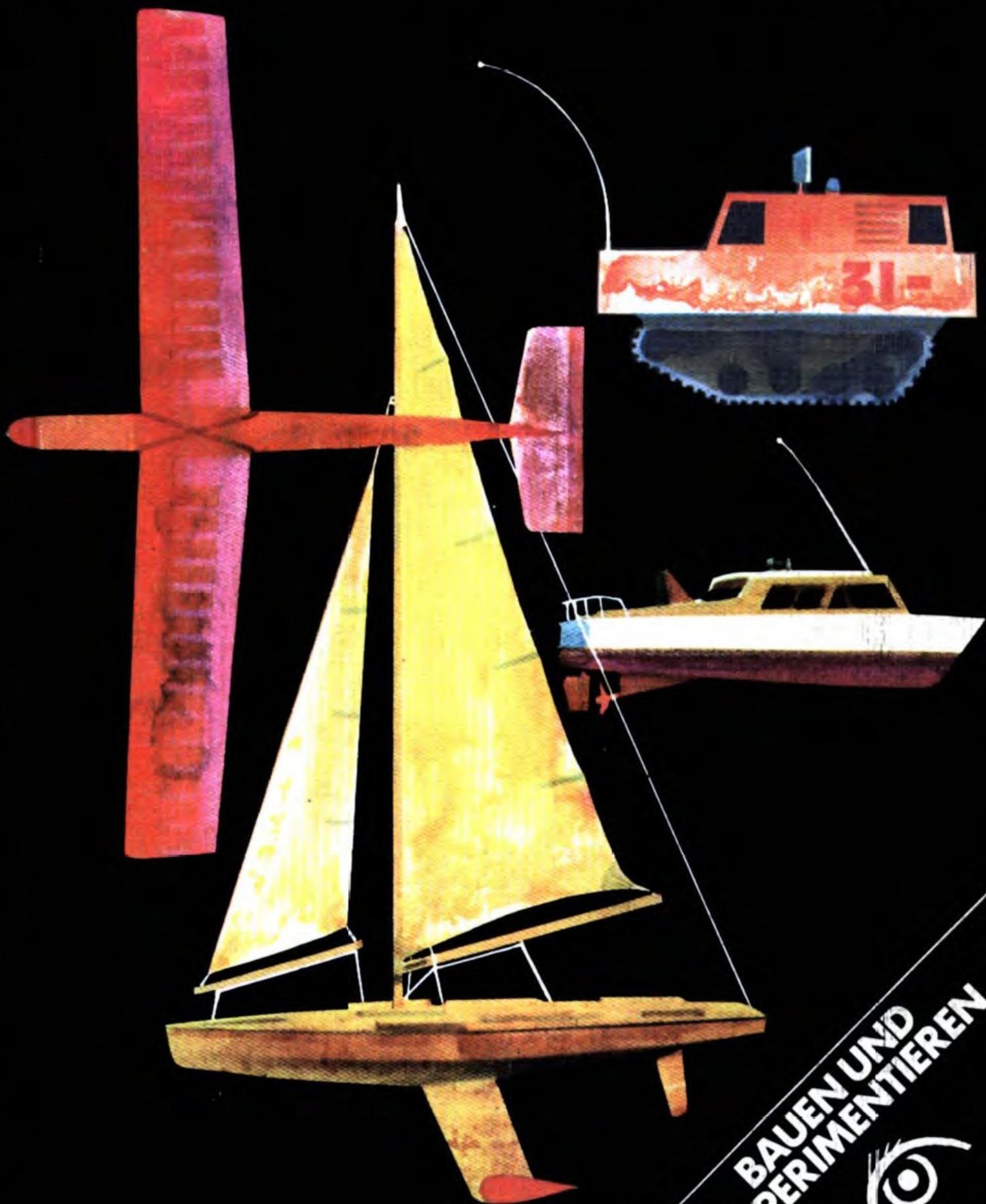


FERNGESTEUERTE MODELLE SELBST GEBAUT

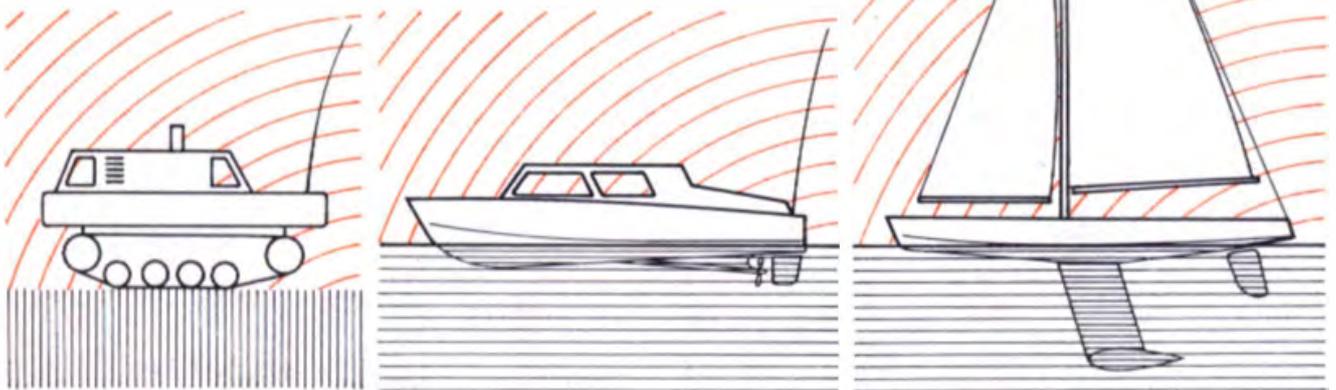
G. MIEL

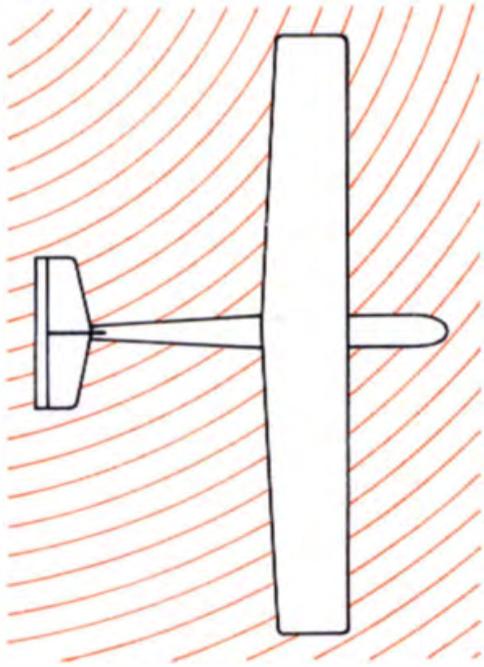


BAUEN UND
EXPERIMENTIEREN



Das kannst auch Du





Günter Miel

**Fern-
gesteuerte
Modelle
selbst gebaut**

**Aufbau und Betrieb
funkferngesteuerter
Schiffs- und Flugmodelle**

**Urania-Verlag
Leipzig · Jena · Berlin**

3., neubearbeitete Aufl. 1981, 31.–50. Tausend
Alle Rechte vorbehalten
© Urania-Verlag, Leipzig · Jena · Berlin,
Verlag für populärwissenschaftliche Literatur,
Leipzig 1977
VLN 212-475/68/81 · LSV 3559
Lektoren: Jochen Horn, Manfred Quaas
Einbandgestaltung: Wolfgang Würfel
Gestaltung: Hans-Jörg Sittauer
Fotos: Dr. Günter Miel
Zeichnungen: Gerhard Pippig, Ralf Sonnekalb
Printed in the German Democratic Republic
Lichtsatz: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb
Leipzig – III/18/97
Druck und buchbinderische Verarbeitung:
Karl-Marx-Werk Pößneck V 15/30
Best.-Nr.: 653 463 0
DDR 13,80 M

Inhalt

Einige Bemerkungen zu Beginn 9

Antragsmuster 10

Wir richten uns einen Arbeitsplatz ein 11

Was wir an Meßgeräten brauchen 15

1. Kapitel

Grundlagen der Fernsteuerung 17

Der Widerstand – ein wichtiges Bauelement 18

Wir lernen den Kondensator kennen 23

Was wir von den Spulen wissen müssen 30

Der Schwingkreis – eine Grundsaltung mit besonderen Eigenschaften 33

Galvanische Elemente als elektrische Spannungsquellen 34

Am Anfang genügen Primärelemente 34

Wirtschaftlicher sind Akkumulatoren 37

Wir bauen einen Akkuprüfer 39

Wir bauen ein Ladegerät 40

Das Relais ist ein elektromechanischer Schalter 42

Der Elektromotor wandelt elektrische in mechanische Energie um 43

Der Elektromotor wird entstört 47

Dioden als Gleichrichter – wir lernen die ersten Halbleiterbauelemente kennen 49

Der Leitungsmechanismus im Halbleiter 49

Wir nehmen die Kennlinien von Dioden auf 52

Was wir außerdem von den Dioden wissen müssen 53

Der Transistor ist unser Verstärkerelement 57

Wir experimentieren mit Transistoren 60

Wir bauen einen Transistorprüfer 62

Der Transistor verstärkt 63

Der Transistor als elektronischer Schalter 66

Zwei Schalter schalten sich gegenseitig 68

Proportionale Fernsteuerung mit Digitaltechnik 69

Was ist Impuls – und was Digitaltechnik? 69

Mit einfachen Impulsschaltungen beginnen wir 70

Der Blinkgeber – eine interessante Schaltung 70

Wir erzeugen Impulse von einstellbarer Dauer 71

Der Flip-Flop hat ein Gedächtnis 72

Wir steuern unser erstes Modell mit Impulsen 73

Wir erzeugen die Kanalimpulse 75

Der Kanalimpuls wird ausgewertet 77

Wir stellen eine gedruckte Schaltung her 79

Unser erstes ferngesteuertes Modell ist ein Landfahrzeug 83

2. Kapitel

Drahtlose Fernsteuerung 85

Wir lernen die Hochfrequenz kennen 86

Wir bauen einen Hochfrequenzoszillator 87

Wir messen Hochfrequenzleistungen 90

Wir senden und empfangen 91

Die Hochfrequenz wird verstärkt und moduliert 95

Der Hochfrequenzverstärker 95

Die Modulation der Hochfrequenz 100

Wir bauen den Fernsteuersender 101

Der Sender-HF-Teil wird abgeglichen 103

Die Antenne strahlt die Hochfrequenz ab 104

Wir bauen die Sendermechanik 107

Die Steuermechanik erfordert präzise Arbeit 109

Wir steuern proportional 113

Das Prinzip der proportionalen Steuerung 113

Der Kanalimpuls wird in der Servoelektronik proportional ausgewertet 114

Wir bauen die Servomechanik 117

Das Servo wird abgeglichen 117

Mit dem Schaltverstärker können wir auch proportional steuern 120

Der nächste Entwicklungsschritt ist die vollintegrierte Servoelektronik 120

Wir steuern mehrere Kanäle proportional 123

Wie der Koder funktioniert 123

Der Dekoder trennt die Impulse wieder 127

Wir gleichen den Koder ab 132

Wir bauen den Siebenkanaldekoder 136

Wir verdrahten den Sender 139

Wir gleichen den Sender ab 140

Der Empfänger der Proportionalanlage ist ein Super 142

Wie der Super funktioniert 143

Was wir von der Antenne wissen müssen 143

Wozu zwei Schwingkreise im Eingang des Supers? 145

Die Frequenzen werden gemischt 145

Die Zwischenfrequenz wird verstärkt 145

Die Regelung des Supers 146

Wir bauen den Transistorsuper 146

Wir gleichen den Super ab 148

Wir bauen den Fernsteuerempfänger 149

Wir bauen den IS-Super 150

Wie der IS-Super funktioniert 150

Wir gleichen den IS-Super ab 154

Wir steuern die Drehzahl des Fahrmotors proportional 155

Wie der Fahrtregler funktioniert 155

Wir bauen den Fahrtregler auf 160

Einige praktische Hinweise zum Gebrauch der Fernsteueranlage 163

Wie wir die Anlage in das Modell einbauen 163

Was wir beim Betrieb des Senders beachten müssen 164

Was wir von der Betriebszeit wissen müssen 164

Was wir beim Betrieb des Fahrtreglers beachten müssen 165

Wie wir mit der Fernsteueranlage Unterricht erteilen können 165

Ein Kapitel Fehlersuche 166

3. Kapitel

Ferngesteuerte Schiffs- und Flugmodelle 169

Vorbereitungen zu Modellbau und Modellbetrieb 170

Welche Werkzeuge benötigen wir noch? 170

Wie wir richtig lackieren 171

Unser Service-Werkzeug 172

Die ferngesteuerte Motorjacht 173

Einiges über physikalische Gesetze des Wassers 173

Wie schnell kann und soll die Motorjacht sein? 174

Wichtig ist der richtige Antrieb 175

Wir bauen die Motorjacht 176

Die ferngesteuerte Segeljacht 181

Experimente mit Postkarten 181

Kräfte am Segel 182

Wahrer und scheinbarer Wind 183

Etwas Theorie zur Konstruktion der Segeljacht 185

Wir bauen die Segeljacht 187

Wir stellen Mast und Takelage her 191

Wir bauen eine Segelwinde 195

Der Ballast wird gegossen 197

Ein Kapitel Segeltechnik 199

Wir üben die Segelmanöver 200

Das ferngesteuerte Segelflugmodell 201

Warum die Luft trägt 201

Noch mehr Wissenswertes aus der Aerodynamik 203

Vor dem Bauen wird überlegt 205	Tabelle 2. Internationaler Farbkode für Widerstände 232
Einiges über Profile 207	Tabelle 3. Richtwerte zur Beurteilung des Ladezustandes gasdichter NK-Akkus 233
Wir bauen das Segelflugmodell 209	Tabelle 4. Abhängigkeit der Parameter einer Transistorschaltung von der Schaltungsart 233
Mit dem Rumpf beginnen wir 209	Tabelle 5. Kennwerte universell verwendbarer Halbleiterbauelemente und Typenbeispiele 234
Wir fertigen den Tragflügel an 212	Tabelle 6. Kanalaufteilung des 27,12 MHz-Fernsteuerbandes mit den international bevorzugten 12 Normfrequenzen für die Modellfernsteuerung 235
Wir bespannen Rumpf und Tragflügel 214	Tabelle 7. Daten der <i>LC</i> -Bandfilter ($ZF = 455$ kHz) 235
Wir fliegen unser Modell ein 215	Tabelle 8. Stückliste für die Motorjacht 236
Das Einfliegen beginnt in der Werkstatt 215	Tabelle 9. Stückliste für die Segeljacht 237
Erste Flugversuche 217	Tabelle 10. Koordinaten gebräuchlicher Profile für Segelflugmodelle 238
Ein Kapitel Hangflugtechnik 219	Tabelle 11. Koordinaten der Musterrippen für das Profil Gö 593 238
Der Thermikflug 221	Tabelle 12. Stückliste für das Segelflugmodell 239
Gestartet wird mit einer Schnur 222	Tabelle 13. Anschriften von Fachgeschäften für Elektronik- und Bastelbedarf 240
Regeln für den Thermikflug 225	Tabelle 14. TTL-Schaltkreise der Standardreihe 74 240
Einige Bemerkungen zum Schluß 226	Sachwörterverzeichnis 241
Auswahl empfehlenswerter Literatur 230	
Tabellenanhang	
Tabelle 1. Internationale Normreihen E 6, E 12, E 24 zur Stufung der Widerstandswerte in Abhängigkeit von der Auslieferungstoleranz 232	

Einige Bemerkungen zu Beginn

Die Zahl der Freunde des Modellbaues vergrößert sich von Jahr zu Jahr. Das liegt sicher nicht nur daran, daß sich der Anteil der Freizeit erhöht, auch die technischen Möglichkeiten für eine sinnvolle Freizeitbeschäftigung verbessern sich ständig. Neue Werkstoffe, Bauelemente und Baukästen erleichtern und vereinfachen die Arbeit. Lehrreich ist dieses Hobby für Jugendliche und Erwachsene gleichermaßen. Sie eignen sich handwerkliche Fertigkeiten an, lernen das Anwenden und Ausnutzen von Naturgesetzen kennen und gewinnen Einblick in komplizierte technische Zusammenhänge. Stehen am Anfang reine »Nachbauten« im Vordergrund, so werden diese bald von eigenen Entwürfen abgelöst. Der Modellsport ist anspruchsvoll und erfordert den »ganzen Kerl«. Er läßt aber den, der einmal richtig »hineingerochen« hat, kaum wieder los.

