und läßt eine Billardkugel aus 1 m Höhe darauftreffen. Die zurücksprühende Kugel fängt man auf. Auf ihr hat sich ein schwarzer Kreis markiert. Er zeigt an, daß sich die Kugel beim Auftreffen vorübergehend abgeplattet hat, und erlaubt, die Pfeilhöhe dieser Abplattung zu berechnen.

In der schematischen Abbildung 5.2.1./1 ist  $d$  der Durchmesser der Kugel,  $\delta$  der Durchmesser des schwarzen Kreises und  $x$  die Pfeilhöhe der Abplattung. Im Dreieck ABC<sub>2</sub> ist nach dem Höhensatz

$$\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 = x \cdot (d - x).$$

$d$  wird mit dem Meßschieber gemessen,  $\delta$  mit dem Stechzirkel abgegriffen. Die Masse  $m$  der Kugel bestimmt man mit der Balkenwaage.  
Die potentielle Energie der Kugel war vor dem Fall

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h.$$

Diese wird beim Fall in kinetische Energie umgewandelt und wandelt sich beim Aufprall in Verformungsarbeit um. Bezeichnet man die dabei wirksame mittlere Stoßkraft mit  $F$ , so ist die Verformungsarbeit

$$W = F \cdot x.$$

Wenn man von Verlusten infolge Reibung absieht, ist

$$F \cdot x = m \cdot g \cdot h$$

oder

$$F = m \cdot g \cdot \frac{h}{x},$$

$$F = F_G \cdot \frac{h}{x},$$

d. h., die Stoßkraft  $F$  verhält sich zur Gewichtskraft  $F_G$  der Kugel wie die Fallhöhe  $h$  zur Pfeilhöhe  $x$ .

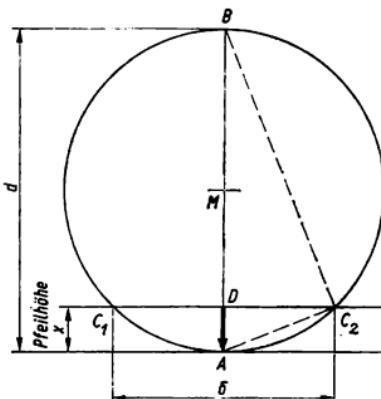


Abb. 5.2.1./1 Bestimmung der Pfeilhöhe der Abplattung an einer aufprallenden Kugel

Bei einem Experiment ergaben sich folgende Werte:

$$\text{Durchmesser der Kugel} \quad d = 47,0 \text{ mm}$$

$$\text{Masse der Kugel} \quad m = 92,5 \text{ g,}$$

$$\text{Durchmesser des schwarzen Kreises} \quad \delta = 6,0 \text{ mm,}$$

$$\text{Fallhöhe} \quad h = 1,0 \text{ m.}$$

Demnach ist die Pfeilhöhe der Abplattung  $x = 0,2 \text{ mm}$ . Für die mittlere Stoßkraft beim Aufprall erhält man

$$F = \frac{9,25 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 1 \text{ m}}{2 \cdot 10^{-4} \text{ m}} = 4540 \text{ N.}$$

#### Bestimmung der Stoßdauer

Um die Stoßdauer abzuschätzen, wird zur Vereinfachung angenommen, daß die Kugel beim Aufprall eine konstante Kraft erfährt, die gleich der oben errechneten mittleren Stoßkraft  $F$  ist und von dieser bis zum Stillstand abgebremst wird. Die Verzögerung der Kugel beträgt

$$a = \frac{F}{m}.$$

### ● V 5.2.1.

Hieraus folgt für die Dauer des Verzögerungsvorganges

$$t = \frac{v}{a}$$

bzw.

$$t = \frac{v \cdot m}{F}.$$

Beim Fall aus 1 m Höhe beträgt die Auftreffgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 1 \text{m}} = 4,43 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Die Stoßdauer ergibt sich demnach zu

$$t = \frac{4,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 9,25 \cdot 10^{-2} \text{ kg}}{4,54 \cdot 10^3 \text{ N}} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ s},$$

sie hat also die Größenordnung  $10^{-4}$  Sekunden.

### 5.2.2. Rückstoß eines Wasserstrahls am beweglichen Ausflußrohr

1. T-Rohr mit zwei passenden Gummistopfen

2. Schlauch

3. Trichter

4. Wanne

#### Methodische Hinweise

1. Das Experiment ist dazu geeignet, den Satz von der Erhaltung des Impulses nachzuweisen. Es kann sowohl zur Einführung als auch zur Wiederholung und Leistungskontrolle eingesetzt werden. Im letzteren Falle führt man es ohne Kommentar vor und lässt die physikalischen Zusammenhänge von einem Schüler erklären.
2. Anwendungsbeispiele sind der rotierende Rasensprenger und das *Segnersche Wasserrad*.

#### Versuch

Das Mittelstück eines T-Rohres wird durch einen Schlauch mit dem Rohr eines Trichters verbunden, der von einem Stativ gehalten wird (Abb. 5.2.2./1). Die beiden anderen Öffnungen werden durch Gummistopfen verschlossen. Gießt man

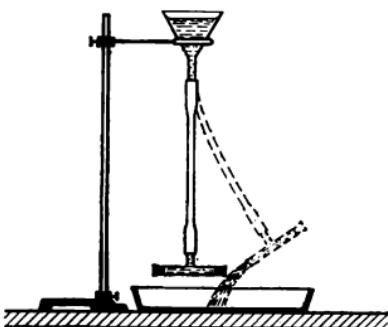


Abb. 5.2.2./1 Rückstoß eines Wasserstrahls am beweglichen Ausflußrohr

Wasser in den Trichter, so bleibt die Vorrichtung in lotrechter Lage in Ruhe. Man stellt eine Wanne unter und entfernt den einen Stopfen. Das Wasser fließt aus, und das T-Rohr wird durch den Rückstoß des Strahls nach der anderen Seite getrieben. Gibt man auch die andere Öffnung frei, dann nimmt das Rohr wieder die lotrechte Lage ein, weil der Rückstoß des einen Strahls entgegengesetzt gleich dem des anderen ist.

Die Summe beider Impulse ist gleich Null.

#### *Bemerkung*

Man kann das T-Rohr auch durch einen kurzen Schlauch an die Wasserleitung anschließen; doch ist dann wegen des hohen Druckes Vorsicht geboten.

### 5.2.3. Rückstoß eines Luftstrahls

1. Luftkissenbahn ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
2. Schwebekörper mit Düse ⑧, dazu erforderliches Material:
  - a) 2 Plastplatten (12 cm × 5 cm × 5 mm)
  - b) Plastplatte (12 cm × 3 cm × 1 cm)
  - c) Metallrohr (10 cm lang, ca. 5 mm Innendurchmesser)
  - d) Plastkleber
3. Staubsauger mit flexilem Schlauch
4. Stelltransformator

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MH Nr. 1, V 5.2.2.!
2. Das im Experiment demonstrierte Prinzip findet bei Düsenflugzeugen und Raketen Anwendung.

#### *Versuch*

Die Versuchsanordnung entspricht der im V 4.1.8. Der Schwebekörper mit Düse unterscheidet sich jedoch von dem dort beschriebenen im inneren Aufbau. Entsprechend Abbildung 5.2.3./1 ist im mittleren Teil des Schwebekörpers eine Vertiefung angebracht, in der sich ein Teil der aus den Bohrungen der Luftkissenbahn austretenden Luft sammelt. Nach dem Ausarbeiten dieser etwa 1 mm tiefen Vertiefungen wird der Schwebekörper entsprechend der Anleitung im V 4.1.8. zusammenklebt. Anstelle der mittleren vertikalen Bohrung im Schwebekörper wird eine solche größeren Durchmessers (entsprechend dem Außendurchmesser des Metallrohres) eingebracht, die bis in den unteren Hohlraum reicht. Ein Nacharbeiten der Öffnung von unten begünstigt das Eintreten der Luft. Das Metallrohr wird um 90° abgewinkelt und von oben auf den Schwebekörper gesteckt. Durch ein leichtes Zusammenquetschen des Rohrendes erhöht sich die Austrittsgeschwindigkeit der Luft.

Das horizontale Ausrichten der Bahn erfolgt nach Anschalten des Staubsaugers bei zunächst verschlossener Düse des Schwebekörpers. Nachfolgend wird die Düse geöffnet. Der Schwebekörper bewegt sich mit zunehmender Geschwindigkeit in die dem Luftstrahl entgegengesetzte Richtung.

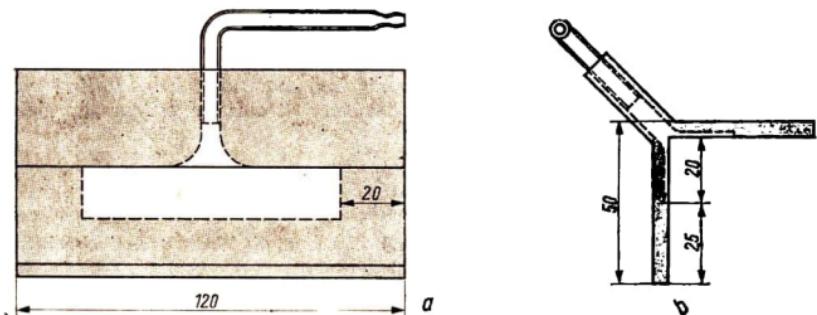


Abb. 5.2.3./1 Schwebekörper mit Vertiefung: a) Frontansicht, b) Seitenansicht

Das Experiment wird mit unterschiedlichem Luftdruck (unterschiedliche Betriebsspannung des Staubsaugers) wiederholt. Je größer die Geschwindigkeit der austretenden Luft ist, umso größer ist auch der Rückstoß.

#### Bemerkungen

1. Die Anordnung ist auch zur Demonstration und Untersuchung der gleichmäßig beschleunigten Bewegung geeignet.
2. Die Veränderung der Ausströmungsgeschwindigkeit der Luft kann auch durch teilweises Abdecken der Ansaugöffnung des Staubsaugers oder durch Öffnen eines Nebenweges für die Luft erfolgen.

### 5.2.4. Nachweis des Satzes von der Erhaltung des Impulses mit einem beweglichen Wagen

#### 1. Wagen für den Nachweis des Beharrungsvermögens

#### Methodische Hinweise

1. Anwendungsbeispiele sind der Rückstoß beim Schießen, der Sprung aus einem Kahn auf das Ufer, der Sprung vom Ufer in einen Kahn und das Raketenprinzip.
2. Vergleiche auch im Teil 3/4/5/ V 5.4.1., V 5.4.2. und V 5.4.3.!

#### Versuch

Die Räder des Experimentierwagens sind gummibereift und laufen auf Doppelkugellagern, so daß nur eine geringe Reibung auftritt. Er hat eine Tragfähigkeit von maximal 800 N.

Stellt sich ein Schüler mit einer möglichst schweren Aktentasche auf den Wagen und bewegt die Tasche wie ein Pendel hin und her, dann vollführt auch der Wagen eine Hin- und Herbewegung. Dabei sind die Bewegungen der Tasche und des Wagens stets entgegengesetzt gerichtet (Abb. 5.2.4./1).

Wirft er die Tasche einem zweiten Schüler zu, der vor dem Wagen steht, dann rollt der Wagen mit ihm infolge des Rückstoßes entgegen der Wurfrichtung ein Stück zurück (Abb. 5.2.4./2). Wirft er eine leere Tasche, dann ist der Rückstoß schwächer. Steigt der Schüler nach hinten vom Wagen, dann rollt der leere Wagen nach vorn (Abb. 5.2.4./3) (Vorsicht!).

Wird dem auf dem ruhenden Wagen stehenden Schüler eine schwere Tasche zu geworfen, dann setzt sich beim Auffangen der Wagen mit ihm in Bewegung (Abb. 5.2.4./4).

Bei allen Teilversuchen kann man den Satz von der Erhaltung des Impulses nachweisen. Betrachtet man den Wagen, den daraufstehenden Schüler und die Tasche als abgeschlossenes System, dann ist stets der Gesamtimpuls vor dem Kraftstoß (Stoß, Wurf oder Sprung) gleich dem Gesamtimpuls nach ihm.

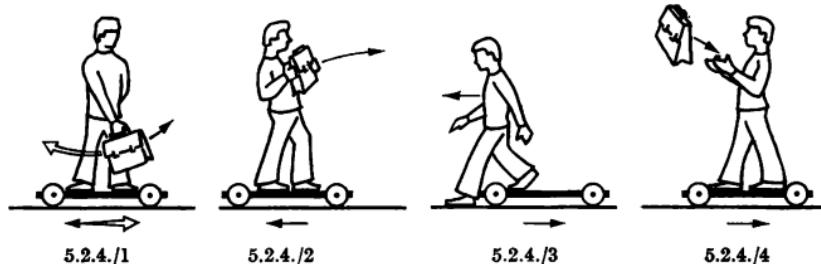


Abb. 5.2.4./1 Schüler mit Aktentasche auf einem leicht beweglichen Wagen. Eine Pendelbewegung mit der Tasche führt zu einer Hin- und Herbewegung des Wagens.

Abb. 5.2.4./2 Nachweis des Rückstoßes beim Werfen eines Gegenstandes

Abb. 5.2.4./3 Rückstoß beim Verlassen des Wagens

Abb. 5.2.4./4 Erhaltung des Impulses beim Auffangen eines Gegenstandes

#### Bemerkungen

- Um einen Unfall zu vermeiden, sollte man den Schüler darauf vorbereiten, daß der Wagen bei den Experimenten in Bewegung gerät. Der Schüler erlangt auf dem rollenden Wagen eine größere Sicherheit, wenn man den zur Prandtlischen Drehscheibe gehörenden Schemel auf den Wagen stellt. Auf der Wagenfläche sind dafür drei Bohrungen vorgesehen, in die man die Zapfen an den Füßen des Schemels stecken kann. Die Experimente werden dann im Sitzen ausgeführt.
- Ähnliche Experimente kann man auch mit dem in V 4.1.7. benutzten Schienenwagen ausführen, auf dem man das Wurfgerät an einem kurzen Stativstab befestigt.

## 5.2.5. Vergleich zweier Kraftstöße mit dem Federstoßgerät — Satz von der Erhaltung des Impulses

#### Zu Variante a

1. Federstoßgerät
2. Faden
3. Streichhölzer

## V 5.2.5.

4. Meßstab
5. zwei Holzklotze
6. Perkussionsrinne mit den dazugehörigen Stahlkugeln

### Zu Variante b

Geräte 1. bis 5., außerdem

7. zwei Wagen (je 100 g)
8. Brett mit Glasplatte
9. Wasserwaage
10. Satz Wägestücke (5 × 50 g)

### Methodische Hinweise

1. Zu den Begriffen *Impuls* und *Kraftstoß* vergleiche MB 5.0.2.!
2. Zur Erklärung der Versuchsanordnung weist man darauf hin, daß die rollenden Kugeln auf der Rinne durch die Reibung zur Ruhe kommen und um so weiter rollen, je größer ihre Anfangsgeschwindigkeit war. Die gleichen Zusammenhänge gelten auch für die beiden Wagen. Außerdem muß man erklären, daß am Federstoßgerät die nach beiden Seiten wirkenden Kräfte und ihre Wirkungsdauer nach dem 3. Newtonschen Gesetz gleich sein müssen. Somit sind auch die Beträge der beiden Kraftstöße gleich

$$F_1 \cdot \Delta t_1 = F_2 \cdot \Delta t_2.$$

Diese Feststellung ist methodisch wichtig, weil erst dann die durch das Experiment gewonnene Erkenntnis, daß die Änderungen der Impulse der beiden gestoßenen Körper gleich sind,

$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2,$$

richtig eingeschätzt werden kann. Die Schüler kommen dann zu der Einsicht, daß gleiche Kraftstöße auch gleiche Änderungen der Impulse zur Folge haben. Diese Einsicht kann mathematisch bestätigt werden:

$$S = F \cdot \Delta t; \quad F = m \cdot a$$

$$F \cdot \Delta t = m \cdot a \cdot \Delta t; \quad a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v.$$

Die Änderung des Impulses  $m \cdot \Delta v$  ist gleich dem Betrag des Kraftstoßes  $F \cdot \Delta t$ , der sie hervorruft.

3. Stellt man diese Überlegungen an den Anfang und setzt voraus, daß gleiche Änderungen der Impulse von gleichen Kraftstößen herrühren müssen, dann kann das Experiment zur Herleitung des Satzes von der Erhaltung des Impulses verwendet werden.

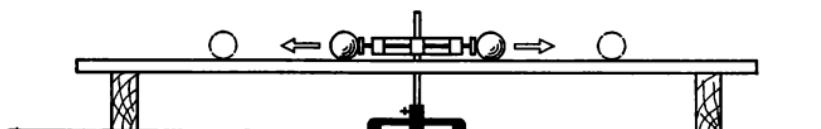


Abb. 5.2.5./1 Versuchsanordnung zum Vergleich zweier Kraftstöße mit der Perkussionsrinne

**Variante a: Verwendung der Perkussionsrinne**

Die Perkussionsrinne wird, wie in Abbildung 5.2.5./1 dargestellt, auf zwei Holzklotzen gelagert. In der Mitte befestigt man dicht über ihr an einem Stativ das Federstoßgerät, drückt die beiden Schlagbolzen zusammen und verbindet die Spannscheiben durch einen Faden. Vor die Schlagbolzen legt man je eine Stahlkugel. Brennt man den Faden durch, so entspannt sich die Feder und erteilt beiden Kugeln Kraftstöße gleicher Beträge. Die Kugeln rollen gleichweit, folglich sind auch ihre Impulse gleich. Die von den Kugeln zurückgelegten Wege werden gemessen und in eine Tabelle eingetragen.

Man wiederholt das Experiment mit mehreren und unterschiedlich vielen Kugeln auf beiden Seiten des Federstoßgerätes.

Links				Rechts			
Anzahl der Kugeln	$m_1$ in g	$s_1$ in cm	$m_1 \cdot s_1$ in g · cm	Anzahl der Kugeln	$m_2$ in g	$s_2$ in cm	$m_2 \cdot s_2$ in g · cm
1	20	42	840	1	20	40	800
2	40	23	920	2	40	24	960
3	60	13	780	1	20	41	820
3	60	14	840	2	40	22	880

Die Tabelle zeigt, daß für jedes einzelne Experiment die Produkte von Masse und Weg annähernd gleich sind. Folglich sind auch die Beträge der Impulse unmittelbar nach dem Stoß gleich. Da sie entgegengesetzt gerichtet sind, ist ihre Summe gleich Null. Die Versuchsanordnung stellt ein abgeschlossenes System dar. Somit gilt der Satz von der Erhaltung des Impulses: *In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller Impulse gleich Null bzw. konstant.*

**Bemerkung**

Die Kraftstöße der einzelnen Experimente kann man nur dann miteinander vergleichen, wenn die Feder des Stoßgerätes jedesmal gleichweit, z. B. bis zum Anschlag gespannt wird. Häufig aber lockert sich beim Binden der Faden etwas, so daß sich die Federspannungen von Experiment zu Experiment meist um einen geringen Betrag unterscheiden.

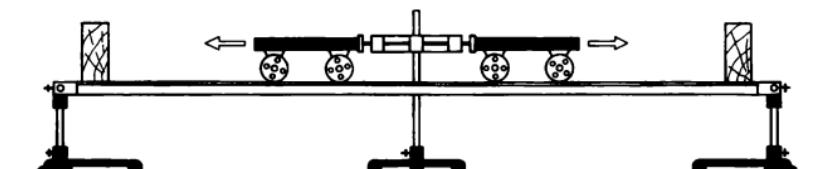


Abb. 5.2.5./2 Versuchsanordnung zum Vergleich zweier Kraftstöße mit zwei Wagen

**Variante b: Verwendung zweier Wagen**

Die Versuchsanordnung ist aus der Abbildung 5.2.5./2 zu ersehen. Das Brett mit der Glasplatte wird mit einer Wasserwaage waagerecht justiert.

## V 5.2.5.

Die Durchführung des Experiments erfolgt wie in der Variante a. Statt der Kugeln werden die beiden Wagen vor die Schlagbolzen des Federstoßgerätes gestellt und in den einzelnen Experimenten gleichmäßig oder unterschiedlich belastet. Die Meßwerte werden wie in der Variante a in einer Tabelle zusammengefaßt und ausgewertet.

## 5.2.6. Bestimmung der Wucht eines Hammerschlags mit dem Stoßpendel

1. Holzquader (Masse etwa 3 kg)
2. 4 Schraubösen
3. Schnur
4. Brett
5. Zeichenpapier, Reißzwecken, Pinsel, Tinte
6. Stoppuhr
7. Hammer
8. Tafelwaage
9. Wägesatz
10. Meßstab

### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment hat das gleiche Ziel wie V 5.1.7. Während man dort mit elementaren Gesetzen der translatorischen Bewegung auskommt, werden hier auch die Gesetze der harmonischen Schwingung und die Anwendung der Differentialrechnung gefordert. Deshalb ist dieses Experiment besonders für die Abiturstufe geeignet.
2. Eine interessante Variante des hier verwendeten Stoßpendels ist im V 5.2.7. zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Luftgewehrgeschosses beschrieben.

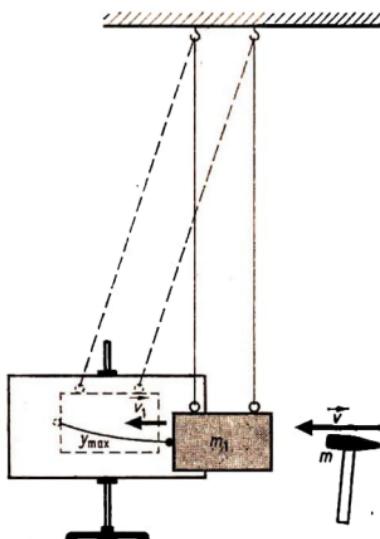


Abb. 5.2.6./1 Stoßpendel zur Bestimmung der Wucht eines Hammerschlags. Die Doppelfäden der bifilaren Aufhängungen erscheinen in der Zeichnung als einfache Linien.

### Versuch

Ein Holzquader mit einer Masse von etwa 3 kg wird mit zwei gleichlangen Schnüren an vier Deckenhaken als bifilares Pendel aufgehängt, so daß bei Schwingungen des Pendels sämtliche Kanten des Quaders parallel verschoben werden (Abb. 5.2.6./1).

An einer Stirnseite befestigt man einen kleinen Haarpinsel so, daß er nach hinten übersteht und beim Schwingen an einem mit weißem Papier bespannten Brett entlang streift, das hinter dem Quader von einem Stativ gehalten wird. Der mit Tinte befeuchtete Pinsel zeichnet die Amplitude  $y_{\max}$  des Pendels als Strich auf dem Papier auf. In einem Vorversuch bestimmt man mit der Stoppuhr die Schwin-

gungsdauer  $T$  des Pendels und mit der Tafelwaage die Masse  $m_1$  des Pendelkörpers sowie die Masse  $m$  des Hammers (mit Stiel).

Führt man mit dem Hammer einen kurzen, kräftigen Schlag gegen den Quader, dann schwingt dieser aus. Nach dem Satz von der Erhaltung des Impulses gilt näherungsweise die Gleichung

$$m \cdot v = m_1 \cdot v_1.$$

Darin ist  $v$  die Geschwindigkeit des Hammers und  $v_1$  die Geschwindigkeit des Klotzes beim Beginn des Ausschwingens. Man kann daraus die Geschwindigkeit  $v$  des Hammers errechnen:

$$v = \frac{m_1}{m} \cdot v_1.$$

Die kinetische Energie, die Wucht des Hammers beim Schlag, kann somit berechnet werden. Die Geschwindigkeit  $v_1$  des Quaders ermittelt man nach den Gesetzmäßigkeiten der harmonischen Schwingung. Es gelten:

$$\text{für die Kreisfrequenz} \quad \omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

und für die Elongation  $y = y_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ .

Die Momentangeschwindigkeit des Stoßpendels erhält man als erste Ableitung der Elongation nach der Zeit

$$v_1 = \frac{dy}{dt} = y_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Für den Beginn des Ausschwingens, für  $t = 0$ , erhält man

$$v_1 = y_{\max} \cdot \omega = y_{\max} \cdot \frac{2\pi}{T}.$$

Die Geschwindigkeit des Hammers ist demzufolge

$$v = \frac{m_1}{m} \cdot y_{\max} \cdot \frac{2\pi}{T}.$$

Setzt man diesen Wert für  $v$  in die Gleichung

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

ein, dann erhält man die kinetische Energie des Hammers beim Schlag. Sie ist

$$E_{\text{kin}} = \frac{m_1^2 \cdot y_{\max}^2 \cdot 2 \cdot \pi^2}{m \cdot T^2} = 2\pi^2 \cdot \frac{m_1^2 \cdot y_{\max}^2}{m \cdot T^2}.$$

### Bemerkungen

1. Die richtige Wahl der Einheiten ist zu beachten. Mißt man die Massen in kg, die Amplitude  $y_{\max}$  in m und die Schwingungsdauer  $T$  in s, so ergibt sich für die kinetische Energie die Einheit N · m.
2. Das Ergebnis kann nur als Näherungswert betrachtet werden, weil der Hammer vom Klotz zurückprallt und nach dem Stoß einen Impuls in der entgegengesetzten Richtung besitzt.



## V 5.2.7.

### 5.2.7. Bestimmung der Geschwindigkeit eines Luftgewehrgeschosses mit dem Stoßpendel

1. Luftgewehr mit Munition
2. Stoßpendel ⑧, erforderliches Material:
  - a) flaches Holzkästchen
  - b) 2 Schraubösen
  - c) Sand, Pappe, Nägel, Schnur
3. Brett
4. Zeichenpapier, Reißzwecken, Pinsel, Tinte
5. Stoppuhr
6. Tafelwaage mit Wägesatz
7. Labor- oder Hornschalenwaage mit Wägesatz

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1 und 2, V 5.2.6.!
2. Eine Methode zur Bestimmung der Geschossgeschwindigkeit ist auch im V 6.1.17. beschrieben. Es ist interessant, die eine Methode zur Kontrolle des Ergebnisses der anderen einzusetzen.

#### Vorbereitungsarbeiten

Als Kugelfang und Stoßpendel stellt man aus etwa 1 cm dicken Brettchen ein flaches Kästchen her (etwa  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ), füllt es mit trockenem Sand und nagelt als Deckel ein Stück Pappe auf. Man schraubt zwei Ösen ein und hängt es an zwei Deckenhaken bifilar auf. Dabei soll die Seitenwand aus Pappe als Zielscheibe dienen. Die Masse des Pendels bestimmt man mit der Tafelwaage. Sie sollte

möglichst gering sein und 300 g nicht überschreiten. An seiner Stirnseite befestigt man wie im V 5.2.6. zur Ermittlung der Amplitude einen kleinen Haarpinsel. Die Schwingungsdauer des Pendels bestimmt man mit einer Stoppuhr. Mit der Labor- oder Hornschalenwaage ermittelt man als arithmetisches Mittel von 10 oder 20 Geschossen (Bleikugeln oder Diabolo) die Masse eines Geschosses. Das Luftgewehr befestigt man mit Stativmaterial (2 Tischklemmen – keine Stativfüße!, 2 Gläsröhrenhalter) oder mit einem Schraubstock (Abb. 5.2.7./1) so, daß sich die Gewehrmündung dicht vor dem Stoßpendel befindet. Durch einen

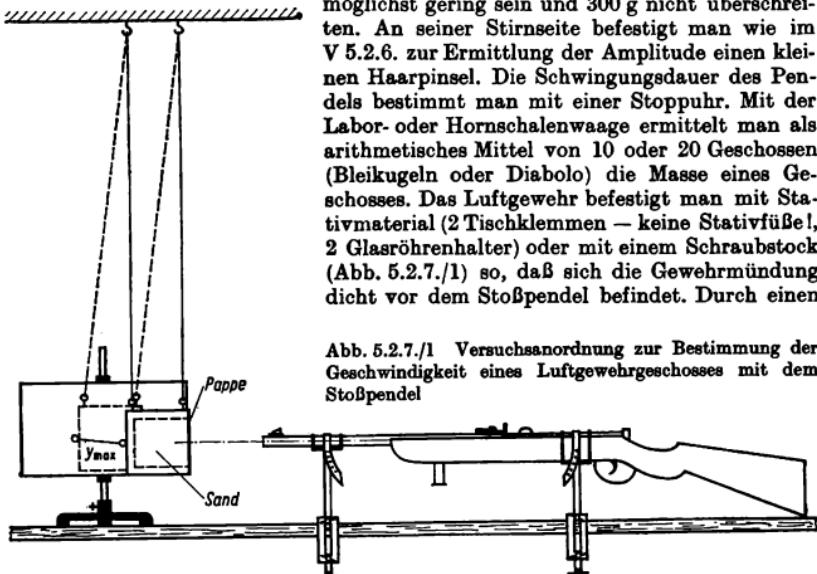


Abb. 5.2.7./1 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Luftgewehrgeschosses mit dem Stoßpendel

Probeschuß überzeugt man sich davon, daß das Geschoß etwa die Mitte der Pappe durchschlägt und im Pendel steckenbleibt. Die Versuchsanordnung muß so aufgebaut werden, daß Unfälle ausgeschlossen sind!

### *Versuch*

Die Ausführung des Experiments und seine Auswertung ähneln der im V 5.2.6. Die Geschwindigkeit des Geschosses berechnet man nach der Gleichung

$$v = \frac{m_1}{m} \cdot y_{\max} \cdot \frac{2\pi}{T}.$$

Hierin bedeuten:  $m_1$  ... Masse des Stoßpendels,  $m$  ... Masse des Geschosses,  $y_{\max}$  ... Amplitude des Pendels,  $T$  ... Schwingungsdauer des Pendels.

Bei einer Pendellänge von 2,5 m, einer Pendelmasse von 310 g und einer Geschossmasse von 0,5 g wurden eine Schwingungsdauer von 3,14 s und eine Amplitude von 4,5 cm gemessen. Daraus ergab sich eine Geschossgeschwindigkeit von etwa  $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### *Bemerkung*

Bei diesem Experiment ist nach Möglichkeit ein Magazingewehr zu verwenden, weil es zum Laden nicht aus der Halterung genommen werden muß.

## **5.2.8. Experimente mit dem Perkussionsapparat — Der zentrale elastische Stoß — Der unelastische Stoß [SE]**

1. Perkussionsapparat
2. Metallblock (Stück einer Eisenbahnschiene) oder Glasblock

### *Methodische Hinweise*

1. Zu den Begriffen *Impuls* und *Kraftstoß* vergleiche MB 5.0.2.!
2. Die Begriffe *elastisch* und *unelastisch* sind den Schülern u. a. aus dem täglichen Sprachgebrauch hinreichend bekannt. Man kann sich durch einen Vorversuch davon überzeugen, daß sie die richtigen Vorstellungen davon haben. Dazu eignet sich z. B. V 5.1.3.
3. Bei der Erklärung der Stoßvorgänge sollte man darauf eingehen, daß sowohl der *Satz von der Erhaltung des Impulses*

$$\sum_{i=1}^n m_i \cdot v_i = \text{konst.}$$

als auch der *Satz von der Erhaltung der Energie*

$$\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{2} \cdot v_i^2 = \text{konst.}$$

gilt. Aus der Wirksamkeit beider Gesetzmäßigkeiten resultiert die Tatsache, daß bei der Verwendung gleichartiger elastischer Kugeln am Ende der Reihe stets ebenso viele Kugeln weggestoßen werden, wie an ihrem Anfang dagegenstoßen.

Beim unelastischen Stoß wird ein Teil der kinetischen Energie des stoßenden Körpers durch die Verformung der am Stoß beteiligten Körper in Wärme umgewandelt und geht dadurch für die Bewegung verloren.

4. Auf die Übertragung des Stoßes durch eine Reihe von Eisenbahnwagen beim Rangieren sollte hingewiesen werden.

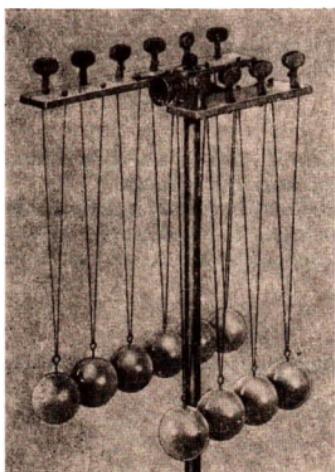


Abb. 5.2.8./1 Perkussionsapparat

*Justieren des Gerätes*

Der Perkussionsapparat wird an einem Stativ befestigt, so daß zunächst die sechs bifilar aufgehängten Kugeln den Schülern zugekehrt sind. Mit Hilfe der Wirbel werden die Pendel so abgestimmt, daß sie genau gleich lang sind, die sechs gleichartigen Kunstharzkugeln also in gleicher Höhe hängen (Abb. 5.2.8./1).

*1. Teilversuch: Elastischer Stoß gegen eine feste Wand*

Man legt fünf der Pendel über den rückwärtigen, kleineren Pendelträger, so daß nur ein Pendel übrigbleibt. Man stellt einen Metallblock mit möglichst großer Masse (Stück einer Eisenbahnschiene, Tischamboss o. ä.) oder einen entsprechenden Glasblock so auf, daß er die Pendelkugel gerade berührt. Hebt

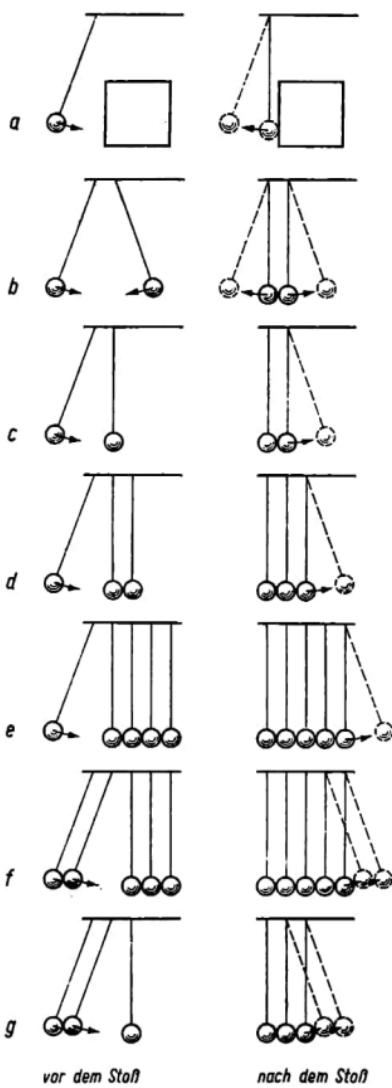


Abb. 5.2.8./2 Der elastische Stoß gleichartiger Kugeln



man die Kugel seitlich an und gibt sie ohne Stoß frei, dann schlägt sie gegen den Block und wird mit nahezu der gleichen Geschwindigkeit wie beim Auftreffen zurückgestoßen (Abb. 5.2.8./2a). Der Vorgang wiederholt sich mehrfach, bis die Kugel schließlich zur Ruhe kommt.

**2. Teilversuch: Zentraler elastischer Stoß zweier gleicher Kugeln mit entgegengesetzten gleichen Impulsen**

Man verwendet zwei nebeneinander hängende Kugeln, die man beide gleichweit seitlich anhebt und gleichzeitig loslässt. Sie prallen gegeneinander und werden beide wieder nahezu in ihre Ausgangslage zurückgestoßen (Abb. 5.2.8./2b). Der Vorgang wiederholt sich mehrfach.

**3. Teilversuch: Zentraler elastischer Stoß einer Kugel gegen eine ruhende Kugel**

Man hebt nur eine der beiden Kugeln an und lässt sie gegen die ruhende zweite stoßen. Die stoßende Kugel gibt ihre Energie völlig an die ruhende Kugel ab und kommt dadurch selbst zur Ruhe (Abb. 5.2.8./2c). Der Vorgang wiederholt sich mehrfach, wobei die Kugeln ihre Rolle als stoßender und gestoßener Körper jeweils vertauschen.