In Fortsetzung der Reihe »Das kannst auch Du« beschäftigt sich der vorliegende Band mit der Fernsteuerung von Modellen. Dabei steht das eigene Erleben im Mittelpunkt. Es werden Kenntnisse über elektronische Bauelemente, einfache Funksende- und empfangsanlagen, die Signalverschlüsselung und -entschlüsselung, den Aufbau von Prüf- und Hilfsgeräten, die Gesetze der Aero- und Hydrodynamik und nicht zuletzt über die Technologie des Modellbaues vermittelt. Die physikalischen Zusammenhänge sind, wo es das leichtere Verstehen erfordert, weitgehend vereinfacht dargestellt, auf umfangreiche Berechnungen wird verzichtet. Unser Ziel ist es, ferngesteuerte Modelle und die dazu erforderlichen Geräte selbst aufzubauen. Die dazu unentbehrlichen Hilfsmittel wie Kopfhörer, Vielfachmeßinstrument und eventuell auch einen Oszillographen leihen wir jedoch aus oder kaufen sie im Fachhandel. Prinzipiell kann man diese Geräte auch selbst bauen, eine Beschreibung würde über das Anliegen dieses Buches allerdings hinausgehen.

Der Schwerpunkt der Erläuterungen liegt auf dem Gebiet der Elektronik. Ausgehend von modernen elektronischen Bauelementen und ihren Eigenschaften, experimentieren wir zu-

nächst mit Grundschaltungen und bauen einfache Prüf- und Hilfsgeräte auf. Aus der Kombination der Grundfunktionen werden später Verfahren der Signalverschlüsselung und -entschlüsselung sowie der Funksende- und -empfangstechnik entwickelt.

Zuerst bauen wir einen Sender und Empfänger für zwei Steuerfunktionen, im weiteren als *Kanäle* bezeichnet, auf. Mit dieser Anlage können wir die Modelle bereits vorbildgetreu fernsteuern. Dabei eignen wir uns die notwendigen Kenntnisse und handwerklichen Fertigkeiten an. Steigen dann unsere Ansprüche, d. h., wollen wir zusätzliche Funktionen (Beleuchtung, Hupe o. ä.) im Modell fernsteuern, bauen wir die Anlage auf sieben Steuerfunktionen aus. Sie ist für diese Erweiterung konzipiert. Ferner können mit ihr auch Anlagenteile, z. B. Empfänger oder Aufschaltseinrichtungen, anderer Fernsteueranlagen betrieben bzw. zusammengeschaltet werden. Auf die dabei zu beachtenden Besonderheiten wird an den entsprechenden Stellen hingewiesen.

Wir wollen unsere Fernsteuergeräte nicht nur auf dem Tisch, sondern vor allem im Modell erproben, dessen sauberem und exaktem Aufbau wir daher große Aufmerksamkeit schenken. Ob man nun Flug- oder Schiffsmodelle bauen möchte, man sollte zunächst mit einfachen und preiswerten Modellen Erfahrungen sammeln. Deshalb wird hier der Aufbau einfacher Modelle in herkömmlicher Technologie beschrieben. Wenn wir deren Herstellung und Betrieb beherrschen, dann können wir uns auch an die komplizierteren Sport- oder Leistungsmodelle heranwagen. In der Fachliteratur (Zeitschriften, Bücher) werden wir dafür genügend Anregungen finden.

Für das Errichten und Betreiben von Funkfernsteueranlagen gibt es strenge Vorschriften, die unbedingt einzuhalten sind. Sie sind in der *Anordnung über die Landfunkdienste* (Landfunkordnung) festgehalten. Bevor wir also überhaupt mit den Fernsteuerexperimenten beginnen, müssen wir an die für den Wohnort zuständige Bezirksdirektion der Deutschen Post einen Antrag zum Errichten und Betreiben einer Funkanlage zur Modellfernsteuerung stellen. Für den Antrag ist ein Vordruck zu verwenden, der bei der Bezirksdirektion erhältlich ist (Muster s. unten).

Erst nachdem uns die Genehmigungsurkunde zugeschickt wurde, für die wir eine Gebühr von 3,-M entrichten müssen, können wir mit den Fernsteuerexperimenten beginnen. Die Genehmigung berechtigt lediglich zum Errichten und Betreiben der im Antrag gekennzeichneten Funkanlage zur Fernsteuerung von Modellen. Wollen wir eine zweite Fernsteueranlage errichten, so ist eine Erweiterung des Genehmigungsumfangs der vorhandenen Urkunde zu beantragen. Das Gesetz schreibt weiter vor, daß die Fernsteueranlage nur von der in der Genehmigungsurkunde bezeichneten Person er-

richtet und betrieben werden darf. Leser unter 18 Jahren müssen ihrem Antrag eine schriftliche Einwilligung des gesetzlichen Vertreters beifügen.

Die Fernsteueranlage darf erst in Betrieb genommen werden, wenn sie durch einen Beauftragten der Deutschen Post abgenommen wurde. Die kostenlose Abnahme wird auf der Genehmigungsurkunde vermerkt und durch eine Genehmigungsnummer für den Sender bescheinigt. Für den Aufbau der Fernsteueranlage haben wir zwei Jahre Zeit, gerechnet von der Antragstellung bis zur Abnahme der Anlage. Überschreiten

Antragsmuster

*Fritz Müller
5300 Weimar
Goethestr. 20*

*Deutsche Post
Bezirksdirektion Erfurt
– Fachgebiet Funk –
5000 Erfurt
Beethovenplatz 3*

Antrag auf Erteilung einer Genehmigung zum Herstellen, Errichten und Betreiben einer Funkanlage zur Fernsteuerung von Modellen (Landfunkordnung vom 12. Febr. 1974)

1. Name und Anschrift des Antragstellers: *Fritz Müller
geb. am 20. 2. 1950
5300 Weimar, Goethestr. 20
Pers.kennzahl 200 250 489 128*
2. Verwendungszweck der Funkanlage: *(Schiffs-, Flug- und Fahrmodelle) für Flugmodelle*
3. Art des Senders und seine Ausgangsleistung in Watt sowie Art des Empfängers (bei Industriegeräten Angabe der Herstellerfirma und der Typenbezeichnung des Ministeriums für Post- und Fernmeldewesen)
Eigenbausender, Ausgangsleistung 0,2 Watt, Super
4. beantragte Sendefrequenz: *27,12 MHz*
5. Sendart: *A 9 bei Digitalanlagen*
6. Art des Empfängers (Schaltungsaufbau): *IS-Super*
7. Einsatzgebiet der Funkanlage: *DDR*
8. Für Anlagen, die im Eigenbau hergestellt werden, sind Schaltbilder beizufügen.
Für Personen unter 18 Jahren bedarf der Antrag auf Erteilung einer Genehmigung der schriftlichen Einwilligung des gesetzlichen Vertreters.
Vor dem Vertrieb (An- und Verkauf von Funkanlagen) ist die Genehmigung der Deutschen Post einzuholen.

*Fritz Müller
Unterschrift*

wir diese Frist, müssen wir die Urkunde an die Post zurücksenden und den Antrag neu stellen.

Für die Modellfernsteuerung sind folgende Frequenzbänder freigegeben:

13,560 MHz \pm 0,05 %,

27,120 MHz \pm 0,6 %,

433,92 MHz \pm 0,2 %.

Fast alle selbst hergestellten und industriell gefertigten Fernsteueranlagen werden im 27,12-MHz-Bereich betrieben. Die hier beschriebene Fernsteuerung ist ebenfalls für diese Frequenz ausgelegt.

Dem Leser liegt jetzt die 3. Auflage dieses Buches vor. Gegenüber der 1. Auflage wurden die Elektronikkapitel gründlich überarbeitet und auf den gegenwärtig aktuellen Stand gebracht. Die NF-Fernsteuerung und der Pendelempfänger sind deshalb nicht mehr enthalten. Erweitert wurden dagegen die Abschnitte über die Digitalanlage um neue Anlagenteile und Schaltungsvarianten mit integrierten Schaltungen. Damit kann sich der Leser eine Fernsteueranlage aufbauen, die in Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit industriell hergestellten Fernsteueranlagen nicht nachsteht.

Wir richten uns einen Arbeitsplatz ein

Bevor wir mit den Experimenten beginnen, wollen wir überlegen, welche Werkzeuge, Werkstoffe und Zubehörteile für unsere Arbeiten benötigt werden.

Als erstes sehen wir uns nach einem geeigneten Arbeitsplatz um. Das wird im einfachsten Fall ein gut beleuchteter Holztisch sein. Steht uns keine freie Keller- oder Bodenecke zur Verfügung, müssen wir uns in der Küche einquartieren. In einem Schubfach bringen wir einen Mindestvorrat an Werkstoffen und in einem Wandschrank die Werkzeuge und Zubehörteile unter. In Reichweite des Tisches sollte sich eine Schuko- (Schutzkontakt-) Steckdose befinden, an die wir bei Bedarf eine handelsübliche Dreifach-Schukosteckdose mit Verlängerungsschnur anschließen.

Nun einige Worte zum Werkzeug. Die hier aufgeführten Werkzeuge sind als Mindestbestand anzusehen. Mit ihnen können alle anfallenden Arbeiten ausgeführt werden. Bei unseren Einkäufen in den einschlägigen Fachgeschäften werden wir im Laufe der Zeit weitere Werkzeuge entdecken, die nicht unbedingt erforderlich sind, aber die Arbeit doch erheblich erleichtern oder beschleunigen. Nach und nach sollten wir unsere Werkzeugausstattung damit vervollkommen.

Der Schraubstock wird eines der meistgebrauchten Werkzeuge sein. Wir wählen beim Kauf eine stabile Ausführung mit mindestens 100 mm Backenbreite. Steht uns keine eigene Werkbank zur Verfügung, muß der Schraubstock eine Zwinde zum Befestigen haben.

An mechanischem Werkzeug benötigen wir (Bild 1):

1. Handbohrmaschine, 2. Laubsägebügel,
3. Laubsägetisch, 4. Zwinde, 5. Hammer (250 g),
6. Schraubenschlüssel (5,5/7; 8/10; 9/11; 12/14 mm), 7. Stechzirkel (150 mm), 8. Flachzange (130 mm), 9. Seitenschneider (130 mm),
10. Kombizange, 11. Zurichtmesser (20 mm breit), 12. Schraubenzieher (3 und 4 mm),
13. einen Satz Uhrmacherschraubenzieher, 14. Bleischere, 15. Schlicht- und Schruppfeilen (200 mm), flach, halbrund und rund, 16. Reißnadel, 17. Körner, 18. Pinzette, 19. Stahllineal (300 mm), 20. Wendelbohrer (0,8; 1,0; 1,6; 2,0; 2,4; 3,0; 3,2; 3,5; 4,0; 5,0; 6,0 mm), 21. je einen Satz Gewindebohrer (M 2, M 3, M 4), 22. Wind-eisen (140 mm), 23. Schneideisen (M 2, M 3, M 4) mit Halter, 24. Anschlagwinkel (120 mm), 25. Röhrchenfeder (1 mm).

Ergänzt wird dieses Werkzeugsortiment durch folgende Elektrowerkzeuge und Hilfsmittel:

26. Lötkolben (100 W), 27. Lötkolben (20 W, für elektronische Schaltungen), 28. Meßschnüre (selbst anfertigen), 29. Prüfspitzen, 30. Zinnlot, 31. Lötkolbenständer, 32. Kolophonium sowie eine größere Zahl Bananenstecker und Krokodilklemmen.

Die meisten der genannten Werkzeuge erhalten wir in Werkzeug-, Elektro- und Bastlerläden. Oberstes Gebot sollte die pflegliche Behandlung aller Werkzeuge sein. Sie danken es nicht nur mit langer Lebensdauer, sondern ermöglichen auch saubere Bastelarbeiten.

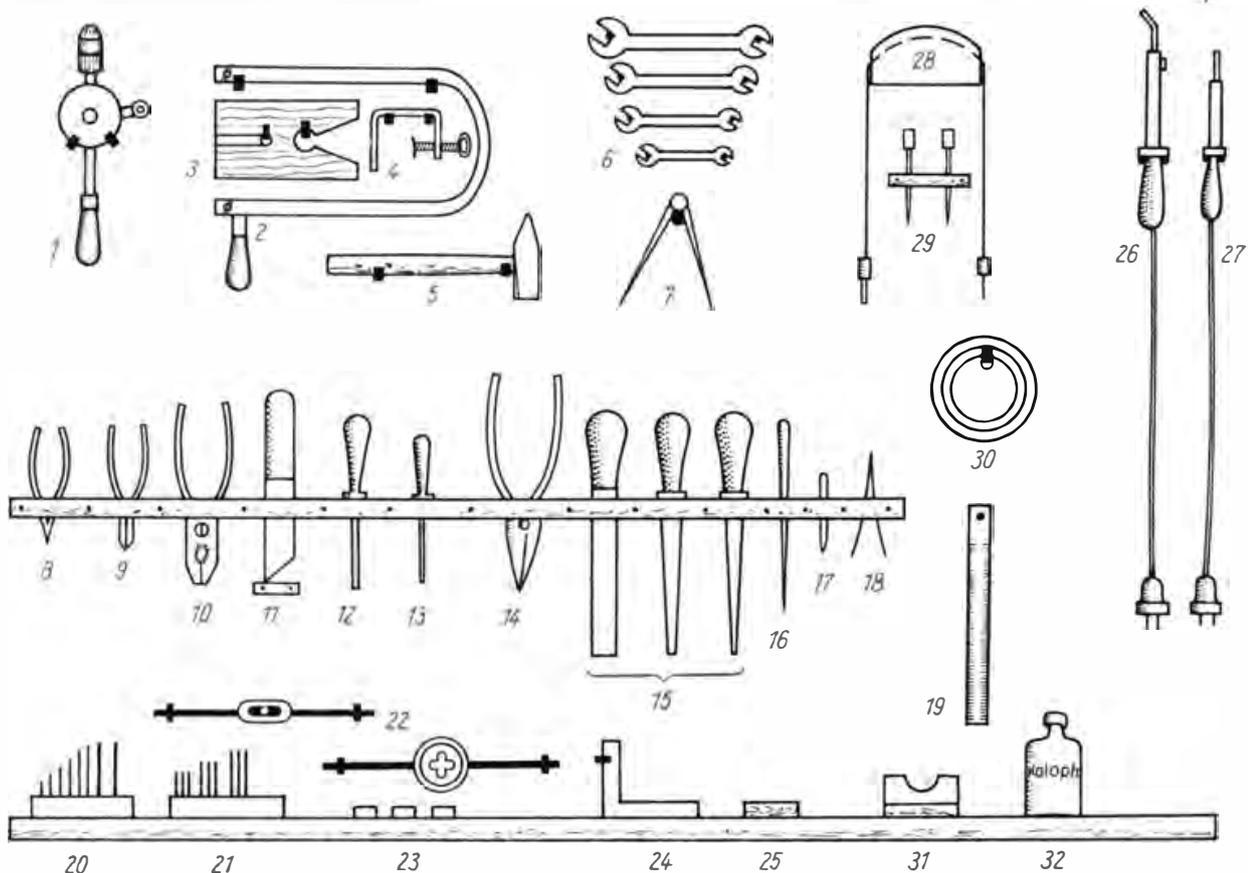


Bild 1. Vorschlag für die Einrichtung eines Werkzeugschranks

Unser Werkzeug bewahren wir übersichtlich und jederzeit griffbereit auf. Ein Wandschrank oder ein großes Wandbrett sind dazu besser geeignet als ein Schubkasten. Man kann viel Zeit beim Werkzeugsuchen sparen, wenn man sich die einmalige Mühe mit der Einrichtung einer übersichtlichen Werkzeughalterung macht.