**4. Teilversuch: Übertragung eines elastischen Stoßes durch eine Reihe von Kugeln**

Benutzt man drei Kugeln und lässt eine der äußeren auf die beiden anderen, ruhenden Kugeln stoßen, so überträgt die unmittelbar angestoßene Kugel die übernommene Bewegungsenergie nur, bleibt selbst in Ruhe, während die andere äußere etwa gleich weit ausschwingt (Abb. 5.2.8./2d). Auch dieser Vorgang wiederholt sich in gleicher Weise in entgegengesetzter Richtung. Die mittlere Kugel bleibt auf ihrem Platz. Sie wird nur vorübergehend deformiert.

Dieser Versuch verläuft in der gleichen Art auch mit vier, fünf oder sechs Kugeln (Abb. 5.2.8./2e).

Läßt man zwei Kugeln gegen die Reihe der ruhenden stoßen, dann werden am Ende der Reihe auch zwei Kugeln weggestoßen (Abb. 5.2.8./2f). Besonders interessant ist eine Variante mit der Benutzung von drei Kugeln. Läßt man zwei Kugeln gegen die dritte, ruhende stoßen, kommt nur die äußere stoßende Kugel zur Ruhe, während die mittlere Kugel ihre Bewegung fortsetzt und zusammen mit der dritten Kugel ausschwingt (Abb. 5.2.8./2g).

**5. Teilversuch: Zentraler elastischer Stoß zweier Kugeln mit unterschiedlichen Massen**

Am kürzeren Pendelträger des Gerätes werden zwei große und zwei kleine Kugeln angehängt. Die Massen der kleinen Kugeln sind halb so groß wie die der großen. Verwendet man zunächst eine große Kugel und lässt sie gegen eine kleine stoßen, dann beobachtet man eine ähnliche Erscheinung wie beim 3. Teilversuch. Allerdings erreicht die kleine Kugel eine größere Steighöhe und die große, stoßende Kugel kommt nicht völlig zur Ruhe (Abb. 5.2.8./3a). Der Impuls und die kinetische Energie konnten nicht vollständig an die kleine Kugel abgegeben werden (vgl. MH Nr. 3).

Läßt man die kleine Kugel gegen die große stoßen, dann hat die kleine Kugel nach dem Stoß sogar einen entgegengesetzt gerichteten Impuls, sie prallt von der großen zurück (Abb. 5.2.8./3b).

Durch die Verwendung von zwei großen und zwei kleinen Kugeln sind weitere Varianten möglich. So kann man z. B. eine große gegen zwei kleine stoßen lassen. Da die Masse der gestoßenen Körper gleich der des stoßenden ist, beobachtet man eine ähnliche Erscheinung wie im 3. Teilversuch.

**6. Teilversuch: Unelastischer Stoß**

Um den unelastischen Stoß zu demonstrieren, hängt man die drei kugelförmigen Plastbeutel mit Knetmasse an und führt Experimente nach der Art des 1., 2., 3. und 4. Teilversuchs aus. Beim 1. und 2. Teilversuch prallen die Beutel kaum zurück. Sie kommen nach dem Stoß sehr schnell zur Ruhe (Abb. 5.2.8./4a). Die kinetische Energie wird fast vollständig durch die Verformung der Knetmasse in Wärme umgewandelt. Beim 3. und 4. Teilversuch bewegen sich der stoßende und der gestoßene Beutel gemeinsam mit einheitlicher Geschwindigkeit weiter.

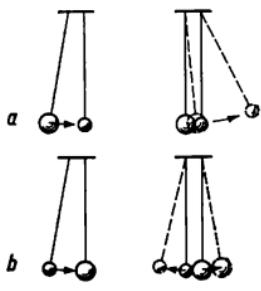


Abb. 5.2.8./3 Der elastische Stoß ungleichartiger Kugeln

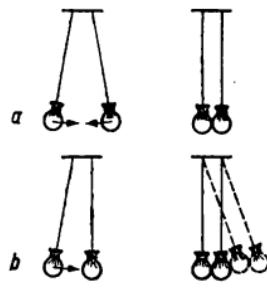


Abb. 5.2.8./4 Der unelastische Stoß

**Bemerkung**

Die Knetmasse verhärtet mit der Zeit und zeigt dabei mehr und mehr Eigenschaften elastischer Körper. Für den 6. Teilversuch eignen sich deshalb noch besser kleine Leinensäckchen, die mit trockenem Sand gefüllt sind. Sie sind praktisch völlig unelastisch und zeigen die Besonderheiten des unelastischen Stoßes noch deutlicher als die Beutel mit Knetmasse.

**5.2.9. Experimente mit der Perkussionsrinne —  
Der zentrale elastische Stoß — Der unelastische Stoß [SE]**

1. Perkussionsrinne mit den dazugehörigen Stahl- und Bleikugeln
2. zwei gleichhohe Holzklötze

**Methodische Hinweise**

1. Zu den Begriffen *Impuls* und *Kraftstoß* vergleiche MB 5.0.2.!
2. Vergleiche MH Nr. 2, 3 und 4, V 5.2.8.!

3. Dieses Experiment kann als Ersatz für V 5.2.8. ausgeführt werden. Die Stoßvorgänge kommen aber hier nur dann exakt zum Ausdruck, wenn man die Kugeln so gegen die ruhenden schnellt, daß sie dabei nicht in Rotation geraten. Ansonsten wirkt außer der kinetischen Energie der Translation auch noch die Rotationsenergie der stoßenden Kugel. Diese Energie wird nur zum Teil an die gestoßenen übertragen und die stoßende Kugel kommt nicht völlig zur Ruhe, sondern rollt weiter.
4. Da Stahlkugeln mit unterschiedlichen Massen auch unterschiedliche Durchmesser haben, kann der zentrale Stoß damit auf der Perkussionsrinne nicht demonstriert werden.

### Versuch

Damit die Stahlkugeln in der Mitte der Perkussionsrinne liegenbleiben, ist sie schwach gebogen, ihre Enden sind um wenige Millimeter erhöht. Man lagert sie deshalb am besten auf zwei gleichhohen Holzklotzen. Auf die Rinne legt man eine Anzahl von gleichartigen Stahlkugeln und führt mit ihnen die im V 5.2.8. beschriebenen Teilversuche 2, 3 und 4 aus (Abb. 5.2.9./1).

Die stoßende Kugel schnellt man so gegen die ruhenden, daß sie dabei möglichst nicht rollt.

Statt eines Metallblocks im Teilversuch 1 verwendet man einen langen Stativstab, den man auf die Rinne legt. Wenn die Kugel gegen seine Stirnfläche stößt, prallt sie zurück.

Im 4. Teilversuch kann man die Kugeln, die den Stoß übertragen, auch durch einen kurzen Stativstab ersetzen (Abb. 5.2.9./2).

Den unelastischen Stoß demonstriert man mit zwei oder mehreren gleichartigen Bleikugeln.

### Bemerkungen

1. Als behelfsmäßige Perkussionsrinne eignet sich auch die im V 4.1.2. beschriebene Fallrinne oder ein Stück einer Gardinenstange aus Plast oder Metall.
2. Bei der Ausführung als Schülerversuch mit dem SEG „Mechanik“ wird als Perkussionsrinne das Experimentierbrett verwendet. Durch Unterlegen des Lineals entlang einer Längskante wird es leicht angekippt. Die erforderlichen Stahl- oder Plastkugeln werden vorübergehend aus mehreren Gerätesätzen entnommen. Auch Stahlkugeln aus Kugellagern sind dafür geeignet.
3. Das Experiment kann in ähnlicher Weise auch mit gleichen und unterschiedlichen Münzen ausgeführt werden, die man auf einer glatten Unterlage gegeneinander stößt. Während bei der Verwendung von Kugeln die Rotation störend wirkt, ist es bei den Münzen die Reibung auf der Unterlage. Diese Variante eignet sich besonders als Hausexperiment.



Abb. 5.2.9./1 Perkussionsrinne zur Demonstration von Experimenten zum elastischen und unelastischen Stoß



Abb. 5.2.9./2 Übertragung des Stoßes einer Kugel durch einen Stahlstab

## 5.2.10. Experimente zum zentralen elastischen und unelastischen Stoß mit der Luftkissenbahn

1. Luftkissenbahn ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
2. 2 Schwebekörper ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
3. 5 Stecker mit keramischen Zylindermagneten ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
4. Streifenblende ⑧ (vgl. MB 4.0.2.)
5. Polydigit
6. Lichtschrankenanordnung
7. Haltemagnet
8. Stromversorgungsgerät für Niederspannung
9. Morsetaste
10. Knetmasse

### Methodischer Hinweis

Um den vollständig elastischen Stoß weitestgehend anzunähern, finden auf Abstoßung gepolte keramische Magnete Verwendung. Anstelle der direkten Berührung der Stoßpartner erfolgt dabei die Energieübertragung durch das Magnetfeld. Dabei vollziehen sich die sonst in äußerst geringen Abmessungen auftretenden Vorgänge räumlich stark gedehnt und dadurch gut beobachtbar.

### Versuchsanordnung

Die Aufstellung der Luftkissenbahn erfolgt wie in V 4.1.8. beschrieben. In beide Schwebekörper werden in die seitlichen Bohrungen die Stecker mit den Magneten eingesteckt. Am linken Ende der Luftkissenbahn befestigt man am vertikal eingeschraubten Stativstab den Haltemagnet. Er wird über die Morsetaste mit den Gleichspannungsbuchsen des Stromversorgungsgerätes verbunden. Als ein Anschluß dient dabei die Steckbuchse am Haltemagnet, die dem Magnet zugewandt ist. Der zweite Anschluß befindet sich im sechspoligen Anschlußstecker des Haltemagnets. Blickt man auf die Steckkontakte und hält dabei den roten Punkt am Stecker oben, so ist es der Anschluß unten links. Die Verbindung kann unmittelbar durch Einsticken eines Laborsteckers an diese Stelle erfolgen. Die Polung erfolgt dabei so, daß beim Drücken der Morsetaste der Schwebekörper abgestoßen wird. Am rechten Ende der Bahn bringt man in dem dort vertikal eingeschraubten Stativstab ebenfalls einen Stecker mit Magnet an. Der Haltemagnet und alle übrigen Magnete müssen sich in gleicher Höhe befinden. Auf den linken Schwebekörper wird die Streifenblende aufgesteckt (Abb. 5.2.10./1). Der zweite Schwebekörper

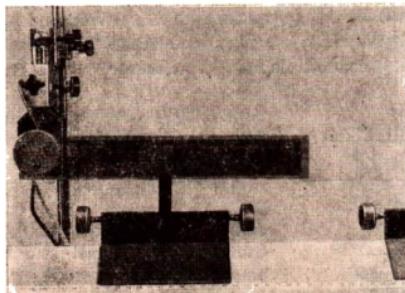


Abb. 5.2.10./1 Versuchsanordnung zum elastischen Stoß



wird zusätzlich mit Knetmasse beschwert, so daß beide gleiche Massen besitzen. Die Lichtschranke wird wie in V 4.5.2. beschrieben angeordnet und über den Schaltverstärker (Buchse ④) mit dem Polydigit verbunden. Da der Haltemagnet nicht an das Polydigit angeschlossen wird, sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich. Das Polydigit wird eingeschaltet und die Meßzeit 1 s vorgewählt.

### 1. Teilversuch: Elastischer Stoß gegen eine feste Wand

Die Lichtschranke wird auf der linken Seite der Bahn angeordnet. Es befindet sich nur der Schwebekörper mit Streifenblende auf der Bahn. Er wird an den Haltemagneten herangeschoben und der Staubsauger eingeschaltet. Bedingt durch den keramischen Magnet verharrt der Schwebekörper in dieser Lage. Jetzt wird die Morsetaste gedrückt. Der Schwebekörper bewegt sich nach rechts. Wenn die Streifenblende in die Lichtschrankenanordnung eingetreten ist, so wird auf die Taste „Messen“ am Polydigit gedrückt.

Nach Ablauf der vorgewählten Zeit (1 s) zeigt es die Geschwindigkeit an. Nach dem Ablesen wird erneut die Taste „Messen“ gedrückt und das Polydigit auf „0“ zurückgestellt. Inzwischen hat sich der Schwebekörper weiterbewegt, prallt auf den Magnet am rechten Ende der Bahn und bewegt sich wieder auf die Lichtschranke zu. Beim Passieren der Lichtschranke wird auf die gleiche Weise erneut die Geschwindigkeit gemessen.

Beide Geschwindigkeiten stimmen nahezu überein.

### 2. Teilversuch: Zentraler elastischer Stoß gegen einen ruhenden Schwebekörper gleicher Masse

Der Schwebekörper mit Streifenblende wird wieder an den Haltemagnet herangeschoben. Etwa in der Mitte der Bahn wird der zweite Schwebekörper angeordnet. Durch Drücken der Morsetaste setzt man in der oben beschriebenen Weise den ersten Schwebekörper in Bewegung und bestimmt dessen Geschwindigkeit. Er stößt mit dem zweiten Schwebekörper zusammen und kommt dabei zur Ruhe, während sich der zweite Schwebekörper mit etwa der gleichen Geschwindigkeit weiterbewegt.

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit des zweiten Schwebekörpers wird das Experiment wiederholt. Streifenblende und Knetmasse werden in ihrer Lage vertauscht. Die Lichtschranke stellt man am rechten Teil der Luftkissenbahn auf. In gleicher Weise wird jetzt die Geschwindigkeit des zweiten Schwebekörpers nach dem Stoß gemessen.

Beide Geschwindigkeiten stimmen nahezu überein.

### 3. Teilversuch: Zentraler elastischer Stoß gegen einen ruhenden Schwebekörper unterschiedlicher Masse

Die Durchführung des Experiments gleicht der im 2. Teilversuch. Zunächst besitzt der zweite Schwebekörper die größere Masse. Beim Stoß überträgt der erste nicht seine gesamte Energie auf den zweiten. Er prallt vom zweiten Schwebekörper zurück, so daß er nach dem Stoß einen entgegengesetzt gerichteten Impuls besitzt. Die Geschwindigkeit des ersten Schwebekörpers wird bei weit links stehender Lichtschranke zunächst vor dem Stoß gemessen, danach schnell die Meßbereitschaft des Polydigit wieder hergestellt und die Geschwindigkeit dieses Schwebekörpers nach dem Zurückprallen erneut ermittelt.

In einem zweiten Teilversuch wird bei rechts stehender Lichtschranke die Geschwindigkeit des zweiten Schwebekörpers bestimmt, nachdem diesem die Streifblende aufgesteckt wurde.

Beobachtung und Messung ergeben, daß die Geschwindigkeiten beider Schwebekörper nach dem Stoß geringer sind als die Geschwindigkeit des ersten Schwebekörpers vor dem Stoß. Besitzt der erste Schwebekörper eine größere Masse als der zweite, so überträgt er beim Stoß ebenfalls nicht seine gesamte Energie. Er folgt dem zweiten Schwebekörper nach dem Stoß mit geringerer Geschwindigkeit. Zunächst wird die Geschwindigkeit des ersten Schwebekörpers vor dem Stoß wie oben beschrieben gemessen. Danach wird die Lichtschranke auf der rechten Seite der Bahn angeordnet und in zwei weiteren Versuchsabläufen die Geschwindigkeit des zweiten und des ersten Schwebekörpers nach dem Stoß ermittelt.

Beobachtung und Messung ergeben, daß die Geschwindigkeit des ersten Schwebekörpers nach dem Stoß geringer ist als vorher. Demgegenüber ist die Geschwindigkeit des zweiten Schwebekörpers größer als die Geschwindigkeit des ersten vor dem Stoß. Bei großem Massenunterschied erreicht sie fast den doppelten Betrag. Die gewonnenen Meßergebnisse ermöglichen eine quantitative Auswertung gemäß den folgenden Gleichungen, die aus der Gültigkeit des Energie- und des Impulserhaltungssatzes folgen:

$$u_1 = v_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}$$

$$u_2 = v_1 \frac{2 m_1}{m_1 + m_2}.$$

Dabei sind  $v_1$  die Geschwindigkeit des ersten Schwebekörpers vor und  $u_1$  die Geschwindigkeit nach dem Stoß und  $u_2$  die Geschwindigkeit des zweiten Schwebekörpers nach dem Stoß.  $m_1$  und  $m_2$  sind die Massen des ersten und zweiten Schwebekörpers.

#### 4. Teilversuch: Zentraler unelastischer Stoß

Anstelle der Stecker mit Magneten wird an der Stelle, an der die beiden Schwebekörper aufeinanderprallen, an jedem eine Kugel aus Knetmasse von etwa 1 cm Durchmesser befestigt. Mit dieser Anordnung wird der zweite Teilversuch wiederholt.

Nach dem Stoß bewegen sich beide Schwebekörper mit der halben Geschwindigkeit des ersten Schwebekörpers vor dem Stoß.

Die analoge Durchführung der im 3. Teilversuch beschriebenen Experimente ermöglicht die Bestätigung der Gleichung für den unelastischen Stoß. Sie besitzt im Falle des zunächst ruhenden zweiten Schwebekörpers die einfache Form

$$u_{1,2} = \frac{m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2},$$

wobei  $v_1$  die Geschwindigkeit des ersten Körpers vor dem Stoß,  $u_{1,2}$  die gemeinsame Geschwindigkeit beider Schwebekörper nach dem Stoß ist.

#### Bemerkungen

1. Die Experimente können auch in halbquantitativer Form ohne Lichtschrankenanordnung und Polydigit durchgeführt werden.



2. Anstelle der Stecker mit keramischen Magneten können auch solche mit Ringfedern Einsatz finden. Die Abweichungen vom vollständig elastischen Stoß werden dadurch nur unwesentlich größer.
3. Die Experimente zum Stoß sind auch mit dem Luftkissentisch durchführbar (siehe 11. Teil, V 1.3.6.). Hierbei tritt jedoch in der Regel ein nichtzentraler Stoß auf. Um einen zentralen Stoß zu garantieren, können zwei Glasstäbe zu beiden Seiten der Schwebekörper angeordnet werden. Dazu werden zwischen ihren Enden Distanzstücke aus Holz gelegt, die etwas größer als der Durchmesser der Schwebekörper sind. Mittels je eines Gummiringes erreicht man, daß die Glasstäbe gegen die Distanzstücke gedrückt werden, so daß die gesamte Barriere die erforderliche Stabilität besitzt.

## 6. Drehbewegungen

### 6.0. Methodische Bemerkungen

**6.0.1.** Die Behandlung der Drehbewegung bleibt im Unterricht der allgemein-bildenden Schule im allgemeinen auf die *gleichförmige Kreisbewegung* beschränkt. Die Gesetze dieser Bewegungen können durch Analogiebetrachtungen und geeignete Experimente von den Gesetzen der gleichförmigen geradlinigen Bewegung abgeleitet werden.

Man kann die Drehbewegung von verschiedenen Standpunkten aus betrachten. Ein *Beobachter im ruhenden System* erkennt die Bewegung auf einer Kreisbahn (Abb. 6.0.1/1). Da sich jeder Körper nach dem 1. Newtonschen Gesetz in kräfte-freien Zustand gleichförmig geradlinig bewegt oder ruht, muß eine Kraft zum Zentrum der Kreisbahn hin wirken, die ihn auf die Kreisbahn zwingt. Man nennt diese Kraft *Radialkraft*  $F_R$ . Sie dient der Überwindung der Trägheit, man kann sie mit einem *Radialkraftmesser* ermitteln.

Reißt die Schnur, die den Körper mit dem Drehzentrum verbindet, dann hört die Radialkraft auf zu wirken und, wenn keine anderen Kräfte auf den Körper wirken, bewegt er sich kräftefrei, gleichförmig auf einer tangentialen Bahn weiter.

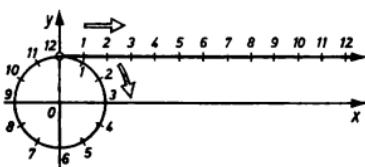


Abb. 6.0.1/1 Drehbewegung für einen Beobachter im ruhenden System.  
Der Körper bewegt sich auf einer Kreisbahn.

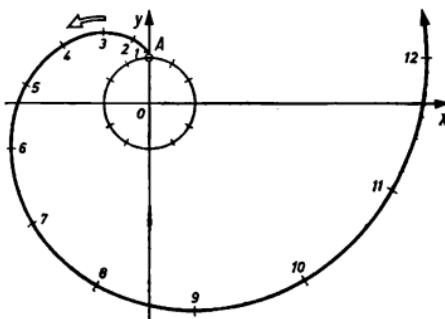


Abb. 6.0.1/2 Drehbewegung für einen mitrotierenden Beobachter.  
Der Körper befindet sich relativ zum rotierenden System in Ruhe.

Für einen *Beobachter im mitrotierenden System*, der sich in der Drehachse befindet, ist der Körper in Ruhe. An der Spannung der Schnur oder einem dazwischen geschalteten Kraftmesser erkennt er, daß der Körper mit einer Kraft an der Schnur von ihm weg zieht. Man nennt diese Kraft, die im mitrotierenden System auftritt, *Zentrifugalkraft* oder *Fliehkraft*. Ihr Betrag ist gleich dem der *Radialkraft*.

Wenn die Schnur reißt, dann bewegt sich der Körper für den weiterhin mit dem System rotierenden Beobachter zuerst in der Richtung der Zentrifugalkraft, also von ihm weg. Schon bald erkennt er aber, daß auch eine zweite Kraft jeweils senkrecht zur augenblicklichen Bewegungsrichtung zu wirken scheint, so daß eine *spirale Bahn*, eine *Kreisevolvente* entsteht (Abb. 6.0.1./2). Diese von der Seite her wirkende Scheinkraft heißt *Corioliskraft*.

Der Beobachter im ruhenden System kann weder die Wirkung der Zentrifugalkraft noch die der Corioliskraft erkennen. Für ihn bewegt sich der Körper, wie oben bereits beschrieben wurde, kräftefrei.

Auf die Erarbeitung einer klaren Vorstellung von den bei der Drehbewegung wirkenden Kräften sollte man besonderen Wert legen. Da bei fast allen im Unterricht ausführten Experimenten zur Drehbewegung der Beobachter ruht und nicht an der Rotation teilnimmt, wird die Betrachtung der Drehbewegung im ruhenden System im Vordergrund stehen. Man kann dabei je nach der Altersstufe verschiedene Wege einschlagen. So kann man z. B. von den Newtonschen Gesetzen ausgehen, wonach jeder Körper infolge der Trägheit eine gleichförmige geradlinige Bewegung ausführt oder in Ruhe verharrt, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt. Eine Kraft bewirkt bei einem beweglichen Körper eine Beschleunigung. Je nach der Kraftrichtung kann diese Beschleunigung zu einer Vergrößerung oder Verkleinerung des Betrages der Geschwindigkeit oder zusätzlich zu einer Richtungsänderung führen. Ein Sonderfall entsteht, wenn die beschleunigende Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung wirkt. Dann ändert sich nur die Richtung des Geschwindigkeitsvektors, nicht aber sein Betrag. Es entsteht die gleichförmige Kreisbewegung. Die beschleunigende Kraft muß dann die Richtung eines Radius der Kreisbahn haben, man nennt sie deshalb *Radialkraft*  $F_R$ . Sie bewirkt die *Radialbeschleunigung*  $a_R$ .

In der experimentellen Behandlung der gleichförmigen Kreisbewegung wird man sich vorwiegend auf qualitative Betrachtungen zur Trägheitswirkung an rotierenden Körpern beschränken und die Gleichung zur Berechnung der Radialkraft oder der Zentrifugalkraft induktiv herleiten. So kann man aus den Beobachtungen der Experimente V 6.1.2. bis V 6.1.5. schließen, daß die Radialkraft  $F_R$  proportional ist dem Produkt aus der Masse  $m$ , dem Quadrat der Drehzahl  $n$  und dem Bahnradius  $r$ :

$$F_R \sim m \cdot n^2 \cdot r.$$

Wenn man berücksichtigt, daß die Drehzahl  $n$  wiederum der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  proportional ist,

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n,$$

dann findet man für die Radialkraft die Proportionalität

$$F_R \sim m \cdot \omega^2 \cdot r \text{ bzw.}$$

mit dem Proportionalitätsfaktor 1 die Gleichung

$$F_R = m \cdot \omega^2 \cdot r.$$

## 6.0.1.

Für die Radialkraft erhält man dann die Einheit N. Wenn man im Experiment V 6.1.3., Variante b, die Drehzahl und den Kreisbahnradius bestimmt, dann kann man die Proportionalität von  $F_R$  und  $\omega^2 \cdot r$  für die konstante Masse  $m$  bestätigen. Mit dem als Unterrichtsmittel angebotenen Radialkraftmesser (Abb. 6.0.1./3) können die quantitativen Zusammenhänge aller Größen der Gleichung zur Berechnung der Radialkraft untersucht werden. Strenggenommen befindet sich die Meßeinrichtung bei diesen Experimenten im mitrotierenden System und mißt die Zentrifugalkraft. Von dieser schließt man auf die im ruhenden System wirkende Radialkraft.

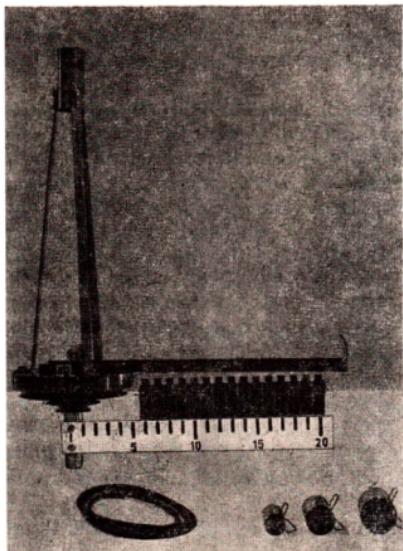


Abb. 6.0.1./3 Radialkraftmesser zur Herleitung der Bestimmungsgleichung für die Radialkraft

In den Versuchsbeschreibungen dieses Abschnitts wird als Antrieb für die Drehbewegung der Experimentiermotor EM 03 genannt. Er ist mit einem Unterstellungsgetriebe und einer stufenlosen Drehzahlregelung versehen. Er ist für Experimente zur Drehbewegung sehr gut geeignet. Statt dieses Motors können auch ältere Ausführungen in Verbindung mit einem Rädervorgelege und einem geeigneten Schiebewiderstand oder Drehpotentiometer zur Drehzahlregelung verwendet werden. Auch eine Schwingmaschine oder eine Handbohrmaschine mit Motor- oder Handantrieb sind dafür geeignet. Die Bohrmaschine spannt man dazu in einen Schraubstock ein (Abb. 6.0.1./4).

Gelegentlich wird die Meinung vertreten, man könne mit der *Kugelschwebe* die Abhängigkeit der Radialkraft von der Masse nachweisen. Dabei geht man davon aus, daß eine größere Masse auch eine größere Radialkraft erfordert, somit eine größere Gegenkraft hervorgerufen wird und demzufolge die Kugel mit der größeren Masse in der Kugelschwebe auch höher gehoben werden müsse. Das ist ein Trugschluß. Die Kugel mit der größeren Masse hat auch eine größere Gewichtskraft

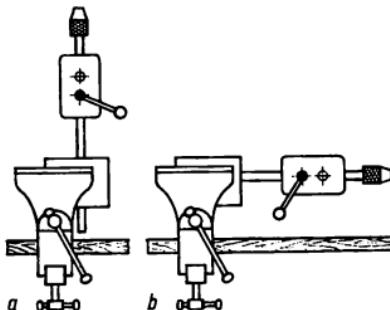


Abb. 6.0.1./4 Handbohrmaschine als Schwingmaschine: a) mit lotrechter, b) mit waagerechter Achse

als eine Kugel mit kleinerer Masse. Die Gewichtskraft ist der Masse direkt proportional:

$$F_g = m \cdot g$$

Die Resultierenden aus der Radialkraft und der Gegenkraft zur Gewichtskraft schließen deshalb bei konstanter Drehzahl mit der lotrechten Drehachse auch bei Kugeln mit unterschiedlichen Massen gleiche Winkel ein. Die verschiedenen Kugeln nehmen dadurch bei konstanter Drehzahl in der Kugelschwebe auch gleiche Höhenlagen ein (vgl. V 6.1.4.).

Am Ende dieses Abschnittes wurde ein Experiment zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Luftgewehrgeschosses aufgenommen. Es stellt eine interessante Variante der Ermittlung großer Geschwindigkeiten dar und bietet außerdem die Möglichkeit, in komplexer Weise eine größere Anzahl von Gesetzmäßigkeiten zu wiederholen und anzuwenden.

**6.0.2.** Die Behandlung des *Trägheitsmomentes* ist von fundamentaler Bedeutung, da erst mit der Einführung dieses Begriffes die bei einer Drehbewegung bestehenden dynamischen Beziehungen voll verständlich werden. Nach einem qualitativen Nachweis, daß die Trägheitswirkung rotierender Körper von ihrer Masse und deren Verteilung bezüglich der Drehachse abhängt (V 6.2.1. bis V 6.2.3.), kann man mit der Anordnung nach V 6.2.4. oder nach V 6.2.5. die Definition des Trägheitsmomentes begründen. Mit dem Reifenapparat kann man schließlich nach V 6.2.7. auch das Grundgesetz der Drehbewegung herleiten. Man sollte dabei nicht vergessen, Analogiebetrachtungen zur translatorischen Bewegung und ihren Gesetzen anzustellen.

Beim *Kreisel* muß man sich im Physikunterricht der allgemeinbildenden Schule auf grundlegende Erscheinungen und Zusammenhänge wie Beständigkeit der Kreiselachse und Reaktion des Kreisels auf einwirkende Kräfte beschränken. Daraus ergeben sich dann Erörterungen über die Anwendung des Kreisels als Schiffskreisel, im Kreiselkompaß, in Flugüberwachungsinstrumenten und zur Erklärung der Präzessionsbewegung der Erdachse.

## 6.1. Die gleichförmige Kreisbewegung

### 6.1.1. Trägheitswirkung auf das Wasser in einer Kanne

#### 1. Milchkanne

##### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment ist zur Einführung und Problemstellung gedacht.

##### *Versuch*

Man füllt eine mit Quergriff versehene Milchkanne ohne Deckel halb mit Wasser und schwingt sie mit ausgestrecktem Arm, so daß sie in einer vertikalen Ebene kreist. Das Wasser läuft infolge der Trägheit selbst dann nicht aus, wenn die Kanne mit ihrer Öffnung nach unten zeigt.

## 6.1.2. Nachweis der Radialkraft — Abhängigkeit vom Radius der Kreisbahn

1. Experimentiermotor mit Zubehör oder Schwungmaschine
2. Gerät zum Nachweis der Abhängigkeit der Radialkraft vom Radius der Kreisbahn

##### *Methodischer Hinweis*

1. Dieses Experiment gehört zu einer Reihe von Experimenten, die zur Herleitung der Gleichung zur Berechnung der Radialkraft nacheinander ausgeführt werden. Vergleiche dazu auch MB 6.0.1.!
2. Zur Veranschaulichung der für einen Beobachter im ruhenden System wirkenden Kräfte kann eine Tafelskizze nach Abbildung 6.1.2./1 dienen. Der Aufhängefaden zeigt in die Richtung der Resultierenden  $R$  aus der Radialkraft  $F_R$  und der Gegenkraft zur Gewichtskraft  $F'_G$ .

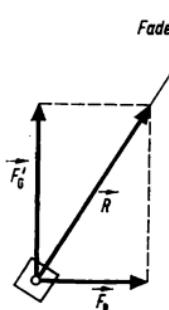


Abb. 6.1.2./1 Kräfte am rotierenden Körper für einen Beobachter im ruhenden System

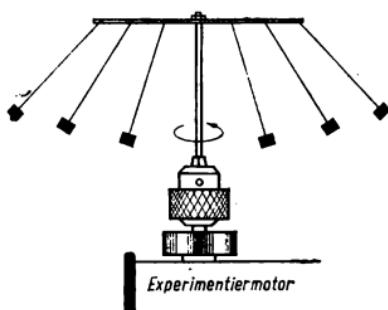


Abb. 6.1.2./2 Nachweis der Abhängigkeit der Radialkraft vom Radius der Kreisbahn

***Versuch***

Das Gerät zum Nachweis der Abhängigkeit der Radialkraft vom Radius der Kreisbahn besteht aus einer Leiste, die mit einem Stativstab als Stiel versehen ist. Symmetrisch zur Drehachse sind in verschiedenen Entfernung von ihr gleichartige Fadenpendel angebracht. Wird das Gerät in langsame Rotation gebracht (niedrigste Drehzahl des Experimentermotors), dann erkennt man am Ausschlagen der Pendel, daß der Betrag der Radialkraft mit dem Abstand von der Drehachse zunehmen muß (Abb. 6.1.2./2).

***Bemerkung***

Ist das Gerät nicht in der Lehrmittelsammlung vorhanden, so kann man es mit geringem Aufwand selbst herstellen. In einen Aluminiumblechstreifen von 30 cm Länge bohrt man in der Mitte ein Loch von 8 mm Durchmesser und in gleichmäßigen Abständen kleine Löcher für die Fäden der Pendel. Als Stiel benutzt man einen Stativstab ( $\varnothing$  nur 10 mm, aus SEG Mechanik), als Pendelkörper 10 g-Hakenkörper.

**6.1.3. Nachweis der Radialkraft — Abhängigkeit von der Drehzahl*****Zu Variante a***

1. Experimentermotor mit Zubehör oder Schwungmaschine
2. Wattsches Pendel

***Zu Variante b***

Geräte 1., außerdem

3. Radialkraftmesser
4. Drehzahlmesser

***Methodische Hinweise***

1. Dieses Experiment gehört zu einer Reihe von Versuchen, die zur Herleitung der Gleichung zur Berechnung der Radialkraft nacheinander ausgeführt werden. Vergleiche dazu auch MB 6.0.1. und MH Nr. 2, V 6.1.2.!
2. Das Wattsche Pendel hat geschichtliche Bedeutung als eine der ersten Regel-einrichtungen, als Drehzahlregler an Dampfmaschinen. Seine Wirkungsweise ist aus der Abbildung 6.1.3./2 zu ersehen.

***Variante a: Benutzung des Wattschen Pendels***

Bevor man das Wattsche Pendel in das Bohrfutter des Experimentermotors einsetzt, zeigt man den Schülern den Aufbau des Gerätes und weist nach, daß relativ große Kräfte erforderlich sind, um die beiden Pendelstangen bis zu einem Winkel von etwa  $60^\circ$  abzuspreizen. Einfach und überzeugend führt man diesen Nachweis, indem man das Gerät einem Schüler übergibt und ihn beauftragt, die Pendelkugeln der obigen Angabe entsprechend auseinanderzuziehen.

### • V 6.1.3.

Man setzt das Gerät in das Bohrfutter des Experimentiermotors oder auf die Achse der Schwungmaschine und steigert die Drehzahl allmählich. Es ist deutlich zu erkennen, daß der Ausschlag der Pendel und folglich auch die Radialkraft zunimmt (Abb. 6.1.3./1).

#### *Variante b: Benutzung des Radialkraftmessers*

Der Zeiger des Radialkraftmessers (Abb. 6.1.3./3) zeigt jeweils den Maximalwert der wirksamen Kraft an und geht nicht von selbst auf Null zurück. Er muß also vor jeder neuen Messung zurückgeschoben werden.

Man setzt das Gerät in das Bohrfutter des Experimentiermotors oder auf die Achse der Schwungmaschine und läßt es zuerst mit einer niedrigen Drehzahl kurze Zeit rotieren. Danach liest man den Betrag der Radialkraft ab und stellt den Zeiger auf Null. Das Experiment wird mehrfach wiederholt und dabei jedesmal die Drehzahl um etwa den gleichen Betrag gesteigert. Man erkennt, daß die Radialkraft mit zunehmender Drehzahl größer wird. Wenn man das Experiment sorgfältig ausführt, kann man erkennen, daß zwischen der Radialkraft und der Drehzahl keine lineare Proportionalität besteht, sondern die Beziehung

$$F_R \sim n^2$$

gelten muß.

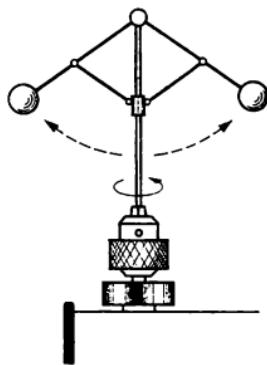


Abb. 6.1.3./1 Watt'sches Pendel

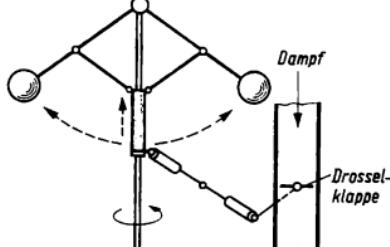


Abb. 6.1.3./2 Watt'sches Pendel  
als Drehzahlregler

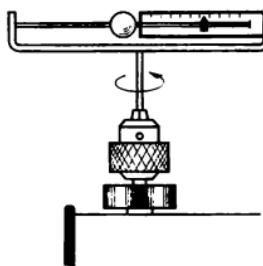


Abb. 6.1.3./3 Radialkraftmesser

**Bemerkungen**

1. Im Experiment der Variante b sind exaktere Messungen möglich, wenn man die Drehzahl des Gerätes mit dem Demonstrationstachometer bestimmt. Man muß bei Berechnungen dann aber auch berücksichtigen, daß mit zunehmender Radialkraft, mit zunehmender Dehnung der Feder des Kraftmessers auch der Abstand des rotierenden Körpers von der Drehachse wächst.
2. Bei der Verwendung der neuen Ausführung des Radialkraftmessers (Abb. 6.0.1./3) kann man durch Heben oder Senken des in der Drehachse angebrachten Kraftmessers den Bahnradius verändern. Als rotierender Körper kann wahlweise eine von drei Walzen mit unterschiedlichen Massen eingesetzt werden.

### 6.1.4. Nachweis der Radialkraft mit der Kugelschwebe — Abhängigkeit von der Drehzahl

1. Experimentiermotor mit Zubehör oder Schwungmaschine
2. Kugelschwebe mit den dazugehörigen Kugeln

**Methodische Hinweise**

1. Bei diesem Experiment sind die physikalischen Zusammenhänge nicht so leicht zu überschauen wie im V 6.1.3. Deshalb ist die Kugelschwebe für die Herleitung der Gleichung zur Berechnung der Radialkraft nicht so gut geeignet wie das Wattsche Pendel oder der Radialkraftmesser.
2. Die Kugelschwebe wird mitunter auch zum Nachweis der Abhängigkeit der Radialkraft von der Masse angegeben. Vergleiche dazu MB 6.0.1.!
3. Als Anwendungsbeispiele können Kurvenüberhöhungen bei Straßen und Rennbahnen genannt werden.

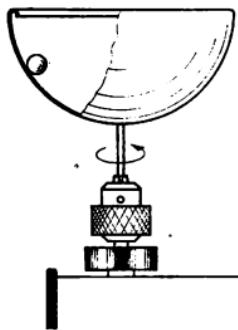


Abb. 6.1.4./1 Kugelschwebe

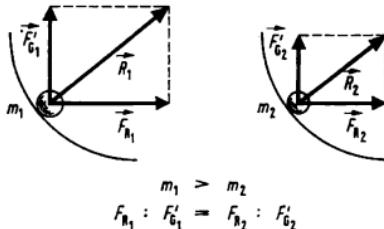


Abb. 6.1.4./2 Kraftwirkungen an Körpern verschiedener Masse bei konstanter Drehzahl

**Versuch**

Die Kugelschwebe besteht aus einer halbkugelförmigen Glasschale, die mit ihrem Stiel in das Bohrfutter des Experimentiermotors oder in die Achse der Schwung-

maschine eingesetzt und zur Rotation gebracht wird. Zum Zubehör gehören je drei Kugeln unterschiedlicher Größe aus Holz, Aluminium und Stahl.

Legt man eine beliebige Kugel in die Schale und versetzt das Gerät in Rotation, dann rotiert die Kugel mit und wird um einen bestimmten Betrag gehoben (Abb. 6.1.4./1). Erhöht man die Drehzahl, dann entfernt sich die Kugel weiter vom Fußpunkt der Schale, sie rotiert in einer höheren Lage.

Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß die Kugel relativ zur Schale nur dann in Ruhe ist, wenn die Resultierende aus der Radialkraft und der Gegenkraft zur Gewichtskraft senkrecht auf der Tangentialebene an die Kugelfläche steht (Abb. 6.1.4./2). Wenn die Kugel bei einer höheren Drehzahl eine höhere Lage einnimmt, kann daraus gefolgert werden, daß mit der Drehzahl auch die Radialkraft zugenommen hat. Daß sie proportional dem Quadrat der Drehzahl ist, kann in diesem Experiment nicht nachgewiesen werden. Auf die Tatsache, daß mit zunehmender Höhenlage der Kugel auch der Abstand von der Drehachse wächst, braucht man im Unterricht nicht unbedingt einzugehen, weil die Zusammenhänge für die Schüler dann im allgemeinen zu unübersichtlich werden.

Legt man mehrere Kugeln unterschiedlicher Größe oder aus unterschiedlichem Material in die Schale, dann nehmen sie bei konstanter Drehzahl jeweils etwa die gleiche Höhenlage ein. Sie haben zwar unterschiedliche Massen und damit auch unterschiedliche Radialkräfte, der größeren Masse entspricht aber nicht nur eine größere Radialkraft, sondern auch eine größere Gewichtskraft. Die Richtung der Resultierenden aus der Radialkraft und der Gegenkraft zur Gewichtskraft ändert sich bei einer Veränderung der Masse nicht (Abb. 6.1.4./2).

#### *Bemerkung*

Wenn der Rand der halbkugelförmigen Glasschale nicht wulstartig verstärkt oder nach innen umgebördelt ist, besteht die Gefahr, daß die Kugeln über den Rand der Schale gehoben und fortgeschleudert werden. Diese Gefahr besteht nicht, wenn man die Drehzahl nur allmählich steigert.

### **6.1.5. Nachweis der Radialkraft — Abhängigkeit von der Masse.**

1. Experimentiermotor mit Zubehör oder Schwungmaschine
2. Gerät zum Nachweis der Abhängigkeit der Radialkraft von der Masse

#### *Methodische Hinweise*

1. Dieses Experiment dient zusammen mit V 6.1.3. und V 6.1.4. zur Herleitung der Gleichung zur Berechnung der Radialkraft. Es sollte möglichst erst nach V 6.1.3. ausgeführt werden, weil hier als bekannt vorausgesetzt werden muß, daß die Radialkraft dem Abstand von der Drehachse proportional ist.
2. Häufig wird als Gerät zum Nachweis der Abhängigkeit der Radialkraft von der Masse auch die *Kugelschwebe* genannt. Dieses Gerät ist dazu jedoch nicht geeignet. Vergleiche dazu MB 6.0.1.!

#### *Versuch*

Das Gerät besteht aus einem Rähmchen mit einem waagerechten Stab, auf dem zwei zylindrische Metallstücke mit dem Massenverhältnis von 2:1 leicht ver-

schiebbar angebracht sind. Sie sind durch einen Faden miteinander verbunden. Das Rähmchen ist zum Einsetzen in das Bohrfutter der Schwungmaschine mit einem Stiel versehen (Abb. 6.1.5./1).

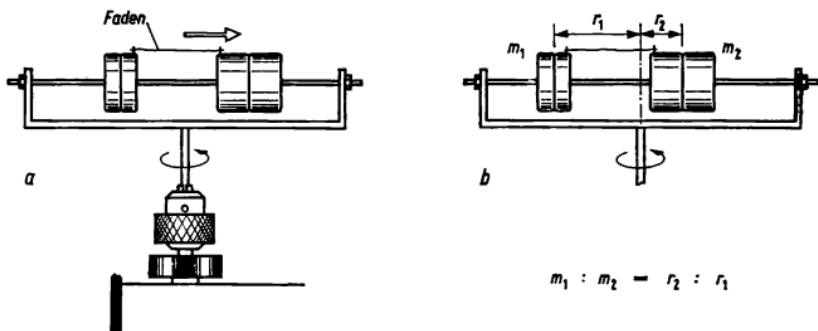


Abb. 6.1.5./1 Gerät zum Nachweis der Abhängigkeit der Radialkraft von der Masse: a) Bei gleicher Entfernung der Massenmittelpunkte von der Drehachse werden bei Rotation die Metallzylinder nach der Seite des größeren gezogen. b) Wenn sich die Abstände von der Drehachse umgekehrt verhalten wie die Massen, dann halten sich die Radialkräfte das Gleichgewicht.

Man ordnet zunächst die beiden Metallzylinder so an, daß ihre Massenmittelpunkte gleich weit von der Drehachse entfernt sind (Abb. 6.1.5./1a) und bringt das Gerät mit einem Experimentiermotor oder einer Schwungmaschine in Rotation. Beide Zylinder werden zur Seite des größeren hingezogen, ein Zeichen dafür, daß am Körper mit der größeren Masse eine größere Radialkraft wirksam sein muß, um ihn auf seiner Bahn zu halten. Nur dann, wenn der Abstand des kleineren Körpers von der Drehachse doppelt so groß ist wie der des größeren, behalten beide Körper auch bei schneller Rotation ihre Stellung auf dem Stab (Abb. 6.1.5./1b). Die Radialkräfte halten einander dann das Gleichgewicht. Wenn man voraussetzen kann, daß die Radialkraft dem Abstand von der Drehachse, dem Bahnradius, proportional ist, dann kann man daraus folgern, daß die Radialkraft auch der Masse direkt proportional ist. Es ist also  $F_R \sim m$ .

## 6.1.6. Abplattung einer deformierbaren Kugel durch Rotation

1. Experimentiermotor mit Zubehör oder Schwungmaschine
2. Abplattungerring

### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment dient in erster Linie dazu, die Entstehung der Abplattung der Erde und anderer Planeten durch Rotation zu erklären. Da wir an der Rotation der Erde teilnehmen, ist es sinnvoll, das Experiment vom Gesichtspunkt des mitrotierenden Beobachters aus zu betrachten.

**Versuch**

Das Gerät besteht aus zwei rechtwinklig zueinanderstehenden elastischen Metallstreifen, die um eine gemeinsame Achse gedreht werden. Da die Metallringe nur oben oder unten fest mit der Achse verbunden sind, entsteht bei der Rotation durch die Zentrifugalkräfte das bekannte Rotationsellipsoid (Abb. 6.1.6./1).

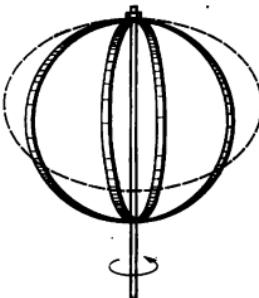


Abb. 6.1.6./1 Abplattungsring. Bei Rotation entsteht das gestrichelt eingezeichnete Rotationsellipsoid.

**6.1.7. Modell einer Zentrifuge**

1. Experimentiermotor mit Zubehör oder Schwungmaschine
2. Modell einer Zentrifuge

**Versuch**

Das Modell der Zentrifuge (Abb. 6.1.7./1) besteht aus einem Rahmen, in dem zwei Reagenzgläser übereinander angebracht sind. Der Rahmen ist mit einem Stiel zum Einsetzen in das Bohrfutter des Experimentiermotors oder in die Achse der Schwungmaschine versehen. Die Reagenzgläser sind zur Drehachse hin leicht geneigt. In dem einen befindet sich eine Wachskugel und in dem anderen eine Hornkugel. Vor dem Experiment werden die Reagenzgläser mit Wasser gefüllt und mit den zugehörigen Gummistopfen verschlossen.

In der Ruhestellung schwimmt die Wachskugel, sie steigt in das höher gelegene Ende des Reagenzglases. Die Hornkugel sinkt in das tieferliegende Ende ihres Glases. Versetzt man das Gerät in Rotation, dann vertauschen die Kugeln ihre Positionen, die Hornkugel wandert nach außen, von der Drehachse weg, die Wachskugel nach innen, zur Drehachse hin.

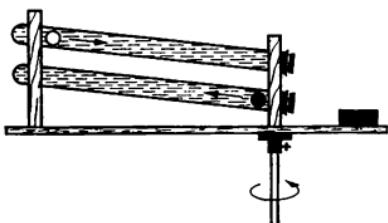


Abb. 6.1.7./1 Modell einer Zentrifuge. Die Reagenzgläser werden vor dem Experiment mit Wasser gefüllt.



Abb. 6.1.7./2 Älteres Modell einer Zentrifuge. Die Reagenzgläser werden vor dem Experiment mit einer Aufschlämmung von Kreide und Wasser gefüllt.



### Bemerkung

In älteren Lehrmittelsammlungen befinden sich Modelle der Zentrifuge mit zwei schwenkbar aufgehängten Reagenzgläsern (Abb. 6.1.7./2). Sie entsprechen in ihrer Form den in der Chemie und Medizin üblichen Zentrifugen. Man füllt die Reagenzgläser mit einer Suspension von Kreide und Wasser. Bei rascher Rotation setzt sich die Kreide in wenigen Sekunden auf dem Boden des Gefäßes ab. Die Suspension kann mit Schlämmkreide oder mit geschabter Wandtafelkreide hergestellt werden.

### 6.1.8. Verteilung einer Flüssigkeit in einem rotierenden kugelförmigen Gefäß

1. Experimentiermotor mit Zubehör oder Schwungmaschine
2. kugelförmige Flasche mit Stiel
3. Fluoreszein oder anderer Farbstoff

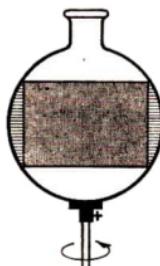


Abb. 6.1.8./1 Verteilung einer Flüssigkeit in einer rotierenden kugelförmigen Flasche

### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment macht verständlich, warum Ozeane vorwiegend in der Äquatorzone der Erde zu finden sind. Da wir an der Rotation der Erde teilnehmen, ist es sinnvoll, das Experiment vom Gesichtspunkt des mitrotierenden Beobachters aus zu betrachten.

### Versuch

Man füllt eine geringe Menge angefärbten Wassers in die Flasche und versetzt sie in Rotation. Das Wasser sammelt sich infolge der Zentrifugalkraft in der Äquatorzone der Kugel (Abb. 6.1.8./1).

### 6.1.9. Oberfläche einer rotierenden Flüssigkeit

1. Experimentiermotor mit Zubehör oder Schwungmaschine
2. Flasche mit Stiel
3. Fluoreszein oder anderer Farbstoff

### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment ist besonders für die Abiturstufe geeignet, weil es ein interessantes Beispiel für die Anwendung der Mathematik zur Untersuchung physikalischer Zusammenhänge darstellt.

2. Man kann die Zusammenhänge auch vom Standpunkt des ruhenden Beobachters aus darstellen. Statt der Zentrifugalkraft und der Gewichtskraft stellt man ähnlich wie in Abbildung 6.1.2./1 die Radialkraft und die Gegenkraft zur Gewichtskraft dar.

### Versuch

Die Flasche wird in das Bohrfutter des Experimentiermotors oder in die Achse der Schwungmaschine eingesetzt, etwa halb mit gefärbtem Wasser gefüllt und in Rotation versetzt. Man steigert die Drehzahl allmählich, bis die Wasseroberfläche die in der Abbildung 6.1.9./1 dargestellte Form eines Rotationsparaboloids angenommen hat.

Zur mathematischen Auswertung stellt man folgende Überlegung an:

In der Abbildung 6.1.9./2 ist ein Schnitt durch das Gefäß mit der rotierenden Flüssigkeit dargestellt. Die Rotation erfolgt um die  $y$ -Achse. Man betrachtet ein Teilchen an der Flüssigkeitsoberfläche mit der Masse  $m$ . Es hat die Koordinaten  $x$  und  $y$ . Bei der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  wirken auf dieses Teilchen

$$\text{die Gewichtskraft} \quad F_G = m \cdot g$$

$$\text{und die Zentrifugalkraft} \quad F_z = m \cdot \omega^2 \cdot x.$$

Die Flüssigkeitsoberfläche verläuft an jeder Stelle senkrecht zur Resultierenden dieser beiden Kräfte. Auf den Schnitt durch die rotierende Flüssigkeit (Abb. 6.1.9/2) bezogen bedeutet das, daß die Resultierende senkrecht auf der Tangente an die Schnittkurve der Flüssigkeitsoberfläche stehen muß. Der Anstiegswinkel  $\alpha$  der Tangente tritt auch im Kräfteparallelogramm auf. Es ist der Winkel zwischen der Gewichtskraft  $F_G$  und der Resultierenden  $F_R$ . Es ist

$$\tan \alpha = \frac{F_z}{F_G} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot x}{m \cdot g} = \frac{\omega^2 \cdot x}{g}.$$

Der Tangens des Anstiegswinkels ist gleich der ersten Ableitung der Funktion

$$\tan \alpha = \frac{dy}{dx}.$$

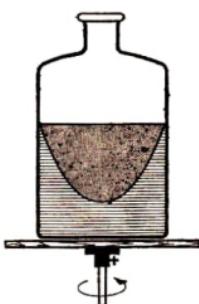


Abb. 6.1.9./1 Verteilung einer Flüssigkeit in einer Flasche. Die Flüssigkeitsoberfläche bildet ein Rotationsparaboloid.

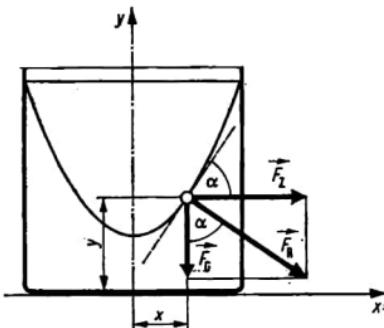


Abb. 6.1.9./2 Achsenschnitt durch eine rotierende Flüssigkeit

Folglich ist

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\omega^2 \cdot x}{g}.$$

Durch die Umkehrung der Rechenoperation, durch Integration, muß sich demnach die Funktion der Schnittkurve ergeben

$$y = \int \frac{\omega^2 \cdot x}{g} \cdot dx = \frac{\omega^2}{2g} \cdot x^2 + C.$$

Dies ist die Gleichung einer Parabel, deren Parameter dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit proportional ist. Die Integrationskonstante  $C$  stellt die Höhe des Scheitels der Parabel über dem Koordinatenursprung dar.

### 6.1.10. Strömungen in einer rotierenden Flüssigkeit

1. Flache Glasschale
2. Papierschnitzel
3. Glasstab

#### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment könnte auch in die Strömungslehre eingeordnet werden. Zur Erklärung der Erscheinungen muß man die Reibung zwischen der Flüssigkeit und den Gefäßwänden heranziehen.

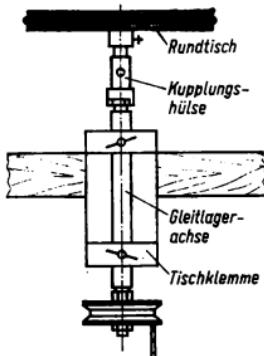


Abb. 6.1.10./1 Drehscheibe aus Teilen des Präzisionsstativmaterials

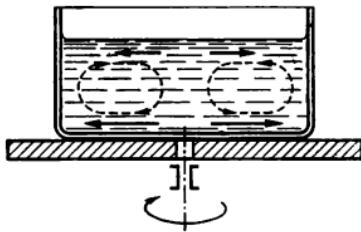


Abb. 6.1.10./2 Flüssigkeit in einem Gefäß auf rotierender Unterlage

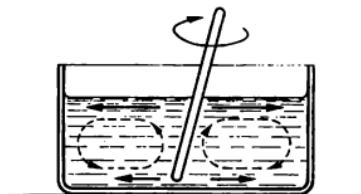


Abb. 6.1.10./3 Flüssigkeit in einem Gefäß, durch Umrühren in Rotation versetzt

**Versuch 1: Strömung im rotierenden Gefäß**

Auf einer Drehscheibe, die man aus Stativmaterial zusammenbaut (Abb. 6.1.10./1), stellt man eine mit Wasser gefüllte Glasschale. Versetzt man sie mit der Hand in langsame Drehung, so werden beim Beginn der Drehbewegung die Wasserteilchen in der Nähe des Bodens mitgenommen. Die Bewegung überträgt sich infolge der inneren Reibung in der Flüssigkeit allmählich von unten nach oben. Die auftretenden Fliehkräfte sind infolgedessen am Boden zunächst stärker als an der Oberfläche. Demzufolge entstehen, solange die Flüssigkeit noch nicht stationär rotiert, am Boden Strömungen von der Mitte zum Rande hin. Sie können durch eingebrachte Papierschnitzel leicht sichtbar gemacht werden (Abb. 6.1.10./2).

**Versuch 2: Strömung im ruhenden Gefäß**

Versetzt man die Flüssigkeit durch Rühren mit einem Glasstab in Umdrehung, so nimmt die Geschwindigkeit infolge der Reibung der Flüssigkeit am Boden von oben nach unten allmählich ab. An der Oberfläche überwiegen die nach außen gerichteten Fliehkräfte. Die Flüssigkeit strömt infolgedessen am Boden zur Mitte hin; die Papierschnitzel sammeln sich in der Mitte (Abb. 6.1.10./3). Vergleiche das Verhalten der Teeblätter in einer Tasse beim Umrühren.

### **6.1.11. Drehzahlmessung mit einem Zählwerk**

1. Experimentiermotor mit Zubehör
2. mechanisches Zählwerk (z. B. aus dem Gerätesatz zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents)
3. Stoppuhr

**Methodischer Hinweis**

Zur Drehzahlmessung wird im Unterricht meist das Demonstrationstachometer verwendet. Es ist ein Wirbelstromtachometer und zeigt die Drehzahl unmittelbar an. Die Anzeige ist mit systematischen Fehlern behaftet. Muß bei einem Vorgang die Anzahl der Umdrehungen exakt bestimmt werden, z. B. in einem Wechselstromzähler, dann reicht die Genauigkeit des Wirbelstromtachometers nicht aus. An seiner Stelle werden mechanische Zählwerke mit springenden Ziffern eingesetzt. Schließt man das Zählwerk und das Demonstrationstachometer gleichzeitig an den Experimentiermotor an, dann kann man die Genauigkeit der Anzeige des Tachometers überprüfen.

**Versuch**

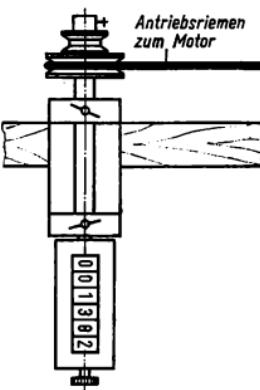
Das zum Gerätesatz zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents gehörende Zählwerk wird mit einer Gummikupplung an eine Gleitlagerachse angeschlossen, auf deren anderes Ende eine Schnurscheibe geschraubt wird. Die Gleitlagerachse wird in lotrechter Lage mit einer Tischklemme an der Kante des Experimentierstisches festgeschraubt. Mit einem Gummiringen koppelt man das Gerät mit einem Experimentiermotor. Vor der Messung stellt man das Zählwerk auf Null (Abb. 6.1.11./1).

Zur Messung der Drehzahl wird gleichzeitig mit dem Ein- und Ausschalten des Motors die Stoppuhr betätigt. Die Drehzahl ergibt sich als Quotient aus der vom Zählwerk angezeigten Anzahl der Umdrehungen und der von der Stoppuhr angezeigten Zeit.

#### Bemerkungen

1. Der Gerätesatz zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents nach Wildermuth wird in den Unterrichtsmittelsammlungen gewöhnlich in zusammengebautem Zustand nach Art eines Kompaktgerätes aufbewahrt, so daß sich der Zusammenbau für dieses Experiment erübrigt.
2. Bei anderen mechanischen Zählwerken endet die herausragende Antriebswelle meist in einem Gummipuffer, mit dem man das Gerät genau zentrisch gegen die flache Stirnseite einer rotierenden Welle drückt. Endet sie in einer Dreikantspitze, dann hält man diese zur Messung gegen den angekörnten Mittelpunkt der rotierenden Welle.

Abb. 6.1.11./1 Messung der Drehzahl eines Experimentiermotors



## 6.1.12. Drehzahlmessung mit der stroboskopischen Scheibe

#### Zu Variante a

1. Experimentiermotor mit Zubehör
2. stroboskopische Scheibe mit Schlitzten ⑧
3. Glimmlampe mit Vorwiderstand

#### Zu Variante b

Gerät 1., außerdem

4. stroboskopische Scheibe mit schwarzen und weißen Sektoren
5. Leuchtstoffröhre (auch als Zimmerbeleuchtung)

#### Methodische Hinweise

1. Das stroboskopische Verfahren eignet sich zur Drehzahlbestimmung rotierender Körper. Es hat den Vorteil, daß die Rotation selbst dadurch nicht behindert wird. Man kann den Schülern die Wirkungsweise der stroboskopischen Methode leicht erklären, indem man im leicht abgedunkelten Raum die Scheibe mit den schwarzen und weißen Sektoren langsam mit der Hand dreht und dabei jeweils im geeigneten Augenblick mit einer Experimentierleuchte oder einer Taschenlampe beleuchtet. Man zeigt, daß bei einer bestimmten Drehzahl die Scheibe scheinbar stillsteht oder langsam vor- bzw. rückläufig rotiert.
2. Schließt man an den Experimentiermotor gleichzeitig das Demonstrationstachometer an, dann kann man die Genauigkeit der Anzeige dieses Gerätes kontrollieren.

3. In der Variante b kann sowohl bei der stroboskopischen Scheibe mit mehreren konzentrischen Ringen wie auch bei der Zylinderfläche der Fall eintreten, daß sich zwei Ringe gleichzeitig in entgegengesetztem Sinne zu drehen scheinen. Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, daß man aus dem beobachteten Drehsinn eines Ringes nicht voreilig auf den Drehsinn der Scheibe schließen darf. Zu einem einwandfreien Urteil über die Bewegung der Scheibe kommt man erst, wenn man alle mitwirkenden Umstände berücksichtigt. Es sind dies der Einfluß der Beleuchtung und die psychologischen Vorgänge bei der Verarbeitung der uns durch die Sinne vermittelten Eindrücke.

*Variante a: Benutzung einer stroboskopischen Scheibe mit radialen Schlitzten*

Die stroboskopische Scheibe kann man aus Pappe schneiden. Ihr Durchmesser beträgt etwa 20 cm, die Schlitzte haben eine Breite von etwa 2 cm und eine Länge von etwa 4 cm. Die Scheibe kann einen oder mehrere Schlitzte haben.

Man versieht sie mit einem Achszapfen und setzt sie in das Bohrfutter des Experimentiermotors ein. Den Motor befestigt man an einem Stativ, so daß die Scheibe vertikal steht. Über dem Motor bringt man hinter der Scheibe in der Höhe der Schlitzte eine Glimmlampe mit Vorwiderstand an.

Legt man an die Glimmlampe die Netzwechselspannung an und betrachtet sie durch einen Schlitz der stillstehenden Scheibe, dann scheinen beide Elektroden mit Glimmlicht überzogen zu sein. Das ist auch der Fall, wenn man die Scheibe mit einer sehr großen Drehzahl rotieren läßt. Verringert man die Drehzahl allmählich, dann wechselt die Glimmlichtbedeckung erst rasch, dann immer langsamer, bis bei einer bestimmten Drehzahl nur eine Elektrode mit Glimmlicht überzogen zu sein scheint. Verringert man die Drehzahl weiter, so wiederholt sich diese Erscheinung noch mehrfach.

Bezeichnet man die Frequenz der Wechselspannung mit  $f$ , die Anzahl der Schlitzte mit  $a$ , dann kann man die Drehzahl  $n$  nach der Gleichung

$$n = \frac{f}{k \cdot a}$$

errechnen. Der Faktor  $k$  kann die Werte 1, 2, 3, 4 usw. annehmen. Beobachtet man bei der Verringerung der Drehzahl die Glimmlichtbedeckung an einer Elektrode allein zum ersten Male, ist  $k = 1$ , beim zweiten Male  $k = 2$  usw.

In der folgenden Tabelle S. 309 sind einige Drehzahlen für Scheiben mit einem, mit zwei und mit vier Schlitzten zusammengestellt.

Die Tabelle zeigt, daß für hohe Drehzahlen eine Scheibe mit nur einem Schlitz, für niedrige Drehzahlen dagegen Scheiben mit mehreren Schlitzten zu empfehlen sind.

*Variante b: Benutzung einer Sektorenscheibe*

Die stroboskopische Scheibe besteht ebenfalls aus Pappe. Sie hat einen Durchmesser von 20 cm bis 30 cm. Man teilt sie in 2, 4, 6, 8, 10 oder mehr Sektoren und gestaltet diese abwechselnd schwarz und weiß (Abb. 6.1.12./1).

Die Scheibe wird mit einem Achszapfen versehen und in das Bohrfutter des Experimentiermotors eingesetzt. Man beleuchtet sie im verdunkelten Zimmer mit einer Leuchtstoffröhre. Am Experimentermotor stellt man zuerst die höchste Drehzahl ein und verringert sie allmählich.

Anzahl der Schlitze $a$	Faktor $k$	Drehzahl $n$	
		in $\text{s}^{-1}$	in $\text{min}^{-1}$
1	1	50	3000
1	2	25	1500
1	3	16,67	1000
1	4	12,5	750
1	5	10	600
2	1	25	1500
2	2	12,5	750
2	3	8,33	500
2	4	6,25	375
2	5	5	300
4	1	12,5	750
4	2	6,25	375
4	3	4,17	250
4	4	3,125	188
4	5	2,5	150

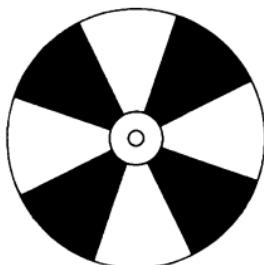


Abb. 6.1.12./1 Stroboskopische Scheibe mit vier Sektorenpaaren

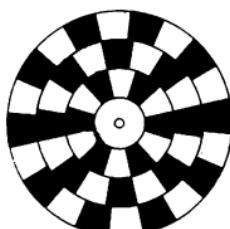


Abb. 6.1.12./2 Stroboskopische Scheibe mit drei Ringen



Abb. 6.1.12./3 Stroboskopische Zylinderfläche (aufgerollt) mit drei Streifen. Die scheinbare Krümmung der Grenzlinien zwischen den Streifen beruht auf Irradiation und ist eine optische Täuschung.

Bei einer Wechselspannung mit der Frequenz von 50 Hz leuchtet die Röhre in der Sekunde hundertmal auf. Hat die Scheibe nur einen schwarzen und einen weißen Halbkreis, so scheint sie stillzustehen, wenn sie in der Sekunde 100 Umdrehungen vollführt. Enthält sie  $a$  Paare von schwarz-weißen Sektoren, so tritt der scheinbare Stillstand bei  $\frac{100}{a}$  Umdrehungen je Sekunde ein. Dreht sich die Scheibe etwas schneller, so laufen die Sektoren in der Drehrichtung mehr oder weniger langsam

um. Macht die Scheibe weniger als  $\frac{100}{a}$  Umdrehungen je Sekunde, so erscheint die Bewegung der Sektoren rückläufig. Die Messung spielt sich in der Regel so ab, daß man den Umlauf der Drehachse regelt, bis die Sektoren still zu stehen scheinen. In diesem Fall ist die Drehzahl  $n = \frac{100}{a}$ . Wird dieser Zustand nicht ganz erreicht, so ermittelt man die Anzahl der scheinbaren Umläufe der Sektoren je Sekunde. Finden in  $t$  Sekunden  $b$  scheinbare Umläufe statt, so ist die Drehzahl

$$n = \frac{100}{a} \pm \frac{b}{t},$$

je nachdem, ob die Bewegung der Sektoren vor- oder rückläufig erfolgt.

#### *Bemerkungen*

1. Für viele Zwecke empfiehlt es sich, die stroboskopischen Marken in mehreren konzentrischen Ringen anzurichten, die sich in der Anzahl der Sektoren um gleiche Stufen unterscheiden (Abb. 6.1.12./2). Die Marken werden auf die Scheibe gezeichnet oder aus schwarzem Papier ausgeschnitten und auf die Scheibe geklebt.
2. Werden die stroboskopischen Marken auf dem Mantel eines Zylinders angebracht, so treten an die Stelle der Sektoren rechteckige Streifen (Abb. 6.1.12./3).
3. Steht ein Lichtblitzstroboskop mit regelbarer Frequenz zur Verfügung (z. B. das digitale Vielfachmeßgerät „impo 8“ Abbildung 4.0.1./6 mit Zubehör), dann vereinfacht sich das Verfahren. Man beleuchtet den rotierenden Körper mit der niedrigsten Blitzfrequenz und steigert die Frequenz allmählich. Scheint der rotierende Körper zum ersten Male stillzustehen, dann ist die Stroboskopfrequenz gleich der Drehzahl des rotierenden Körpers.

## **6.1.13. Drehzahlmessung mit dem Digitalzähler Polydigit**

1. Experimentiermotor mit Zubehör
2. Polydigit
3. Lichtschrankenanordnung
4. Stromversorgungsgerät für Niederspannung
5. Impulsscheibe
6. Schraube M 6 × 30 mit Mutter

#### *Methodische Hinweise*

1. Vergleiche MB 4.0.2., „Drehzahlmessungen“!
2. Dieses Verfahren hat den Vorzug, daß durch die Messung die Bewegung des rotierenden Körpers nicht beeinflußt wird und die Drehzahl durch den Digitalzähler in Umdrehungen je Sekunde oder je Minute direkt angezeigt wird, und eine Umrechnung nicht erforderlich ist.

#### *Versuch*

Die Impulsscheibe (Abb. 4.0.2./15) wird mit einer kurzen Welle versehen und im Bohrfutter des Experimentiermotors befestigt. Als Welle eignet sich eine Schraube M 6 mit Mutter. Eine Lichtschranke wird so angebracht, daß der Lichtstrom einen

der drei Teilkreise durchsetzt. Die am Geber der Lichtschranke angebrachte Blende wird vor die Lichteintrittsöffnung geschwenkt. Bei der Messung soll der Geber möglichst dicht an der Impulsscheibe sein. An die Lampe wird eine Spannung von 6 V angelegt. Den Geber schließt man an den Eingang 1 des Schaltverstärkers an. Der Schaltverstärker wird auf „Impuls“, „Dunkel“ und „Schranke 1“ geschaltet und an die Buchse ① des Polydigit angeschlossen. Das Polydigit wird eingeschaltet und die Taste „1,0 s“ gedrückt. Bei Betätigung der Taste „Messen“ wird das Tor für 1 s geöffnet, und die in dieser Zeit von der Lichtschranke erfaßten Impulse werden vom Polydigit angezeigt.

Ist dabei die Lichtschranke auf den inneren Teilkreis (1 Impuls je Umdrehung) eingestellt, erfolgt die Angabe der Drehzahl in Umdrehungen je Sekunde. Bei der Verwendung des mittleren Teilkreises (60 Impulse je Umdrehung) wird die Anzahl der Umdrehungen mit 60 vervielfacht und somit die Anzahl der Umdrehungen je Minute angezeigt. Der äußere Teilkreis (100 Impulse je Umdrehung) wird dann angewendet, wenn die Rotation sehr langsam erfolgt. Die Anzeige des Polydigit gibt bei der Zeitbasis von einer Sekunde Hunderstel Umdrehungen je Sekunde an.

#### ***Bemerkungen***

1. Zur Verwendung der Lichtschrankenanordnung mit Impulsscheibe zur Geschwindigkeitsmessung am Bandgerät vergleiche MB 2.0.4. „Drehzahlmessung“.
2. Die Tasten „1,0 s“ und „0,1 s“ dürfen nicht gleichzeitig gedrückt werden, da sonst der Impulsaufbaustein des Polydigit zerstört wird.

### **6.1.14. Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit**

1. Kreisförmige Pappscheibe ( $\varnothing$  etwa 30 cm) ⑧
2. Zeitungspapier
3. Klebstoff

#### ***Methodischer Hinweis***

Das Experiment dient als Versuch zur Einführung der Begriffe *Bahngeschwindigkeit* und *Winkelgeschwindigkeit*.