Nun müssen wir noch überlegen, welche Werkstoffe benötigt werden. Von einigen legen wir uns einen kleinen Vorrat an, andere kaufen wir nach Bedarf. Kupferlackdraht (CuL 0,5 mm und 0,1 mm) brauchen wir für die Herstellung der Spulen, Kupferlitze dagegen zur Anfertigung flexibler Meßschnüre. Da alle elektronischen Schaltungen in gedruckter Schaltungstechnik ausgeführt werden, ist dazu einseitig kupferbeschichtetes Leiterplattenmaterial erforderlich, das es in Form von Preßspan- (Pertinax-) oder glasfaserverstärkten Polyesterplatten in Elektronikbastlerläden gibt. Letztgenanntes Material ist wegen seiner wesentlich besseren mechanischen und elektrischen Eigenschaften zu

bevorzugen. Für unsere Zwecke genügt Material von 1 und 1,5 mm Stärke. Die Leitungsführung (Leiterbahnen) der gedruckten Schaltungen zeichnen wir mit der Röhrenfeder und verdünntem Nitrolack auf die Leiterplatten. Wir benötigen also auch Nitrolack, Nitroverdünnung und Ätzmittel, z. B. Eisen(III)-chlorid (FeCl_3). Die anderen Werkstoffe (Stahlblech, Alu-Blech, PVC, Piacrlyl, Pertinax, Sperrholz, Leisten und Kunstleder) kaufen wir nach Bedarf. Daß Reste zur Weiterverwendung aufgehoben werden, versteht sich von selbst.

Für die Lötarbeiten an elektronischen Bauelementen und Leiterplatten verwenden wir ein neutrales Flußmittel. Geeignet ist in Spiritus gelöstes Kolophonium. Da andere Flußmittel (z. B. Lötwasser) aggressive chemische Verbindungen enthalten, würden durch deren Einwirkung die Lötstellen in den Schaltungen mit der Zeit zerfressen werden und damit unkontrollierbare Fehlerquellen entstehen. Lötwasser werden wir nur benutzen, wenn Stahlblech oder Eisenteile zu löten sind. Dafür verwenden wir auch eine gesonderte Lötkolbenspitze. Weiterhin ist ein gut fließendes Weichlot wichtig. Geeignet

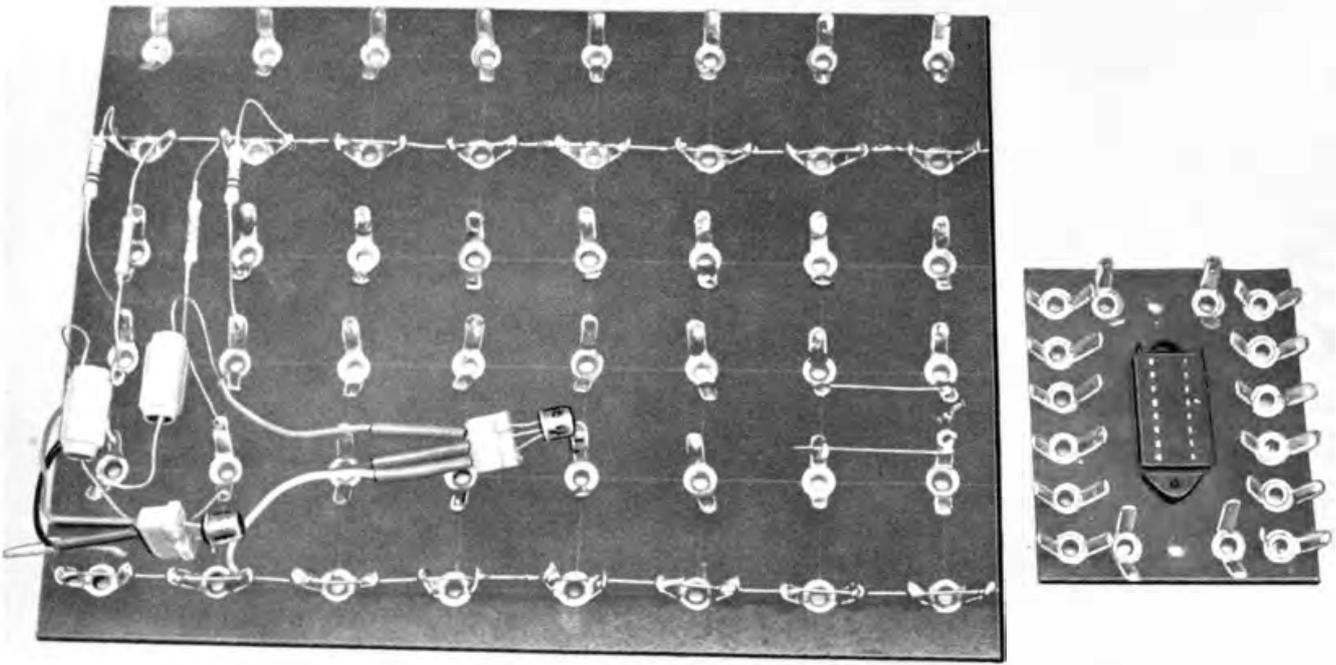
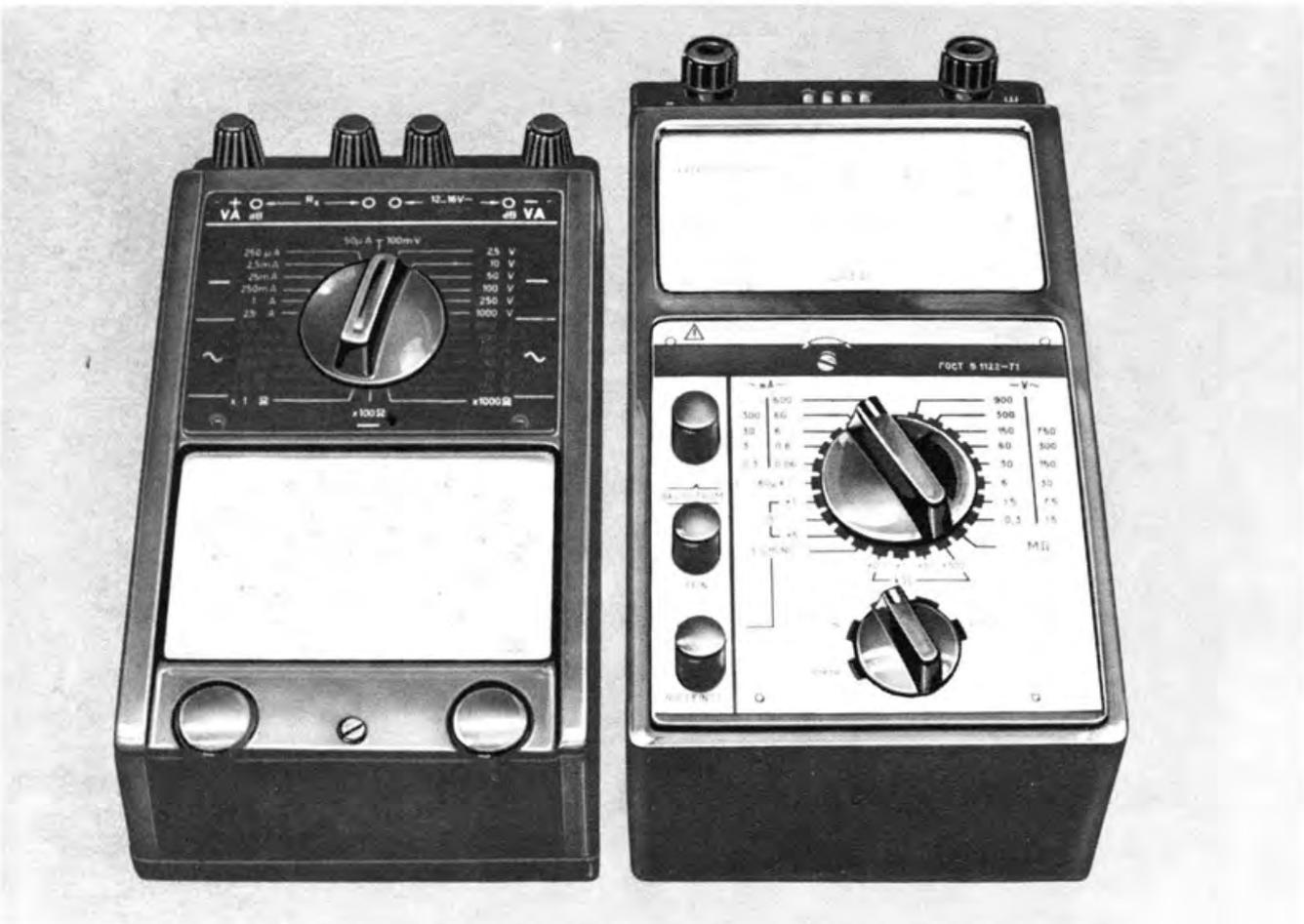


Bild 3. Experimentierplatine mit Schaltungsaufbau

Bild 4. Vielfachmeßgeräte



perimentierplatine (Bild 3). Auf einer Isolierstoffplatte (2mm Pertinax) mit den Maßen $160\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ reißen wir ein 20-mm-Raster an. An den Kreuzungspunkten bohren wir Löcher mit 3 mm Durchmesser und schlagen Nietlötösen ein. Da wir auch umfangreiche Schaltungen erproben, fertigen wir gleich zwei Stück dieser Experimentierplatinen an. Wie im Bild 3 zu sehen ist, können wir an den Lötösen, die hier als Lötunkte dienen, die Bauelemente in *fliegendem Aufbau* anlöten. Das hat für unsere Experimente einige Vorteile:

1. Alle Bauelemente sind wieder verwendungsfähig, da die Anschlüsse nicht gekürzt werden.
2. Der Aufbau erfordert wenig Zeit.
3. Die Bauelementeanordnung und die Verknüpfungen sind übersichtlich; alle Meßpunkte sind leicht zugänglich.
4. Der Austausch von Bauelementen ist ohne Schwierigkeiten möglich.

Bild 5. Oszillograph EO 174 A

Sind von uns ganze Baugruppen auf der Experimentierplatine erfolgreich erprobt, so übertragen wir die Bauelemente auf die gedruckte Leiterplatte.

Was wir an Meßgeräten brauchen

Ein Meßgerät, das wir bei vielen Experimenten benötigen, ist der Vielfachmesser für Ströme und Spannungen. Früher oder später sollten wir uns zu seiner Anschaffung entschließen; es genügt eine Ausführung mit einem Innenwiderstand $R_i > 10\text{ k}\Omega/\text{V}$, mit der man Gleich- und Wechselspannungen sowie Gleich- und Wechselströme messen kann. Teurere Geräte sind außerdem für Widerstands- und Kapazitätsmessungen ausgelegt.

In vielen Fällen, besonders bei der Funktionsüberprüfung und Fehlersuche in Digitalschaltungen, kann uns der Elektronenstrahloszillograph (im weiteren kurz Oszillograph genannt) gute Dienste leisten (Bild 5). Aus den bereits er-



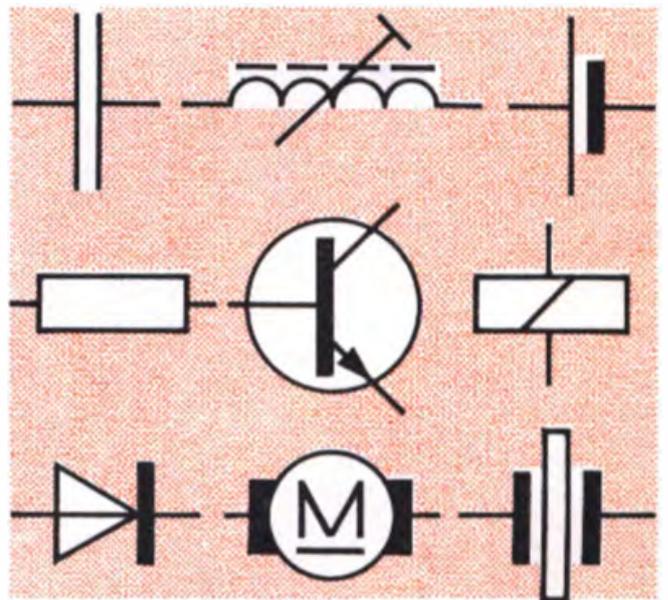
wähnten Gründen verzichten wir auf den Selbstbau und versuchen, dieses Gerät leihweise zu nutzen. Oszillographen sind in den Lehrmittelsammlungen der Oberschulen, bestimmter Berufsschulen, in Klubstationen von Funkamateuren und sicher auch in vielen Stationen Junger Naturforscher und Techniker vorhanden. Für unsere Zwecke genügt bereits ein Kleinoszillograph. Wesentlich genauere Aussagen erlauben der Demonstrationsoszillograph und der Impulsozillograph. Bevor wir mit einem geliehenen Oszillographen oder anderen elektronischen Geräten arbeiten, studieren wir sorgfältig die Bedienungsanleitung und machen uns mit dem Gerät gründlich vertraut. Fehler in der

Bedienung und Schäden am Gerät werden dadurch vermieden.

Nachdem wir die wichtigsten Werkzeuge und Werkstoffe für unsere Arbeit kennengelernt haben, werden wir nun mit den elektronischen Bauelementen, ihrer Funktion und ihrem Verhalten bekanntgemacht. Wir beschäftigen uns mit den Grundgesetzen der Elektronik. Gerade die genaue Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge wird es uns ermöglichen, die Fernsteuergerte nicht nur aufzubauen und in Betrieb zu setzen, sondern auch, und das ist mindestens ebenso wichtig, auftretende Fehler systematisch einzugrenzen und zu beheben.

1. Kapitel

Grundlagen der Fern- steuerung



Der Widerstand – ein wichtiges Bauelement

Das Wort *Widerstand* hat für uns zweierlei Bedeutung. Einmal verstehen wir darunter das *Bauelement* als solches, wie es z. B. in ein Gerät eingebaut wird. Zum anderen beschreibt es aber auch das *Verhalten* des Bauelements Widerstand im elektrischen Stromkreis. Beide Bedeutungen des Wortes sind im weiteren streng auseinanderzuhalten, um Mißverständnisse zu vermeiden.