#### ***Versuch***

Eine kreisförmige Pappscheibe beklebt man mit bedrucktem Zeitungspapier und befestigt sie an einer Gleitlagerachse. Die Gleitlagerachse spannt man mit einer Kreuzklemme an ein Stativ, so daß die Pappscheibe in einer vertikalen Ebene rotieren kann (Abb. 6.1.14./1).

Versetzt man die Scheibe durch Drehen der Kurbel in Rotation, dann verschwimmt die Schrift, und zwar um so mehr, je näher sie sich dem Rande befindet. Nur in der Mitte der Scheibe sind in einem begrenzten Bereich noch Buchstaben zu erkennen. Man ersieht daraus, daß die Buchstaben sich auf den von ihnen beschriebenen Kreisbahnen mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen, obwohl die Umlaufzeiten für alle Buchstaben gleich groß sind.

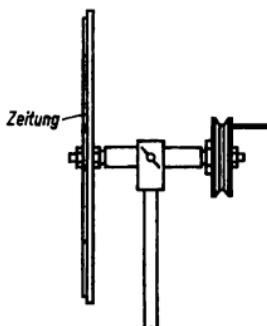


Abb. 6.1.14./1 Drehzscheibe aus Pappe mit Gleitlagerachse

Bei der gleichförmigen Drehbewegung ist die Winkelgeschwindigkeit für alle Buchstaben gleich. Der Zusammenhang zwischen der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und der Umlaufdauer  $T$  wird durch die Gleichung

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

beschrieben.

Die Einheit der Winkelgeschwindigkeit ist Radian je Sekunde  $\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$ .

Die Bahngeschwindigkeit  $v$  der Buchstaben dagegen ist um so größer, je größer der Radius der Bahn ist.

Er ist

$$v = \omega \cdot r.$$

### 6.1.15. Beobachtung der Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit an einem Rad

1. Fahrrad
2. Zeitungspapier
3. Lappen

#### Methodischer Hinweis

Das Experiment dient wie V 6.1.14. als Vorversuch zur qualitativen Veranschaulichung der Begriffe *Bahngeschwindigkeit* und *Winkelgeschwindigkeit*.

#### Versuch

Man stellt ein Fahrrad umgekehrt auf Sattel und Lenkstange und dreht die Tretkurbel langsam mit möglichst konstanter Drehzahl (etwa 1 Umdrehung in 2 Sekunden). Um zu verhüten, daß das Hinterrad „frei“ läuft, bremst man es leicht durch einen weichen, lose zwischen Bereifung und Spritzblech geklemmten Lappen. Auf folgende Einzelheiten ist beim Versuch besonders zu achten:



a) Jede Speiche beschreibt beim Drehen einen ständig wachsenden Winkel. Der Quotient aus Winkel und Zeit ist die Winkelgeschwindigkeit. Sie ist für alle Speichen und überhaupt für alle Punkte des Rades gleich.

b) Während man den Umlauf von Teilen der Freilaufnabe (z. B. Öleinlauf) gut verfolgen kann, ist dies wegen der größeren Bahngeschwindigkeit bei Punkten (Kreidestrichen) auf der Bereifung nur schwer oder gar nicht möglich. Die unter b) genannte Erscheinung ist noch augenfälliger zu beobachten, wenn man die Speichen dicht an der Nabe und dicht an der Felge mit Streifen großbedruckten Zeitungspapiers (Überschriften) durchfliegt. Die Buchstaben sind in der Nähe der Nabe bei langsamer Umdrehung noch als solche zu erkennen, in der Nähe der Felge verschwimmen sie.

### 6.1.16. Untersuchung der Abhängigkeit des Drehwinkels von der Zeit bei der gleichförmigen Kreisbewegung

1. Reifenapparat mit Zubehör
2. Zentraluhr

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1 und Nr. 2, V 4.1.4.!
2. Bei diesem Experiment soll nachgewiesen werden, daß bei der gleichförmigen Kreisbewegung für den Drehwinkel  $\sigma$  und die Zeit  $t$  eine analoge Beziehung besteht, wie für den Weg  $s$  und die Zeit  $t$  bei der gleichförmigen geradlinigen Bewegung. Bei der Auswertung des Experiments sollte man auf diesen Vergleich hinweisen und auch auf die analogen Gesetze

$$\sigma = \omega \cdot t \quad \text{und} \quad s = v \cdot t$$

eingehen.

#### Versuch

Die Versuchsanordnung entspricht der im V 4.1.4. Statt des Rotationszylinders wird die Drehstange mit zwei gleich großen, verschiedenfarbigen, zylindrischen Körpern verwendet, die man in gleichen Abständen von der Drehachse an der Drehstange befestigt (Abb. 6.1.16./1). Die Zentraluhr wird auf Sekundenimpulse eingestellt.

Nachdem der zum Antrieb an der Schnur befestigte Hakenkörper auf dem Fußboden aufgetroffen ist, läuft die weitere Bewegung kräftefrei und damit gleichförmig ab. Nun beobachtet man einen der beiden zylindrischen Körper. Wenn er, von den Schülern aus gesehen, vor der Drehachse vorbeigeht, setzt man die Uhr in Gang und bestimmt jeweils die Zeit für einen vollen Umlauf des Drehkörpers. Diese Messung gestaltet sich besonders einfach, wenn man in einem Vorversuch die Höhe des Hakenkörpers über dem Fußboden vor dem Start so abgeglichen hat, daß einem vollen Umlauf eine ganzzahlige Anzahl von Sekunden entspricht. Bei zwei zylindrischen Körpern von je 500 g, die im Abstand von 19 cm von der Drehachse angebracht waren, und einem Hakenkörper von 20 g Masse ergab sich bei dem vom Verfasser benutzten Gerät eine Umlaufdauer von etwa 6 s, wenn der Hakenkörper beim Start etwa 10 cm über dem Fußboden hing.

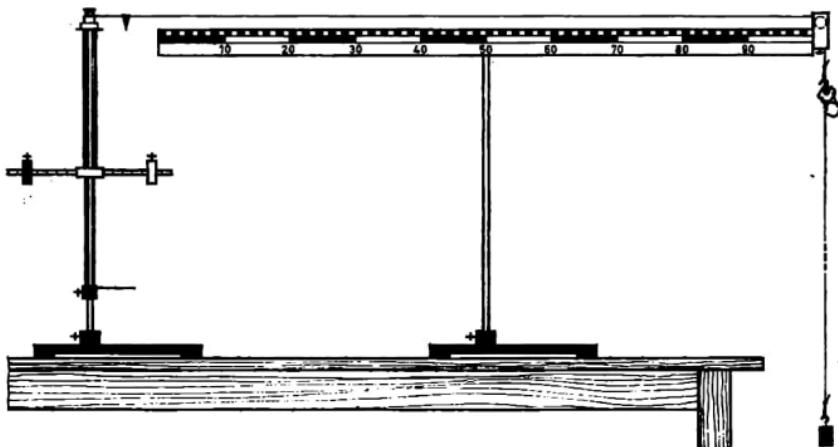


Abb. 6.1.16./1 Versuchsaufbau zur Untersuchung der Abhängigkeit des Drehwinkels von der Zeit

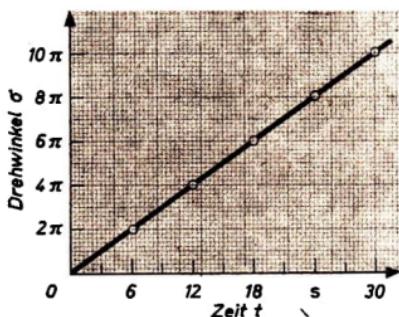


Abb. 6.1.16./2 Drehwinkel-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Kreisbewegung

Die Abhängigkeit des Drehwinkels von der Zeit wird in einem Diagramm veranschaulicht. Dabei setzt man für eine volle Umdrehung für  $\sigma$  den Wert  $2\pi$  ein (Abb. 6.1.16./2).

Aus dem Diagramm ist zu ersehen, daß  $\sigma \sim t$  ist. Der Quotient

$$\frac{\sigma}{t} = \omega$$

ist konstant. Somit ergibt sich für die gleichförmige Kreisbewegung das Gesetz  $\sigma = \omega \cdot t$ .



### 6.1.17. Bestimmung der Geschwindigkeit eines Luftgewehrgeschosses

1. Luftgewehr mit Munition
2. Kugelfang
3. Experimentiermotor mit Zubehör
4. Demonstrationstachometer mit Zubehör
5. 2 Pappscheiben (Ø etwa 30 cm) ⑧
6. Winkelmesser
7. Klebstoff

#### *Methodische Hinweise*

1. Das Experiment zeigt eine Möglichkeit, mit schulischen Mitteln die große Geschwindigkeit eines Geschosses zu ermitteln. Sie beruht auf dem Vergleich der Bahngeschwindigkeit der translatorischen Bewegung des Geschosses mit der Winkelgeschwindigkeit einer gleichförmigen Drehbewegung. Dadurch bietet das Experiment eine Möglichkeit, nach dem Abschluß der Behandlung dieser Stoffkomplexe einige der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten zu wiederholen und anzuwenden.  
Daß das Experiment das ungeteilte Interesse der Schüler weckt, braucht wohl nicht besonders begründet zu werden.
2. Vergleiche auch V 5.2.7.!

#### *Versuchsaufbau*

Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 6.1.17./1 zu ersehen. Zuerst lagert man das Gewehr in der Längsrichtung des Experimentiertisches auf zwei Glasröhrenhaltern (14). Den Kugelfang (2) befestigt man mit einer Schnellklemme (15). Man setzt eine Scheibe in den Kugelfang ein und überzeugt sich durch einen Probeschuß davon, daß das Geschöß etwa die Mitte der Scheibe durchschlägt. Danach erst vervollständigt man den Versuchsaufbau.

Die beiden Pappscheiben (5) werden an zwei Stellringen (8) geklebt und im Abstand von etwa 80 cm auf einem 1 m langen Stativstab befestigt. Der Stativstab dient als Welle und wird mit zwei Kugellagern (10) waagerecht gelagert. Die zum Präzisionsstativmaterial gehörenden Kugellager sind mit 8 mm-Gewindebohrungen versehen, so daß man sie auf Stativstäbe schrauben kann. Der Antrieb erfolgt durch einen Experimentiermotor (3). Man kann ihn am Stativstab befestigen, der das eine Kugellager trägt. Zum Antrieb eignet sich die Schnurlaufrolle (11), die als Kurbelrad zur Gleitlagerachse des Stativmaterials gehört. Sie ist mit 8 mm-Gewinde versehen und kann auf den Gewindezapfen des als Welle dienenden Stativstabes geschraubt werden. Statt einer Kontermutter benutzt man das Kupplungsstück (12) aus dem Zubehör des Demonstrationstachometers. Auf sein Gewinde paßt die Schnurlaufrolle (13) des Tachometers. Die geeignete Kombination der Schnurlaufrollen zum Antrieb des Tachometers (4) entnimmt man der Tabelle auf seiner Skalenscheibe. Man wählt zweckmäßigerweise den größten Meßbereich des Gerätes, 0 bis 400 Umdrehungen je Minute.

#### *Versuch*

Bei stillstehendem Motor schießt man durch die Pappscheiben. Sie sollen in der Nähe ihres oberen Randes durchschlagen werden. Die Einschläge kennzeichnen

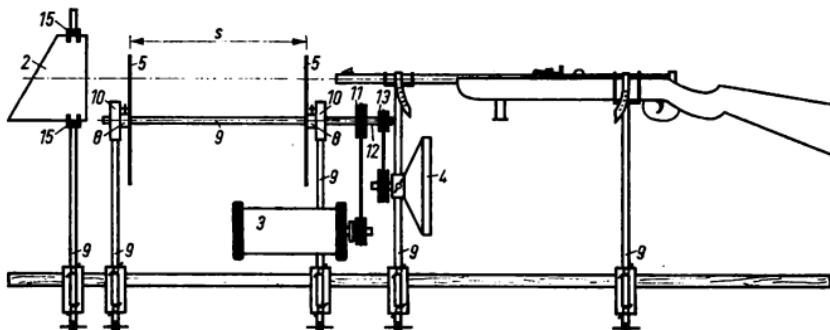


Abb. 6.1.17./1 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Luftgewehr-geschosses

1 Luftgewehr	9 Stativstäbe
2 Kugelfang	10 Kugellager
3 Experimentiermotor	11 Schnurlaufrolle für den Antrieb
4 Demonstrationstachometer	12 Kupplungsstück
5 Papp scheiben	13 Schnurlaufrolle für den Tachometerantrieb
6 Stellringe	14 Gläsröhrenhalter
7 5 Tischklemmen	15 Schnellklemme
8 2 Ringe mit Haken	

man durch Bleistiftstriche. Sie dienen später bei der Auswertung als Vergleichsmarken. Dann versetzt man die Scheiben in Rotation und regelt am Experimentiermotor eine möglichst hohe Drehzahl ein, notiert sie und durchschießt die rotierenden Scheiben. Zur Auswertung nimmt man die Scheiben ab und legt sie so übereinander, daß die Vergleichsmarken zur Deckung kommen. Man erkennt, daß die Durchschüsse bei der Rotation gegeneinander versetzt sind. Mit einem Bleistift überträgt man die Durchschußstelle der oberen Scheibe auf die untere und kann dort mit einem Winkelmaß feststellen, um welchen Winkel  $\alpha$  sich die Scheiben gedreht haben, während das Geschoß die Strecke  $s$  zwischen den Scheiben zurücklegte (Abb. 6.1.17./2).

Bezeichnet man die Laufzeit des Geschoßes zwischen den Scheiben mit  $t$ , die Umlaufdauer mit  $T$  und die Drehzahl mit  $n$ , so gelten folgende Beziehungen:

$$t:T = \alpha:360^\circ$$

$$t = \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot T$$

$$\text{bzw. wegen } T = \frac{1}{n}$$

$$t = \frac{\alpha}{360^\circ \cdot n}.$$

Die Geschoßgeschwindigkeit  $v$  errechnet man nach der Gleichung

$$v = \frac{s}{t}.$$

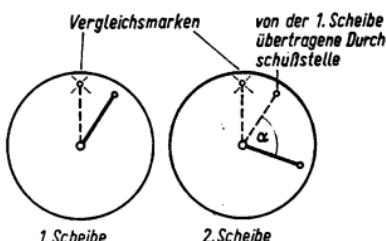


Abb. 6.1.17./2  
Papp scheiben mit Durchschußlöchern

Setzt man für die Zeit  $t$  den oben hergeleiteten Wert ein, so erhält man

$$v = \frac{360^\circ \cdot n \cdot s}{\alpha}.$$

Bei einem Experiment wurden folgende Werte gemessen:

$$n = 960 \text{ min}^{-1} = 16 \text{ s}^{-1}$$

$$\alpha = 72^\circ$$

$$s = 0,8 \text{ m}.$$

Daraus ergibt sich die Geschoßgeschwindigkeit zu

$$v = \frac{360^\circ \cdot 16 \text{ s}^{-1} \cdot 0,8 \text{ m}}{72^\circ} = 64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

#### Bemerkungen

1. Für das Experiment eignet sich am besten ein „Magazingewehr“. Ein sogenannter „Knikker“ ist weniger geeignet, weil er zum Laden jedesmal aus seiner Halterung genommen werden müßte.
2. Um Unfälle auszuschließen, baut man die Versuchsanordnung bereits vor dem Unterricht auf und vergewissert sich durch Probeschüsse, daß die Geschosse durch den Kugelfang aufgenommen werden. Das Gewehr wird so befestigt, daß es seine Lage während des Experiments nicht verändern kann. Außerdem läßt man die Schüler während des Experiments bis in die letzten Tischreihen zurücktreten.
3. Zur Drehzahlmessung kann auch die Impulsscheibe in Verbindung mit der Lichtschrankenanordnung und dem Digitalzähler Polydigit verwendet werden. Vergleiche dazu V 6.1.13.!

## 6.1.18. Trägheitswirkung an einem Kettenring

1. Experimentiermotor mit Zubehör
2. Ring aus einer Fahrradkette ( $\varnothing$  etwa 20 cm) ⑥
3. Holzleiste (etwa 30 cm lang)
4. Kiste

#### Methodische Hinweise

1. Wegen seines Überraschungsmomentes ist das Experiment als Einführungsvorlesung zur Erarbeitung des Begriffs Zentrifugalkraft geeignet. Es kann aber auch nach der Stoffbehandlung zur Wiederholung und zur Leistungskontrolle ausgeführt werden.
2. Betrachtet man den Vorgang vom Standpunkt eines ruhenden Beobachters aus, so kann man sich vorstellen, daß die einzelnen Kettenglieder infolge der Trägheit tangential von der Scheibe weggeschleudert würden. Durch Radialkräfte, elastische Kräfte, die durch die Spannung der Kette entstehen, werden sie auf eine Kreisbahn gezwungen.

#### Versuch

Der Experimentiermotor wird mit einem Stativstab und einer Tischklemme am Experimentiertisch befestigt, so daß der Achszapfen des Unterstellungsgesetzes seitlich herausragt. Er wird mit dem Bohrfutter aus dem Zubehör versehen. In

das Bohrfutter spannt man einen kurzen Stativstab, auf dem man einen Rundtisch ( $\varnothing$  19 cm, aus dem Präzisionsstativmaterial) befestigt. Um diese Scheibe legt man eine geschlossene Gliederkette, die man aus einer Fahrradkette herstellt (Abb. 6.1.18./1).

Schaltet man den Motor ein und steigert seine Drehzahl allmählich, so strafft sich die Kette unter dem Einfluß der an den Gliedern angreifenden Zentrifugalkraft. Bei genügend hoher Drehzahl nimmt die Kette die Eigenschaften eines nahezu starren Körpers an. Sie behält diese bei, wenn man sie durch einen leichten seitlichen Stoß mit einer Holzleiste von der Scheibe wirft, und läuft wie ein Reifen über den Tisch.

#### *Bemerkung*

Um Unfälle und Sachbeschädigungen zu vermeiden, erhöht man die Drehzahl nur so weit, wie es zur Ausführung des Experiments gerade erforderlich ist und läßt die Kette in eine offene Kiste hineinrollen, die man in der Laufrichtung am Ende des Experimentiertisches aufstellt.

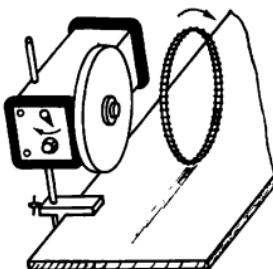


Abb. 6.1.18./1 Rotierender Kettenring. Nach dem Abwerfen rollt die Kette wie ein Reifen über den Tisch.

### 6.1.19. Schneidwirkung einer rotierenden Papierscheibe

1. Experimentiermotor mit Zubehör      2. steifes Zeichenpapier      3. dünne Holzstäbe

#### *Methodischer Hinweis*

Vergleiche MH, V 6.1.18.!

#### *Versuch*

Der Experimentiermotor wird mit einem Stativ am Tisch festgeschraubt und der an seiner Stirnseite herausragende, nicht unersetzte Achszapfen mit dem Bohrfutter aus dem Zubehör versehen. Aus festem Zeichenpapier schneidet man eine Kreisscheibe ( $\varnothing$  etwa 20 cm), locht sie in der Mitte und versieht sie mit einem kurzen Stativstab (2,5 cm), auf dessen Gewinde man sie zwischen zwei Beilegscheiben festschraubt. Diesen Stab setzt man in das Bohrfutter des Experimentermotors ein.

Schaltet man den Motor ein, dann versteift sich die Papierscheibe mit zunehmender Drehzahl unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft. Sie wirkt schließlich wie ein dünnes Kreismesser. Hält man einen dünnen Stab aus weichem Holz dagegen, so wird er zerschnitten.

## 6.2. Das Trägheitsmoment — Der Kreisel

### 6.2.1. Trägheitserscheinungen an einem Hebel

1. Waagebalken (Hebelstab)
2. 2 Wägestücke zu je 500 g (Handelswägestücke oder Hakenwägesatz)

#### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment ist wie die beiden folgenden als qualitativer Vorversuch zur Einführung des Trägheitsmomentes gedacht. Der Versuchsaufbau ist einfach und übersichtlich, dadurch sind die physikalischen Zusammenhänge leicht erkennbar.

#### *Versuch*

Auf einem Achszapfen, den man an einem Stativ befestigt hat, wird ein Waagebalken drehbar gelagert. Man hängt in gleichen Abständen von der Achse zwei Körper möglichst großer, gleicher Masse (etwa je 500 g). Der Hebel ist in waagerechter Lage im Gleichgewicht. Man versucht, den Hebel durch Stöße zu drehen. Sind die Entfernung der Aufhängepunkte von der Achse gering, so genügen schwache Impulse, um den Hebel in Bewegung zu setzen. Hängen dagegen die Körper in großen Abständen von der Achse, so ist zum Drehen des Hebels ein merklich größerer Kraftaufwand erforderlich. Bei einer Drehbewegung wirken Körper um so trüger, je größer ihre Entfernung von der Drehachse ist.

#### *Bemerkung*

Die gleichen Beobachtungen kann man an einer mit zwei Personen besetzten Wippe machen, wenn man sie durch äußere Kraftwirkung auf und nieder bewegt.

## 6.2.2. Trägheitserscheinungen an rollenden Büchsen

1. 2 Büchsen gleicher Abmessungen und gleicher Masse mit unterschiedlichen Trägheitsmomenten ⑧, dazu erforderliches Material:
  - 2 gleich große Konservenbüchsen oder Pappbüchsen
  - Blei- oder Eisenrohr
  - Papier
2. Holzleiste

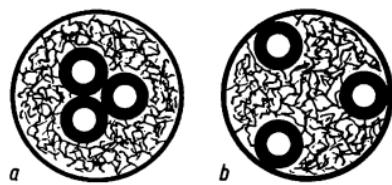


Abb. 6.2.2.1 Büchsen mit eingelagerten Metallrohrstücken mit gleich großen Massen (von oben gesehen): a) axiale Anordnung der Rohrstücke, b) seitliche Anordnung der Rohrstücke

#### *Methodischer Hinweis*

Vergleiche MH, V 6.2.1.!

#### *Herstellen der Versuchsgeräte*

Von einem Blei- oder Eisenrohr schneidet man sechs Stücke ab, deren Länge gleich der Höhe der Büchsen ist. Drei Stücke stellt man dicht nebeneinander in die Mitte

der einen Büchse, wobei man ihnen dadurch Halt gibt, daß man den übrigen Raum der Büchse fest mit Papier ausstopft (Abb. 6.2.2./1a). Die anderen drei Rohrstücke stellt man mit gleichen gegenseitigen Abständen dicht an die Wand der anderen Büchse und füllt den Hohlraum ebenfalls mit Papier aus (Abb. 6.2.2./1b). Die Massen beider Büchsen gleicht man durch einige Bleistückchen aufeinander ab.

*Versuch*

Man legt die beiden Büchsen mit geringem Abstand so auf einen glatten Tisch, daß ihre Längsachsen auf einer Geraden liegen, und stößt mit einer Holzleiste gegen ihre Längsseiten, so daß auf beide Büchsen annähernd der gleiche Kraftstoß ausgeführt wird. Obwohl beide Büchsen gleiche Massen haben, rollt die Büchse b nicht so weit wie die Büchse a. Das Experiment zeigt wie V 6.2.1., daß die Trägheit eines sich drehenden Körpers von der Verteilung der Masse abhängt.

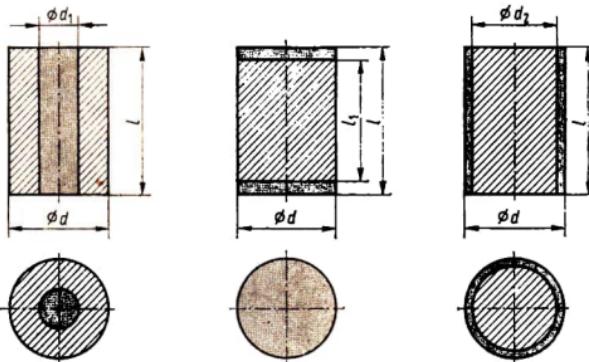
*Bemerkung*

Die gleiche Beobachtung kann man machen, wenn man die Büchsen auf einem gereigten glatten Brett nebeneinander hinabrollen läßt. Die Büchse b bleibt hinter der Büchse a zurück.

### 6.2.3. Trägheitserscheinungen an rollenden Zylindern aus Holz und Blei

1. 3 Zylinder aus Holz und Blei mit gleichen Abmessungen und gleichen Massen, aber unterschiedlichen Trägheitsmomenten, @ dazu erforderliches Material:
  - a) 3 Holzzylinder mit den Abmessungen, die aus der Abbildung 6.2.3./1 zu ersehen sind
  - b) Blei (etwa 850 g)
2. Holzleiste
3. glattes Brett
4. Unterlegeklotz

Abb. 6.2.3./1  
Übersicht über die für das Experiment benötigten Walzen



*Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment ist wie V 6.2.1. und V 6.2.2. als qualitativer Vorversuch zur Einführung des Trägheitsmomentes gedacht. Die Herstellung der drei unterschiedlichen Zylinder bereitet zwar etwas Mühe, aber die Trägheitswirkungen sind deutlich zu erkennen. Das Experiment weckt das Interesse der Schüler und ist deshalb gut zur Problemstellung geeignet.

### Herstellung von Walzen

Gebraucht werden drei aus Holz und Blei gefertigte Walzen von gleichem Durchmesser, gleicher Länge und gleicher Masse, die sich in der Verteilung der Blei- und der Holzteile unterscheiden. Die Holzteile lässt man aus Weichholz von einem Tischler, Drechsler oder Dreher herstellen. Zum Gießen der zylindrischen Bleiteile stellt man Gießformen aus Blech her. Die Gießform der für die eine Walze erforderlichen rechteckigen Bleiplatte gewinnt man, indem man aus einem schmalen Schwarzblechstreifen einen rechteckigen Rahmen biegt, dessen überlappende Enden man durch Büroklammern zusammenhält. Als Unterlage für den Rahmen dient eine Eisenplatte oder eine Kachel. Bedingungen für Massengleichheit der drei Walzen (ohne Beweis mitgeteilt):

$$d^2 = d_1^2 + d_2^2,$$

$$l_1 = \frac{d^2 - d_1^2}{d^2} \cdot l.$$

*Beispiel für die Abmessungen einer Walzengruppe bei stärkster Steigerung der Trägheitsmomente (Dichte: Blei 11,3 g · cm<sup>-3</sup>, Weichholz 0,5 g · cm<sup>-3</sup>)*

Abmessungen der Walzen				Trägheitsmoment
Walze 1	Holzwalze:	Durchmesser Bohrungs- durchmesser Länge	$d = 50 \text{ mm}$ $d_1 = 20 \text{ mm}$ $l = 75 \text{ mm}$	$J_1 = 360 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$
	Bleikern:	Durchmesser Länge	$d_1 = 20 \text{ mm}$ $l = 75 \text{ mm}$	
Walze 2	Holzwalze:	Durchmesser Länge	$d = 50 \text{ mm}$ $l_1 = 63 \text{ mm}$	$J_2 = 1025 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$
	2 Blei- scheiben:	Durchmesser je Dicke	$d = 50 \text{ mm}$ $D = 6 \text{ mm}$	
Walze 3	Holzwalze:	Durchmesser Länge	$d_2 = 46 \text{ mm}$ $l = 75 \text{ mm}$	$J_3 = 1690 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$
	Bleimantel:	Wandstärke mittlerer Durchmesser	$d_W = 2 \text{ mm}$	
		Länge des aufgerollten Mantels Breite des aufgerollten Mantels	$d_3 = 48 \text{ mm}$ $l = 75 \text{ mm}$ $\pi \cdot d_3 = 151 \text{ mm}$	

Bleibedarf jeder Walze etwa 270 g.

Die Bleiteile werden mit Drahtstiften an den Holzwalzen befestigt. Geringe Unterschiede der Massen werden durch vorsichtiges Abschneiden von Blei an den Stirnseiten ausgeglichen.

Obwohl die Walzen gleiche äußere Abmessungen und gleiche Massen besitzen, sind ihre Trägheitsmomente verschieden. Walze 1 hat das kleinste, Walze 3 das größte Trägheitsmoment. Bei dem angeführten Beispiel verhalten sich

$$J_1 : J_2 : J_3 = 1 : 2,88 : 4,74.$$

*Variante a*

Man legt die drei Walzen in gleicher Achsenrichtung nebeneinander auf eine glatte, waagerechte Tischfläche und stößt sie ähnlich wie in V 6.2.2. mit einer dahintergelegten Holzleiste an, so daß sie gleichzeitig zu rollen beginnen. Obwohl alle drei Walzen die gleiche Masse besitzen, rollen sie verschieden weit. Die Walze 1 mit dem geringsten Trägheitsmoment rollt am weitesten, die Walze 3 mit dem größten Trägheitsmoment rollt die kürzeste Strecke vorwärts.

*Variante b*

Man läßt die Walzen nebeneinander auf einem breiten, etwas geneigten Brett hinabrollen. Walze 1 erfährt die größte, Walze 3 die geringste Beschleunigung.

*Variante c*

Man legt die Walzen in der Reihenfolge 1—2—3 hintereinander auf ein geneigtes Brett und hält zunächst die vorderste fest. Läßt man sie los, so rollen die Walzen hinab, wobei sie sich infolge der Anordnung nach der Größe ihrer Trägheitsmomente voneinander trennen (Abb. 6.2.3./2a). Läßt man sie in der Reihenfolge 3—2—1 hinabrollen, so bleibt die Gruppe geschlossen (Abb. 6.2.3./2b).

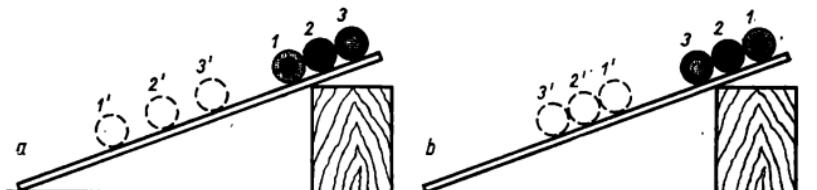


Abb. 6.2.3./2 Walzen mit gleichen Massen, aber verschiedenen Trägheitsmomenten auf einer geneigten Ebene: a) nach zunehmenden, b) nach abnehmenden Trägheitsmomenten geordnet

**6.2.4. Herleitung der Gleichung des Trägheitsmoments mit rotierenden Metallscheiben [SE]**

1. Reifenapparat mit Zubehör      2. Demonstrationsstoppuhr oder Polydigit

*Methodische Hinweise*

- Während die Experimente V 6.2.1. bis V 6.2.3. nur als qualitative Vorversuche geeignet sind, können mit der hier beschriebenen Methode quantitative Vergleiche von Trägheitsmomenten durchgeführt werden.
- Bei der Auswertung des Experiments braucht das Trägheitsmoment des Drehstabes nicht berücksichtigt zu werden, weil beim Teilversuch 3, dessen Meßwerte zur Herleitung der Gesetzmäßigkeit herangezogen werden, sowohl das Drehmoment  $M$  wie auch die Winkelbeschleunigung  $\alpha$  konstant gehalten werden und nach dem Grundgesetz der Drehbewegung

$$M = J \cdot \alpha$$

auch das Trägheitsmoment  $J$ , die Summe der Trägheitsmomente des Drehstabes und der aufgeschobenen Metallscheiben, konstant sein muß.

3. Zur Benutzung des Reifenapparates vergleiche MB 4.0.1. und V 4.1.4. bzw. V 4.2.2.!
4. Da die Metallscheiben im Vergleich zum Abstand von der Drehachse nur eine geringe Ausdehnung haben, können sie angenähert als „Punktmassen“ angesehen werden.

### *Versuchsaufbau*

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 6.2.4./1 dargestellt. Man setzt den zum Reifenapparat gehörenden Stativstab in einen großen Stativfuß ein und richtet ihn mit den Stellschrauben des Fußes lotrecht ein. In die am oberen Ende des Stativstabes angebrachte Lagerpfanne legt man die dazugehörige Stahlkugel ein. Auf das Ansatzrohr des Drehstabes schraubt man die Aufhängetrommel und setzt diese Kombination auf den Stativstab. Sie muß frei beweglich sein, ohne daß das Rohr den Stativstab berührt. Schließlich führt man den Faden über die Rolle, legt auf den Gewichtsteller die geschlitzte Scheibe von 20 g Masse auf und justiert die Rolle so, daß der Faden genau in ihrer Mitte läuft und beim Aufspulen auf der Aufhängetrommel in gleichmäßigen Windungen aufgewickelt wird.

Bei allen Teilversuchen benutzt man dieselbe geschlitzte Scheibe für den Antrieb, so daß das Drehmoment konstant bleibt. Als Anschlag zum Festlegen der Ausgangsstellung dient ein Stativ.

#### *1. Teilversuch: Abhängigkeit der Trägheitswirkung von der Masse*

Man schiebt auf beide Seiten des Drehstabes gleich große Scheiben auf und schraubt sie gleich weit von der Drehachse entfernt fest. Eine der beiden Scheiben kennzeichnet man durch einen Kreidestrich.

Gibt man den Drehstab frei, dann beginnt er sich unter dem Einfluß der Gewichtskraft der aufgelegten geschlitzten Scheibe zu drehen. Es kommt zu einer gleichmäßig beschleunigten Drehbewegung. Mit einer Stoppuhr bestimmt man die Zeit für eine bestimmte Anzahl von Umdrehungen, d. h., man stoppt, wenn das gekennzeichnete Massestück zum  $n$ -ten Male seine Ausgangsstellung passiert. Das Experiment wird nacheinander mit je zwei Scheiben von 125 g, 250 g und 500 g ausgeführt. Der Abstand von der Drehachse wird dabei konstant gehalten (Abb. 6.2.4./2). Man erkennt, daß die für gleich viele Umdrehungen benötigte Zeit um so größer ist, je größer die benutzte Masse ist. Bei konstantem Abstand von der Drehachse wächst die Trägheitswirkung mit der Masse der rotierenden Körper.

#### *2. Teilversuch: Abhängigkeit der Trägheitswirkung vom Abstand der Körper von der Drehachse*

Nun hält man die Masse konstant und verändert von Messung zu Messung jeweils die Abstände der Körper von der Drehachse. Dabei kann man sich nach der Meßeinteilung auf den Drehstäben richten (Abb. 6.2.4./3).

Man erkennt, daß die für gleich viele Umdrehungen benötigte Zeit um so größer ist, je weiter die Scheiben von der Drehachse entfernt sind. Bei konstanter Masse der rotierenden Körper wächst die Trägheitswirkung mit dem Abstand der Körper von der Drehachse.