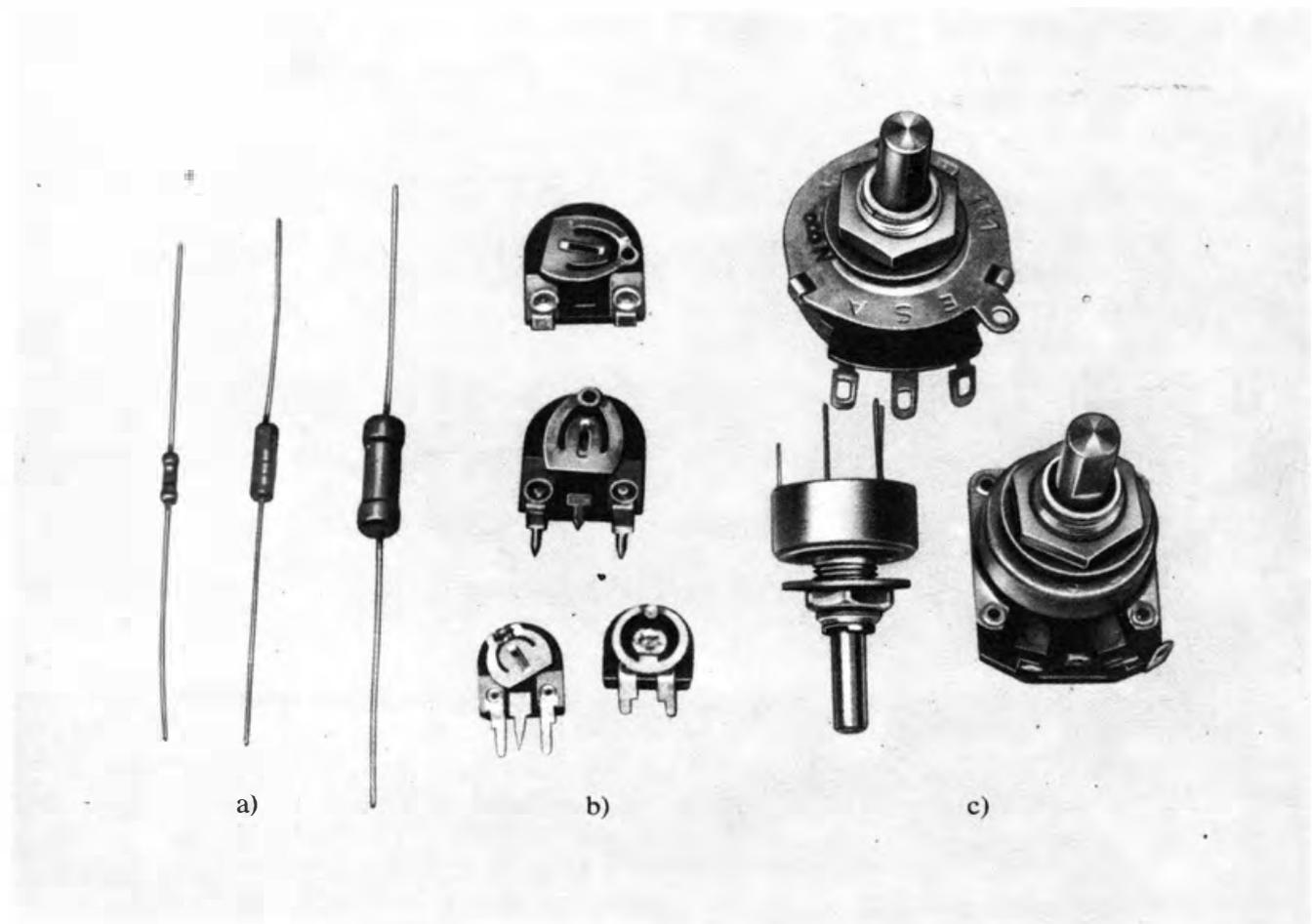
Was müssen wir von dem Bauelement Widerstand wissen? Wir können zunächst zwischen Fest- und regelbaren Widerständen unterscheiden.

Bild 6. Ausführungsformen von Widerständen: a) Schichtwiderstände, b) Schichtdrehwiderstände (Einstellregler), c) Schichtdrehwiderstände (Potentiometer)

den (Bild 6). Festwiderstände unterteilt man nach der Art des Anschlusses (axial oder radial) sowie nach ihren Abmessungen und ihrem Widerstandswert. In der Hauptsache werden wir *Kohleschichtwiderstände* verwenden. In die Oberfläche des Keramikkörpers dieser Bauelemente ist eine Kohleschicht eingebrannt. Um höhere Widerstandswerte zu erreichen, wird eine Wendel eingeschliffen. Der Anschluß erfolgt über Kappen und verzinnte Anschlußdrähte bzw. -fahnen. Zum Schutz gegen Feuchtigkeit und klimatische Einflüsse sind solche Widerstände mit einer Lackschicht überzogen.

Um Art und Funktion des Bauteils Widerstand im Schaltbild eindeutig zu kennzeichnen, verwendet man entsprechende *Schaltzeichen* (Bild 7).

Der Widerstandswert hat aus produktionstechnischen Gründen eine Toleranz. So gibt es für Schichtwiderstände die internationalen Normreihen E 6, E 12, E 24 und E 48 mit den Toleranzen ± 20 , ± 10 , ± 5 bzw. $\pm 2\%$ (s. auch Tabelle 1 im Anhang). Für die meisten Anwendungsfälle



Benennung	Schaltzeichen	Belastbarkeit in Watt (W)	Schaltzeichen (ausführlich)
Festwiderstand		1/20	
einstellbarer Widerstand (Einstellregler)		1/8	
verstellbarer Widerstand (Potentiometer)		1/4	
temperaturabhängiger Widerstand (Thermistor)		1/2	
		1	
		1,5	
		2	
		3	

Bild 7. Schaltzeichen von Widerständen

genügt uns die Toleranzreihe E 12. Der Widerstandswert wird entweder aufgedruckt oder durch Anbringen von Farbpunkten bzw. Farbringen gekennzeichnet. So bedeutet z. B. der Aufdruck 4,7 k oder 4 k 7 den Wert 4,7 kΩ oder 180 den Wert 180 Ω. Da Widerstände immer in Ohm (Ω) angegeben werden, läßt man die Einheit beim Aufdruck und – wie wir später sehen werden – auch in den Schaltbildern weg. Anders ist es bei der Kennzeichnung mit Hilfe des Farbkodes. Zur vollständigen Kennzeichnung des Widerstandswertes genügen vier Farbringe oder Farbpunkte (Tabelle 2).

Neben den Festwiderständen benötigen wir für viele Anwendungen einstellbare bzw. verstellbare Widerstände.

Die verstellbaren Widerstände bezeichnet man als *Potentiometer*. Sie haben die drei gekennzeichneten Anschlüsse:

- A Anfang,
- S Schleifer,
- E Ende.

Die Lötfläche am Gehäuse liegt an Masse.

Neben den Potentiometern brauchen wir auch veränderliche Widerstände, die zu Abgleichzwecken einmalig eingestellt werden. Sie sind wesentlich einfacher aufgebaut und werden als *Einstellregler* bezeichnet. Je nach Einbauart gibt es die Einstellregler in der freitragenden bzw. für gedruckte Schaltungen in der stehenden oder

liegenden Form. Drehwiderstände werden u. a. in folgenden Nenngrößen hergestellt:

- Ω 100; 250; 500
- kΩ 1; 2,5; 5; 10; 25; 50; 100; 200; 500
- MΩ 1; 2,5; 5; 10.

Die Toleranz des Nennwiderstandes beträgt dabei ±20%. Der Widerstand eines Drehwiderstandes ändert sich in Abhängigkeit vom Drehwinkel. Er wird in einer Kennlinie festgehalten. Es werden Drehwiderstände mit *linearer, positiv logarithmischem* und *negativ logarithmischem Kennlinienverlauf* hergestellt. Ein Potentiometer mit dem Aufdruck 5 k 1 hat z. B. einen Widerstandswert von 5 kΩ ± 20% zwischen den Anschlüssen A und E und eine lineare Kennlinie. Das geht aus der letzten Ziffer hervor, die den Kennlinienverlauf angibt:

- 1 linear,
- 2 positiv logarithmisch,
- 3 negativ logarithmisch.

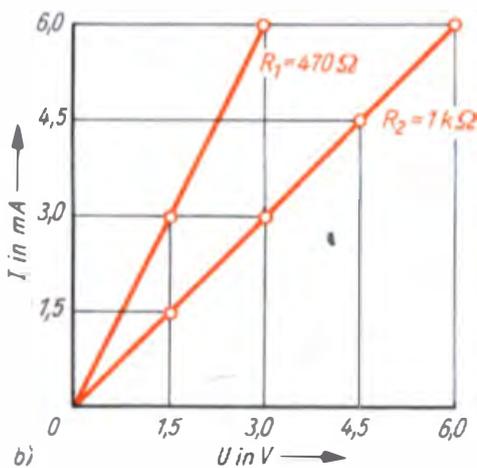
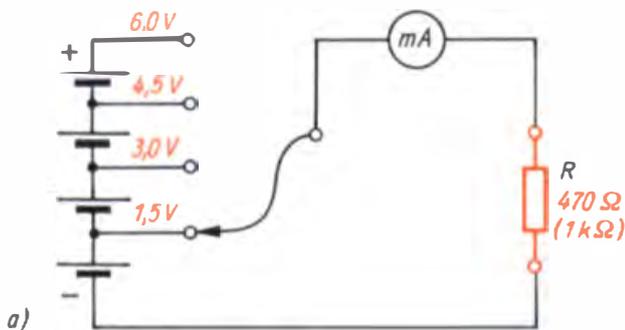
Als nächstes wollen wir mit Widerständen experimentieren und dabei ihr physikalisches Verhalten näher untersuchen. Dazu müssen wir noch zwei weitere physikalische Größen kennenlernen. Das sind die *elektrische Spannung* (Formelzeichen *U*) und der *elektrische Strom* (Formelzeichen *I*). Unter elektrischem Strom wollen wir die je Zeiteinheit durch einen Leiter fließenden Ladungsträger verstehen. Als Einheit für die Stromstärke wurde das Ampere (A) festgelegt. Elektrischen Strom erkennen wir an seinen Wirkungen:

- an der Wärmeentwicklung im Leiter,
- am Magnetfeld um den stromdurchflossenen Leiter und
- am den Strom begleitenden Stofftransport in Ionenleitern.

Die Spannung als zweite interessierende Größe wird in der Einheit Volt (V) angegeben. Elektrische Spannungen können auf verschiedene Art erzeugt werden, z. B. durch Induktion, elektrochemische Elemente, Thermoelemente, Piezo-elemente.

Für unser erstes Experiment benötigen wir vier Kohle-Zink-Elemente (*Monozellen*) mit je 1,5 V Klemmenspannung, Widerstände von 470 Ω und 1 kΩ (belastbar bis 0,125 W) und einen Vielfachmesser (Meßbereich 10 mA). Die Monozellen schalten wir in Reihe, so daß die Spannungswerte 1,5 V; 3 V; 4,5 und 6 V abgegriffen werden können (Bild 8a). Mit beiden Widerständen wird der Strom für jeden Spannungswert gemessen, so daß wir zwei Meßreihen erhalten:

Bild 8. Zum Verhalten des Widerstandes im Stromkreis: a) Schaltung, b) Kennlinie



	U in V	1,5	3	4,5	6
R ₁ = 470 Ω	I in mA	3,2	6,4	9,6	12,8
R ₂ = 1 kΩ	I in mA	1,5	3	4,5	6

Die Werte der Meßreihen tragen wir in ein Diagramm (Bild 8b) ein und stellen fest, daß beide Kennlinien Geraden sind. Die Steigung einer solchen Kennlinie wird durch einen konstanten Steigungsfaktor beschrieben, der in unserem Fall der Quotient $\frac{U}{I}$ ist. Die durch diesen Quotienten gebildete Größe heißt *Widerstand* (Formelzeichen R). Also gilt

$$R = \frac{U}{I}$$

Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm (Ω):

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

Man bezeichnet Widerstände mit gerader Strom-Spannungs-Kennlinie, also mit konstanter Steigung bzw. konstantem Widerstand, als *ohmsche Widerstände*. Betrachten wir noch einmal Bild 8b, so stellen wir fest, daß sich die Kennlinien nur in der Steigung unterscheiden. Je nach Größe des Widerstandes wird also ein mehr oder weniger großer Strom fließen.

Dieses Verhalten im Stromkreis können wir zur Bestimmung des Widerstandswertes unbekannter Widerstände ausnutzen. Wir nehmen für das zweite Experiment irgendeinen Widerstand aus unserem Bauelementevorrat, wenn möglich sogar einen ohne Aufdruck, und messen den Strom bei 1,5 V Klemmenspannung. Den Widerstandswert berechnen wir nach der Formel

$$R = \frac{U}{I}$$

Damit steht uns eine einfache Meßmethode für Widerstände zur Verfügung.

In unseren Experimenten werden wir es oft mit sehr großen oder sehr kleinen Werten zu tun haben. Bei der Angabe von Einheiten ist es deshalb üblich, Teile oder Vielfache davon durch Vorsätze zu kennzeichnen:

p... = Piko... $\triangleq 10^{-12}$
 (z. B. 1 pA = 1 Pikoampere = 10^{-12} A),

n... = Nano... $\triangleq 10^{-9}$
 (z. B. 1 nA = 1 Nanoampere = 10^{-9} A),
 μ ... = Mikro... $\triangleq 10^{-6}$
 (z. B. 1 μ V = 1 Mikrovolt = 10^{-6} V),
 m... = Milli... $\triangleq 10^{-3}$
 (z. B. 1 mV = 1 Millivolt = 10^{-3} V),
 k... = Kilo... $\triangleq 10^3$
 (z. B. 1 k Ω = 1 Kiloohm = $10^3 \Omega$),
 M... = Mega... $\triangleq 10^6$
 (z. B. 1 M Ω = 1 Megaohm = $10^6 \Omega$).

Bild 6 zeigte, daß Kohleschichtwiderstände in recht unterschiedlichen Abmessungen hergestellt werden, die sich nach ihrer *Nennverlustleistung* richten. Fließt durch den ohmschen Widerstand ein Strom, so entsteht in ihm *Wärme*. Damit der Widerstand nicht durch diese Wärme zerstört wird, gibt man als obere zulässige Grenze der im Widerstand umgesetzten elektrischen Leistung die Nennverlustleistung an. Ein Widerstand mit großen Abmessungen hat daher auch eine größere Verlustleistung als einer mit kleineren Abmessungen der gleichen Bauart. Interessant sind für uns die Widerstände mit den Nennverlustleistungen.

0,05 W; 0,125 W; 0,25 W; 0,5 W; 1,0 W und 2,0 W.

W ist die Abkürzung für Watt = Einheit der Leistung. Am häufigsten verwenden wir Widerstände mit 0,05 W und 0,125 W Nennverlustleistung. Die Nennverlustleistung (Formelzeichen P_V) gilt für *Umgebungstemperaturen bis 40°C* und nimmt mit weiter steigender Umgebungstemperatur ab, um bei $\approx 150^\circ\text{C}$ den Wert Null zu erreichen. Das bedeutet, daß Schichtwiderstände oberhalb 150°C zerstört werden.

Wie können wir kontrollieren, ob ein Widerstand überlastet ist oder nicht? Die elektrische Leistung P berechnen wir als Produkt aus anliegender Spannung und fließendem Strom nach der Formel

$$P = U \cdot I.$$

Es gilt $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$.

Nun berechnen wir die beim Experiment im Widerstand umgesetzten Verlustleistungen:

$$P_{V1} = U_1 \cdot I_1 = 6,0 \text{ V} \cdot 12,8 \text{ mA} = 76,8 \text{ mW}$$

und

$$P_{V2} = U_2 \cdot I_2 = 6,0 \text{ V} \cdot 6,0 \text{ mA} = 36,0 \text{ mW}.$$

Da die Nennverlustleistung der verwendeten Ausführungsform 125 mW beträgt, sind die Widerstände in beiden Fällen nicht überlastet. Unter Benutzung der Gleichung $R = \frac{U}{I}$ können wir die Gleichung $P = U \cdot I$ umstellen:

$$I = \frac{U}{R}; \quad P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R} \quad \text{und}$$

$$U = I \cdot R; \quad P = U \cdot I = I \cdot R \cdot I = I^2 \cdot R$$

und erhalten die Formeln:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad \text{bzw.} \quad P = I^2 \cdot R.$$

Somit läßt sich z. B. die Nennverlustleistung berechnen, ohne daß wir den Strom kennen.