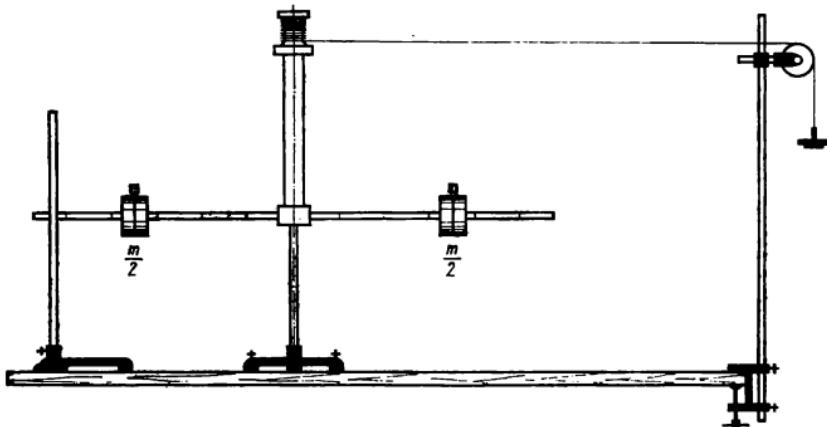


Abb. 6.2.4./1 Versuchsanordnung zur Untersuchung der Trägheitswirkung rotierender Körper

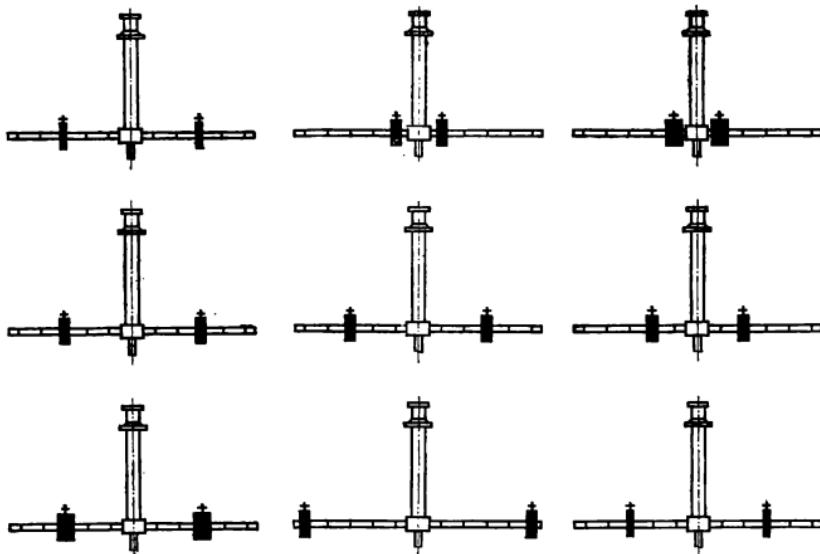


Abb. 6.2.4./2 Abhängigkeit der Trägheitswirkung von der Masse. Es werden nacheinander Körper mit Massen von je 125 g, 250 g und 500 g benutzt.

Abb. 6.2.4./3 Abhängigkeit der Trägheitswirkung vom Bahnradius. Die Masse der rotierenden Körper bleibt konstant.

Abb. 6.2.4./4 Gleiche Trägheitswirkung unterschiedlicher Massen. Die Trägheitswirkungen sind gleich, wenn  $m \cdot r^2$  konstant ist.



### 3. Teilversuch: Herleitung der Gleichung zur Berechnung von Trägheitsmomenten

Man bringt zuerst die beiden Scheiben von je 500 g im Abstand von 10 cm von der Drehachse an und ermittelt die Zeit für zehn Umläufe. Danach ersetzt man die Scheiben durch solche mit je 250 g und verschiebt sie auf dem Drehstab so weit nach außen, daß sich für zehn Umläufe die gleiche Zeit ergibt. Das ist bei ungefähr 14 cm Abstand von der Achse der Fall. Benutzt man die Scheiben mit 125 g, dann muß der Abstand sogar 20 cm betragen (Abb. 6.2.4./4). Die Meßwerte werden in einer Tabelle erfaßt.

#### Abhängigkeit des Bahnradius von der Masse bei gleichen Trägheitswirkungen

Massen der rotierenden Körper $m$ in kg	Abstand von der Drehachse (Bahnradius) $r$ in m	$m \cdot r^2$ in kg · m <sup>2</sup>
1,0	0,10	$1,00 \cdot 10^{-2}$
0,5	0,14	$0,98 \cdot 10^{-2}$
0,25	0,20	$1,00 \cdot 10^{-2}$

Bildet man jeweils das Produkt aus der Masse und dem Quadrat des Abstandes der Körper von der Drehachse, also  $m \cdot r^2$ , so erhält man mit guter Annäherung gleiche Werte. Dieses Produkt wird als *Trägheitsmoment  $J$*  bezeichnet. Man kann es nach der Gleichung  $J = m \cdot r^2$  berechnen.

#### Bemerkungen

- Bei der Verwendung der neuen Ausführung des Reifenapparats tritt an die Stelle des Stativs, das als Anschlag zum Festlegen der Ausgangsstellung dient, das Bremsrohr mit dem Freistellhebel. Statt der geschlitzten Scheibe dient zum Antrieb ein Hakenkörper mit einer Masse von 20 g.
- Für Schülerexperimente wird das als „Hantelapparat“ bezeichnete Gerät eingesetzt. Es entspricht im Aufbau etwa dem Reifenapparat der älteren Ausführung ohne die Reifen.

### 6.2.5. Abhängigkeit der Schwingungsdauer vom Trägheitsmoment bei Torsionsschwingungen [SE]

1. Holzstäbchen (Ø 5 mm, Länge 21 cm)	3. dicker Eisendraht	4. Hakenkörper
2. Kupferdraht (Ø 0,4 mm)	(Ø 3 mm, Länge etwa 15 cm)	5. Stoppuhr

#### Methodische Hinweise

- Das Experiment ist besonders als Schülerexperiment in der Abiturstufe geeignet. Obwohl der Versuchsaufbau keinen Aufwand erfordert, führt die rechnerische und zeichnerische Auswertung zu brauchbaren Ergebnissen.
- Bei der hier beschriebenen Versuchsanordnung ist das Trägheitsmoment des Stäbchens gegenüber dem der angehängten Körper so klein, daß es bei der Auswertung vernachlässigt werden kann.

3. Ohne Beweis soll hier die Gleichung für die Schwingungsdauer von Torsionsschwingungen mitgeteilt werden. Sie lautet:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D}}.$$

Hierin ist  $J$  das Trägheitsmoment des schwingenden Systems und  $D$  das Drehmomentsmoment, durch das der Körper aus der Ruhelage um den Einheitswinkel  $\alpha = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57,3^\circ = 1 \text{ rad}$  ausgelenkt wird.

#### *Versuchsanordnung*

Ein etwa 35 cm langer Kupferdraht ( $\varnothing 0,4 \text{ mm}$ ) wird mit dem einen Ende in der Mitte eines Holzstäbchens befestigt. Das andere Ende lötet man an ein etwa 15 cm langes, 3 mm dickes Drahtstück. Dieses wird so an ein Stativ geklemmt, daß das waagerecht hängende Stäbchen ungehindert Drehschwingungen ausführen kann (Abb. 6.2.5./1). Das Stäbchen wird von der Mitte aus nach beiden Seiten mit einer Teilung in Zentimetern versehen. Zum Anhängen von Hakenkörpern dienen Drahthäkchen, die man selbst anfertigt. Sie sollen unter Reibung auf dem Stäbchen verschiebbar sein.

#### *1. Teilversuch: Abhängigkeit der Schwingungsdauer vom Abstand der schwingenden Körper von der Drehachse*

Man belastet das Stäbchen symmetrisch mit je einem Hakenkörper von 50 g und bestimmt die Schwingungsdauer mit der Stoppuhr. Man wählt zunächst einen möglichst kleinen Abstand von der Drehachse (4 cm) und vergrößert ihn nach jeder Messung um jeweils 1 cm. Die Meßwerte werden in einer Tabelle und in einer grafischen Darstellung (Abb. 6.2.5./2) ausgewertet.

Der Quotient  $\frac{T}{r}$  erweist sich als nahezu konstant

und führt zu der Beziehung

$$T \sim r.$$

Die grafische Darstellung ergibt eine Gerade.

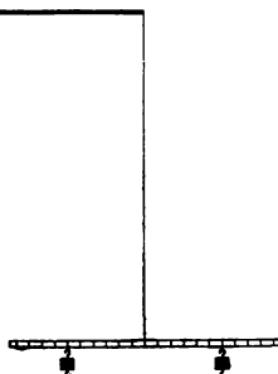


Abb. 6.2.5./1 Vorrichtung für Torsionsschwingungen

*Tabelle 1: Abhängigkeit der Schwingungsdauer vom Achsenabstand der schwingenden Körper*

Massen $m$ in kg	Achsenabstand $r$ in m	Schwingungsdauer $T$ in s	$\frac{T}{r}$
0,1	$4 \cdot 10^{-2}$	4,4	1,10
0,1	$5 \cdot 10^{-2}$	5,4	1,08
0,1	$6 \cdot 10^{-2}$	6,4	1,07
0,1	$7 \cdot 10^{-2}$	7,4	1,06
0,1	$8 \cdot 10^{-2}$	8,4	1,05
0,1	$9 \cdot 10^{-2}$	9,5	1,06
0,1	$10 \cdot 10^{-2}$	10,7	1,07

*2. Teilversuch: Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Masse des schwingenden Körpers*

Bei diesem Teilversuch läßt man  $r$  konstant (beispielsweise  $r = 6 \text{ cm}$ ) und ändert die Massen in Stufen von 50 g (vgl. Tabelle 2). Zur Ergänzung ist noch das Ergebnis eines Versuches mit Körpern kleinerer Massen ( $m = 30 \text{ g}$ ) aufgenommen. Die grafische Darstellung zeigt, daß die Meßpunkte auf einer Parabel liegen (Abb. 6.2.5./3).

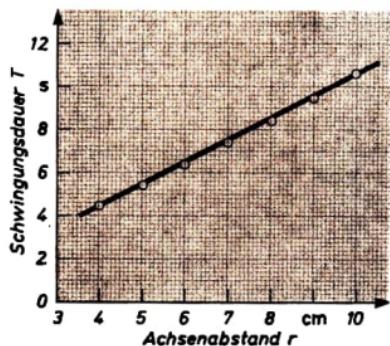


Abb. 6.2.5./2 Abhängigkeit der Schwingungsdauer vom Achsenabstand

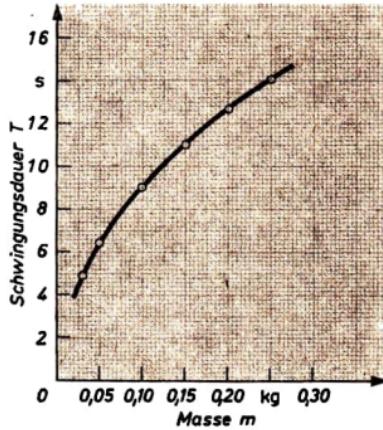


Abb. 6.2.5./3 Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Masse der schwingenden Körper

Aus der Rechnung folgt, daß  $\frac{T}{\sqrt{m}}$  nahezu konstant ist; demnach gilt:

$$T \sim \sqrt{m}.$$

Aus beiden Teilversuchen folgt

$$T \sim r \cdot \sqrt{m}$$

oder

$$T \sim \sqrt{m \cdot r^2}.$$

Wenn also die Schwingungszeit konstant gehalten werden soll, so muß  $m \cdot r^2$  konstant sein. Dieses Produkt ist der Ausdruck für das Trägheitsmoment einer als punktförmig anzusehenden Masse.

*Tabelle 2: Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Masse*

Masse $m$ in kg	Abstand $r$ in m	Schwingungsdauer $T$ in s	$\frac{T}{\sqrt{m}}$
0,03	$6 \cdot 10^{-2}$	4,9	28,3
0,05	$6 \cdot 10^{-2}$	6,4	28,6
0,10	$6 \cdot 10^{-2}$	9,0	28,5
0,15	$6 \cdot 10^{-2}$	11,0	28,4
0,20	$6 \cdot 10^{-2}$	12,7	28,3
0,25	$6 \cdot 10^{-2}$	14,1	28,2

*Bemerkung*

Für dieses Experiment ist der im V6.2.6. beschriebene Torsionsschwinger nicht geeignet, weil das Trägheitsmoment der unbelasteten Drehstange zu groß ist und nicht vernachlässigt werden kann.

**6.2.6. Bestimmung des Trägheitsmoments eines Probekörpers mit Hilfe von Torsionsschwingungen [SE]**

Geräte 1. und 2. wie in V 6.2.4.

*Methodische Hinweise*

- Bei diesem Experiment soll das Trägheitsmoment eines Probekörpers, z. B. des Drehstabes ohne zylindrische Körper, ermittelt werden.  
Die Schwingungsdauer  $T$  eines Torsionsschwingers ist

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D}},$$

wobei  $J$  das Trägheitsmoment des schwingenden Körpers und  $D$  das Direktionsmoment der Anordnung, eine von den Abmessungen und dem Material des Torsionsdrahtes abhängige Konstante ist. Es ist das Kraftmoment, durch das der Körper um den Einheitswinkel 1 rad ( $57,3^\circ$ ) aus der Ruhelage ausgelenkt würde.

Das Direktionsmoment selbst braucht man bei diesem Experiment nicht zu kennen, wenn man nach folgender Überlegung eine Gleichung zur Berechnung des Trägheitsmoments herleitet:

Bringt man am Probekörper eine zusätzliche Masse  $m$  in Form zweier gleicher zylindrischer Körper im gleichen Abstand von der Drehachse an, so vergrößert sich das Trägheitsmoment um

$$J_z = m \cdot r^2,$$

wobei  $m$  die Summe der Massen der beiden zusätzlich angebrachten Körper und  $r$  ihr Abstand von der Drehachse ist. Die beiden Teilmassen werden dabei als

Punktmassen angenommen. Das Gesamtträgheitsmoment beträgt dann

$$J + J_z.$$

Für die Schwingungsdauer dieses Systems ergibt sich folglich die Gleichung

$$T_z = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J + J_z}{D}}.$$

Löst man die Gleichung der Schwingungsdauer des Probekörpers nach  $D$  auf und setzt den so erhaltenen Term für  $D$  in diese Gleichung ein, so erhält man eine Bestimmungsgleichung für das Trägheitsmoment des Probekörpers:

$$J = J_z \cdot \frac{T^2}{T_z^2 - T^2}.$$

- Das Experiment ist in mathematischer Hinsicht für die Schüler recht anspruchsvoll und ist deshalb besonders für die Abiturstufe als Schülerexperiment geeignet.

### Versuch

Der Versuchsaufbau entspricht dem in V 6.2.5. (Abb. 6.2.5./1). Zuerst bestimmt man als Mittelwert aus zehn Schwingungen die Schwingungsdauer  $T$  des Drehstabes ohne zusätzlich angebrachte Körper. Danach bringt man zwei gleiche zusätzliche Körper im gleichen Abstand von der Drehachse an und ermittelt die Schwingungsdauer  $T_z$  dieses Systems. Die Meßwerte werden in einer Tabelle erfaßt und ausgewertet. Das Trägheitsmoment des Probekörpers berechnet man nach der in den methodischen Hinweisen hergeleiteten Gleichung

$$J = J_z \cdot \frac{T^2}{T_z^2 - T^2}.$$

Zur Kontrolle wiederholt man das Experiment, nachdem man durch Verändern des Abstandes  $r$  das zusätzliche Trägheitsmoment  $J_z$  verändert hat. Die errechneten Ergebnisse für das Trägheitsmoment  $J$  müssen angenehrt übereinstimmen.

### Meßwerttabelle: Trägheitsmoment des Probekörpers

Torsionsdraht  $\varnothing 0,5$  mm

Zusatzkörper		$T$	$T_z$	$J_z = m \cdot r^2$	$J = J_z \cdot \frac{T^2}{T_z^2 - T^2}$
$m$ in kg	$r$ in m	in s	in s	in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
—	—	4,4	—	—	—
0,5	0,15	—	10,5	$1,125 \cdot 10^{-2}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$
0,5	0,20	—	13,2	$2,000 \cdot 10^{-2}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$

Das Trägheitsmoment des Probekörpers beträgt somit

$$J = 2,50 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

## V 6.2.6.

### Bemerkungen

1. Vergleiche Bem. Nr. 1 und 2, V 6.2.5.!
2. Das Experiment kann auch mit dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen ausgeführt werden. An Stelle des Torsionsdrahtes wird bei dieser Versuchsanordnung eine Spiralfeder verwendet.

### 6.2.7. Herleitung des Grundgesetzes der Drehbewegung mit dem Reifenapparat

1. Reifenapparat mit Zubehör
2. Demonstrationsstoppuhr oder Polydigit
3. Meßschieber

#### Methodische Hinweise

1. Das Experiment ist zur Herleitung und zur Bestätigung des Grundgesetzes der Drehbewegung geeignet. Durch den übersichtlichen Aufbau und die überzeugenden Meßwerte, die durch die reibungsarme Lagerung zustande kommen, ist der Reifenapparat anderen Versuchsanordnungen überlegen.
2. Um das Verständnis zu vertiefen, ist es zweckmäßig, die Drehbewegung mit der translatorischen Bewegung zu vergleichen und die Analogie zwischen den Bestimmungsgrößen aufzuzeigen. Es entsprechen einander

bei der Translation	bei der Rotation
Kraft $F$	Drehmoment $M$
Masse $m$	Trägheitsmoment $J$
Geschwindigkeit $v$	Winkelgeschwindigkeit $\omega$
Weg $s$	Kreisbogen $\sigma$
Beschleunigung $a$	Winkelbeschleunigung $\alpha$

Während bei der gleichmäßig beschleunigten translatorischen Bewegung für die Beschleunigung die Gleichung

$$a = \frac{2s}{t^2}$$

gilt, lautet die analoge Gleichung zur Bestimmung der Winkelbeschleunigung bei der gleichmäßig beschleunigten Kreisbewegung

$$\alpha = \frac{2\sigma}{t^2}$$

Für den Kreisbogen  $\sigma$  kann man  $2\pi \cdot n$  einsetzen.  $n$  ist hierbei die Anzahl der Umdrehungen. So ergibt sich für die Winkelbeschleunigung die Bestimmungsgleichung

$$\alpha = \frac{4\pi n}{t^2}$$

3. Für die Auswertung benötigt man das Trägheitsmoment der unbelasteten Drehstange. Das im V 6.2.6. bestimmte Trägheitsmoment kann hier nicht verwendet werden, weil außer den beiden Stäben hier noch weitere Geräteteile an der Rotation teilnehmen. Bei dem vom Autor verwendeten Gerät betrug das Trägheitsmoment der Drehstange etwa  $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . Die ermittelten Werte streuen, weil mit zunehmender Belastung der Drehstange durch die zusätzlich angebrachten Körper auch die Reibung zunimmt.

### Versuchsaufbau

Die Versuchsanordnung entspricht der im V 6.1.16.

Statt der Zentraluhr benutzt man hier eine Demonstrationsstoppuhr oder das Polydigit. Während im V 6.1.16. eine gleichförmige Drehbewegung untersucht wurde, handelt es sich hier um eine gleichmäßig beschleunigte. Der Hakenkörper wird deshalb bei diesem Experiment dicht unter dem Schnurkärtchen befestigt und setzt während des Bewegungsablaufs nicht auf dem Fußboden auf.

Um das Drehmoment berechnen zu können, das durch die Gewichtskraft des Hakenkörpers bewirkt wird, muß man den Radius der Fadentrommel kennen. Man mißt ihn mit einem Meßschieber. Bei der Benutzung der mittleren Stufe der Stufenrolle beträgt der Durchmesser 2 cm, der Radius  $r$  ist somit 1 cm. Bezeichnet man die Masse des Hakenkörpers mit  $m$ , so erhält man seine Gewichtskraft nach der Gleichung

$$F_G = m \cdot g$$

und das durch sie hervorgerufene Drehmoment nach der Gleichung

$$M = F_G \cdot r$$

bzw.

$$M = m \cdot g \cdot r$$

Für Hakenkörper mit den Massen 10 g, 20 g, 30 g und 40 g ergeben sich folgende Drehmomente:

### Drehmomente am Reifenapparat bei der Benutzung der mittleren Stufe der Stufenrolle

Masse $m$ in kg	Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ in N	Radius der Fadentrommel $r$ in m	Drehmoment $M = F_G \cdot r$ in N · m
$10 \cdot 10^{-3}$	$9,81 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$0,98 \cdot 10^{-3}$
$20 \cdot 10^{-3}$	$19,62 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$

Das Trägheitsmoment des Drehkörpers setzt sich aus dem Trägheitsmoment der Drehstange  $J_{st}$  und dem Trägheitsmoment der zusätzlich angebrachten Massen  $J_z$  zusammen.

$$J = J_{st} + J_z$$

Zur Bestimmung des Trägheitsmoments  $J_{st}$  vergleiche MH Nr. 3! Die Trägheitsmomente der zusätzlich angebrachten Körper berechnet man nach der Gleichung

$$J = m \cdot r^2$$

## V 6.2.7.

Bei dem vom Autor benutzten Gerät hatte die Drehstange ein Trägheitsmoment von etwa

$$J_{\text{st}} = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

Für die kombinierten Drehkörper ergaben sich folgende Trägheitsmomente:

### Trägheitsmomente der Drehkörper

$J_{\text{st}}$ in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Gesamtmasse der Zusatzkörper $m$ in kg	Abstand von der Drehachse $r$ in m	$J_z = m \cdot r^2$ in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$J = J_{\text{st}} + J_z$ in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$4,0 \cdot 10^{-3}$	0,250	0,15	$5,625 \cdot 10^{-3}$	$9,625 \cdot 10^{-3}$
$4,0 \cdot 10^{-3}$	0,250	0,20	$10,000 \cdot 10^{-3}$	$14,000 \cdot 10^{-3}$

### Versuch

Im Experiment bestimmt man für einige Drehkörper mit unterschiedlichen Trägheitsmomenten  $J$  für unterschiedliche Drehmomente  $M$  die Winkelbeschleunigungen  $\alpha$ . Zur Bestimmung von  $\alpha$  setzt man gleichzeitig mit der Freigabe der Bewegung auch die Stoppuhr in Gang und bestimmt die Zeit  $t$  für eine bestimmte Anzahl  $n$  von Umdrehungen. Die ermittelten Werte werden in einer Tabelle zusammengestellt und ausgewertet.

Tabelle zum Vergleich des Drehmoments mit dem Produkt aus Trägheitsmoment und Winkelbeschleunigung

Dreh- moment $M$ in $\text{N} \cdot \text{m}$	Trägheits- moment $J$ in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	An- zahl der Um- dre- hun- gen $n$	Dreh- winkel $\sigma$	Zeit $t$ ins	$t^2$ in $\text{s}^2$	Winkel- beschl. $\alpha$ in $\text{s}^{-2}$	$J \cdot \alpha$ in $\text{N} \cdot \text{m}$
$0,98 \cdot 10^{-3}$	$9,625 \cdot 10^{-3}$	10	$20\pi$	33,4	1115,6	$1,126 \cdot 10^{-1}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$
$0,98 \cdot 10^{-3}$	$14,000 \cdot 10^{-3}$	10	$20\pi$	41,3	1705,7	$0,737 \cdot 10^{-1}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$
$1,96 \cdot 10^{-3}$	$9,625 \cdot 10^{-3}$	10	$20\pi$	24,6	605,2	$2,076 \cdot 10^{-1}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$
$1,96 \cdot 10^{-3}$	$14,000 \cdot 10^{-3}$	10	$20\pi$	29,7	882,1	$1,426 \cdot 10^{-1}$	$1,99 \cdot 10^{-3}$

Die Tabelle zeigt, daß für die gleichmäßig beschleunigte Drehbewegung die Gesetzmäßigkeit

$$M = J \cdot \alpha$$

gilt. Sie wird *Grundgesetz der Drehbewegung* genannt, weil sie dem *Grundgesetz der translatorischen Bewegung*

$$F = m \cdot a$$

entspricht.

#### Bemerkungen

1. Verwendet man als Drehkörper den zum Reifenapparat gehörenden Reifen, dann berechnet sich das Trägheitsmoment aus der Masse des Reifens

$$m = 0,600 \text{ kg}$$

und dem Radius

$$r = 0,125 \text{ m}$$

zu

$$J = 9,375 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

2. Bei der Verwendung des Reifenapparats älterer Ausführung gestaltet sich das Experiment einfacher, weil die Trägheitsmomente der Drehkörper errechnet werden können, ohne das Trägheitsmoment der Drehstange vorher bestimmen zu müssen.

Die zu diesem Gerät gehörenden großen Reifen haben eine Masse von 1,2 kg und einen Radius von 0,25 m, die kleinen Reifen eine Masse von 0,6 kg und einen Radius von 0,125 m. Danach ergeben sich folgende Trägheitsmomente:

$$\text{für einen großen Reifen} \quad J = 7,50 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$\text{für zwei übereinandergelegte große Reifen} \quad J = 1,50 \cdot 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$\text{für einen kleinen Reifen} \quad J = 9,38 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$\text{für zwei übereinandergelegte kleine Reifen} \quad J = 1,88 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

#### 6.2.8. Nachweis der freien Achsen an einem Holzquader

1. Holzquader (etwa von der Größe einer Zigarrenkiste) oder mit Sand gefüllte flache Zigarrenkiste, je zwei parallele Flächen mit gleichen Farben gekennzeichnet

#### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment ist als Vorversuch für die folgenden gedacht.
2. Das Experiment sollte möglichst im Freien ausgeführt werden. Muß man es im Unterrichtsraum durchführen, dann nimmt man einen kleineren Quader (etwa 10 cm  $\times$  5 cm  $\times$  3 cm). Wegen der kleineren Ausmaße und wegen der geringeren Wurfhöhe ist das Experiment dann allerdings nicht so wirkungsvoll.
3. Zur Erklärung der Erscheinung wird man Überlegungen zur Wirkung der Trägheit anstellen.

#### Versuch

Beim Quader sind die Symmetrieachsen zugleich die Hauptträgheitsachsen (Abb. 6.2.8./1). Fällt die Achse der Drehung mit der Achse *a* des größten oder der Achse *c* des kleinsten Trägheitsmomentes zusammen, so bleibt die Achsenrichtung bestehen, wie man an der Farbe der senkrecht zur Achse stehenden Flächen erkennen kann. Rotiert er dagegen bei Beginn des Wurfes um die Achse *b* des mittleren Trägheitsmomentes, so bleibt die Achsenrichtung nicht erhalten, und der Körper führt torkelnde Bewegungen aus.

Der Versuch zeigt, daß nur die Achsen des kleinsten und des größten Trägheitsmomentes stabile freie Achsen sein können.

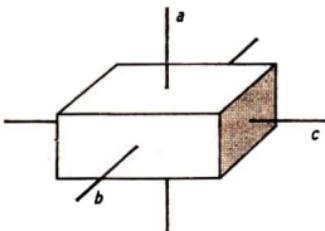


Abb. 6.2.8./1 Quader mit den Hauptträgheitsachsen

### 6.2.9. Nachweis der freien Achsen an verschiedenen rotierenden Körpern

1. Experimentiermotor mit Zubehör
2. Haken aus starkem Draht ⑧
3. dicke Schnur
4. Holzquader (etwa  $10 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ ) mit Ösen in den Mitten von drei verschiedenen großen Seitenflächen ⑧
5. Holzstab (Länge etwa 15 cm) mit Öse in der Stirnfläche ⑧
6. kreisförmige Holzscheibe ( $\varnothing$  etwa 15 cm) mit einer Öse am Rande und einer Öse in der Mitte ⑧
7. Ring aus dickem Draht ( $\varnothing$  etwa 15 cm) ⑧
8. Kette (Länge etwa 35 cm), zu einem Ring zusammengefügt ⑧

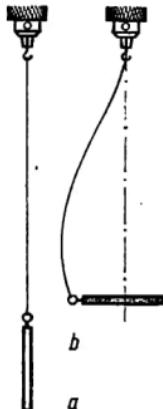


Abb. 6.2.9./1 Freie Rotationsachsen bei einem Stab: a) Drehung um die Achse des kleinsten, b) Drehung um die Achse des größten Trägheitsmomentes

#### Methodischer Hinweis

Bevor man dieses Experiment ausführt, sollte V 6.2.8. als Vorversuch gezeigt werden. So wie dort wird man auch hier Überlegungen über die Wirkungen der Trägheit anstellen und die Trägheitsmomente für die möglichen Rotationsachsen miteinander vergleichen.

#### Versuchsanordnung

Der unersetzte Achszapfen des Experimentiermotors wird mit dem Bohrfutter versehen. Man befestigt den Motor an einem Stativ so, daß das Bohrfutter nach unten zeigt und ein Körper, den man mit einem starken Bindfaden daran aufhängt, frei über der Tischplatte rotieren kann. Als Aufhängevorrichtung biegt man einen kräftigen Haken aus starkem Draht und spannt ihn in das Bohrfutter.



### *Versuche*

- Bei der Drehung des Quaders zeigt sich, daß nur die Achsen des größten und des kleinsten Trägheitsmomentes stabile Drehachsen sein können (vgl. V 6.2.8.). Die Rotation um die Achse des kleinsten Trägheitsmomentes ist aber nur stabil, solange die Störungen nicht zu groß sind. Überschreiten sie einen gewissen Betrag, so schlägt der Körper um und rotiert um die Achse des größten Trägheitsmomentes. Läßt man den Körper um die Achse des mittleren Trägheitsmomentes rotieren, so verläßt er diese labile Lage schon bei einer geringen Störung und geht schließlich in eine Drehung um die Achse des größten Trägheitsmomentes über.
- Der Stab rotiert bei geringer Drehgeschwindigkeit zunächst um seine Längsachse. Bei erhöhter Geschwindigkeit stellt er sich waagerecht und dreht sich um seinen Mittelpunkt (Abb. 6.2.9./1).
- Die am Mittelhaken aufgehängte Kreisscheibe rotiert um den Faden. Die am Rande aufgehängte Scheibe verhält sich ähnlich wie der Stab.
- Der starre Ring verhält sich wie die Kreisscheibe.
- Der lose Kettenring spannt sich bei rascher Rotation zu einem waagerecht liegenden Ring, der sich um eine durch seinen Mittelpunkt gehende lotrechte Achse dreht und dabei den Eindruck eines starren Körpers macht (vgl. V 6.1.18.). Die Versuche zeigen, daß nicht die Fadenrichtung die Richtung der Drehachse bestimmt, sondern die Lage der Hauptträgheitsachsen. Bei kleinen Geschwindigkeiten kann die Achse des kleinsten Trägheitsmomentes, bei großen Geschwindigkeiten aber nur die Achse des größten Trägheitsmomentes eine stabile freie Drehachse sein.

### *Bemerkungen*

- Statt des Experimentiermotors kann auch eine Bohrmaschine oder eine Schwungmaschine benutzt werden. Die Schwungmaschine stellt man so auf, daß ihre Achse über die Tischkante ragt und die Körper vor dem Tisch rotieren können.
- Der Bindfaden darf nicht zu kurz sein (Länge etwa 40 cm), damit sich die Körper bei der Rotation heben können.
- Wenn die Richtung der Rotationsscheibe nicht mit der Fadenrichtung übereinstimmt, beschreibt der Faden eine Rotationsfläche von flaschenförmiger Gestalt.

## **6.2.10. Rotation zweier Körper um den gemeinsamen Schwerpunkt**

- Experimentiermotor mit Zubehör
- Haken aus starkem Draht (vgl. V 6.2.9.) ⑧
- Erde-Mond-Modell ⑧, dazu erforderliches Material:
  - Bleikugel (etwa 100 g)
  - Bleikugel (etwa 200 g)
  - Stricknadel
  - Draht
- dicker Bindfaden

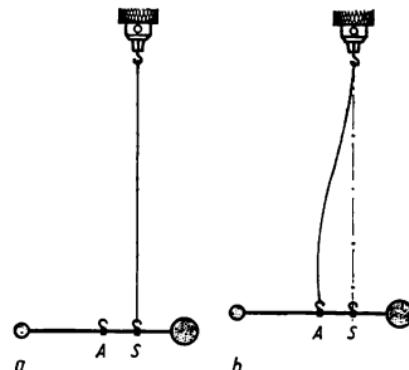


Abb. 6.2.10./1 Erde-Mond-Modell:  
 a) Aufhängung im Schwerpunkt des Systems,  
 b) Aufhängung in einem beliebigen Punkt

*Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment kann zur Veranschaulichung der Bewegung zweier benachbarter Himmelskörper dienen, die um ihren gemeinsamen Schwerpunkt rotieren, z. B. Doppelsterne oder Erde und Mond. Das Gerät wird deshalb auch Erde-Mond-Modell genannt.

*Herstellung des Modells*

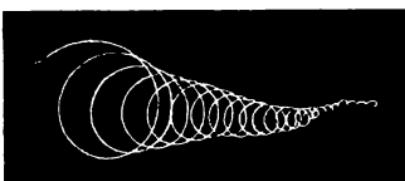
Zwei Blei- oder Eisenstücke mit unterschiedlichen Massen werden durchbohrt und auf einer Stricknadel festgelötet. Man stellt durch Ausbalancieren den Schwerpunkt S des Systems fest und lötet an dieser Stelle und an einer beliebigen anderen Stelle A aus Draht gebogene Haken an (Abb. 6.2.10./1).

Der Experimentiermotor wird mit dem Bohrfutter versehen und wie in V 6.2.9. an einem Stativ befestigt. Man hängt das Modell mit einem dicken, etwa 40 cm langen Bindfaden an einen Draht haken, den man in das Bohrfutter spannt. Man hängt das Modell erst am Haken S, dann am Haken A auf. Bei der Rotation bleibt im ersten Falle der Faden in seiner Lage, im zweiten beschreibt er wie bei V 6.2.9. eine Rotationsfläche, während das System um eine durch S gehende vertikale Achse rotiert. Nur diese Achse des größten Trägheitsmomentes kann eine stabile freie Drehungssachse sein.

**6.2.11. Versuche mit einem Kreisel — Stabilität der Kreiselachse [SE]**

1. Kreisel ⑧
2. Holzstäbchen (Speieler)
3. Glasplatte (etwa 20 cm × 30 cm)
4. Kerze

Abb. 6.2.11./1 Spur der Kreiselspitze auf einer beruften Glasplatte





### *Methodische Hinweise*

1. Dieses Experiment ist zur Einführung geeignet, um die Schüler zum Beobachten anzuregen und das Interesse für die physikalischen Zusammenhänge bei der Bewegung eines Kreisels zu wecken.
2. Der erste Teilversuch wirft das Problem auf, warum der Kreisel nicht unifällt und warum er sich in einer Torkelbewegung allmählich aufrichtet. Der zweite Teilversuch kann zur Klärung des Problems herangezogen werden. Er zeigt, daß die Kreiselachse senkrecht zu einer auf sie wirkenden Kraft ausweicht. Die Erklärung dieser Erscheinung durch den Trägheitssatz erfordert von den Schülern ein hohes Abstraktionsvermögen.

#### *1. Teilversuch: Die Kreiselachse richtet sich von selbst auf*

Aus einer kleinen kreisrunden Scheibe aus Holz oder Metall mit einer Mittelbohrung und einem angespitzten Holzstäbchen stellt man einen Kreisel her und setzt ihn durch Drehen zwischen zwei Fingern in Bewegung. Man erkennt die Beständigkeit der lotrechten Achsenlage. War die Achse beim Anwerfen schief gestellt, so vollführt sie eine Torkelbewegung und richtet sich allmählich auf. Beruht man in einer Kerzenflamme eine Glasplatte und läßt einen schief angeworfenen Kreisel auf ihr laufen, so sieht man aus der aufgezeichneten Spur der Spitze, daß das seitliche Wandern der Achse immer mehr abnimmt, je mehr sie sich aufrichtet (Abb. 6.2.11./1). Die Glasplatte kann mit dem Tageslichtschreibprojektor projiziert werden.

#### *2. Teilversuch: Verhalten der Kreiselachse beim Einwirken einer Kraft*

Versetzt man einen Kreisel in Rotation und drückt mit einem Stäbchen vorsichtig von der Seite her gegen seine Achse, so weicht sie senkrecht zu der Richtung der einwirkenden Kraft aus (Abb. 6.2.11./2). Entfernt man das Stäbchen rasch wieder, dann vollführt der Kreisel wie im 1. Teilversuch eine Torkelbewegung und richtet sich allmählich wieder auf.

### *Bemerkungen*

1. Das Experiment kann auch mit einem Kinderkreisel ausgeführt werden.
2. Die Drehzahl des Kreisels kann man nach dem stroboskopischen Verfahren abschätzen (vgl. V 6.1.12.). Man stellt aus Pappe oder dünnem Sperrholz Kreiselscheiben mit einem Durchmesser von etwa 7 cm her, die man mit Sektorenteilungen versieht. Man klebt sie auf der Kreiselscheibe fest oder heftet sie mit einem Drahtstiftchen an. Man beobachtet sie im Licht einer Leuchtstoffröhre oder einer Glimmlampe.
3. Ein in Rotation versetztes hölzernes Ei verhält sich ähnlich wie ein Kreisel. Das Aufrichten der Längsachse wirkt bei ihm besonders ungewöhnlich.