Beispiel:

$$P_{V1} = \frac{U_1^2}{R_1} = \frac{6^2 \cdot \text{V}^2}{470 \Omega} = \frac{36 \cdot \text{V}^2 \cdot \text{A}}{470 \text{ V}} = 76,6 \text{ mW}.$$

In vielen Fällen führen die umgestellten Gleichungen schneller zum Ergebnis.

Im ersten Experiment untersuchten wir beide Widerstände einzeln. In zwei weiteren Experimenten wollen wir nun klären, was geschieht, wenn zwei Widerstände zusammengeschaltet werden. Untersuchen wir zunächst die *Reihenschaltung* nach Bild 9a und messen Strom und Spannung. Wir erhalten etwa folgende Werte:

I in mA	U in V	U ₁ in V	U ₂ in V
4,1	6	1,9	4,1

Daraus erkennen wir:

- Es fließt nur *ein* Strom.
- Die Teilspannungen U_1 und U_2 sind kleiner als die Gesamtspannung U .
- Die Summe der Teilspannungen ergibt die *Gesamtspannung*.
- Am größeren Teilwiderstand fällt die größere Teilspannung ab.
- Die Teilspannungen verhalten sich etwa wie die Werte der Widerstände.

Eine Berechnung bestätigt dies (bei $I = \text{konst.}$):

$$U = U_1 + U_2 \quad \text{und} \quad R = R_1 + R_2;$$

folglich wird:

$$\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R} \quad \text{und daraus} \quad U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R}.$$

Wir können also die Teilspannung U_1 aus der Gesamtspannung U und dem Widerstandsverhältnis $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ berechnen und erhalten aus

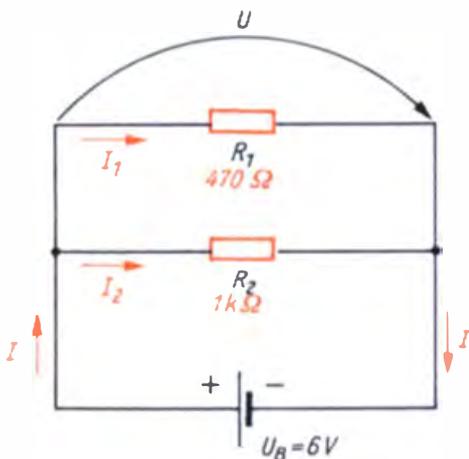
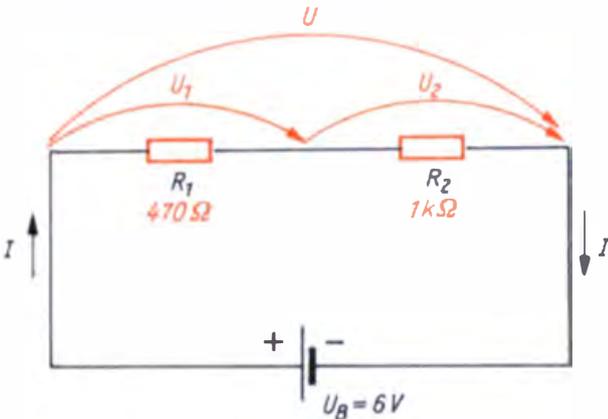
$$U_1 = 6 \text{ V} \cdot \frac{470 \Omega}{1470 \Omega} = 1,92 \text{ V}$$

den im Experiment gemessenen Wert von U_1 .

Daraus sind einige wichtige Schlußfolgerungen für die weitere Arbeit zu ziehen:

1. Bei der Reihenschaltung addieren sich die Einzelwiderstände zum *Gesamtwiderstand*. Benötigen wir also für bestimmte Zwecke einen Widerstandswert, der in der Toleranztafel nicht enthalten ist (z. B. 80 kΩ), so

Bild 9. Zusammenschaltung zweier Widerstände:
a) Reihenschaltung, b) Parallelschaltung



stellen wir ihn aus vorhandenen Werten zusammen (z. B. 47 kΩ + 33 kΩ).

2. Da sich bei der Reihenschaltung die anliegende Spannung im Verhältnis der Widerstände teilt, können durch entsprechende Dimensionierung *beliebige Teilspannungen* eingestellt werden.

Beispiel:

Angenommen, für einen bestimmten Zweck wird eine Teilspannung von 0,3 V bei einem Querstrom von 1 mA durch den Spannungsteiler R_1/R_2 benötigt. Die Gesamtspannung betrage 4,5 V. Aus $\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R}$ ergibt sich dann

$$R_1 = R \cdot \frac{U_1}{U}. \quad \text{Zunächst berechnen wir}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4,5 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 4,5 \text{ k}\Omega$$

und wählen R zu 4,7 kΩ.

$$R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega \cdot \frac{0,3 \text{ V}}{4,5 \text{ V}} = 0,31 \text{ k}\Omega \approx 310 \Omega.$$

Wir nehmen nach der Toleranztafel für R_1 den Wert 300 Ω und für R_2 4,3 kΩ.

3. Die *Spannungsteilung* können wir bei der *Meßbereicherweiterung* anwenden. Haben wir z. B. ein Voltmeter mit 10 V Vollausschlag und 100 kΩ Innenwiderstand und wollen damit bis 20 V messen, so müssen wir einen gleich großen Widerstand, also 100 kΩ, vorschalten. Mit den abgeleiteten Gleichungen können die Vorwiderstände für beliebige Meßbereicherweiterungen berechnet werden.

In einem weiteren Experiment untersuchen wir die *Parallelschaltung* (Bild 9b) der beiden Widerstände. Wir messen wieder Strom und Spannung und erhalten folgende Werte:

U in V	I in mA	I_1 in mA	I_2 in mA
6	18,8	12,8	6,0

Daraus können wir schlußfolgern:

- Es liegt nur *eine* Spannung an.
- Die Teilströme I_1 und I_2 sind kleiner als der Gesamtstrom I .
- Die Summe der Teilströme ergibt den *Gesamtstrom*.

- Durch den kleineren Widerstand fließt der größere Teilstrom.
- Die Teilströme verhalten sich etwa wie die reziproken Werte der Teilwiderstände. Eine Berechnung bestätigt dies (bei $U = \text{konst.}$):

$$I = I_1 + I_2 \quad \text{und} \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2};$$

folglich wird

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{und aus } \frac{I_1}{I} = \frac{R_2}{R} \text{ ergibt sich } I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R}.$$

Wir können also den Teilstrom aus dem Gesamtstrom I und dem Widerstandsverhältnis

$$\frac{R_2}{R} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ berechnen und erhalten aus}$$

$$I_1 = 18,8 \text{ mA} \cdot \frac{320 \Omega}{1000 \Omega} = 5,8 \text{ mA}$$

etwa den im Experiment gemessenen Wert von I_1 .

Auch daraus sind wichtige Schlußfolgerungen zu ziehen:

1. Bei der Parallelschaltung von Widerständen ist der *Gesamtwiderstand* kleiner als der kleinste Einzelwiderstand. Schaltet man z. B. zwei Widerstände von je 10Ω parallel, so beträgt der Gesamtwiderstand 5Ω . Die *Verlustleistung* verteilt sich in diesem Fall gleichmäßig auf beide Widerstände. Benötigen wir also einen Widerstand von $4,7 \Omega / 0,25 \text{ W}$, so können wir ihn durch die Parallelschaltung von zwei Widerständen zu je $10 \Omega / 0,125 \text{ W}$ realisieren.
2. Bei der Parallelschaltung verhalten sich die *Teilströme* umgekehrt wie die zugehörigen Widerstände. Darf durch einen Widerstand nur ein bestimmter Strom fließen, so können wir praktisch den »überflüssigen« Strom durch Parallelschalten eines zweiten Widerstandes am ersten »vorbeileiten«. Das wird bei der *Meßbereichserweiterung von Amperemetern* ausgenutzt.

Wir lernen den Kondensator kennen

Vielfältig sind die technischen Ausführungsformen und die Arten der Kondensatoren, des nächsten passiven Bauelements, das wir kennenlernen. Ein Kondensator besteht im Prinzip aus zwei metallischen Platten, zwischen denen sich ein *Isolierstoff*, im einfachsten Fall Luft, befindet. Die für uns wichtigste Eigenschaft des Kondensators besteht darin, auf seinen beiden Platten Ladungen unterschiedlicher Polarität aufzunehmen, d. h., sich elektrisch aufzuladen. Diese Aufnahmefähigkeit für elektrische Ladungen wird mit dem Begriff *Kapazität* beschrieben. Zwischen den Ladungen auf den Platten bildet sich ein *elektrisches Feld* aus, das durch *Feldlinien* dargestellt werden kann. Längs dieser Feldlinien verlaufen die Kräfte, die auf die Ladungen wirken.

Die Kapazität eines Kondensators ist nicht nur von der *Plattengröße*, sondern auch von der *Art des Dielektrikums* (Isolierstoff zwischen den Platten) abhängig, da sich in bestimmten Dielektrika sehr viele Feldlinien ausbreiten können. Sie wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}.$$

Hierin bedeuten

A Fläche einer Platte,

d Plattenabstand,

ϵ_0 absolute Dielektrizitätskonstante (Vakuum),

ϵ_r relative Dielektrizitätskonstante als Materialkenngröße.

In Anlehnung an den Aufbau der Kondensatoren wurden genormte Schaltzeichen (Bild 10) eingeführt.

Das Verhalten des Kondensators im Stromkreis untersuchen wir wieder in einem einfachen Experiment. Mit der Schaltung nach Bild 11a wird der Kondensator C bei Schalterstellung 1 aufgeladen und bei Schalterstellung 2 entladen. Den Entladestromstoß messen wir mit dem Vielfachmesser, er ist ein Maß für die vom Kondensator abfließende *Ladungsmenge*. Für verschiedene Kondensatoren ($2 \times 50 \mu\text{F}$, $100 \mu\text{F}$ und

Benennung	Schaltzeichen
Kondensator, allgemein	
Kondensator (mit Darstellung des Außenbelags)	
Kondensator, gepolt (Elektrolytkondensator)	
Durchführungskondensator	
Kondensator, verstellbar (Drehko)	
Kondensator, einstellbar (Trimmer)	

Bild 10. Schaltzeichen von Kondensatoren

deren Kombinationen) erhalten wir für 6 V Ladespannung folgende Meßreihe:

C in μF	50	100	150	200
I_{ent} in mA	0,5	1,0	1,5	2,0

Als Kennlinie dargestellt, ergibt $I_{\text{ent}} = f(C)$ eine Gerade. Damit haben wir die Bestätigung dafür erhalten, daß die gespeicherte Ladungsmenge Q der Kapazität C eines Kondensators proportional ist ($Q \sim C$). In einem weiteren Experiment untersuchen wir den Einfluß der Ladespannung auf die gespeicherte Ladungsmenge. Für den angeschalteten Kondensator von $200 \mu\text{F}$ erhöhen wir die Ladespannung von Messung zu Messung von 1,5 V auf 6 V. Dabei erhalten wir die Meßreihe:

U in V	1,5	3	4,5	6
I_{ent} in mA	0,5	1,0	1,5	2,0

Auch hier läßt die Kennlinie (Bild 11b) wieder eine strenge Proportionalität, diesmal zwischen gespeicherter Ladungsmenge und Ladespannung, erkennen. Daraus schlußfolgern wir: $Q \sim U$. Man faßt beide Abhängigkeiten zu der Gleichung $Q = C \cdot U$ zusammen.

Damit gilt auch:

$$1 \text{ A} \cdot \text{s} = 1 \text{ F} \cdot 1 \text{ V}$$

mit

A · s Amperesekunde (Einheit der Ladungsmenge),

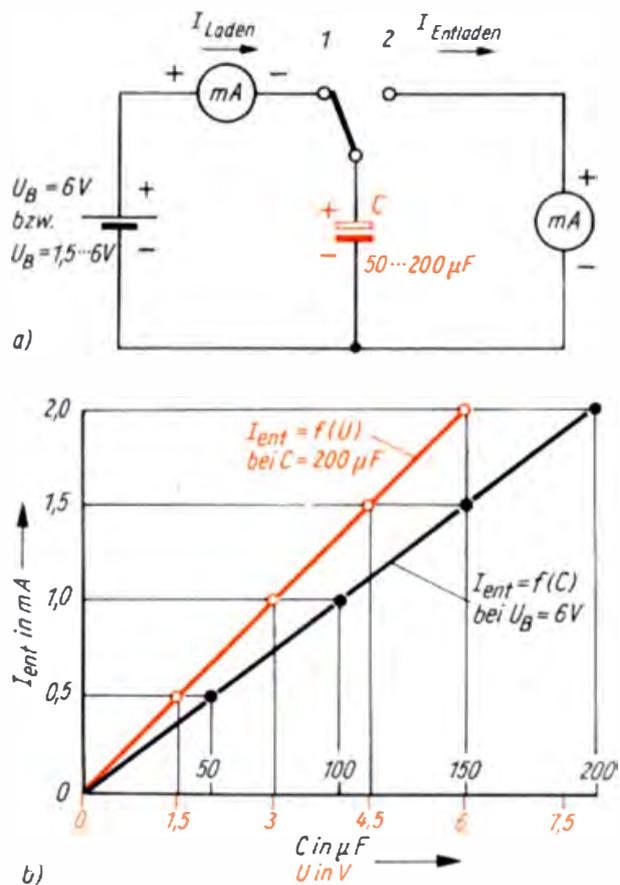
F Farad (Einheit der Kapazität) und

V Volt.

Zu erwähnen ist noch, daß das Verhalten des Kondensators durch weitere Kennwerte beschrieben wird, so z. B. sein *Temperaturverhalten* α_c und seine *Güte* durch den *Verlustfaktor* $\tan \delta$. Da wir mit beiden Kennwerten nicht rechnen, wird hier auch nicht näher darauf eingegangen.

Die Kapazitätswerte der im Handel erhältlichen Kondensatoren entsprechen in der Regel den im Anhang (Tabelle 1) angegebenen internationalen Normreihen E6, E12 und E24. Aus Gründen der Rationalisierung werden Kondensatoren vornehmlich mit Kapazitätswerten der Reihen E6 und E12 hergestellt.

Bild 11. Zum Verhalten des Kondensators im Stromkreis: a) Schaltung, b) Kennlinien



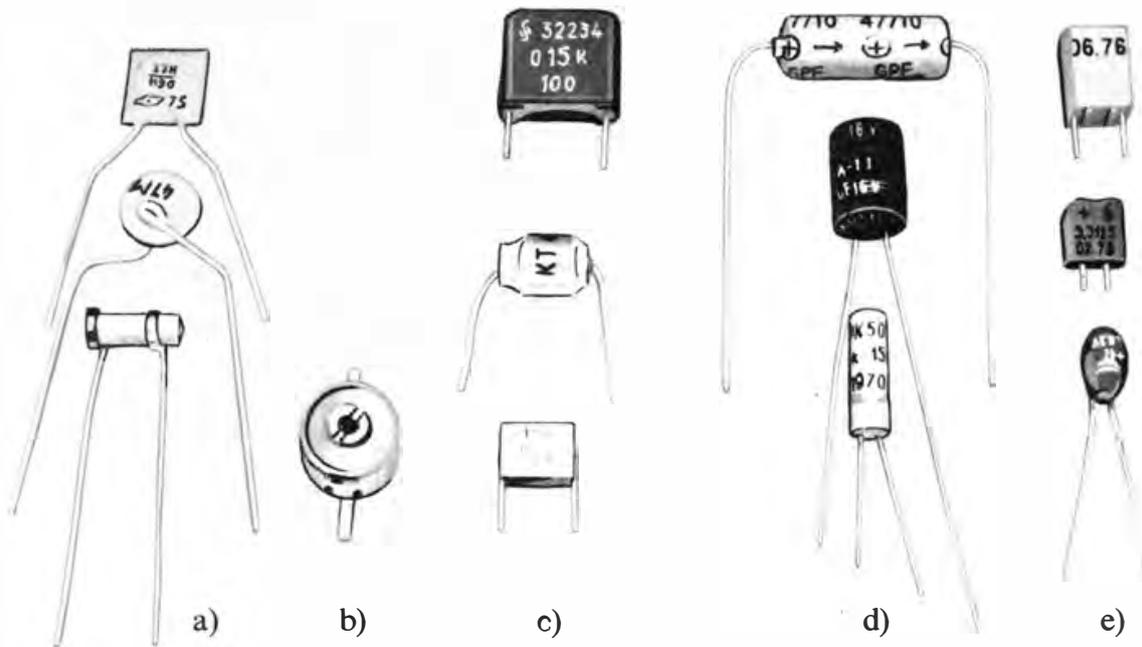


Bild 12. Ausführungsformen von Kondensatoren: a) Keramikkondensatoren, b) keramischer Scheibentrimmer, c) Plastfoliekondensatoren, d) Al-Elektrolytkondensatoren, e) Ta-Elektrolytkondensatoren

Nachdem wir nun etwas über die Kennwerte der Kondensatoren erfahren haben, wollen wir die *technischen Ausführungsformen* näher kennenlernen (Bild 12). Bei den *Keramikkondensatoren* besteht das Dielektrikum aus einer verlustarmen keramischen Masse. Die Funktion der Kondensatorplatten übernehmen auf die Keramik eingebrannte Silberbeläge. Der gesamte Kondensator ist zum Schutz gegen äußere Einflüsse lackiert. Die Farbe weist auf die Art des verwendeten Dielektrikums und auf seinen Temperaturbeiwert hin. Nach der äußeren Form unterscheiden wir die *Rohr- und Scheibenkondensatoren*. Kapazitätswert, Toleranz und Nennspannung sind auf dem Kondensator aufgedruckt. Bei kleinen Bauformen wird die Kapazität durch Kurzzeichen ausgedrückt. In der Größenordnung von pF läßt man die Maßeinheit ganz weg, so daß der aufgedruckte Zahlenwert die Kapazität in pF angibt. Kapazitätswerte im Bereich von nF werden durch ein kleines n hinter dem Zahlenwert gekennzeichnet.

Für einstellbare Kapazitätswerte gibt es die *Rohr- und Scheibentrimmer*. In der Regel verwenden wir Scheibentrimmer zum einmaligen

Einstellen eines bestimmten Kapazitätswertes beim Abgleich. Sie bestehen aus einem keramischen Stator, auf dem sich ein Rotor (ebenfalls aus Keramik) drehen läßt. Die Funktion der Kondensatorplatten übernehmen die auf Stator und Rotor eingebrannten Silberbeläge. Durch Verdrehen der Rotorscheibe mit einem Abgleichschraubenzieher können wir den Kapazitätswert zwischen Anfangs- und Endkapazität beliebig einstellen. Die *Nennkapazität* des Scheibentrimmers wird als Zahl aufgedruckt.

Beispiel:

Der Aufdruck 10/40 bedeutet Anfangskapazität 10 pF, Endkapazität 40 pF. Mit Keramikkondensatoren können wir Kapazitätswerte im Bereich von 0,2 pF bis 47 nF realisieren. Bei höheren Kapazitätswerten müssen wir auf andere Bauformen zurückgreifen: auf *Plastfolie-, Papier-, Metallpapier- oder Lackfilmkondensatoren*. Bei allen diesen Kondensatoren ist das als Band ausgebildete Dielektrikum (Plastfolie oder Papier) beiderseits mit einem Belag (Metallfolie oder aufgedampftes Metall) versehen und zu einem Wickel aufgerollt.

Plastfoliekondensatoren mit Polystyrol als Dielektrikum werden als *Polystyrol- oder Styroflexkondensatoren* bezeichnet. Ihre vorteilhaften Eigenschaften sind geringe Kapazitätstoleranz, hohe Kapazitätskonstanz, niedriger Verlustfaktor, negativer Temperaturkoeffizient und hohe

Betriebssicherheit. Polystyrolkondensatoren werden in Kapazitätswerten nach den Normreihen E 6, E 12 und E 24 bis zu dem Wert $0,47 \mu\text{F}$ hergestellt und als gesinterte Wickel oder für höhere klimatische Beanspruchung in dicht verlöteten Gehäusen angeboten. Der Anschluß des äußeren Belages ist durch einen umlaufenden Ring gekennzeichnet.

Ähnlich gute elektrische Eigenschaften hat der *Plastfoliekondensator mit Polyesterfolie als Dielektrikum*. Bei den Papierkondensatoren dient imprägniertes Papier als Dielektrikum. Sie haben aber nicht so günstige elektrische Eigenschaften wie Plastfoliekondensatoren.

Eine weitere in der Transistortechnik vielfach verwendete Kondensatorart ist der *Niedervolt-Elektrolytkondensator*. Man unterscheidet *Aluminium- und Tantal-Elektrolytkondensatoren*. Erstere bestehen aus einem Wickel zweier Aluminiumfolien, die durch eine Papierlage voneinander getrennt sind. Die eine Folie dient als Anode, die andere der Stromzuführung. Das Dielektrikum ist eine Aluminiumoxidschicht auf der Anodenfolie. Als Katode wirkt eine mit Elektrolytflüssigkeit getränkte Papierlage. Man unterscheidet Bauformen mit glatten und rauhen Anoden. Durch das Aufrauen der Anodenfolie erzielt man eine größere wirksame Oberfläche. Elektrolytkondensatoren haben bei geringen äußeren Abmessungen Kapazitätswerte von $0,5 \dots 5000 \mu\text{F}$.

Bei unseren Experimenten verwenden wir *gepolte Kondensatoren*, die nur für Gleichspannungen geeignet sind. Der Anodenanschluß solcher Kondensatoren wird mit + gekennzeichnet. Bei *ungepolten Kondensatoren* kann man die Polarität der Gleichspannung vertauschen; für den Betrieb mit Wechselspannungen sind sie *nicht* geeignet. Die Ausführungsformen sind recht vielfältig. Zu beachten ist die auf dem Kondensator aufgedruckte *Nenngleichspannung*. Die Summe aus Gleichspannung und Scheitelwert der überlagerten Wechselspannung darf die angegebene Nenngleichspannung nicht überschreiten. Bei falscher Polung oder Überschreiten der Nenngleichspannung werden Elektrolytkondensatoren zerstört.

Niedervolt-Elektrolytkondensatoren gibt es für folgende Spannungswerte: 3; 6; 10; 15; 25; 35; 50 und 70 V.

Gebräuchlich sind bei Al-Elektrolytkondensatoren die Kapazitätswerte 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000 und $5000 \mu\text{F}$ bei Toleranzen von $-10 \dots +100\%$.

Gegenüber dem Al-Elektrolytkondensator stellt der *Tantal-Elektrolytkondensator* eine Weiterentwicklung dar. Er ist ein gepolter Kondensator mit flüssigem oder festem Elektrolyten. Die Anode besteht aus gesintertem Tantalpulver, das Dielektrikum aus einer Tantalpentoxidschicht und die Katode aus Mangandioxid. Die Stromzuführung zur Katode übernimmt ein auf die Mangandioxidschicht aufgebracht Metallbelag. Der Kondensator wird entweder in einen Metallbecher eingebaut und verlötet oder mit Plast umhüllt (Tropfenform). Die Vorzugswerte der Nennspannung sind die gleichen wie beim Al-Kondensator. Im Handel sind Ta-Kondensatoren mit Kapazitätswerten nach der Normreihe E 6 erhältlich. Die Kapazitätstoleranz beträgt $\pm 20\%$. Da die Ta-Kondensatoren mit Plastumhüllung sehr geringe Abmessungen haben, bedient man sich zur Kennzeichnung eines Farbkodes. Schaltet man zwei Ta-Kondensatoren mit je gleichem Kapazitätswert in Reihe (Katode an Katode), so kann diese Anordnung mit in der Polung wechselnder Gleichspannung oder mit reiner Wechselspannung bis zur Höhe der Nenngleichspannung belastet werden.

Wie wir gesehen haben, werden Kondensatoren, außer Al-Elektrolytkondensatoren, nur mit Kapazitätswerten nach den Normreihen hergestellt. Brauchen wir für bestimmte Zwecke Zwischenwerte, so müssen wir sie durch entsprechende *Kondensatorkombinationen* selbst herstellen. Dabei ist im Unterschied zum ohmschen Widerstand zu beachten, daß sich bei *Parallelschaltung* zweier Kondensatoren die Gesamtkapazität als Summe der beiden Einzelkapazitäten aus

$$C_g = C_1 + C_2$$

ergibt, weil durch die Parallelschaltung die wirksame Plattenfläche vergrößert wird. Im Gegensatz dazu vergrößert sich durch die *Reihenschaltung* von zwei Kondensatoren der Plattenabstand, so daß die Gleichung

$$\frac{1}{C_g} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{gilt.}$$

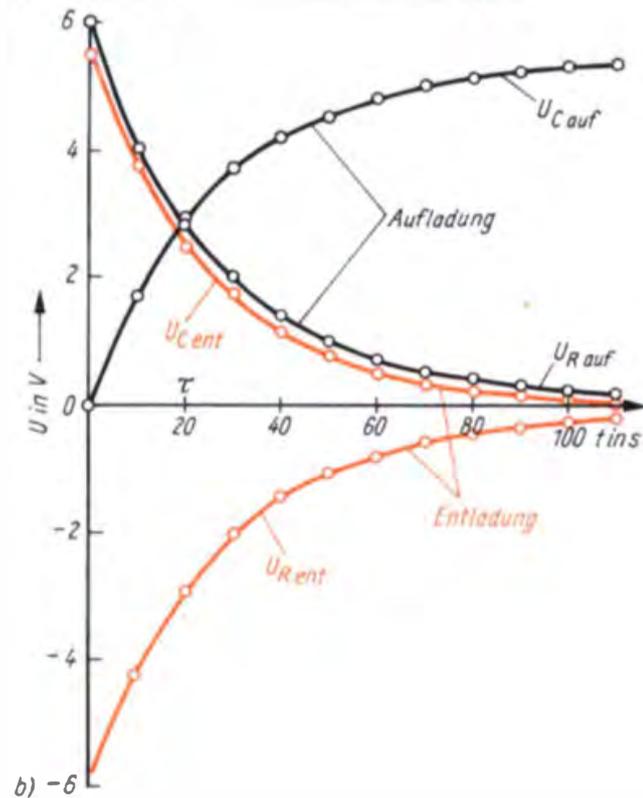
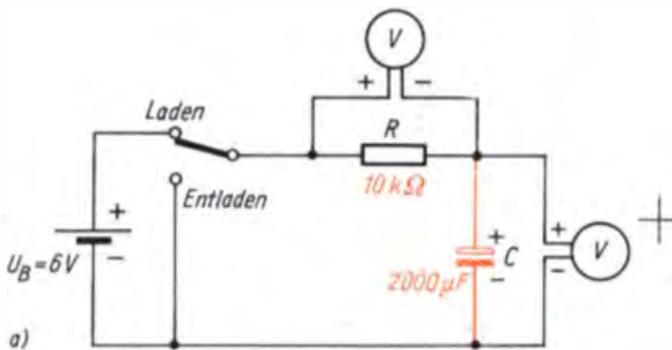


Bild 13. Untersuchung der Schaltvorgänge am Kondensator: a) Schaltung, b) zeitlicher Verlauf der Spannungen bei Aufladung und Entladung

Beispiel:

Brauchen wir einen Kondensator mit geringen Abmessungen und dem Kapazitätswert

$C = 0,25 \mu\text{F}$, so schalten wir zwei Al-Kondensatoren zu je $0,5 \mu\text{F}$ in Reihe und erhalten aus

$$\frac{1}{C_g} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{die Formel} \quad C_g = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\text{bzw.} \quad C_g = \frac{0,5 \mu\text{F} \cdot 0,5 \mu\text{F}}{0,5 \mu\text{F} + 0,5 \mu\text{F}} = 0,25 \mu\text{F}.$$

Bisher lernten wir das Verhalten des Kondensators im Stromkreis kennen. Als nächstes wollen wir untersuchen, wie sich Strom und Spannung am Kondensator bei der *Zusammenschaltung mit einem Widerstand* verhalten. In der Schaltung nach Bild 13a wird der Kondensator über einen Widerstand aufgeladen und entladen. Die Spannung U_C am Kondensator beobachten wir mit einem Voltmeter, das parallel zu den Kondensatorplatten geschaltet ist. Die Spannung U_R am Widerstand berechnet sich aus $U_R = I_{\text{auf}} \cdot R$ oder $U_R = I_{\text{ent}} \cdot R$. Damit ist der Verlauf von I_{auf} bzw. I_{ent} dem von U_R proportional, und wir können aus der Messung von U_R direkt auf den Verlauf des Lade- und Entladestromes schließen. Im Experiment stellen wir vier Meßreihen in der Reihenfolge $U_{C\text{auf}}$, $U_{R\text{auf}}$ bei Aufladung, $U_{C\text{ent}}$ und $U_{R\text{ent}}$ bei Entladung auf. Bei der Entladung muß das Meßgerät gegenüber der Aufladung umgepolt werden. Die Spannungswerte lesen wir alle zehn Sekunden ab und tragen sie in das Meßprotokoll ein. Wir erhalten die unten stehende Tabelle.

Die Meßwerte übertragen wir in ein Diagramm und überlegen, wie dieses Ergebnis zu deuten ist. Beim *Aufladevorgang* kann der Kondensator je nach Kapazität *Ladungen* aufnehmen, die den Widerstand R als Strom durchfließen. Da der Widerstand aber den Strom und damit die fließende Ladungsmenge begrenzt, wird für den Aufladevorgang eine bestimmte Zeit benötigt. Die *Aufladezeit* hängt von der Größe des Wider-

	t in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Auf-ladung	U_C in V	5,5	1,7	2,9	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0	5,1	5,2	5,3	5,35
	U_R in V		4,0	2,8	2,0	1,4	1,0	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15
Ent-ladung	U_C in V	0	3,8	2,5	1,8	1,2	0,8	0,55	0,4	0,25	0,2	0,1	0,1
	U_R in V		-4,2	-2,9	-2,0	-1,4	-1,0	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,15

standes und der Kapazität des Kondensators ab. Es ist einleuchtend, daß die zunächst ungeladenen Kondensatorplatten je Zeiteinheit viele Ladungen aufnehmen können. Je mehr sich der Kondensator auflädt, um so geringer wird die auf die Platten fließende Ladungsmenge und um so kleiner wird der Aufladestrom, bis er schließlich bei voll aufgeladenem Kondensator Null ist. In gleichem Maße wie der Aufladestrom abnimmt, baut sich zwischen den Kondensatorplatten die Spannung U_C auf.

Bei der Entladung spielen sich analoge Vorgänge ab. Die Ladung fließt über den Widerstand von den Kondensatorplatten ab. Dabei hat der Strom die umgekehrte Richtung. Beim Auf- und Entladevorgang ändern sich U_R bzw. I und U_C nach einer Exponentialfunktion.

Eine wichtige Größe ist die *Zeitkonstante* τ . Sie ist ein Maß für die Geschwindigkeit der Auf- und Entladevorgänge. Bei $0,7\tau$ haben U_C und U_R jeweils den halben Wert erreicht. Beim Aufladevorgang wird τ_{auf} erreicht, wenn

$$U_C = U_0 \left(1 - \frac{1}{e}\right),$$

und beim Entladevorgang τ_{ent} , wenn

$U_C = U_0 \cdot \frac{1}{e}$ ist. ($e = 2,7183\dots$ ist die Basis der natürlichen Logarithmen.) Die Zeitkonstante berechnet man aus der Gleichung $\tau = R \cdot C$. Bei unserem Experiment war R für Auf- und Entladung gleich ($\tau_{\text{auf}} = \tau_{\text{ent}}$). Aus der Gleichung $\tau = R \cdot C$ ersehen wir aber auch, daß die Zeitkonstante um so kleiner wird, die Ladevorgänge also um so schneller ablaufen, je kleiner R und C sind.