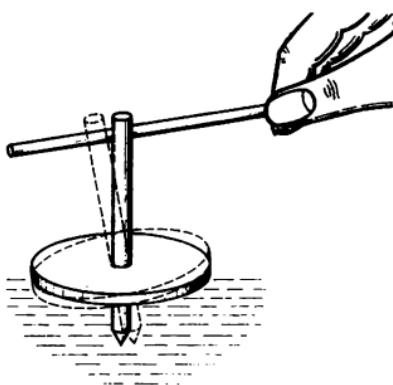


Abb. 6.2.11./2 Ausweichen der Achse eines Kreisels bei einem Kippversuch

### 6.2.12. Versuche mit einem kardanisch gelagerten Kreisel

#### 1. Kardanisch gelagerter Kreisel

##### *Methodische Hinweise*

1. Das Experiment kann zur Erklärung der Präzessionsbewegung der Erdachse herangezogen werden.

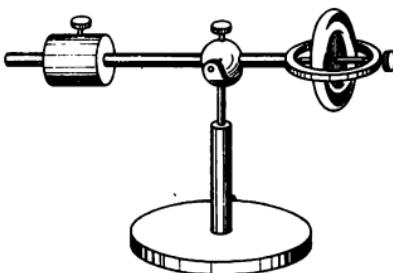


Abb. 6.2.12./1 Kardanisch gelagerter Kreisel

2. Beispiele für die Anwendung des Kreisels sind:

der Spielzeugkreisel, der Schiffskreisel, der Kreiselkompaß u. a. m. Vielseitige Anwendung findet er in Flugüberwachungsgeräten in Flugzeugen. Sie sind besonders beim Flug ohne Erdsicht, dem „Blindflug“, notwendig. So ist im Wendezeiger, im Kurskreisel, im künstlichen Horizont und im Autopilot jeweils ein Kreisel das Kernstück des Systems.

Zur Speicherung von Rotationsenergie wird der Kreisel in Spielzeugautos und versuchsweise auch schon in Straßenfahrzeugen angewandt.

3. In älteren physikalischen Unterrichtsmittelsammlungen sind meist kardanisch aufgehängte Kreisel vorhanden. Es gibt verschiedene Ausführungsformen. Dieser Versuchsbeschreibung ist eine Form zugrunde gelegt, die besonders zweckmäßig ist. Die Versuchsdurchführung kann bei der Benutzung einer anderen Ausführungsform sinngemäß abgewandelt werden.

##### *Beschreibung des Gerätes*

Der für dieses Experiment benutzte Kreisel (Abb. 6.2.12./1) besteht aus einer kreisrunden Metallscheibe von etwa 7 cm Durchmesser, die an ihrem Rand wulstartig verdickt ist. Ihre zylindrische Achse ist an beiden Enden konisch zugespitzt. Die Spitzen dienen zur Lagerung. Die Lagerpfannen werden durch einen Ring gehalten. Eine davon sitzt in der Stirnfläche einer Schraube und kann zur Einstellung des richtigen Abstandes verstellt werden.

In der Halterung ist ein 25 cm langer Stativstab eingeschraubt. Er führt durch ein Kugelgelenk und trägt am anderen Ende ein verschiebbares Metallstück zum Gewichtsausgleich. Das Kugelgelenk ist in einer Gabel zwischen den Spitzen gelagert. Die Gabel ist am oberen Ende eines kurzen Stativstabes angeschraubt. Dieser Stab ist in einem zylindrischen Rohr reibungssarm drehbar gelagert.

Die Kreiselachse ist mit einer Querbohrung versehen. In diese Bohrung steckt man das Ende einer dünnen, festen Schnur und wickelt diese in etwa 20 bis 30 Windungen um die Achse. Zieht man kräftig an der Schnur, wobei man mit der linken Hand den Halter festhält, dann wird der Kreisel in Rotation versetzt. Bei richtiger Einstellung der Lagerung läuft er mehrere Minuten lang.

##### *Versuch 1: Beständigkeit der Kreiselachse*

Durch Verschieben des Metallstückes stellt man den Gewichtsausgleich her, so daß die Kreiselachse waagerecht steht. Diese Einstellung sollte recht sorgfältig vorgenommen werden, weil davon das Gelingen des Experiments abhängt. Dann versetzt man den Kreisel in Rotation.

Man faßt das Gerät am Stativfuß oder an der zylindrischen Röhre, hebt es, senkt es, bewegt es nach der Seite, neigt es leicht nach beliebigen Seiten und dreht es schließlich einmal herum. Die Kreiselachse behält bei all diesen Bewegungen ihre Lage im Raum bei, sie zeigt immer in derselben Richtung. Auch wenn man die Kreiselebene beim Anwerfen geneigt hält, behält der Kreisel diese nunmehr geneigte Richtung im Raum bei.

*Versuch 2: Verhalten des Kreisels bei einer seitlich auf seine Rotationsachse einwirkenden Kraft*

Man versetzt den nach Versuch 1 eingestellten Kreisel in Rotation, so daß seine Achse waagerecht steht. Stößt man von der Seite her leicht gegen das Ende des waagerechten Stativstabes, dann folgt der Kreisel dieser Bewegung nicht, sondern weicht nach oben oder nach unten aus. Er vollführt eine Torkelbewegung und kommt schließlich wieder in der ursprünglichen Richtung zur Ruhe. Auf einen leichten Stoß von oben oder von unten weicht er nach der Seite aus. Die Ausweichbewegung erfolgt immer senkrecht zur Richtung der einwirkenden Kraft (Abb. 6.2.12./2).

*Versuch 3: Präzession der Kreiselachse*

Man verschiebt das Metallstück auf dem Stativstab um wenige Millimeter nach außen, so daß ein geringes Übergewicht entsteht. Versetzt man nun den Kreisel bei waagerechter Stellung seiner Achse in Rotation, dann behält die Kreiselachse ihre Lage im Raum nicht mehr bei. Die Achse dreht sich langsam um den lotrechten Stativstab, sie vollführt eine Präzessionsbewegung. Ganz allmählich senkt sich dabei infolge des Übergewichts das Metallstück, so daß der Kreisel schließlich mit einer schräg nach oben gerichteten Achse zur Ruhe kommt. Je größer das Übergewicht ist, um so schneller erfolgt die Drehung der Kreiselachse um den lotrechten Stativstab. Verschiebt man das Metallstück nach innen, dann bewegt sich die Kreiselachse in entgegengesetzter Richtung.

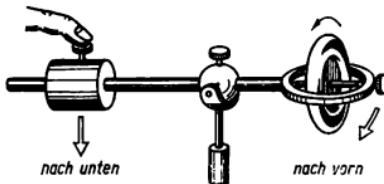


Abb. 6.2.12./2 Ausweichbewegung des Kreisels bei einer Kraft, die von oben her auf seine Achse einwirkt

### 6.2.13. Versuche mit einem Fahrradkreisel

*Zu Variante a*

1. Vorderrad eines Fahrrades
2. 2 zylindrische Handgriffe aus Metall ⑧

*Zu Variante b*

Geräte 1. und 2., außerdem

3. Drehschemel

### *Methodische Hinweise*

1. Die Kraft, mit der der Kreiselachse bei einem Kippversuch reagiert, ist von der Größe des Trägheitsmomentes abhängig. Durch den großen Radius des Rades ist sein Trägheitsmoment erheblich. So besteht der Vorzug dieses Experiments darin, daß der Experimentierende diese unerwartet heftige Reaktion des Kreisels verspürt. Der Kreisel sollte deshalb von einem Schüler gehalten werden.
2. Besonders wirkungsvoll ist die Variante b, die man unbedingt bevorzugen sollte, wenn ein Drehschemel zur Verfügung steht.

### *Herstellung des Kreisels*

Die Handgriffe fertigt man aus zwei Metallrohrstücken, in die man zur Radachse passendes Gewinde schneidet. Man schraubt sie auf die auf beiden Seiten herausragende Achse.

### *Variante a*

Ein Schüler erfaßt das Rad mit beiden Händen an den Handgriffen und hält es zwischen den vorgestreckten, leicht gespreizten Armen so vor sich hin, daß es sich in einer vertikalen Ebene unbehindert drehen kann.

Versetzt man die Felge mit der Hand in Umdrehung, so wirkt das Rad wie ein Kreisel. Versucht der Schüler, die Radachse zu kippen, so weicht das Rad seitlich aus (Abb. 6.2.13./1). Dreht sich der Schüler schnell um seine Achse, so reagiert das Rad darauf mit einer Kippung seiner Achse.

### *Variante b*

Die Ausführung des Experiments erfolgt wie in der Variante a, nur mit dem Unterschied, daß der Schüler auf einem Drehschemel sitzt. Versucht er, die Kreiselachse zu kippen, dann wird er durch die Reaktion des Kreisels mit dem Schemel gedreht. Kippt er die Kreiselachse nach der anderen Seite, dann ändert sich auch die Drehrichtung des Schemels. Dreht man den Schemel mit dem Schüler, dann kippt die Kreiselachse, bis sie lotrecht steht. Der Kreisel rotiert dann in einer horizontalen Ebene.

### *Bemerkung*

Man kann das Trägheitsmoment des Rades und damit die Kraftwirkungen des Kreisels noch vergrößern, wenn man statt der Befestigung ein Stück Starkstromkabel auf der Felge anbringt.

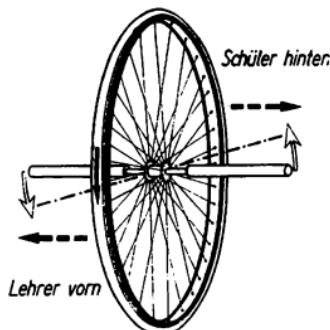


Abb. 6.2.13./1 Kraftwirkungen am Fahrradkreisel:

Voller Pfeil: Drehung des Kreisels,

Hohlpfeile: Kippen der Kreiselachse durch einen Schüler.

gestrichelte Pfeile: Seitliches Ausweichen des Kreisels. Der Schüler steht auf der dem Beschauer abgewandten Seite des Bildes.

## 7. Schwingungen

### 7.0. Methodische Bemerkungen

**7.0.1.** Erfolgt die zeitlich periodische Veränderung einer physikalischen Größe  $y$  nach einer Sinusfunktion:

$$y = y_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

dann nennt man die Schwingung *harmonisch*. Die grafische Darstellung der Elongation  $y$  einer harmonischen Schwingung ergibt eine Sinuskurve. Im Mathematikunterricht leitet man die Sinuskurve aus der Bewegung eines Punktes auf einer Kreisbahn her. Im Physikunterricht verknüpft man die Herleitung der Gleichung für die Elongation einer harmonischen Schwingung experimentell mit einer gleichförmigen Kreisbewegung (V 7.1.6.), indem man die Schwingung mit der Projektion der Kreisbewegung vergleicht.

Schwingungsversuche mit Federschwingern und Fadenpendeln eignen sich sehr gut als Praktikumsexperimente. Schülerexperimente in gleicher Front sind im allgemeinen nicht möglich, weil so viele Stoppuhren meist nicht zur Verfügung stehen.

Im Zusammenhang mit Problemen des Raumfluges oder der geologischen Erforschung der Erde ist die Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Schwerkraft von Interesse. Im Experiment V 7.1.10. ist eine Möglichkeit gezeigt, wie man diese Abhängigkeit nachweisen kann.

Drei Experimente dieses Abschnittes sind der Aufzeichnung von Schwingungen gewidmet. Hier könnten auch die Experimente V 1.3.3. bis V 1.3.5., V 3.1.2. und V 3.1.3. aus dem 10. Teil eingereiht werden. Dort werden zur Aufzeichnung von Schwingungen außer den hier beschriebenen Methoden auch die stroboskopische Methode mit einer Schlitzscheibe und die Methode der Umwandlung mechanischer Schwingungen in elektrische und deren Aufzeichnung mit dem Kathodenstrahl- oszilloskop benutzt.

**7.0.2. Resonanz und Überlagerung von Schwingungen** spielen in der Wissenschaft und in der Technik eine wesentliche Rolle.

Es bereitet keine Schwierigkeiten, diese Erscheinungen und Zusammenhänge in einigen grundlegenden Experimenten zu behandeln. Man sollte aber darauf achten, daß neben Beispielen für die Anwendung der Resonanz auch Beispiele für das Auftreten unbeabsichtigter oder unerwünschter Resonanz genannt werden. In diesem Abschnitt des Buches wurden nur einige Experimente zur Resonanz und zur Überlagerung von Schwingungen aus der Mechanik beschrieben. Beispiele aus der Akustik, aus der Elektrotechnik und der Hochfrequenztechnik sind im 10. Teil zu finden.

**7.0.3.** Die meisten der in diesem Kapitel beschriebenen Experimente können mit Teilen aus dem *Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen* ausgeführt werden. Dieser Gerätesatz enthält verschiedene Zugfedern, eine Druckfeder, eine Blattfeder, eine Spiralfeder und einige Zubehörteile, die in Verbindung mit diesen Federn benutzt werden können. Dadurch gestalten sich die Experimentieranordnungen im allgemeinen recht einfach und übersichtlich.

Zur Aufzeichnung von Schwingungen eignet sich das als *Schwingungsschreiber* bezeichnete Unterrichtsmittel.

Dieses Gerät besteht aus Aufbauteilen. Sein Aufbau erfordert einen Aufwand. Diese Mühe lohnt aber; denn die Schwingungsbilder, die man mit ihm erhält, sind anschaulich, groß und überzeugend. Gelegentliche Mißerfolge sind im allgemeinen auf eine unsachgemäße Bedienung zurückzuführen.

## 7.1. Die harmonische Bewegung — Das Pendel

### 7.1.1. Schwingungen eines vertikalen Federschwingers [SE]

1. Schraubenfeder mit Endhaken
2. Hakenkörper
3. Demonstrationsstoppuhr oder Stoppuhr
4. Vertikalmeßstab mit 3 Zeigern

#### Methodischer Hinweis

Das Experiment ist als Vorversuch gedacht und soll die Schüler mit den grundlegenden Erscheinungen und Begriffen der Schwingungslehre bekanntmachen.

#### Versuch

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 7.1.1./1 wiedergegeben. Zum Erzielen möglichst langsamer Schwingungen wählt man eine lange, weiche Schraubenfeder aus. Als Beobachtungsmarken für die Ruhelage und die Umkehrpunkte dienen drei Schiebezeiger.

Mit dieser Versuchsanordnung werden folgende Begriffe erarbeitet:

- Periodizität,
- Schwingungsdauer  $T$ ,
- Frequenz oder Schwingungszahl  $f$ ,
- Schwingungsphase,
- Elongation  $y$  und
- Amplitude  $y_{\max}$ .

Folgende Zusammenhänge können erörtert werden:

- die rückführende Kraft und die Beschleunigung des schwingenden Körpers,
- der Verlauf der Geschwindigkeit des schwingenden Körpers,
- die Energieumwandlungen und die physikalischen Ursachen für den Schwingungsvorgang.

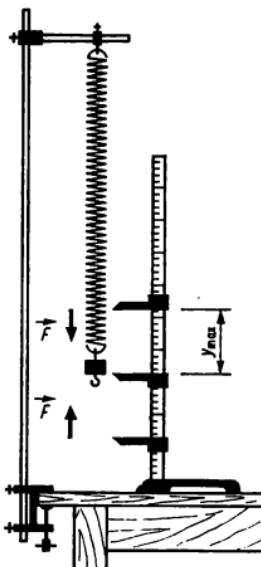


Abb. 7.1.1./1 Vertikaler Federschwinger

***Bemerkung***

Die Schraubenfeder kann dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.

**7.1.2. Schwingungen eines horizontalen Federschwingers**

1. 2 gleichartige weiche Schraubenfedern
2. Hakenkörper
3. Demonstrationsstoppuhr oder Polydigit

***Methodische Hinweise***

1. Vergleiche MH, V 7.1.1.!
2. Mit diesem Experiment können die gleichen Erkenntnisse vermittelt werden wie mit V 7.1.1.

***Versuch***

Man spannt zwei gleiche Schraubenfedern zwischen zwei Stativen so aus, daß ihre beiden freien Enden durch einen Hakenkörper verbunden werden. Um zu vermeiden, daß das System durchhängt, befestigt man den Hakenkörper mit einem langen Faden pendelartig an einem weiteren Stativ (vgl. Abb. 5.1.2./3).

Der Pendelkörper wird in Richtung der Federn in Schwingung versetzt. Die Ausführung des Versuches erfolgt ebenso wie im V 7.1.1.

***Bemerkungen***

1. Die Schraubenfedern können dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.
2. Das Experiment ist in verbesserter Form unter Verwendung einer Luftkissenbahn durchführbar. Dazu wird der Hakenkörper durch einen Schwebekörper großer Masse ersetzt (vgl. V 7.2.2.). Da die Federn nicht die Gewichtskraft des schwingenden Körpers zu kompensieren brauchen, können sie lang und weich sein. Daraus resultiert eine Schwingungsdauer, die weit über einer Sekunde liegt.

**7.1.3. Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Federschwingers von der Masse des Pendelkörpers [SE]**

1. Schraubenfeder
2. Hakenkörper (Wägesatz)
3. Demonstrationsstoppuhr oder Polydigit

***Methodischer Hinweis***

Dieses Experiment und die beiden folgenden bilden eine Einheit und dienen der Herleitung der Gleichung zur Bestimmung der Schwingungsdauer eines Federschwingers. Sie sind als Schülerexperimente sehr gut geeignet.

*Versuch*

Die Schraubenfeder wird wie im V 7.1.1. an einem Stativ aufgehängt. Man belastet sie in Abstufungen von je 50 g mit Hakenkörpern und versetzt sie in vertikale Schwingungen. Für jede Belastung wird die Schwingungsdauer  $T$  als arithmetisches Mittel einer größeren Anzahl von Schwingungen ermittelt. Die Ergebnisse werden als Funktion der Masse  $m$  des Pendelkörpers grafisch dargestellt (Abb. 7.1.3./1). Die Darstellung läßt vermuten, daß es sich um eine Parabel handelt und daß

$$T \sim \sqrt{m}$$

ist. Eine rechnerische Prüfung in Form einer Tabelle ergibt mit guter Übereinstimmung konstante Werte für  $\frac{T}{\sqrt{m}}$ .

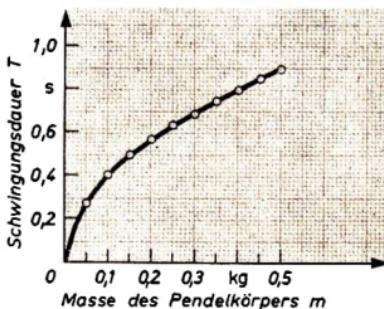


Abb. 7.1.3./1 Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Federschwingers von der Masse des Pendelkörpers

*Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Federschwingers von der Masse des Pendelkörpers*

Masse $m$ in kg	Schwingungsdauer $T$ in s	$\sqrt{m}$	$\frac{T}{\sqrt{m}}$
0,05	0,27	0,224	1,21
0,10	0,40	0,316	1,26
0,15	0,49	0,387	1,26
0,20	0,57	0,448	1,27
0,25	0,63	0,500	1,26
0,30	0,68	0,548	1,24
0,35	0,74	0,592	1,25
0,40	0,79	0,633	1,25
0,45	0,84	0,671	1,25
0,50	0,89	0,708	1,26

Das Experiment zeigt, daß die Schwingungsdauer  $T$  eines Federschwingers proportional der Quadratwurzel aus der Masse  $m$  des Pendelkörpers ist:

$$T \sim \sqrt{m}.$$

Die Masse der Feder selbst ist relativ klein gegenüber der Masse des Pendelkörpers und wirkt sich auf die Schwingungsdauer nur geringfügig aus. Sie kann vernachlässigt werden.

#### Bemerkungen

1. Die Schraubenfeder kann dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.
2. Bei der Ausführung als Schülerexperiment werden Teile des SEG Mechanik für den Versuchsaufbau benutzt.

### 7.1.4. Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Federschwingers von der Federkonstanten [SE]

#### Zu Variante a

1. Mehrere gleichartige Schraubenfedern
2. Hakenkörper
3. Demonstrationsstoppuhr oder Polydigit
4. Vertikalmeßstab

#### Zu Variante b

Geräte 2. bis 4., außerdem

5. mehrere Schraubenfedern mit unterschiedlichen Federkonstanten

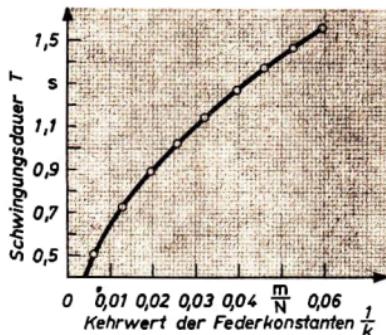


Abb. 7.1.4./1 Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Federschwingers vom Kehrwert der Federkonstanten

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH, V 7.1.3.!
2. Wenn man mehrere gleichartige Schraubenfedern zur Verfügung hat, sollte man die Variante a wählen, weil man die Federkonstanten der einzelnen Kombinationen leicht vergleichen kann. Die Abhängigkeit von der Federkonstante kann dadurch besonders sinnfällig nachgewiesen werden. Eine aus  $n$  Einzelfedern zusammengesetzte Feder hat dieselben elastischen Eigenschaften wie eine Feder von der  $n$ -fachen Länge einer Einzelfeder.

#### Variante a: Verwendung mehrerer gleichartiger Schraubenfedern

Wenn die verwendeten Federn völlig gleichartig sind, erweisen sich die Federkonstanten  $k$  der zusammengesetzten Federn als umgekehrt proportional der Anzahl  $n$  der Einzelfedern. Diese Tatsache kann man in einem Vorversuch nach V 3.2.1. bestätigen. Es ist

$$n \cdot k = \text{konst.}$$

oder

$$n \sim \frac{1}{k}.$$

Zur Ausführung des Hauptversuches hängt man zunächst an eine einzelne Feder Hakenkörper beliebiger Masse, beispielsweise 1 kg, läßt sie schwingen und bestimmt die Schwingungsdauer. Ebenso verfährt man mit jeder Kette von  $n$  Federn. Die Meßergebnisse werden in eine Tabelle aufgenommen und grafisch dargestellt (Abb. 7.1.4./1). Bei der Betrachtung der Kurve kann man vermuten, daß es sich um eine Parabel handelt und daß die Beziehung

$$T \sim \sqrt{n}$$

gilt. Diese Vermutung wird durch Rechnung überprüft.

Da

$$n \sim \frac{1}{k}$$

ist, ergibt sich

$$T \sim \sqrt{\frac{1}{k}}$$

oder

$$T \cdot \sqrt{k} = \text{konst.}$$

Der Durchschnittswert von  $T \cdot \sqrt{k}$  betrug bei dem hier beschriebenen Experiment 6,35 (vgl. Tabelle). Der Versuch zeigt also: Bei konstanter Masse des Pendelkörpers ist die Schwingungsdauer eines Federschwingers proportional der Quadratwurzel aus dem reziproken Wert der Federkonstanten.

#### Bemerkung

Die für dieses Experiment benötigten gleichartigen Federn kann man selbst herstellen, indem man von einer langen Feder gleichlange Stücke abkneift und die Enden zu halbkreisförmigen Ösen umbiegt, so daß man die Stücke leicht aneinanderhängen kann.

Anzahl der Federn $n$	Federkonstante $k$ in N/m	$n \cdot k$ in m/N	Schwingungsdauer $T$ in s	$\sqrt{k}$	$T \cdot \sqrt{k}$
1	155	155	0,51	12,40	6,35
2	77,5	155	0,72	8,80	6,35
3	51,0	153	0,89	7,14	6,35
4	38,8	155	1,02	6,23	6,35
5	31,0	155	1,14	5,57	6,35
6	25,3	152	1,26	5,03	6,35
7	21,8	153	1,35	4,67	6,35
8	19,0	152	1,46	4,36	6,37
9	16,8	151	1,55	4,10	6,36

*Variante b: Verwendung mehrerer Schraubenfedern mit unterschiedlichen Federkonstanten*

In einem Vorversuch bestimmt man nach V 3.2.1. die Federkonstanten der einzelnen Schraubenfedern. Danach belastet man sie nacheinander mit demselben Hakenkörper und bestimmt wie bei der Variante a die Schwingungsdauer der Federschwinger. Die Auswertung erfolgt wie dort in Form einer Tabelle. Eine

grafische Darstellung ist nur dann sinnvoll, wenn eine ausreichende Zahl unterschiedlicher Federn für das Experiment zur Verfügung standen.

*Bemerkung*

Die für die Variante b benötigten Schraubenfedern kann man dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnehmen.

### 7.1.5. Herleitung der Gleichung zur Berechnung der Schwingungsdauer eines Federschwingers [SE]

Geräte wie im V 7.1.3. und 7.1.4.

*Methodische Hinweise*

1. Dieses Experiment schließt sich an die Experimente V 7.1.3. und V 7.1.4. an (vgl. MH, V 7.1.3.).
2. Die Gleichung zur Berechnung der Schwingungsdauer wird aus den Ergebnissen von V 7.1.3. und V 7.1.4. induktiv hergeleitet, der Proportionalitätsfaktor  $2\pi$  wird empirisch bestimmt.

*Zusammenfassung der Ergebnisse aus V 7.1.3 und V 7.1.4.*

In den beiden vorausgegangenen Experimenten wurde festgestellt, daß die Schwingungsdauer  $T$  eines Federschwingers der Quadratwurzel aus der Masse  $m$  des Pendelkörpers direkt und der Quadratwurzel aus der Federkonstanten  $k$  umgekehrt proportional ist. Faßt man beide Gesetzmäßigkeiten zusammen, dann ergibt sich

$$T \sim \sqrt{\frac{m}{k}}$$

oder durch das Einführen eines Proportionalitätsfaktors  $c$

$$T = c \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad \text{Daraus folgt} \quad c = T \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Setzt man in diese Gleichung die Schwingungsdauer  $T$  in s, die Federkonstante  $k$  in  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$  und die Masse  $m$  in kg ein, dann ergibt sich  $c$  als dimensionslose Zahl. Um  $c$  berechnen zu können, muß man für eine beliebige Feder die Federkonstante, die schwingende Masse und die Schwingungsdauer kennen. In der Tabelle sind die Ergebnisse für fünf Federn mit stark voneinander abweichenden Federkonstanten und beliebig gewählten schwingenden Massen angegeben. Als arithmetisches Mittel der errechneten Werte von  $c$  ergibt sich 6,33, und die experimentell bestimmte Schwingungsgleichung lautet

$$T = 6,33 \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Die *theoretisch* hergeleitete Schwingungsgleichung ist, wie hier ohne Beweis mitgeteilt sei,

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Der *experimentell* gefundene Wert 6,33 ist eine brauchbare Annäherung an  $2\pi$ .

*Experimentelle Bestimmung des Proportionalitätsfaktors der Gleichung zur Berechnung der Schwingungsdauer eines Federschwingers*

Lfd. Nr.	Feder- konstante $k$ in $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	Massa des Pendelkörpers $m$ in kg	Schwingungs- dauer $T$ in s	$c = T \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$
1	12,5	0,4	1,14	6,38
2	21,8	0,5	0,96	6,34
3	25,5	0,4	0,80	6,39
4	40,6	0,5	0,69	6,22
5	73,5	1,53	0,91	6,32

*Bemerkung*

Für dieses Experiment können sowohl die für die Variante a als auch die für die Variante b im V 7.1.4. benutzten Schraubenfedern verwendet werden.

**7.1.6. Vergleich einer Pendelschwingung mit der Projektion der Bewegung einer Kurbel**

1. Schraubenfeder	5. Pappe
2. Hakenkörper	6. Physikleuchte mit Transformator
3. Experimentiermotor mit Zubehör	7. Projektionsschirm
4. dicker Draht	

*Methodische Hinweise*

1. Die Bedeutung des Experiments liegt darin, daß es die Auffassung der harmonischen Bewegung als Projektion einer gleichförmigen Kreisbewegung experimentell veranschaulicht.
2. Zur Herleitung der Gleichung für die Elongation kann der Tageslichtschreibrprojektor eingesetzt werden. Die Projektionsfolie gestaltet man zweckmäßig als Entwicklungsfolie. Auf der Grundfolie werden die Kreisbahn und das Koordinatensystem dargestellt. Auf den Klappfolien, die wie die Blätter eines Buches alle von einer Seite her nacheinander darübergeklappt werden, stellt man die einzelnen Bewegungsphasen dar, so daß schließlich das Bild der Sinusfunktion entsteht und die Gleichung

$$y = f(t) = y_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

abgelesen werden kann.

*Versuchsaufbau*

Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 7.1.6./1 wiedergegeben. Der Experimentiermotor wird an einem Stativ so befestigt, daß der seitlich herausragende untergesetzte Achsstumpf in der Höhe der Ruhelage des Pendelkörpers steht. Man setzt das zum Zubehör des Motors gehörende Bohrfutter auf und spannt einen kurzen Stativstab ein. Daran befestigt man mit einigen Windungen ein Stück

Draht, das man auch der Form einer Kurbel hiegt. Die Länge des Kurbelarmes soll der Amplitude des Federschwingers entsprechen. Die Versuchsanordnung wird mit einer Physikleuchte aus nicht zu geringer Entfernung auf einen Projektions schirm oder auf die Wand projiziert (Schattenprojektion). Die Physikleuchte sollte dabei in der Höhe der Ruhelage des Pendelkörpers angebracht werden.

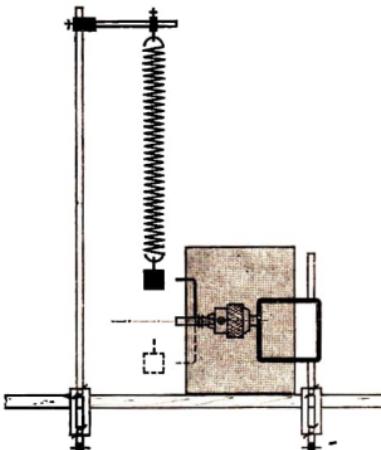


Abb. 7.1.6./1 Versuchsanordnung zum Vergleich einer Pendelschwingung mit der Projektion der Bewegung einer Kurbel

### Versuch

Man versetzt den Pendelkörper in Schwingung und schaltet den Motor ein. Die Drehzahl des Motors regelt man sorgfältig so ein, daß der Schatten der Kurbel genau im selben Rhythmus wie der Pendelkörper und mit ihm phasengleich auf und ab schwingt. Dabei nimmt man die Kreisbewegung des gebogenen Drahtstückes kaum wahr, sondern hat den Eindruck, daß es ebenso wie der Pendelkörper auf und ab schwingt. Dieser Eindruck verstärkt sich, wenn man den Kurbelarm durch ein Stück Pappe verdeckt, das man vor oder hinter dem Experimentiermotor anbringt (Abb. 7.1.6./1), so daß in der Projektion nur das Ende des Stativstabes und das Ende der Drahtkurbel zu sehen sind.

Betrachtet man den Schatten des rotierenden Drahtes allein, dann kann man die Bewegung nahezu beliebig langsam einstellen. Dabei sieht man, wie die Geschwindigkeit des schwingenden Schattens jedesmal bis auf Null absinkt, wenn er sich einem Umkehrpunkt nähert, und wie sie wieder zunimmt, wenn der Schatten des Drahtes auf den Schatten des Stativstabes, auf die Ruhelage, zuläuft.

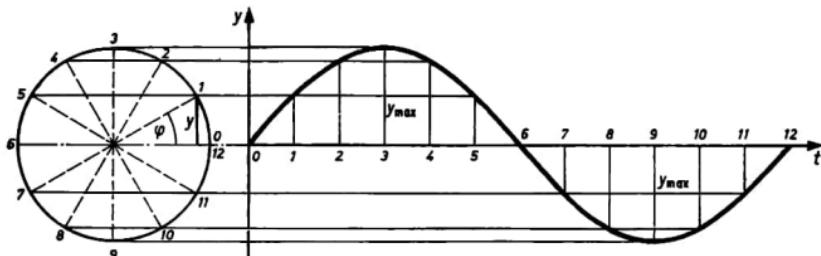


Abb. 7.1.6./2 Grafische Darstellung zur Herleitung der Gleichung für die Elongation einer harmonischen Schwingung

Die Auswertung erfolgt an einer zeichnerischen Darstellung (Abb. 7.1.6./2). Man weist nach, daß die Darstellung der Elongation  $y$  als Funktion der Zeit  $t$  der Sinusfunktion entspricht:

$$y = f(t) = y_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

In dieser Gleichung ist  $y$  die Elongation,  $y_{\max}$  die Amplitude und  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit (oder Kreisfrequenz). Die Amplitude entspricht dem Radius der gleichförmigen Kreisbewegung, und das Produkt  $\omega \cdot t$  ergibt den Phasenwinkel  $\varphi$ .

#### Bemerkung

Die für dieses Experiment benötigte Schraubenfeder kann dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.

### 7.1.7. Unabhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Masse des Pendelkörpers

1. 2 gleichartige Fläschchen
2. dünner Draht
3. Faden
4. Schrot oder Sand

#### Methodischer Hinweis

Das Experiment mag überflüssig erscheinen, aber für die Schüler ist die Tatsache, daß die Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Masse des Pendelkörpers unabhängig ist, gar nicht so selbstverständlich. Das ist besonders dann der Fall, wenn vorher die Gesetzmäßigkeiten eines Federschwingers untersucht wurden.

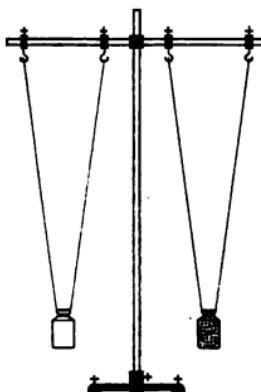


Abb. 7.1.7./1 Zwei bifilar aufgehängte Pendel

#### Versuch

Um die Hälse von zwei gleich großen Fläschchen legt man aus dünnem Draht einen Ring und befestigt an ihm an gegenüberliegenden Stellen zwei Ösen. Die Flaschen werden mit Hilfe von je zwei Ringen mit Haken an einem Querstab eines Stativs bifilar aufgehängt (Abb. 7.1.7./1).

Durch Verschieben der Haken stellt man die Pendel auf gleiche Länge ein und läßt sie dann gleichzeitig schwingen. Die beiden Pendel haben etwa die gleiche Schwingungsdauer. Darauf ändert sich nichts, wenn man das eine Fläschchen mit Sand oder Schrot füllt. Der Versuch zeigt die Unabhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Masse des Pendelkörpers.

### 7.1.8. Einfluß der Schwingungsweite auf die Schwingungsdauer eines Fadenpendels [SE]

1. Hakenkörper ( $m = 50 \text{ g}$ )
2. Faden
3. Tafelwinkelmesser
4. Demonstrationsstoppuhr oder Stoppuhr

#### Methodischer Hinweis

Der Pendelkörper eines Fadenpendels bewegt sich auf einer Kreisbahn, deshalb ist es sinnvoll, die Abhängigkeit der Schwingungsdauer vom Winkelausschlag  $\alpha$  zu untersuchen. Er kann mit einem Winkelmaß leicht bestimmt werden. Die hier gewonnenen Erkenntnisse können auf die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Amplitude übertragen werden.

Zur experimentellen Untersuchung dieser Zusammenhänge eignet sich wegen der Geradlinigkeit der Bewegung besser ein Federschwinger.

#### Versuch

Aus dem Hakenkörper und einem etwa 1 m langen Faden fertigt man ein Fadenpendel, das man an einem Stativ aufhängt. Dicht davor bringt man einen Tafelwinkelmaß so an, daß man die Winkelausschläge des Pendels daran ablesen kann (Abb. 7.1.8./1). Man hebt den Pendelkörper seitlich an, so daß der Pendelfaden mit der Ruhelage einen beliebigen Winkel  $\alpha$  einschließt. Man läßt das Pendel los und bestimmt die Schwingungsdauer  $T$ . Das Experiment wird mit verschiedenen Winkelausschlägen wiederholt. Die Meßergebnisse werden in einer Tabelle erfaßt.

Winkelausschlag $\alpha$ in Grad						
Schwingungsdauer $T$ in s						

Man erkennt, daß bei größeren Winkelausschlägen die Schwingungsdauer größer ist als bei kleineren. Für Winkelausschläge unter  $5^\circ$  ist die Schwingungsdauer mit guter Annäherung konstant.