Die Reihenschaltung von Widerstand und Kondensator bezeichnen wir als *RC-Glied*. RC-Glieder werden uns in vielen Schaltungen der Digitaltechnik wieder begegnen.

Legen wir an den Kondensator eine Gleichspannung an, so fließt lediglich der Aufladestrom, und im weiteren verhält sich der Kondensator bei gleichbleibender Spannung infolge seines Dielektrikums wie ein unendlich großer Widerstand. Lassen wir Lade- und Entladevorgänge in schneller Folge wechseln, so fließen abwechselnd Lade- und Entladeströme. Das bedeutet: Bei Betrieb mit Wechselspannung

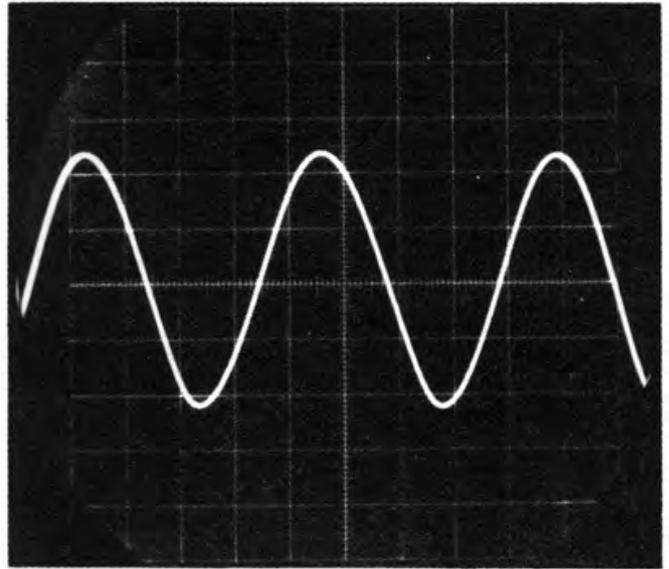


Bild 14. Oszillogramm einer Sinusspannung

fließt »durch« den Kondensator ein in der Richtung wechselnder Strom, der um so größer sein wird, je öfter der Wechsel je Zeiteinheit erfolgt. Wenn bei Betrieb des Kondensators mit einer Wechselspannung ein Wechselstrom fließt, so muß der Kondensator auch einen *Wechselstromwiderstand* haben. Speisen wir den Kondensator mit einer rechteckförmigen Impulsspannung (wir wollen sie als eine Sonderform der Wechselspannung ansehen), so hat das, wie das Experiment zeigt, den Nachteil, daß dabei Spannung U , Kondensatorspannung U_C und Strom I jeweils eine andere Kurvenform haben. Für den Techniker ist aber aus bestimmten Gründen gerade die Kurvenform der Spannung interessant, die sich beim Betrieb des Kondensators nicht verändert. Diese Kurve ist die *Sinuskurve*, die Spannung eine *Sinusspannung*, die man schlechthin als *Wechselspannung* bezeichnet. Solche Sinusspannungen (Bild 14) liefert uns der Universalgenerator. Da sie uns noch des öfteren begegnen wird, müssen wir etwas ausführlicher darauf eingehen. Ihre mathematische Form lautet:

$$u = \hat{u} \cdot \sin \alpha.$$

Hierin bedeuten

- u Momentanwert,
- \hat{u} Maximalwert, Amplitude,
- α Winkel.

Betrachten wir die Sinuskurve, so erkennen wir ihren *periodischen Charakter* (Bild 15a). In jeder Periode hat sie ein *Maximum* und ein *Minimum*. Die Perioden können mehr oder weniger schnell aufeinanderfolgen. Um dafür ein Maß zu erhalten, wird der Winkel α durch eine zeitbezogene Größe, die *Kreisfrequenz* ω , ausgedrückt, wobei $\alpha = \omega \cdot t$ ist. Nach der Zeit $t = T$ hat ein Punkt auf der Sinuskurve eine Periode durchlaufen. T ist die *Periodendauer*. Da die *Frequenz* die Zahl der durchlaufenen Perioden je Zeiteinheit ist, gilt ferner $f = \frac{1}{T}$. Die Frequenz wird in der Einheit *Hertz* (Hz) gemessen, wobei

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{1 \text{ s}} = 1 \text{ s}^{-1}$$

ist.

Wie wir wissen, treten in Wechselstromkreisen Spannungen und Ströme auf. Die Lage ihrer Kurven zueinander hat eine bestimmte Bedeutung und wird als *Phasenverschiebung* φ bezeichnet. Damit erhält die Gleichung der sinusförmigen *Wechselspannung* die Form

$$u = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Hierin bedeuten

u Momentanwert,

\hat{u} Amplitude,

ω Kreisfrequenz,

φ Phasenverschiebung.

Ferner gilt für die Kreisfrequenz:

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}.$$

Durchfließt der Wechselstrom i einen ohmschen Widerstand, so ruft er in ihm eine *Wärmewirkung* hervor. Die dafür aufgewendete *elektrische Leistung* läßt sich nicht direkt aus den Maximalwerten \hat{u} und \hat{i} berechnen. Man führt deshalb einen *Effektivwert* ein, der im ohmschen Widerstand die gleiche Erwärmung zur Folge hat wie der entsprechende Wert eines Gleichstromes bzw. einer Gleichspannung. Die Rechnung ergibt für die Effektivwerte

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \quad \text{bzw.} \quad I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}.$$

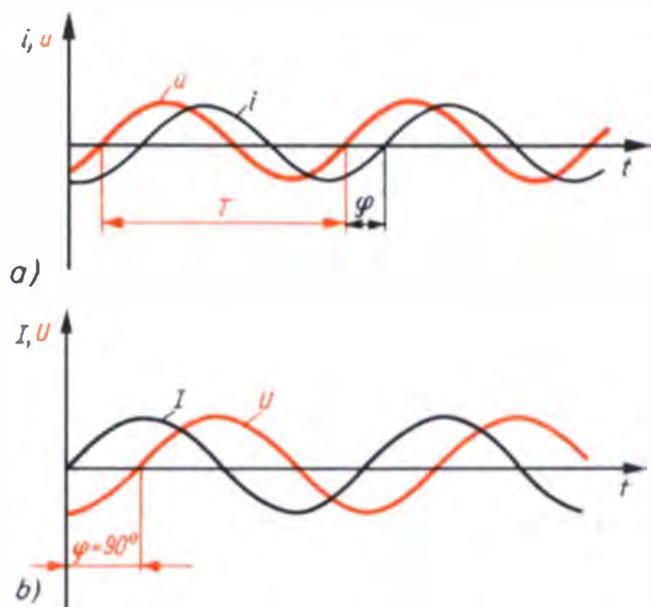
Die Meßgeräte für Wechselspannung und Wechselstrom sind auf die Effektivwerte geeicht.

Bei den Schaltvorgängen am *RC-Glied* konnten wir beobachten, daß Strom und Spannung am Kondensator nicht den gleichen zeitlichen Verlauf haben. Legen wir statt der Gleichspannung (Rechteckimpuls) eine sinusförmige *Wechselspannung* an, so bleibt an beiden Schaltgliedern *R* und *C* die Sinusform bei Strom und Spannung erhalten. Der Unterschied im zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung am Kondensator besteht jetzt im Auftreten einer *Phasenverschiebung* zwischen beiden Größen. Dabei eilt der Strom der Spannung um 90° voraus (Bild 15b).

Neben der Aussage über die Phasenverschiebung durch den Kondensator benötigen wir noch eine über sein *Widerstandsverhalten*. Ein besonderes Experiment dazu führen wir nicht durch, sondern überprüfen die folgenden Überlegungen und deren Ergebnisse erst später.

Beim Kondensator wird der Wechselstromwiderstand durch die sich ständig wiederholenden *Auf- und Entladevorgänge* hervorgerufen. Im Unterschied zum ohmschen Widerstand wird die elektrische Energie nur zeitweise im Kondensator gespeichert und nicht in eine andere Energieform umgewandelt. Widerstände, die durch ein solches *Speicherverhalten* von Feldern (z. B. des elektrischen Feldes beim Kondensator) zustande kommen, bezeichnen wir als *Blind-*

Bild 15. Sinuskurven: a) Darstellung, b) Phasenverschiebung zwischen Spannung U und Strom I



widerstand (Formelzeichen X). Im Unterschied dazu gibt es den *Wirkwiderstand* (z. B. den ohmschen Widerstand), bei dem die elektrische Energie unumkehrbar in eine andere Energieform (z. B. Wärme) umgewandelt wird.

Wir überlegen uns nun, wovon der Blindwiderstand X_C abhängig ist. Am einfachsten betrachten wir dazu das Verhalten der Ladungsträger.

1. Fall:

Ein Kondensator mit großem Kapazitätswert kann je Zeiteinheit mehr Ladungsträger aufnehmen als ein anderer mit kleinerem Kapazitätswert ($Q \sim C$). Mehr Ladungsträger je Zeiteinheit bedeutet nach $I = \frac{Q}{t}$ aber größeren Strom,

und das wiederum nach $X_C = \frac{U_C}{I_C}$ kleineren Blindwiderstand. Also können wir schreiben:

$$X_C \sim \frac{1}{C}.$$

2. Fall:

Wenn wir die Frequenz des Wechselstromes verdoppeln, dann muß auch in der gleichen Zeiteinheit die doppelte Ladungsmenge auf die Platten bzw. von den Platten fließen.

Nach $I = \frac{Q}{t}$ wird damit der Strom größer und

folglich nach $X_C = \frac{U_C}{I_C}$ der Blindwiderstand kleiner. Wir können wieder schlußfolgern:

$$X_C \sim \frac{1}{f}.$$

Unter Einführung der *Kreisfrequenz* formuliert man aus den beiden Abhängigkeiten folgende Gleichung:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

Damit können wir den Blindwiderstand eines Kondensators berechnen. Wir merken uns als Faustregel: Der Blindwiderstand eines Kondensators ist um so kleiner, je größer die Frequenz der angelegten Wechselspannung und je größer der Kapazitätswert ist.

Beispiel:

Wir berechnen den Blindwiderstand eines

Kondensators mit $C = 4,7 \text{ nF}$ für $f_1 = 1 \text{ kHz}$ (Meßton im Rundfunk) und für $f_2 = 27,12 \text{ MHz}$ (Sendefrequenz des Fernsteuersenders).

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C},$$

$$\begin{aligned} X_{C1} &= \frac{1 \text{ s} \cdot \text{V}}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^3 \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{s}} \\ &= 33,8 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 33,8 \text{ k}\Omega, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{C2} &= \frac{1 \text{ s} \cdot \text{V}}{2 \cdot 3,14 \cdot 27,12 \cdot 10^6 \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{s}} \\ &= 1,25 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1,25 \Omega. \end{aligned}$$

Aus dem Vergleich beider Ergebnisse erkennt man, welchen Einfluß die Frequenz auf den Blindwiderstand hat. Im MHz-Bereich stellt der Kondensator mit der Kapazität $4,7 \text{ nF}$ einen solch geringen Blindwiderstand dar, daß wir ihn in vielen Fällen als »Wechselstromkurzschluß« betrachten können (»Kurzschluß« ist die Bezeichnung für eine elektrische Verbindung zwischen zwei Punkten mit Spannungsunterschied bei sehr niedrigem Widerstand).

Was wir von den Spulen wissen müssen

Vielfältig sind die technischen Ausführungsformen der Spulen. Wir wollen allerdings nur die Formen näher betrachten, die wir später zum Aufbau der Fernsteuer- und Hilfsgeräte benötigen (Bild 16).

Als einfachste Spulenform begegnet uns die einlagige *Zylinderspule*. Wird sie aus Kupferdraht mit einem Durchmesser von $0,7 \dots 1 \text{ mm}$ hergestellt, so ist sie bei kleinen Windungszahlen so stabil, daß sie *freitragend* in die Schaltung eingebaut werden kann. Um bei größeren Windungszahlen eine mechanisch stabile Ausführung zu erhalten, werden einlagige Spulen meist auf *Wickelkörper* aus Plast gewickelt. Das hat den Vorteil, daß man durch einen eindrehbaren Kern den elektrischen Kennwert der Spule, ihre *In-*

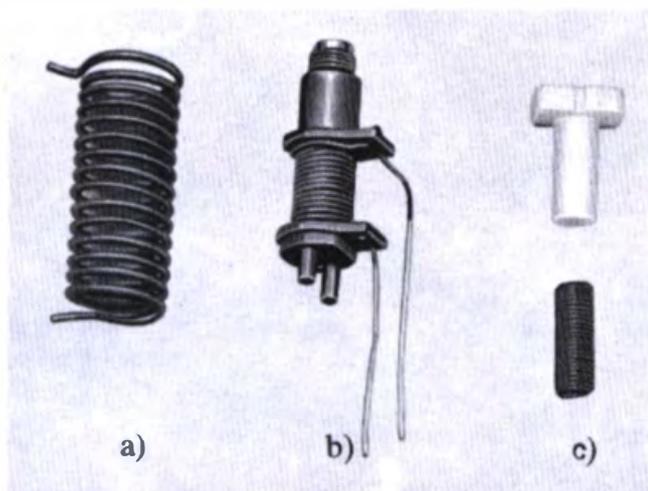


Bild 16. Ausführungsformen von HF-Spulen: a) Luftspule, b) auf Spulenkörper gewickelte Spule, c) Spulenkörper mit Kern

duktivität, in gewissen Grenzen verändern kann. Diese Tatsache werden wir in den Schaltungsaufbauten nutzen, in denen ein Abgleich erforderlich ist. In Anlehnung an den Aufbau der Spulen wurden wiederum ihre *Schaltzeichen* festgelegt (Bild 17).

Nun wollen wir das elektrische Verhalten der Spulen näher untersuchen. War es beim Kondensator das elektrische Feld, das sein Verhalten als Bauelement bestimmte, so ist es bei der Spule das *magnetische Feld*. In der einfachsten Form besteht eine Spule aus mehreren Drahtwindungen. Wird eine solche Spule von einem elektrischen Strom durchflossen, so bildet sich ein Magnetfeld um die Spule aus, das durch Feldlinien dargestellt werden kann. Die Gesamtheit der aus der Spule austretenden Feldlinien bezeichnet man als *magnetischen Fluß*, dessen

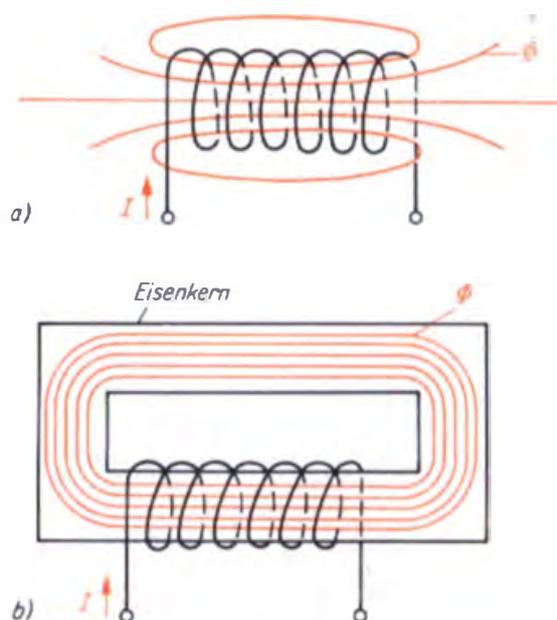
Bild 17. Schaltzeichen von Spulen

Benennung	Schaltzeichen
Spule, allgemein	 oder
Spule mit Eisenkern	
Spule mit Massekern, einstellbar; Kennzeichnung des Wicklungsanfangs durch Punkt	

Stärke von der Größe des fließenden Stromes, der Windungszahl der Spule und den Eigenschaften des Stoffes, in dem er sich ausbreitet, abhängt. So hat Eisen beispielsweise die Eigenschaft, der Ausbreitung des magnetischen Flusses nur einen geringen Widerstand entgegenzusetzen. Eisen ist also ein guter magnetischer Leiter. Für Spulen, in denen sich bei vorgegebener Stromstärke und Windungszahl ein starker magnetischer Fluß ausbilden soll, müssen wir daher möglichst einen geschlossenen Eisenkreis nach Bild 18b vorsehen.