Das gleiche Ergebnis erhält man auch, wenn man das Experiment mit anderen Pendellängen wiederholt.

#### Bemerkungen

1. Da der Winkelausschlag von Schwingung zu Schwingung allmählich abnimmt, ist es ratsam, zur Bestimmung der Schwingungsdauer nur die Zeit für wenige Schwingungen zu stoppen.
2. Wegen der Abnahme des Winkelausschlags braucht man den Pendelkörper nur einmal in Schwingung zu versetzen ( $\alpha$  etwa  $90^\circ$ ). Man wartet dann immer, bis der Winkelausschlag um einen bestimmten Betrag, z. B. um  $10^\circ$ , abgenommen hat, um die Schwingungsdauer erneut zu ermitteln.

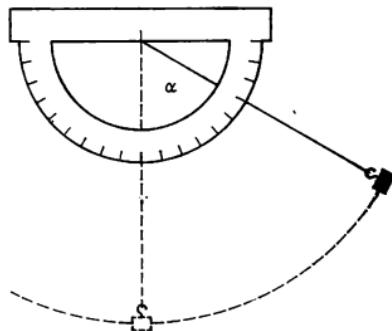


Abb. 7.1.8./1 Versuchsanordnung zur Messung des Winkelausschlags eines Fadenpendels. Das Stativmaterial ist nicht mitgezeichnet.

### 7.1.9. Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Pendellänge [SE]

1. Pendelkugel mit Öse oder Hakenkörper (etwa 50 g)
2. dünner Faden
3. Demonstrationsstoppuhr oder Stoppuhr
4. Meßstab
5. Federklammer

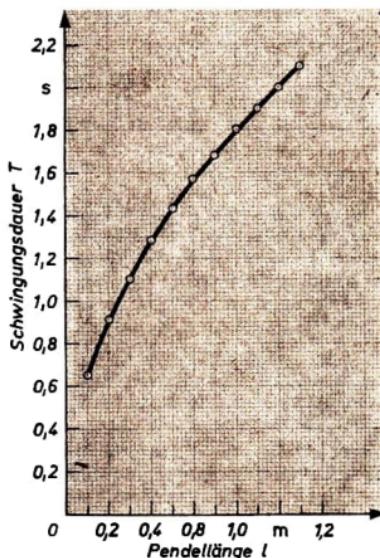
#### Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist als Schülerexperiment sehr gut geeignet.
2. Wenn man die Schwingungsgleichung

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

als bekannt voraussetzt, kann man das Fadenpendel zur Bestimmung der Fallbeschleunigung  $g$  verwenden.

Abb. 7.1.9/1 Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Pendellänge



#### Versuch

Man befestigt mit einer Kreuzmuffe an einem Stativ einen Querstab und klemmt daran mit einer Federklammer ein Fadenpendel so an, daß es bis zu einer Pendellänge von 1,10 m frei schwingen kann. Die Pendellänge wird vom Aufhängepunkt bis zur Mitte des Pendelkörpers gemessen.

Man bestimmt bei kleinen Winkelausschlägen aus einer größeren Anzahl von Schwingungen die Schwingungsdauer  $T$ , wobei man die Pendellänge in Stufen von je 10 cm bis zu einer Länge von 1,10 m ändert.

#### Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Pendellänge

Pendellänge $l$ in m	Schwingungsdauer $T$ in s	$\sqrt{l}$ in $\text{m}^{1/2}$	$\frac{T}{\sqrt{l}}$ in $\text{s} \cdot \text{m}^{-1/2}$
0,1	0,65	0,317	2,05
0,2	0,91	0,448	2,03
0,3	1,10	0,548	2,00
0,4	1,28	0,632	2,02
0,5	1,43	0,707	2,02
0,6	1,57	0,775	2,03
0,7	1,68	0,837	2,00
0,8	1,80	0,894	2,01
0,9	1,90	0,949	2,00
1,0	2,00	1,000	2,00
1,1	2,10	1,049	2,00



Man trägt vorerst nur die Meßwerte für  $l$  und  $T$  ein und stellt die Abhängigkeit der Schwingungsdauer  $T$  von der Pendellänge  $l$  grafisch dar (Abb. 7.1.9./1). Diese Darstellung ergibt eine Parabel. Als Funktionsgleichung kann man vermuten

$$T = a \cdot \sqrt{l}, \text{ wobei } a = T/\sqrt{l}$$

ein noch zu bestimmender Proportionalitätsfaktor ist.

Um die Richtigkeit dieser Vermutung zu bestätigen, ergänzt man die Tabelle und erkennt, daß der Quotient  $T/\sqrt{l}$  mit guter Annäherung konstant ist. Aus der im Unterricht theoretisch hergeleiteten Gesetzmäßigkeit für das mathematische Pendel

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

erkennt man, daß der Proportionalitätsfaktor  $a$  in dieser Gleichung den Wert von  $\frac{2\pi}{\sqrt{g}}$  hat. Für  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  erhält man

$$a = 2,00 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/2}.$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem für das Fadenpendel experimentell gefundenen überein.

Aus der grafischen Darstellung in der Abbildung 7.1.9./1 kann man in Umkehrung des beschriebenen Experiments durch Interpolieren die Pendellänge bestimmen, wenn die Schwingungsdauer vorgeschrieben ist.

#### Bemerkungen

1. Die Länge des Sekundenpendels, d. h. des Pendels, dessen halbe Schwingungsdauer 1 s beträgt, ergibt sich aus der Kurve und aus der Tabelle als 1 m. Der genaue Wert beträgt für unsere geographische Breite 0,994 m.
2. Durch Abgleichen der Länge eines Fadenpendels kann man die *reduzierte Pendellänge* für ein beliebiges physikalisches Pendel, z. B. eine drehbar aufgehängte Holzleiste, bestimmen.

### 7.1.10. Einfluß eines Magnets auf die Schwingungen eines eisernen Pendelkörpers

1. Hakenkörper ( $m = 50 \text{ g}$ ) oder eiserne Pendelkugel ⑧
2. dünner Faden
3. Manigumplatte (Mindestgröße 10 cm  $\times$  10 cm) oder Haftmagnet (vgl. Bem. Nr. 1)
4. Demonstrationsstoppuhr oder Stoppuhr

#### Methodischer Hinweis

Das Experiment zeigt, daß eine Vergrößerung der rückführenden Kraft bei gleichbleibender Masse des Pendelkörpers die Schwingungsdauer des Pendels verkleinert. Zu einer quantitativen Auswertung ist es nicht geeignet. Es ist aber ein brauchbarer Modellversuch zur Veranschaulichung des Einflusses der Schwerkraft bzw. der Fallbeschleunigung auf die Schwingungsdauer.

Um das Verständnis für den Inhalt des Experiments zu vertiefen, sollte man mit den Schülern folgende Frage diskutieren:

### V 7.1.10.

„Wenn man die Masse des Pendelkörpers vergrößert, wächst auch die Schwerkraft. Warum ändert sich in diesem Falle die Schwingungsdauer des Fadenpendels nicht?“

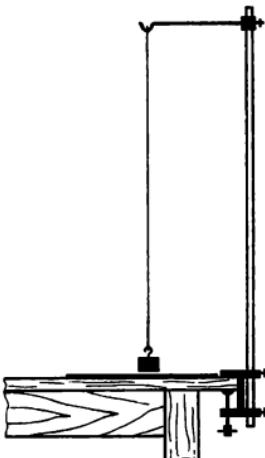


Abb. 7.1.10./1 Fadenpendel über einer Manigumplatte

#### Versuch

Man benutzt ein Fadenpendel von etwa 80 cm Länge. Als Pendelkörper dient ein eiserner Hakenkörper oder eine eiserne Pendelkugel. Man hängt das Pendel so auf, daß der Pendelkörper in der Ruhelage nur etwa 1 cm über der Tischplatte hängt. Man läßt es mit kleiner Amplitude schwingen und bestimmt aus einer größeren Anzahl von Schwingungen die Schwingungsdauer.

Wiederholt man das Experiment, nachdem man unter das Pendel eine Manigumplatte gelegt hat (Abb. 7.1.10./1), dann ergibt sich eine etwas kleinere Schwingungsdauer. Der Unterschied beträgt einige zehntel Sekunden. Er ist um so größer, je dichter der Pendelkörper über der magnetischen Gummiplatte schwingt und je kleiner die Amplitude ist.

Auch bei Wiederholungen des Experiments mit anderen Pendellängen beobachtet man eine Abnahme der Schwingungsdauer unter dem Einfluß des Magneten.

#### Bemerkungen

1. Steht keine Manigumplatte zur Verfügung, dann kann an ihrer Stelle auch ein Manipermagnet (Haftmagnet) verwendet werden. Damit er nicht an den Pendelkörper hochschnellt, benutzt man ein Eisenblech als Unterlage, an dem er haftet. Als Pendelkörper eignet sich dann aber der Hakenkörper nicht so gut. Besser ist hierfür eine Pendelkugel, die man aus einer Stahlkugel von etwa 15 mm Durchmesser (Kugellagerkugel) selbst herstellt, indem man eine Öse aus Draht anlötet oder mit einem geeigneten Alleskleber, z. B. einem Zweikomponentenkleber, anklebt.
2. Man kann das Experiment dadurch abwandeln, daß man die Höhe des Pendelkörpers über dem Magneten zuerst etwas größer wählt und dann schrittweise verkleinert.

### 7.1.11. Aufzeichnen der Schwingungen einer Blattfeder mit einer Schreibspitze

1. Blattfeder mit Schreibspitze

(Länge etwa 30 cm) ⑧,

dazu erforderliches Material:

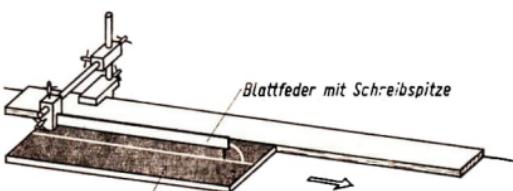
- Stück einer Uhrfeder oder Messingblechstreifen
- dünner Messing- oder Kupferdraht
- Alleskleber

2. Glasplatte (etwa 5 cm  $\times$  20 cm) *berußte Glasplatte*

3. Kerze

Abb. 7.1.11./1 Versuchsanordnung zur Aufzeichnung der

4. Leiste (Länge etwa 50 cm) Schwingungen einer Blattfeder



#### Methodische Hinweise

- Dieser Versuch und die beiden folgenden zeigen Möglichkeiten, die Abhängigkeit der Elongation von der Zeit experimentell darzustellen. Außerdem sind sie dazu geeignet, den Begriff *Dämpfung* zu erläutern.
- Vergleiche auch 10. Teil, V 1.3.3. bis V 1.3.5.!

#### Versuch

Ein etwa 5 cm breiter Streifen aus Fensterglas wird mit einer Kerzenflamme streifenweise berußt und auf den Tisch gelegt. Darüber befestigt man an einem Stativ mit einer Plattenmuffe die Blattfeder, an deren Ende man ein dünnes Drähtchen als Schreibspitze so angeklebt oder angelötet hat, daß die Schreibspitze die Rußschicht gerade berührt. Als Führung der Glasplatte klemmt man mit der Tischklemme des Stativs eine dünne Leiste auf der Tischplatte fest (Abb. 7.1.11./1). Verschiebt man die berußte Platte bei ruhender Feder an der Leiste entlang, so zeichnet die Schreibspitze eine gerade Linie auf. Läßt man dann die Feder schwingen und bewegt die Glasplatte noch einmal möglichst gleichförmig unter der Schreibspitze vorbei, so entsteht eine Wellenlinie (Abb. 7.1.11./2). Man kann die Platte mit dem Tageslichtschreibprojektor projizieren. An der Abnahme der Amplitude der Schwingung erkennt man deutlich die Dämpfung. Man sieht weiterhin, daß die Abstände der Schnittpunkte der Kurve mit der Mittellinie (Nullstellen) etwa gleich groß sind, und kann daraus schließen, daß trotz der Abnahme der Amplitude die Schwingungsdauer konstant geblieben ist.

#### Bemerkung

Man kann die Gleitfähigkeit der Glasplatte verbessern, indem man sie auf ein Brettchen legt, das man mit Möbelgleitern versehen hat.

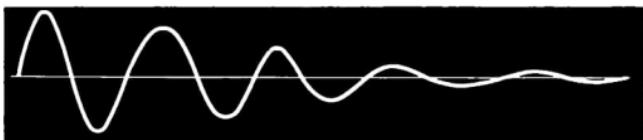


Abb. 7.1.11./2

### 7.1.12. Aufzeichnen der Schwingungen einer Blattfeder durch einen Lichtzeiger

1. Blattfeder mit Spiegel (Länge etwa 30 cm) ⑧, dazu erforderliches Material:
  - a) Stück einer Uhrfeder oder Messingblechstreifen
  - b) Stück eines dünnen Spiegels (etwa 2 cm × 2 cm)
  - c) Alleskleber
2. Physikleuchte mit Transformator
3. Drehspiegel    4. Projektionsschirm

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1, V 7.1.11.!
2. Vergleiche 10. Teil, V 1.3.3.!

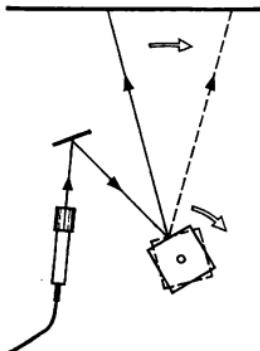


Abb. 7.1.12./1 Aufbau zum Aufzeichnen der Schwingungen einer Blattfeder durch einen Lichtzeiger (Draufsicht)

#### Versuch

Auf das eine Ende einer Blattfeder klebt man einen kleinen Spiegel. Man befestigt sie mit einer Plattenmuffe an einem Stativ in lotrechter Lage so, daß das Lichtbündel einer Physikleuchte über den aufgekitteten Spiegel und einen zunächst noch ruhenden Drehspiegel auf einen Projektionsschirm oder eine helle Wand gelenkt wird (Abb. 7.1.12./1). Die Glühpunktlampe verschiebt man in der Physikleuchte so, daß ein angenähert paralleles Lichtbündel entsteht. Auf der Projektionsfläche soll ein möglichst kleiner Lichtfleck entstehen.

Versetzt man die Blattfeder in Schwingungen, so sieht man auf der Projektionsfläche einen vertikalen Lichtstreifen. Dieser wird bei einer nicht zu schnellen Rotation des Drehspiegels zu einer Sinuskurve auseinandergezogen. Man kann die Sichtbarkeit der projizierten Kurve erhöhen, wenn man den Raum abdunkelt.

### 7.1.13. Aufzeichnen der Schwingungen eines Fadenpendels durch ausfließenden Sand — Das Sandpendel

1. Sandpendeltrichter (vgl. Bemerkung Nr. 1)
2. Gleitbrett ⑧, dazu erforderliches Material:
  - a) Brett (etwa 20 cm × 60 cm)
  - b) schwarze Farbe (Wandtafelfarbe) oder schwarzes Papier und Klebstoff
  - c) 4 Möbelgleiter
3. Faden
4. Leiste (Länge etwa 1 m) oder Lineal
5. Pappe (etwa Format A 5, A 4, A 3)
6. Federklammern
7. feiner trockener Sand (gesiebt)
8. großer Bogen Packpapier

#### Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1, V 7.1.11.!
2. Dieses Experiment ist sehr eindrucksvoll und als Demonstrationsexperiment besonders zu empfehlen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, verschiedene Grade der Dämpfung vorführen zu können.

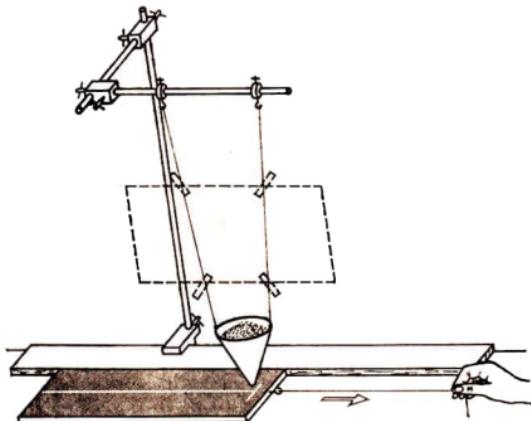


Abb. 7.1.13./1 Versuchsanordnung zum Aufzeichnen der Schwingungen mit dem Sandpendel



Abb. 7.1.13./3 Physikalisches Pendel mit Sandtrichter. Die Schwingungen erfolgen senkrecht zur Zeichenebene.

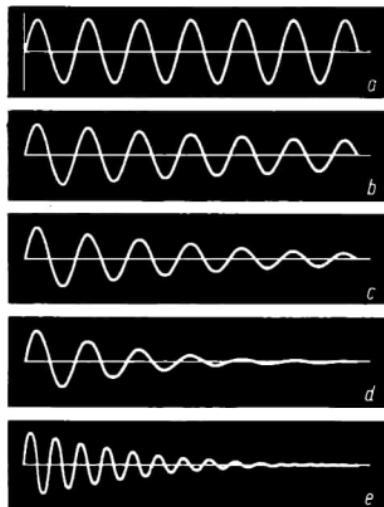


Abb. 7.1.13./2 Diagramme zur Abhängigkeit der Elongation des Pendelkörpers von der Zeit als Sandspuren auf dem Gleitbrett:  
 a) nahezu ungedämpfte Schwingung,  
 b) bis d) Schwingungen mit unterschiedlichen Dämpfungen,  
 c) Diagramm einer gedämpften Schwingung bei langsamer Bewegung des Gleitbrettes

### **Versuch**

Der Pendelkörper, der Sandpendeltrichter, ist im allgemeinen ein dickwandiger Metalltrichter. An seinem oberen Rand sind zwei Ösen angebracht, an denen man den Trichter bifilar aufhängt. Das Gleitbrett wird zur Verbesserung der Gleitfähigkeit an seiner Unterseite mit vier Möbelgleitern (halbkugelförmige Metallknöpfe) versehen. Seine gehobelte Oberseite streicht man mit schwarzer Farbe. An seiner Stirnfläche kann man noch einen kleinen Haken einschrauben und einen Faden anbringen.

Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 7.1.13./1 dargestellt. Als Führung für das Gleitbrett klemmt man mit der Tischklemme des Stativs eine Leiste oder ein Lineal mit auf die Tischplatte fest.

Man verschließt die Ausflußöffnung des Trichters mit dem Finger und füllt ihn mit Sand. Gibt man die Öffnung frei und zieht das Brett unter dem noch ruhenden Trichter vorbei, dann entsteht eine geradlinige Sandspur in der Mitte des Brettes.

Man verschließt die Ausflußöffnung wieder und schiebt das Brett wieder in seine Ausgangsstellung. Läßt man den Trichter jetzt mit kleiner Amplitude schwingen, dann zeichnet er auf dem ruhenden Brett eine Querspur auf. zieht man das Brett möglichst gleichförmig langsam unter dem schwingenden Trichter vorbei, dann entsteht als Sandspur eine Sinuskurve, das Bild einer nahezu ungedämpften harmonischen Schwingung (Abb. 7.1.13./2a).

Befestigt man an den Aufhängefäden des Pendels mit Federklammern ein rechteckiges Stück Pappe, dann entsteht das Diagramm einer gedämpften Schwingung (Abb. 7.1.13./2b bis d). Die Dämpfung ist um so größer, je größer man die Pappe wählt.

Bewegt man das Gleitbrett sehr langsam, ist an dem aufgezeichneten Diagramm der gedämpften Schwingung deutlich zu erkennen, daß die Umhüllenden des Schwingungsbildes Hyperbeläste sind (Abb. 7.1.13./2e).

### **Bemerkungen**

1. Den Sandpendeltrichter kann man aus Blech selbst herstellen. Es genügt dazu Konservenbüchsenblech, besonders gut eignet sich Bleiblech, z. B. aus dem Mantel eines 15 kV-Erdkabels.
2. Um die Sandspur für die Schüler gut sichtbar zu machen, läßt man sie entweder an die Versuchsanordnung herantreten oder hält über das Gleitbrett mit der Sandspur einen Spiegel so, daß die Schüler das Diagramm im Spiegel sehen können. Meist genügt es auch schon, wenn man das Brett vorsichtig auf die Schüler zu neigt.
3. Nach jedem Experiment schüttet man den Sand vom Brett auf einen Bogen Packpapier, von dem man ihn dann schließlich in das Vorratsgefäß zurückschüttet kann.
4. In der Nähe der Umkehrpunkte häuft sich der Sand stärker an, da hier die Geschwindigkeit des Pendelkörpers gering ist.
5. Statt des Fadenpendels kann man auch ein physisches Pendel für dieses Experiment verwenden (Abb. 7.1.13./3). Es besteht aus einer Holzleiste, die man an einem Ende mit einer Bohrung für einen Lagerzapfen und am anderen Ende mit einem Brettchen versieht. Durch ein Loch in diesem Brettchen steckt man einen Glastrichter, den man mit Sand füllt. Zur Verkleinerung der Ausflußöffnung kann man mit einem Schlauchstück ein Glasröhren ansetzen, das man zu einer Spalte ausgezogen hat.

6. Zur Aufzeichnung von Schwingungen kann auch das als Schwingungsschreiber bezeichnete Unterrichtsmittel eingesetzt werden. Mit dem Gerät wird eine ausführliche Bedienungsanleitung ausgeliefert, so daß hier auf die Beschreibung der Experimente verzichtet werden kann.

### 7.1.14. Gedämpfte Schwingungen einer Wassersäule

1. U-Rohr aus Glas (Ø etwa 15 mm, Schenkellänge etwa 30 cm)
2. Fluoreszein oder Eosin
3. Glasperlen

#### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment kann zur Wiederholung und Leistungskontrolle eingesetzt werden. Es kann von den Schülern gefordert werden:

1. Beschreibung der Beobachtung
2. Bedingungen für das Zustandekommen einer Schwingung
3. Bestimmungsgrößen einer Schwingung (Elongation, Amplitude, Schwingungsphase, Schwingungsdauer, Frequenz u. a. m.)
4. Beschreibung der Energieumwandlungen
5. Dämpfung und ihre Ursache

Außerdem sollte man darauf hinweisen, daß auch die Entstehung von Wellen an einer Flüssigkeitsoberfläche auf Schwingungsvorgänge zurückzuführen ist.

#### *Versuch*

Man füllt ein U-Rohr, das etwa die oben angegebenen Abmessungen hat, zur Hälfte mit gefärbtem Wasser. Durch Neigen des Rohres, Verschließen der einen Öffnung mit dem Daumen und Wiederaufrichten sorgt man dafür, daß zu Beginn des Versuchs der eine Schenkel ganz mit Wasser gefüllt, der andere dagegen nahezu leer ist (Abb. 7.1.14./1). Gibt man die Öffnung frei, so gleicht sich der Wassersstand in langsam abklingenden, gedämpften Schwingungen aus. Schüttet man in das Rohr Glasperlen hinein, so erfolgt der Ausgleich mit zunehmender Menge der Glasperlen in immer stärker gedämpften Schwingungen und verläuft schließlich bei genügender Anzahl der Perlen aperiodisch.

#### *Bemerkungen*

1. Zum Anfärben des Wassers genügt eine verschwindend geringe Menge Fluoreszein oder Eosin. Bei der Verwendung von Eosin muß das Gefäß nach der Benutzung gut ausgespült werden, weil sonst Verfärbungen des Glases auftreten können, die man nur mit Mühe wieder entfernen kann.
2. Bei idealer (reibungsfreier) Flüssigkeit wäre die Schwingungsdauer der Flüssigkeitssäule

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Für  $l$  ist hierbei die Länge der Wassersäule einzusetzen.

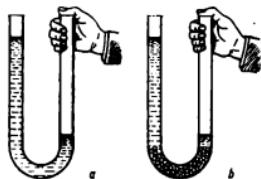


Abb. 7.1.14./1 U-Rohr für eine schwingende Wassersäule; Wasserstand zu Beginn des Versuchs:

- a) Rohr ohne Glasperlen – schwach gedämpfte Schwingungen,
- b) Rohr mit Glasperlen – stark gedämpfte Schwingungen oder aperiodischer Ausgleich

## 7.2. Resonanz — Überlagerung von Schwingungen

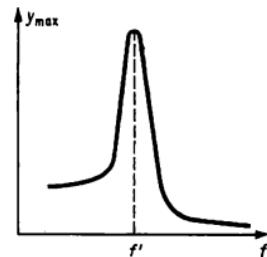
### 7.2.1. Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen eines Federschwingers und eines Fadenpendels (Vorversuch zur Resonanz)

1. Schraubenfeder    2. Hakenkörper    3. Faden

#### *Methodischer Hinweis*

Obwohl das Experiment als Freihandversuch mit einfachen Mitteln ausgeführt wird, vermittelt es bereits die wichtigsten Vorstellungen zum Verständnis des Begriffes *Resonanz* und ermöglicht sogar bei geschickter Ausführung Aussagen über die Abhängigkeit der Amplitude von der Erregerfrequenz außerhalb des Resonanzfalles (Verlauf der Resonanzkurve).

Abb. 7.2.1./1 Abhängigkeit der Amplitude der Schwingung des Pendelkörpers von der Erregerfrequenz. Im Resonanzpunkt  $f'$  ist die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz des Pendels.



#### *Versuch*

Man hängt einen Federschwinger und ein Fadenpendel an einem Stativ auf und versetzt sie in Schwingungen. Beide Systeme vollführen Eigenschwingungen mit einer bestimmten, abhängigen Schwingungsdauer.

Man nimmt nun das obere Ende der Schraubenfeder in die Hand und zwingt dem Federschwinger Schwingungen auf, indem man es mit der Hand rhythmisch auf und ab bewegt. Man führt diese Bewegung zuerst mit sehr niedriger Frequenz (etwa eine Schwingung in zwei Sekunden) aus und steigert die Erregerfrequenz allmählich. Dabei beobachtet man, daß der Pendelkörper bei extrem niedriger Frequenz die Bewegungen der Hand ausführt. Eigenschwingungen des Pendelkörpers kann man dabei noch nicht beobachten. Seine Amplitude entspricht der Amplitude der Hand. Der Federschwinger vollführt erzwungene Schwingungen. Erhöht man die Erregerfrequenz allmählich, dann vergrößert sich die Amplitude der Schwingung des Pendelkörpers. Zu den erzwungenen Schwingungen kommt mit zunehmender Frequenz eine immer stärker werdende Eigenschwingung. Stimmen schließlich Erregerfrequenz und Eigenfrequenz des Schwingers überein, so vollführt der Pendelkörper selbst bei sehr schwachen Erregerimpulsen sehr

heftige Schwingungen, die Amplitude der Schwingung erreicht einen Maximalwert. Steigert man die Erregerfrequenz weiter, dann nimmt die Amplitude der Pendelschwingung wieder ab und wird bei extrem hoher Erregerfrequenz etwa Null. Diese Erscheinungen kann man auch am Fadenpendel beobachten, wenn man das obere Ende des Fadens mit zunehmender Frequenz seitlich hin und her bewegt. Stellt man die Amplitude als Funktion der Erregerfrequenz grafisch dar, dann erhält man eine Kurve, die den typischen Verlauf der Resonanzkurve aufweist (Abb. 7.2.1./1). Der Kurvenverlauf ist nicht maßstabsgerecht, weil im Resonanzpunkt die Amplitude der erregenden Schwingung (Bewegung der Hand) wesentlich kleiner war als vorher und nachher.

#### *Bemerkung*

Die Schraubenfeder kann dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen entnommen werden.

### **7.2.2. Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen — Resonanz**

1. Luftkissenbahn ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
2. Schwebekörper ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
3. Blende mit Stecker ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
4. 2 Stecker mit Haken ⑧ (vgl. V 4.1.8.)
5. 2 Stecker
6. Körper mit zentraler Bohrung (zur Vergrößerung der Masse des Gleitkörpers)
7. 2 lange, weiche Schraubenfedern
8. kurzer Faden (20 cm lang, 3 mm Durchmesser) mit Knebel
9. Staubsauger mit flexilem Schlauch
10. Vertikalmeßstab (1,5 m bzw. 2,0 m)
11. Zentraluhr

#### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment ermöglicht es, das Wesen der Eigenschwingungen und der erzwungenen Schwingungen sowie die starke Aufschaukelung der Schwingung im Falle der Resonanz bei geringer Dämpfung überzeugend zu demonstrieren.

#### *Versuchsanordnung*

Die Aufstellung der Luftkissenbahn und das Anbringen des Vertikalmeßstabes entsprechen den Hinweisen unter V 4.1.8. In beiden Seiten des Schwebekörpers wird ein Stecker mit Haken hineingesteckt, in die mittlere obere Bohrung der Stecker mit Blende und in die oberen seitlichen Bohrungen die Stecker, auf die die Körper aufgelegt werden können. Die Masse des Schwebekörpers wird soweit vergrößert, daß er an allen Stellen der Bahn noch sicher schwebt. Eine der Schraubenfedern befestigt man zwischen dem rechten Haken des Schwebekörpers und dem rechten Stativstab, der vertikal in die Luftkissenbahn eingeschraubt ist (Abb. 7.2.2./1). Die andere Feder wird an dem linken Haken des Schwebekörpers angebracht. An ihrem anderen Ende befestigt man den Faden mit Knebel, nachdem man

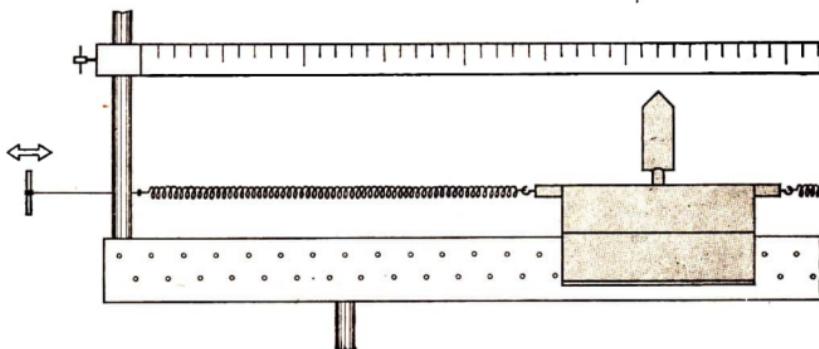


Abb. 7.2.2./1 Versuchsanordnung zur Luftpumpebahn

ihn durch eine Bohrung im Stativstab gezogen hat, der am linken Ende der Bahn befestigt ist (Abb. 7.2.2./1).

#### *Versuch*

Der Staubsauger wird eingeschaltet und der Schwebekörper von Hand zur Ruhe gebracht. Nachfolgend zieht man rhythmisch an dem Knebel mit sehr kleiner Frequenz. Der Schwebekörper folgt dieser Bewegung mit einer geringfügigen zeitlichen Verzögerung. Die Amplitude seiner Schwingungen ist geringer als die der Handbewegung.

Die Erregerfrequenz wird allmählich gesteigert. Dabei nimmt die Amplitude des Schwebekörpers zu.

In der Nähe der Eigenfrequenz ist die Zunahme besonders auffällig. Im Falle der Übereinstimmung von Erreger- und Eigenfrequenz wächst die Amplitude je nach Dauer der Einwirkungen so weit an, bis der Schwingungsvorgang durch zusätzlich auftretende Stoß- oder Reibungseffekte behindert wird.

Hat die Erregerfrequenz die Eigenfrequenz überschritten, so sinkt bei weiterem Steigern die Amplitude wieder ab. Bei großen Erregerfrequenzen ist sie Null.

#### *Bemerkungen*

1. Zur quantitativen Untersuchung der Abhängigkeit der Amplitude von der Erregerfrequenz kann das rhythmische Erregen des schwingungsfähigen Systems mit einem Experimentiermotor erfolgen. Dazu wird in das Bohrfutter ein Exzenter eingespannt, an dem das Ende des Fadens befestigt ist, der die Schwingung erregt. Hierfür ist z. B. ein Plastrad mit wenigen Zentimetern Durchmesser geeignet, an dessen Peripherie das Fadenende befestigt ist. Die Welle des Motors muß dann etwa senkrecht zur Schwingungsrichtung stehen.

Damit die Resonanzfrequenz innerhalb des Drehzahlbereichs des Motors liegt, ist die Masse des Schwebekörpers gering zu halten oder mit Federn größerer Federkonstante zu arbeiten.

2. Die Anordnung ist auch sehr gut zur Aufnahme einer Dämpfungskurve geeignet. Dazu wird nach dem kräftigen Erregen des Schwingungsvorganges z. B. bei jeder zweiten Schwingung die Amplitude gemessen und als Funktion der Anzahl der Schwingungen (und damit der Zeit) graphisch dargestellt.

3. Vergleiche Bem. Nr. 2, V 4.5.2.!



### 7.2.3. Resonanzerscheinungen an drei Fadenpendeln

1. 3 Hakenkörper (50 g)
2. Brett (Länge etwa 60 cm, Breite etwa 10 cm)
3. Schraubhähkchen, Faden

#### *Methodischer Hinweis*

Während im V 7.2.1. und V 7.2.2. die Resonanz an jeweils nur einem schwingungsfähigen System beobachtet wurde, sind es bei diesem Experiment drei derartige Systeme, von denen jeweils nur eines durch Resonanz in Schwingungen versetzt wird. Bei diesem Experiment kann man klar machen, daß jedes schwingungsfähige System eine bestimmte Eigenfrequenz hat und nur in Resonanz gerät, wenn die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz ist.

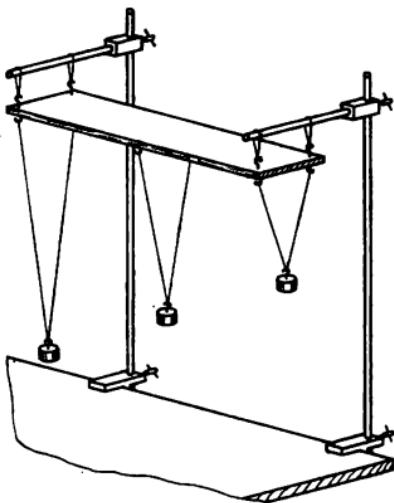


Abb. 7.2.3./1 Waagerechtes Brett mit drei bifilar aufgehängten Fadenpendeln für Resonanzversuche

#### *Versuch*

Man schraubt in die Oberseite des Brettes in die vier Ecken je einen kleinen Schraubhaken und hängt es mit vier gleichen Schnurschlingen an den Querstäben zweier Stativen waagerecht auf. An der Unterseite befestigt man an sechs paarweise verteilten Schraubhähkchen drei bifilar aufgehängte Fadenpendel (Abb. 7.2.3./1). Die Pendellängen sollen etwa 50 cm, 35 cm und 20 cm betragen.

Erteilt man dem Brett schwache rhythmische Impulse in der Längsrichtung, so gerät von den drei Pendeln jeweils nur das in lebhafte Schwingungen, dessen Eigenfrequenz mit der Erregerfrequenz übereinstimmt.

### 7.2.4. Resonanzerscheinungen an einem unwuchtigen Motor und einer Holzleiste

1. Experimentiermotor mit Zubehör
2. dünne Leiste (etwa 2 cm  $\times$  5 mm  $\times$  1 m)
3. dicker Kupfer- oder Aluminiumdraht ( $\varnothing$  etwa 4 mm, Länge etwa 10 cm)
4. Schraube M 4  $\times$  15, mit Mutter

#### *Methodischer Hinweis*

Dieses Experiment kann man zum Anlaß nehmen, um auf die Gefahren von Unwuchten an rotierenden Teilen und auf die Gefahren unerwünschter Resonanzerscheinungen an Maschinen mit schwingenden oder rotierenden Teilen hinzuweisen.

Beispiele solcher Maschinen sind Kurzhobelmaschinen, Bohrmaschinen, Fräsen, Drehmaschinen, Schleifmaschinen, Kraftfahrzeuge, Flugzeuge u. a. m.

*Versuch*

Der Experimentiermotor wird an einem Stativ mit Tischklemme befestigt. Über dem Motor bringt man am Stativ eine dünne Holzleiste von etwa 1 m Länge an (Abb. 7.2.4./1). Am seitlich aus dem Gehäuse des Experimentiermotors herausragenden, untersetzten Achszapfen setzt man das Bohrfutter auf.

Das Ende eines dicken Kupfer- oder Aluminiumdrahtes biegt man zu einer Öse und schraubt darin eine Schraube mit Mutter fest. Etwa 4 cm von der Öse entfernt biegt man ihn rechtwinklig um und spannt das freie Ende in das Bohrfutter ein. Man läßt den Motor zunächst mit niedriger Drehzahl laufen und steigt sie allmählich. Durch den eingespannten Draht mit der Schraube hat der Motor eine Unwucht bekommen, die zu Schwingungen des Stativs und der Leiste führen. Bei einer bestimmten Drehzahl des Motors tritt Resonanz auf. Die Leiste schwingt sehr kräftig und kann dabei sogar zerbrechen.

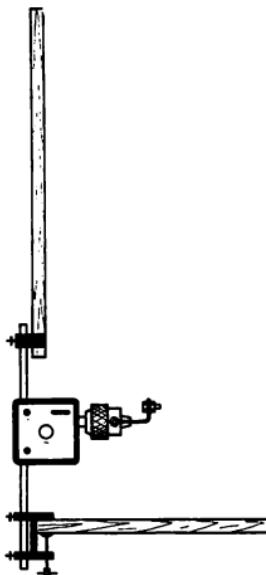


Abb. 7.2.4./1 Versuchsanordnung mit einem unwuchtigen Motor und einer dünnen Leiste

*Bemerkungen*

1. Die Anfertigung und das Einspannen des Drahtstückes mit der Schraube muß sehr sorgfältig erfolgen, damit es sich nicht lockert und fortgeschleudert werden kann.
2. Bringt man am Stativ gleichzeitig mehrere Leisten verschiedener Länge an, dann erkennt man deutlich, daß sie unterschiedliche Eigenfrequenzen haben. Die einzelnen Leisten schwingen bei unterschiedlichen Motordrehzahlen mit.
3. An Stelle der Leiste kann auch die Blattfeder aus dem Gerätesatz zur Demonstration mechanischer Schwingungen verwendet werden.

## 7.2.5. Resonanzerscheinungen an zwei gekoppelten Fadenpendeln

1. Hakenkörper, verschiedene Größen
2. Faden

*Methodischer Hinweis*

Das Experiment zeigt deutlich den Energieaustausch zwischen den beiden schwingenden Systemen. Dabei kann man die Bedeutung der Kopplung für den Energieaustausch experimentell untersuchen.

*Versuch*

Aus zwei Hakenkörpern von je 50 g und dünnem Faden stellt man zwei gleichlange Fadenpendel her, die man in etwa 20 cm Abstand nebeneinander aufhängt. Man

stimmt sie auf gleiche Frequenz ab. An beide Pendelfäden knüpft man mit verschiebbarem Knoten einen locker hängenden Faden und beschwert ihn mit einem Hakenkörper von 20 g (Abb. 7.2.5./1).

Beide Pendel sind durch den Faden und den kleinen Hakenkörper miteinander gekoppelt. Man stellt die Knoten zunächst auf etwa  $\frac{1}{4}$  der Pendellänge ein.

Versetzt man das eine Pendel in Schwingungen, so beginnt auch das andere Pendel allmählich mitzuschwingen. Es wird zu immer größeren Amplituden aufgeschaukelt und erreicht fast die gleiche Amplitude, die das erste Pendel zu Anfang hatte. In der gleichen Zeit sind die Schwingungen des ersten Pendels immer schwächer geworden, und es ist schließlich zum Stillstand gekommen. Es hat seine gesamte Schwingungsenergie an das zweite Pendel abgegeben.

Dieser Vorgang wiederholt sich dann in umgekehrter Richtung und wechselt mehrfach hin und her, bis die Schwingungen durch die Energieabgabe an die Umgebung allmählich abklingen.

Ändert man die Spannung des Koppelfadens, indem man den Abstand zwischen den Aufhängepunkten der Pendel vergrößert, oder verstärkt man die Kopplung durch die Benutzung eines größeren Hakenkörpers am Koppelfaden, dann vergrößert sich auch der Kopplungsgrad, und die Energie wird schneller auf das zweite Pendel übertragen. Die Intervalle zwischen maximalem Schwingen und Stillstand sind kürzer. Die gleiche Erscheinung beobachtet man, wenn man die Knoten des Koppelfadens weiter nach unten schiebt.

Versetzt man beide Pendel phasengleich in Schwingungen, indem man sie beide gleichzeitig nach vorn zieht und gleichzeitig loslässt, dann erfolgt keine Energieübertragung. Beide Pendel schwingen über einige Zeit völlig gleichartig.

Ändert man die Länge eines Pendels, so daß die Eigenfrequenzen der beiden Pendel nicht mehr übereinstimmen, so wird die Energie des ersten Pendels nicht mehr vollständig auf das zweite übertragen, das erste Pendel kommt nicht völlig zum Stillstand. Ist der Unterschied der Eigenfrequenzen sehr groß, dann wird das zweite Pendel kaum zum Schwingen erregt.

### Bemerkungen

1. Ob man die Pendel aufeinander zu oder senkrecht zu dieser Ebene in Schwingung versetzt, wirkt sich auf das Ergebnis des Experiments nicht aus.
2. Die Kopplung kann auch durch einen Gummifaden erfolgen. Der kleine Hakenkörper ist dann unnötig.

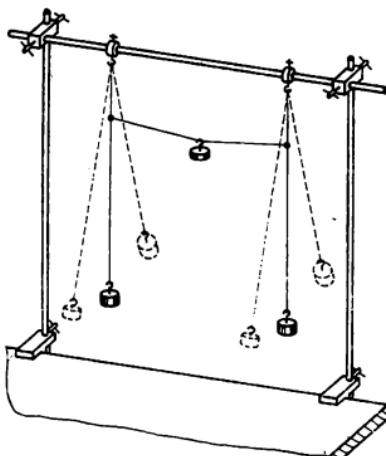


Abb. 7.2.5./1 Gekoppelte Fadenpendel

## 7.2.6. Resonanzerscheinungen an mehreren gekoppelten Fadenpendeln oder Federschwingern

1. Hakenkörper (50 g)
2. mehrere Paare gleichartiger Schraubenfedern
3. weicher Gummischlauch oder Schraubenfeder (Länge etwa 70 cm)
4. Faden

### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment zeigt anschaulich, daß Resonanz nur auftritt, wenn die Eigenfrequenz des Resonators gleich der Erregerfrequenz ist. Ebenso wie im V 7.2.5. kann man den wechselseitigen Energieaustausch beobachten.

### *Versuch*

Zwischen zwei Stativen spannt man einen möglichst weichen Gummischlauch oder eine Schraubenfeder aus. Daran hängt man in beliebiger Verteilung mehrere Fadenpendel von paarweise gleicher Länge, beispielsweise 50 cm, 35 cm, 20 cm (Abb. 7.2.6./1). Sämtliche Pendel sind durch den Schlauch oder die Feder elastisch gekoppelt.

Schwingt eines von ihnen, so übertragen sich die Schwingungen durch den Schlauch auf die anderen, es gerät aber jeweils nur das Pendel mit der gleichen Eigenfrequenz in lebhafte Schwingungen. Die Resonanz kann an allen Pendelpaaren nachgewiesen werden.

Verwendet man statt der Fadenpendel mehrere Paare gleichartiger Federschwinger, so kann man die gleichen Zusammenhänge auch an den vertikalen Schwingungen derselben beobachten (Abb. 7.2.6./2).

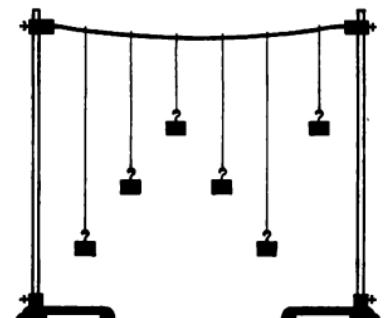


Abb. 7.2.6./1 Drei Paare elastisch gekoppelter Fadenpendel

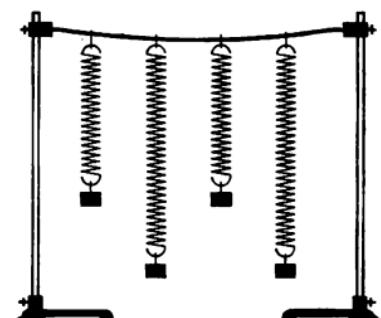


Abb. 7.2.6./2 Zwei Paare elastisch gekoppelter Federschwinger



## 7.2.7. Entdämpfung eines Fadenpendels durch rhythmische Impulse

1. Pendelkugel
2. Metronom
3. kleiner, weicher Haarpinsel
4. Faden

### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment zeigt, wie ein schwingungsfähiges System, das Fadenpendel, mechanisch entdämpft werden kann, indem jeweils im geeigneten Augenblick ein geringer Energiebetrag in Form eines Impulses zugeführt wird.

Beispiele für diesen Vorgang sind die Bewegung eines Uhrendralls und das rhythmische Anstoßen einer Schaukel.

### Versuch

Bei dieser Versuchsanordnung wird eine Kugel als Pendel bifilar an einem Stativ aufgehängt. Unter die Kugel stellt man ein Metronom, an dessen Pendelstange man einen leichten, weichen Haarpinsel befestigt. Metronom und Pendel werden so aufgestellt, daß die Stange des Metronoms und das Pendel in einer Ebene schwingen und der Pinsel die Pendelkugel dabei leicht berührt (Abb. 7.2.7./1). Das Metronom wird auf die Frequenz des Pendels abgestimmt.

Läßt man das Metronom schwingen, so wird das Pendel durch die Stöße des Pinsels zum Schwingen angeregt. Obwohl die einzelnen Impulse sehr gering sind, wird das Pendel zu immer größeren Amplituden aufgeschaukelt, wenn die Impulse im richtigen Augenblick erfolgen. Die Entdämpfung und das Aufschaukeln kommen nicht zustande, wenn man die Frequenz des Metronoms verändert.

### Bemerkung

Ein Hakenkörper ist für dieses Experiment nicht so gut geeignet wie eine Pendelkugel.

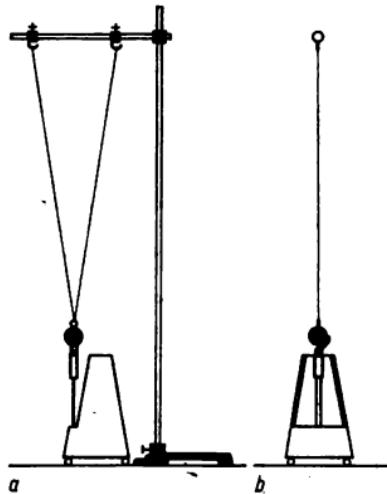


Abb. 7.2.7./1 Versuchsanordnung zum Entdämpfen eines bifilaren Fadenpendels:

- a) Seitenansicht,
- b) Vorderansicht (ohne Stativ)

## 7.2.8. Entdämpfung eines physischen Pendels — Die Pendelhemmung

1. Modell einer Pendelhemmung
2. Demonstrationsstoppuhr oder Stoppuhr

### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment hat die gleiche Aufgabe wie V 7.2.7. Statt eines Fadenpendels wird hier ein physisches Pendel als schwingungsfähiges System benutzt. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch darin, daß hier die Energiezufuhr selbst gesteuert wird, während im V 7.2.7. die Energiezufuhr durch ein zweites System, das Metronom erfolgt.
2. In älteren Unterrichtsmittelsammlungen kann man verschiedene Funktionsmodelle von Pendelhemmungen finden. Sie sind aus Holz, aus Metall, haben Antriebsfäden oder Antriebsketten u. a. m. Sie beruhen aber alle auf dem gleichen Prinzip.
3. Der Begriff *Pendelhemmung* bezieht sich darauf, daß bei jeder halben Schwingung des Pendels jeweils eine der beiden Klaue des Pendels in das Steiggrad eingreift und so dessen Bewegung hemmt. Da die Schwingungsdauer durch die Beschaffenheit des Pendels (Pendellänge bzw. Trägheitsmoment) bestimmt wird, kann die Pendelhemmung zur Zeitmessung benutzt werden. Pendeluhrn werden wegen ihrer Genauigkeit noch heute in der Wissenschaft und Forschung häufig angewandt.

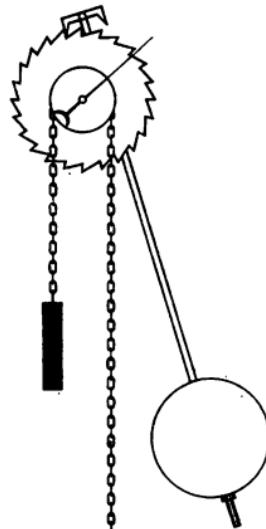


Abb. 7.2.8./1 Modell einer Pendelhemmung (schematisch)

### Versuch

Das Modell einer Pendelhemmung wird an einem Stativ befestigt und in Bewegung gesetzt (Abb. 7.2.8./1). Man erkennt,

- daß bei jeder halben Schwingung das Steiggrad um einen Zahn weiterrückt,
- daß durch die Steigung der Zahnflanke des Steigrades bei jeder halben Schwingung der eingreifende Klaue ein Impuls erteilt wird. Die dazu erforderliche Energie wird der Energie des Antriebsgewichtsstückes entnommen. Diese Impulse führen zur Entdämpfung,
- daß die Amplitude des Pendels konstant bleibt, daß es also ungedämpfte Schwingungen ausführt.

Man mißt mit einer Stoppuhr die Zeit für eine volle Umdrehung des Steigrades bzw. des mit ihm verbundenen Zeigers.

Verschiebt man den Pendelkörper auf dem Pendelstab (Perpendikel) und wiederholt die Zeitmessung, so erkennt man, daß z. B. die Schwingungsdauer kleiner wird, wenn man den Pendelkörper nach oben verschiebt. Mit dem Pendelkörper kann man somit den Gang einer Pendelhemmung bzw. einer Pendeluhr einregeln.

### Bemerkung

Man kann das Modell einer Pendelhemmung auf Sekundenschlag einstellen (Sekundenpendel) und für viele Experimente statt des Metronoms zur Zeitmessung verwenden.

## 7.2.9. Überlagerung gleichgerichteter Schwingungen am Sandpendel

1. Sandpendeltrichter (vgl. V 7.1.13.)	6. Zwischenkörper ⑧, dazu erforderliches Material:
2. Gleitbrett (vgl. V 7.1.13.) ⑧	a) 2 Holzleisten (je 1 cm × 2 cm × 20 cm)
3. Faden oder Kettchen	b) Schraube mit Flügelmutter
4. feiner, trockener Sand (gesiebt)	c) Pendelmasse mit Mittelbohrung
5. großer Bogen Packpapier	d) 4 Schraubhaken

### Methodische Hinweise

- Überlagerte Schwingungen kommen in der Praxis häufig vor, z. B. der Klang von Musikinstrumenten, der Klang der menschlichen Stimme, moduliert hochfrequente Schwingungen u. a. m. Das hier beschriebene Experiment bereitet das Verständnis für das Zustandekommen der oben genannten Schwingungsformen vor.
- Zur Erklärung der Entstehung einer Überlagerung sollte man die Elongation zweier Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen in einer Tafelzeichnung nach Art der Abbildung 7.2.9./1 geometrisch addieren. Diese Darstellung könnte auch als Folie für den Tageslichtschreibprojektor vorbereitet werden, indem man z. B. das obere Diagramm als Grundfolie und die beiden anderen als Überdeckfolie mit unterschiedlichen Farben gestaltet.

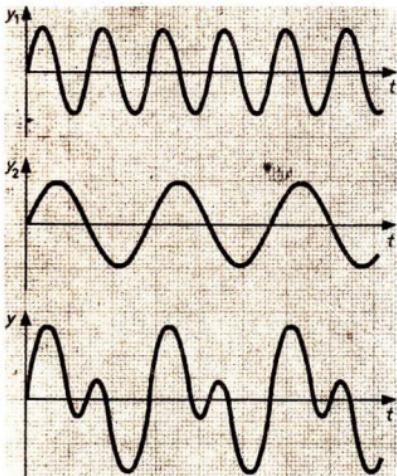


Abb. 7.2.9./1 Geometrische Addition der Amplituden zweier Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen

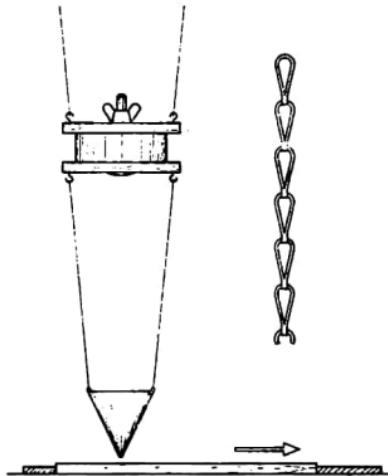


Abb. 7.2.9./2 Doppelpendel zum Aufzeichnen überlagerter Schwingungen durch Sand. Beide Pendelteile schwingen senkrecht zur Zeichenebene. Nebenzeichnung: Stück einer Kette

### Herstellung des Zwischenkörpers und Versuch

Der Zwischenkörper wird nach Abbildung 7.2.9./2 so zusammengesetzt, daß die beiden entstehenden Pendelteile wahlweise in gleichen oder in gekreuzten Ebenen schwingen können. Er besteht aus zwei kurzen Leisten, die durch eine Schraube mit Flügelmutter verbunden werden. Zwischen den Leisten befindet sich eine schwere Pendelmasse aus Eisen oder Blei von beliebiger Form. Die Leistenstücke werden an jedem Ende mit einem kleinen Schraubhaken versehen.

Der Versuchsaufbau ähnelt dem im V 7.1.13. Der Zwischenkörper wird bifilar an einem hohen Stativ so aufgehängt, daß er quer zur Bewegungsrichtung des Gleitbrettes schwingen kann. An seiner unteren Leiste hängt das Sandpendel (Abb. 7.2.9./2). Stößt man das Doppelpendel an, so führen beide Pendel Schwingungen in derselben Ebene aus.

Die Bewegung des unteren Pendelkörpers läßt die durch Überlagerung entstandene Schwingung erkennen. Diese wird wie in V 7.1.13. durch Sand aufgezeichnet (Abb. 7.2.9./3).

### Bemerkungen

1. Durch Ändern des Verhältnisses der Pendellängen kann man verschiedene Kurven erzeugen. Ein schneller Wechsel der Versuchsanordnung wird durch Verwendung von leichten Ketten an Stelle von Bindfäden ermöglicht (vgl. Nebenzeichnung zu Abbildung 7.2.9./2). Die freien Enden der Ketten werden zweckmäßig mit kleinen Endhaken versehen und angehängt.
2. Als Pendelmasse für den Zwischenkörper eignet sich ein Rundfuß aus dem Stativmaterial. Man kann den Zwischenkörper auch nach Abbildung 7.2.9./4 aus zwei kurzen Stativstäben und einer Kreuzmuffe herstellen.



Abb. 7.2.9./3 Überlagerung zweier gleichgerichteter Schwingungen, aufgezeichnet durch ein Sandpendel

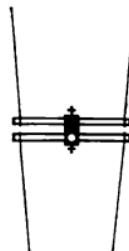


Abb. 7.2.9./4  
Zwischenkörper  
aus Stativmaterial

### 7.2.10. Überlagerung verschieden gerichteter Schwingungen am Sandpendel

Geräte wie bei V 7.2.9.

### Methodischer Hinweis

Auch beim Vergleich von elektrischen Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen mit dem Kathodenstrahlzosillografen erhält man Lissajousche Figuren. Dieses Experiment kann als analoger mechanischer Vorgang gezeigt werden.

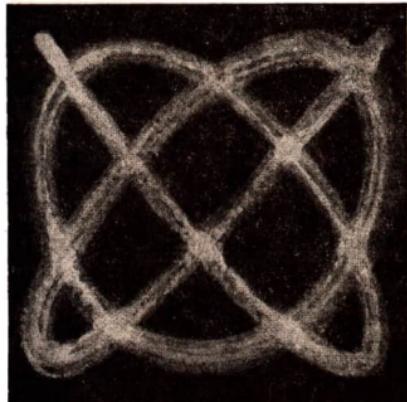
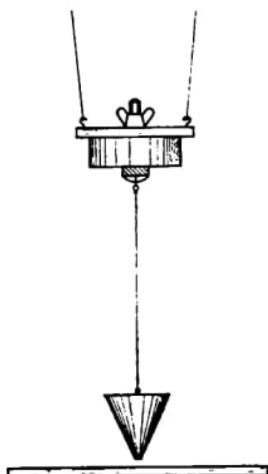


Abb. 7.2.10./2 Durch ein Sandpendel erzeugte Lissajousche Figur

Abb. 7.2.10./1 Doppelpendel zum Aufzeichnen überlagerter Schwingungen durch Sand. Das obere Pendel schwingt senkrecht zur Zeichenebene, das untere in ihr.

#### Versuch

Die Versuchsanordnung gleicht der im V 7.2.9. Man braucht nur die beiden Leisten des Zwischenkörpers senkrecht zueinander zu stellen (Abb. 7.2.10./1).

Man verschließt die Ausflußöffnung des Sandpendels mit einem Finger und zieht den mit Sand gefüllten Trichter nach vorn und nach der Seite. Wenn sich das System beruhigt hat, lässt man ihn los. Die Schwingungen werden durch den ausfließenden Sand auf dem ruhenden Brett aufgezeichnet. Es ergeben sich die nach *Lissajous* benannten Figuren. Abbildung 7.2.10./2 zeigt ein Beispiel. Durch Verstellen der Pendellängen  $l_1$  und  $l_2$  kann man ihr Verhältnis und damit die Gestalt der Kurven verändern. Die Kurvenform ist kennzeichnend für das Verhältnis der Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  der beiden sich überlagernden Schwingungen.

#### Bemerkung

Die entstehende Lissajousche Figur ist nur bei rationalem Verhältnis der Frequenzen geschlossen. Bei irrationalem Verhältnis erfüllt sie, wenn auch theoretisch erst nach unendlich langer Zeit, die gesamte rechteckige oder quadratische Fläche, die durch die Amplituden der Teilschwingungen bestimmt ist.

## 7.2.11. Überlagerung der Schwingungen zweier Blattfedern — Aufzeichnung durch einen Lichtzeiger

Geräte wie bei V 7.1.12., außerdem  
5. eine weitere Blattfeder mit Spiegel ⑧

*Methodische Hinweise*

1. Dieses Experiment dient dem gleichen Zweck wie V 7.2.9. und V 7.2.10.
2. Vergleiche MH, V 7.2.9. und MH, V 7.2.10.!
3. Es empfiehlt sich, zwei gekreuzte Sinusschwingungen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude auch zeichnerisch zusammenzusetzen und die Übereinstimmung der Zeichnung mit den Ergebnissen der Versuche zu zeigen.

*Versuch 1: Überlagerung gleichgerichteter Schwingungen*

Der Versuchsaufbau ähnelt dem von V 7.1.12. Nur wird hier eine weitere Blattfeder mit Spiegel in den Strahlengang des Lichtbündels gebracht. Die beiden Blattfedern sollen in parallelen Ebenen schwingen können (Abb. 7.2.11./1).

Läßt man nur eine Feder schwingen, so verläuft der Versuch wie bei V 7.1.12., man erhält auf dem Schirm eine Sinuskurve. Schwingen dagegen beide Federn, so ergibt sich bei der Rotation des Drehspiegels auf dem Schirm eine durch Überlagerung zweier

Sinuskurven entstandene Kurve. Man zeigt, daß ihre Gestalt von der Amplitude, dem Phasenunterschied und der Frequenz der Schwingungen abhängt. Die Frequenz kann man durch Verschieben der Federn in den Klemmvorrichtungen ändern.

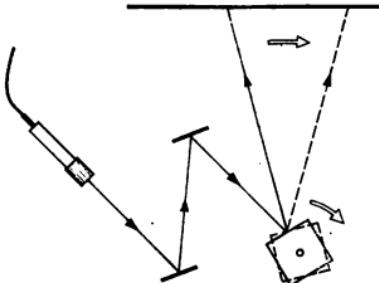


Abb. 7.2.11./1 Aufzeichnung der Überlagerung gleichgerichteter Schwingungen durch einen Lichtzeiger

*Versuch 2: Überlagerung gekreuzter Schwingungen*

Die Federn werden so angeordnet, daß die eine in einer vertikalen, die andere in einer horizontalen Ebene schwingt. Ein enges Lichtbündel wird über beide Spiegel unmittelbar auf den Schirm geleitet, ohne daß der Drehspiegel benutzt wird.

Läßt man die Federn einzeln schwingen, so ergibt sich das eine Mal ein lotrechter Lichtstreifen, das andere Mal ein waagerechter. Schwingen beide Federn, so durchläuft der Lichtfleck eine Lissajousche Figur.

Schwingen die beiden Federn mit gleicher Frequenz und mit gleicher Amplitude, so ergibt sich je nach dem Phasenunterschied als Bild der zusammengesetzten Schwingung eine Strecke, eine Ellipse oder ein Kreis.

## 7.2.12. Überlagerung von Schwingungen eines Stahldrahtes

1. Stricknadel oder Stahldraht
2. kleine Metallkugel mit Bohrung oder Glasperle
3. 2 Hartholzklötzchen
4. Schraubstock

*Methodischer Hinweis*

Das Experiment zeigt die Überlagerung zweier gekreuzter Schwingungen mit gleicher Frequenz (vgl. MH Nr. 3, V 7.2.11.). Ein Beobachtung durch mehrere

Schüler ist nur dann möglich, wenn man einen steifen, nicht zu kurzen Stahldraht auf die Schüler hin gerichtet einspannen kann. Die glänzende Metallkugel beleuchtet man im leicht abgedunkelten Raum von der Seite her mit einer starken Lichtquelle.

#### *Versuch*

Eine Stricknadel wird zwischen zwei Klötzchen aus Hartholz in einen Schraubstock gespannt. Läßt man sie in einer beliebigen Richtung schwingen, so beobachtet man, daß die Schwingungsebene wandert. Dabei sind zwei Schwingungsrichtungen ausgezeichnet, nämlich die Richtung parallel zur Backenkante des Schraubstocks und die hierzu senkrechte. Diese Richtungen behält die Stricknadel ziemlich beständig bei, wenn sie in einer von ihnen erregt wird.

Um die Schwingungen gut beobachten zu können, befestigt man auf der Spitze der Nadel eine kleine glänzende Metallkugel oder eine Perle. Dann bewegt sich in den beiden erwähnten Fällen der Spiegelfleck des auf die Kugel fallenden Lichtes auf einer Geraden. Erregt man die Schwingungen der Nadel in einer anderen Richtung, so beschreibt der Spiegelfleck des Lichtes eine Ellipse, die allmählich ihre Gestalt ändert und dabei zu einem Kreis oder zu einer Strecke werden kann. Es handelt sich hier um die Zusammensetzung zweier gekreuzter Schwingungen gleicher Frequenz, aber wechselnder Phase.

#### *Bemerkung*

Man kann das Experiment auch ohne Schraubstock ausführen, wenn man die Stricknadel an der Ecke des Experimentiertisches mit einer Tischklemme festklemmt.

### **7.2.13. Schwebungen gekoppelter Pendel**

Geräte wie bei V 7.2.5., außerdem

3. Demonstrationsstoppuhr oder Stoppuhr

#### *Methodischer Hinweis*

Die im V 7.2.5. beobachtete Bewegung der gekoppelten Fadenpendel kann sowohl als *Resonanz* als auch als *Schwebung* gedeutet werden. Das An- und Abschwellen der Amplituden erinnert an den Vorgang einer Schwebung. Eine solche kommt zustande, wenn zwei Schwingungen einander überlagern, deren Frequenzen nur wenig voneinander verschieden sind.

Das Experiment soll diesen Zusammenhang prüfen und zeigen, daß am gekoppelten Pendelpaar tatsächlich zwei derartige sich überlagernde Schwingungen auftreten. Man kann diese Schwingungen getrennt nachweisen.

#### *1. Teilversuch: Beide Pendel schwingen phasengleich*

Die Versuchsanordnung gleicht der im V 7.2.5. Nachdem man die Eigenfrequenz beider Pendel genau aufeinander abgestimmt hat, koppelt man sie durch einen belasteten Faden.

Man zieht beide Pendelkörper zu sich heran und läßt sie gleichzeitig los, so daß sie parallel zueinander und phasengleich schwingen. Die Schwingung soll senkrecht zu der Ebene verlaufen, die durch die Ruhelage der Pendel bestimmt wird. Die beiden Pendel schwingen völlig gleichartig, ohne daß Energie von einem zum anderen übertragen wird. Der Kopplungsfaden behält dabei immer dieselbe Spannung. Man bestimmt die Schwingungsdauer des Systems mit der Stoppuhr und berechnet daraus die Eigenfrequenz  $f_1$  des phasengleich schwingenden Systems.

**2. Teilversuch: Die Pendel schwingen mit einem Phasenunterschied von  $\pi$  (entgegengesetzte Phasen)**

Zieht man die beiden Pendelkörper in entgegengesetzte Richtungen und läßt sie gleichzeitig los, so schwingen sie mit einem Phasenunterschied von  $\pi$ . Wenn sich die Pendelkörper voneinander entfernen, wird der Kopplungsfaden jedesmal straffen gespannt. Dadurch wird die rückführende Kraft größer, und man mißt eine kleinere Schwingungsdauer als im ersten Teilversuch. Die Eigenfrequenz des Systems  $f_2$  ist bei dieser Schwingungsform größer als bei der vorhergehenden.

**3. Teilversuch: Erregung nur eines Pendels**

Erregt man nur das eine Pendel, so gerät auch das andere in Schwingungen. Es bildet sich dann aber keiner der beschriebenen Sonderfälle aus, da sich der Phasenunterschied zwischen beiden Pendeln dauernd ändert. Beide Schwingungen überlagern sich zu Schwebungen, deren Frequenz  $f_3$  ebenfalls gemessen wird.

Aus der Schwingungslehre folgt, wie hier ohne Beweis mitgeteilt wird,

$$f_3 = f_2 - f_1,$$

wenn  $f_2 > f_1$  ist.

Bei den in der Tabelle wiedergegebenen Versuchen betrug die Länge der Pendelfäden 600 mm und ihr Abstand 200 m. Die Endpunkte des koppelnden Fadens lagen bei den ersten drei Versuchen 220 mm, beim vierten Versuch 450 mm von den Aufhängepunkten entfernt.

**Einzelfrequenzen ( $f_1, f_2$ ) und Schwebungsfrequenzen ( $f_3$ ) gekoppelter Pendel**

Masste der Pendelkörper $m$ in g	Masste des Kopplungskörpers $m_k$ in g	Abstand des Kopplungsfadens vom Aufhängepunkt in mm	Gemessene Frequenzen			Berechnete Schwebungsfrequenz $f_3 - f_1$ in Hz
			$f_1$ in Hz	$f_2$ in Hz	$f_3$ in Hz	
50	20	220	0,65	0,70	0,04	0,05
100	20	220	0,64	0,67	0,03	0,03
200	20	220	0,63	0,65	0,02	0,02
50	20	450	0,64	0,82	0,18	0,18

Die Versuche bestätigen mit guter Übereinstimmung, daß die Frequenzen der Schwebungen gleich der Differenz der Frequenzen der sich überlagernden Schwingungen sind.

## Register

Achsen, freie 334  
Adhäsion 52  
Aggregatzustand 38f.  
Arbeit 126ff.

Bandgerät 176, 202  
Beschleunigungsmessung 158f.  
Bewegung, gleichförmige geradlinige 165ff.  
—, gleimäßig beschleunigte geradlinige 187 ff.  
—, harmonische 342ff.  
Bologneser Fläschchen 83

Dichtebestimmungen 43  
Differentialflaschenzug 109  
Digitalzähler 141ff.  
Drehbewegungen 292ff.  
Drehmoment 98ff.  
Drehmomentenwaage 110  
Drehzahlmessungen 155f., 306ff.

Ebene, geneigte 121, 128, 250  
Energie, mechanische 257ff.

Fadenpendel 33, 214, 363f.  
Fahrradkreisel 339  
Faktorenflaschenzug 108  
Fall, freier 206ff.  
Fallrinne 167, 175, 187, 201  
Fallschnur 207  
Federschwinger 342ff.  
Federstoßgerät 277  
Feinmeßschraube 24  
Flächenbestimmungen 24  
Flaschenzug 108f., 126  
freie Achsen 334

freier Fall 206ff.  
Frequenzmessungen 155f.

Gefügemodell 52  
Gegenwirkungsprinzip 68  
geneigte Ebene 121, 128, 250  
Geschwindigkeitsmessung 157f.  
Glastränen 83  
Gleichgewichtslagen 88

Hookesches Gesetz 74  
Hebel 99ff.

Impuls 272ff.  
Impulsscheibe 155ff.  
Impulszählgerät 35

Keil 125  
Klobenzug 107  
Knallbüchse 39  
Kohäsion 52  
Kraftmesser 30, 65, 80, 270  
Kraftstoß 272ff.  
Kreisbewegung, gleichförmige 296ff.  
Kreisel 336ff.  
Kugelschwebe 299

Leistung 126ff.  
Lichtschanke 151ff.  
Luftkissenbahn 183, 230, 265  
Luftkissenfahrzeug, Modell 244

Massenvergleich 30  
Maxwellsches Rad 269  
Meßschieber 21f.  
Metronom 35  
Momentenscheibe 113

Nonius 21  
Pendelhemmung 368  
Perkussionsapparat 283  
Perkussionsrinne 286  
Porosität 55  
Potenzflaschenzug 108  
Pronyscher Zaum 132  
Pyknometer 44  
  
Radialkraft 296 ff.  
Reibung 242 ff.  
Reibungszahl 246  
Reifenapparat 171, 192, 233, 266, 330  
Resonanz 360 ff.  
Riementrieb 117 f.  
Rolle 106, 126  
  
Sandpendel 356  
Sanduhr 31  
Schaltverstärker 152 ff.  
Schienenwagen 180, 205, 228  
Schraube 124  
Schwebekörper 184 f.  
Schwingungen 341 ff.  
Seilmaschinen 105  
Seiltrieb 116  
Spiegelmeßstab 20  
Stabpendel 34  
Standfestigkeit 88 ff.  
  
Stirnradtrieb 119  
Stoß, der unelastische 283, 286  
—, der zentrale elastische 283, 286  
Stoßpendel 280  
stroboskopische Scheibe 307  
Stufenrolle 115  
Stufenscheibentrieb 118  
  
Taucherglocke 40  
Torsionsschwingungen 325, 328  
Trägheit 42 ff.  
Trägheitsmoment 319 ff.  
  
Verformbarkeit 57  
Volumenmessungen 26 ff.  
  
Waagenmodelle 102  
Wägung 30 ff.  
Wasseruhr 33  
Wellrad 115  
Wurf, horizontaler 220  
—, lotrechter 226  
—, schräger 222  
  
Zahnradübersetzung 120  
Zeitmessungen 31 ff.  
Zentraluhr 139 ff.  
Zentrifuge, Modell 302  
Zugfestigkeit 82 f.

**Quellennachweis der Abbildungen**

DEWAG-Werbung, Leipzig 3.0.1./3 · J. Fischer, Drewitz 4.0.1./6 · Atelier E. Heim, Flöha 3.0.1./2, 4.0.1./7 a und b, 6.0.1./3 · W. Hering, Hermsdorf 4.0.2./1, 4.0.2./3 · Kratsch, Karl-Marx-Stadt 4.0.2./12 und 13, 4.0.2./15 · Foto Römer, Karl-Marx-Stadt 4.0.1./4 a und b · M. Schmidt, Berlin 4.0.2./11 · Foto Seifert, Berlin 4.0.1./5 · Volk und Wissen Archiv, Berlin 3.4.13./4, 3.4.21./3, 4.0.1./1 und 2, 4.0.1./3, 4.0.2./18, 5.2.8./1, 6.2.11./1, 7.2.9./3, 7.2.10./2 · J. Wilke, Potsdam 4.1.8./9, 4.2.2./6 und 7, 4.2.3./1 und 2, 4.5.2./1, 5.2.10./1