Jeder Strom wird von einem Magnetfeld begleitet. Andererseits ruft aber jede Magnetflußänderung im elektrischen Kreis eine Spannung hervor. Diesen Zusammenhang drückt das Induktionsgesetz aus. Die Ableitung der Gleichung würde hier zu weit führen.

Bild 18. Magnetfeld einer Spule: a) ohne Eisenkern, b) mit Eisenkern



$$U = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Hierin bedeuten
U induzierte Spannung der Spule,
N Windungszahl der Spule,
 $\frac{d\Phi}{dt}$ Flußänderung je Zeit.

Tritt z. B. in der Spule nach Bild 18a eine Flußänderung $\frac{d\Phi}{dt}$ auf, so wird in den Windungen eine Spannung U induziert, die so gerichtet ist, daß sie ihrer Ursache entgegenwirkt – daher das Minuszeichen in der Gleichung.

Um mit dem Induktionsgesetz rechnen zu können, müssen wir die Gleichung

$$U = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

den elektrischen Strom I , die Windungszahl N , die Permeabilität μ des Stoffes, in dem sich der Fluß ausbreitet, den Spulenquerschnitt A und die mittlere Länge der Flußlinien l ersetzen. Unter Wegfall des Minuszeichens erhält man dann:

$$U = N \cdot \frac{N \cdot \mu \cdot A}{l} \cdot \frac{dI}{dt}$$

Die Permeabilität μ wird aus $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ berechnet. Dabei ist μ_0 die *magnetische Feldkonstante* (Induktionskonstante)

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

und μ_r die *relative Permeabilität* als Werkstoffkenngröße. Man faßt alle konstruktiven Einflußfaktoren der Spule zur Induktivität L zusammen. Es gilt:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{l}$$

Die Einheit für die Induktivität ist das *Henry* (H). Dabei gilt:

$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}}$$

Für Spulen, bei denen der magnetische Fluß durch den Kern einen vorgegebenen Weg erhält und damit der magnetische Widerstand festgelegt ist, faßt man die konstanten Faktoren zum *Induktivitätsfaktor* zusammen.

Aus

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{l}$$

wird $L = N^2 \cdot A_L$, was die Berechnung von Spulen stark vereinfacht.

Das *Widerstandsverhalten* der Spulen leiten wir analog zu dem des Kondensators ab, nur daß wir jetzt die *Spannungen* und nicht die Ströme betrachten. Nach der Gleichung

$$U = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

ist die induzierte Spannung gleich groß, aber entgegengesetzt der angelegten Wechselspannung. Dabei vernachlässigen wir zunächst den ohmschen Widerstand der Spule, d. h. ihren Wirkwiderstand. Durch Umformung erhalten wir:

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Nach der o. g. Gleichung wird die über der Spule abfallende Wechselspannung größer, wenn die Induktivität L größer wird. Also gilt $U_L \sim L$ und, da

$$X_L = \frac{U_L}{I_L}$$

folglich auch $X_L \sim L$.

Die Abhängigkeit von der Frequenz können wir ebenfalls aus der o. g. Gleichung ablesen. Da $f = \frac{1}{T}$ gilt (oder allgemeiner $f = \frac{1}{t}$), wird der Spannungsabfall U_L um so größer, je größer die Frequenz f wird. Es ist $U_L \sim f$, und mit

$$X_L = \frac{U_L}{I_L}$$

erhalten wir wieder $X_L \sim f$.

Unter Einführung der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f$ fassen wir beide Abhängigkeiten zu einer Gleichung zusammen:

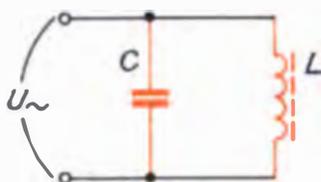
$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L$$

Damit hat das zunächst für unsere Absichten etwas unbequem aussehende Induktionsgesetz eine Form erhalten, mit der wir ohne Schwierigkeiten rechnen können. Diese Gleichung besagt: Der Blindwiderstand einer Spule ist um so größer, je größer die Frequenz und je größer die Induktivität ist.

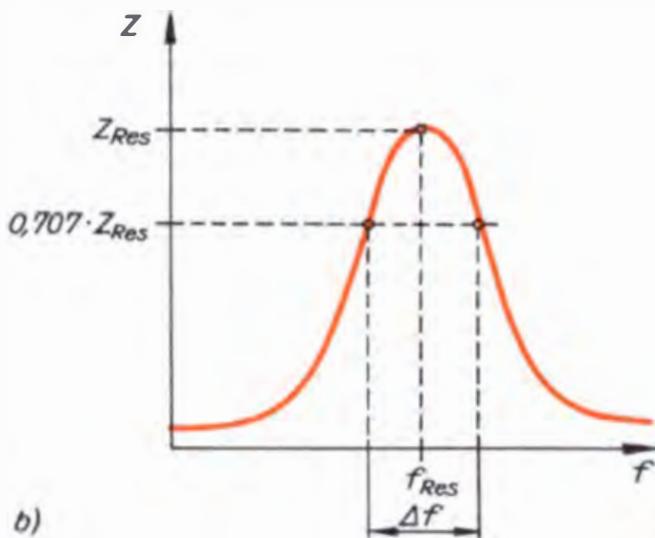
Der Schwingkreis – eine Grundsaltung mit besonderen Eigenschaften

Bisher haben wir den ohmschen Widerstand, den Kondensator und die Spule nur für sich, gewissermaßen als ideale Bauelemente, betrachtet. In Wirklichkeit gibt es diese idealen Bauelemente aber nicht. So existiert kein *absolutes* Dielektrikum. Das bedeutet, daß durch den Kondensator ein, wenn auch nur geringer, Verluststrom, also ein Wirkstrom fließt. Analog ist es bei der Spule. Sie hat neben dem Blindwiderstand den ohmschen Widerstand des Kupferdrahtes, also auch einen Wirkwiderstand, der eine Verlustspannung hervorruft. Diese Kombination von Blind- und Wirkwiderstand begegnet uns auch, wenn wir z. B. Spule und Widerstand oder Kondensator und Widerstand zusammenschalten.

Bild 19. Parallelschwingkreis: a) Schaltbild, b) Widerstandsverhalten bei Frequenzänderung



a)



b)

Ein Widerstand, der sich aus einem Blind- und einem Wirkwiderstand zusammensetzt, wird als *Scheinwiderstand* bezeichnet (Formelzeichen Z). Wir können auch eine Spule und einen Kondensator parallel zusammenschalten (Bild 19a). Dann hat der Kondensator den Blindwiderstand

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

und die Spule

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L.$$

An beiden Bauelementen liegt die gleiche Wechselspannung mit der gleichen Frequenz.

Wir überlegen uns nun, wie sich der Widerstand verhält, wenn sich die Frequenz ändert und die angelegte Spannung konstant bleibt. Bei tiefen Frequenzen wird der kapazitive Widerstand X_C überwiegen und mit steigender Frequenz immer mehr abnehmen. Gegenläufig dazu ändert sich der induktive Widerstand X_L , der bei tiefen Frequenzen klein ist und linear mit der Frequenz steigt. Bei einer bestimmten Frequenz tritt daher der Fall ein, daß

$$X_C = X_L$$

ist, die beiden Blindwiderstände sich also einander kompensieren und die Schaltung nur noch einen Wirkwiderstand aufweist. Die Frequenz für diesen Fall können wir ausrechnen, sie ist, da

$$X_C = X_L \text{ oder } \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = 2\pi \cdot f \cdot L :$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

und wird als *Resonanzfrequenz* bezeichnet. Diese Gleichung hat den Namen *Thomson'sche Schwingungsgleichung*. Die mathematische Behandlung des Schwingkreises und seiner physikalischen Eigenschaften ist sehr interessant und viel umfangreicher, als wir sie hier kennenlernen können. Wer in diese Zusammenhänge tiefer eindringen möchte, lese in der entsprechenden Spezialliteratur nach.

Wir merken uns nur noch folgendes, da es für das Verständnis einiger später zu besprechender Schaltungsdetails wichtig ist: Im *Resonanzfall* pendelt (schwingt) die elektrische Energie mit der Resonanzfrequenz zwischen dem dielektrischen Speicher, dem Kondensator, und dem magne-

tischen Speicher, der Spule, hin und her. Die im Schwingkreis vorhandenen Wirkwiderstände (Verluste) dämpfen die Schwingung. Je geringer die Verluste sind, um so geringer ist die Dämpfung und um so geringer ist die von außen zur Aufrechterhaltung der Schwingung zuzuführende Energie. Beim Parallelschwingkreis bedeutet aber geringe zugeführte Energie kleinen Strom und der wiederum hohen Scheinwiderstand. Im Resonanzfall steigt der Scheinwiderstand stark an, so daß wir bei entsprechenden Messungen etwa Bild 19b erhalten.

Die Eigenschaft des Parallelschwingkreises, bei der Resonanzfrequenz einen großen Scheinwiderstand anzunehmen, werden wir für bestimmte Zwecke ausnutzen. Es ist hier schon zu erkennen, daß dieses Verhalten besonders dazu geeignet ist, bestimmte Frequenzen aus einem Frequenzgemisch auszusondern, sie zu *selektieren*. Um ein Maß für die Schärfe der Resonanz in bezug auf die Frequenz zu erhalten, führt man die *Bandbreite* (Formelzeichen: b) ein. Die Bandbreite wird wie die Frequenz in der Einheit Hertz (Hz) angegeben. Man definiert: Die Bandbreite $b_{0,7}$ ist erreicht, wenn der Scheinwiderstand auf das 0,707fache des Resonanzwiderstandes gesunken ist.

Die Zusammenhänge sind, wie bereits betont, etwas komplizierter. Der Faktor 0,707 ergibt sich aus der Annahme, der Scheinwiderstand sei gesunken, bis Blind- und Wirkanteil gleich groß sind. Wegen der Phasenverschiebung zwischen beiden, die für diesen Fall $\varphi = 45^\circ$ ist, wird das Verhältnis zwischen Kathete und Hypotenuse $1 : \sqrt{2}$, also erhalten wir:

$$\frac{Z}{Z_R} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707.$$

Die Bandbreite b wird auch als *absolute Bandbreite* bezeichnet. Um sie zur Beurteilung der Eigenschaften eines Schwingkreises unabhängig von der Resonanzfrequenz heranziehen zu

können, bildet man den Quotienten $\frac{b}{f_{\text{res}}} = d$ und

nennt ihn *relative Bandbreite* oder *Dämpfung* (Formelzeichen: d). Die Dämpfung wird in Prozent angegeben und ist ein Maß für die Güte des Schwingkreises. Für uns spielt sie dann beim Aufbau des Senders und des Empfängers eine wichtige Rolle.

Galvanische Elemente als elektrische Spannungsquellen

Zum Betrieb der Fernsteuergeräte (Sender und Empfänger) brauchen wir geeignete Spannungsquellen. Dafür kommen praktisch nur die handelsüblichen *chemischen Spannungsquellen* (*galvanische Elemente*) in Betracht. In den galvanischen Elementen wird durch einen elektrochemischen Vorgang chemisch gespeicherte Energie in elektrische Energie umgewandelt. Im Bild 20 sind die von uns am häufigsten benutzten Typen zusammengestellt.

Wir unterscheiden die galvanischen Elemente in *Primär-* und *Sekundärelemente*. Bei den Primärelementen wird die elektrische Energie durch Auflösung der negativen Elektrode (Zink) im Elektrolyten gewonnen. Ist die negative Elektrode oder der Depolarisator, der zur Bindung der Wasserstoffionen dient, verbraucht, so wird das Element unbrauchbar und muß ersetzt werden. Die Sekundärelemente sind unter der Bezeichnung *Akkumulator*, kurz Akku, bekannt. Der Akku kann nur elektrische Energie abgeben, wenn er vorher geladen wurde. Bei der *Ladung* wird elektrische Energie in chemische umgewandelt und gespeichert. Dieser Umwandlungsprozeß kehrt sich bei der *Entladung* des Akkus um, wenn die gespeicherte chemische Energie wieder in elektrische Energie verwandelt wird. Akkus können mehrmals geladen und entladen werden.

Nachdem wir die beiden grundsätzlichen Arten von galvanischen Elementen kennengelernt haben, wollen wir nun die jeweiligen Ausführungsformen und ihre Eigenschaften näher betrachten.

Am Anfang genügen Primärelemente

Der Aufbau des gebräuchlichsten Primärelements, des *Kohle-Zink-Elements*, ist im Bild 21 dargestellt. Die positive Elektrode dieses Troknelements besteht aus einem Kohlestäbchen, das vom Depolarisator (Braunstein) umgeben ist.

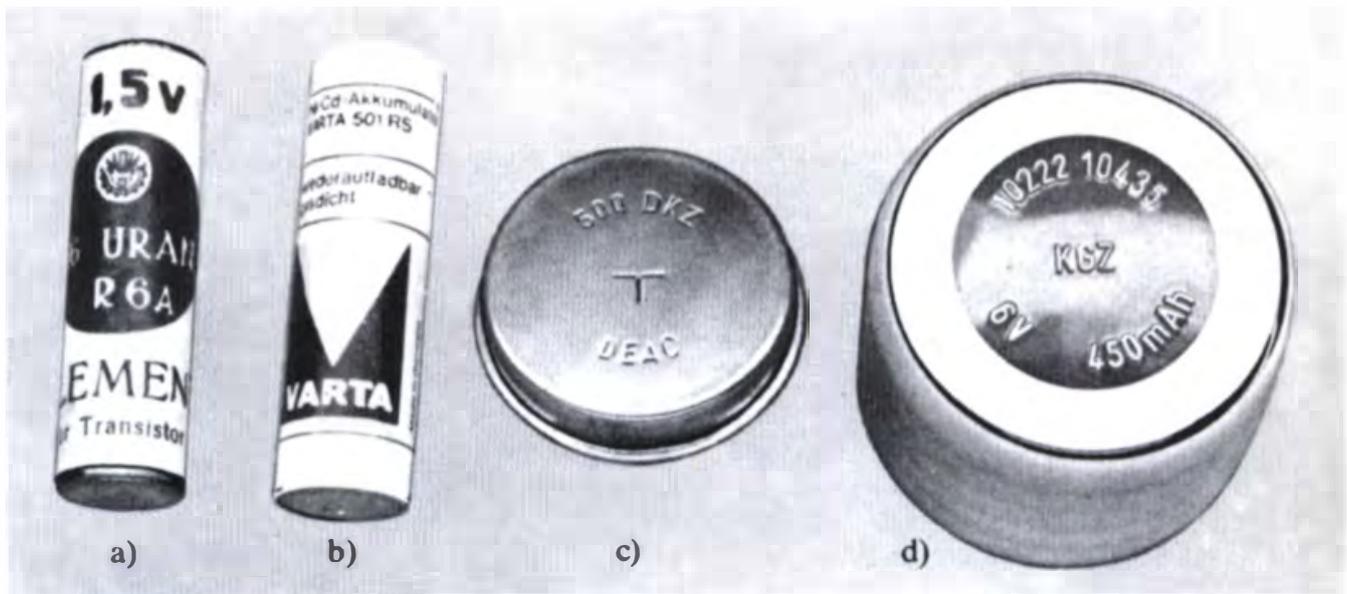
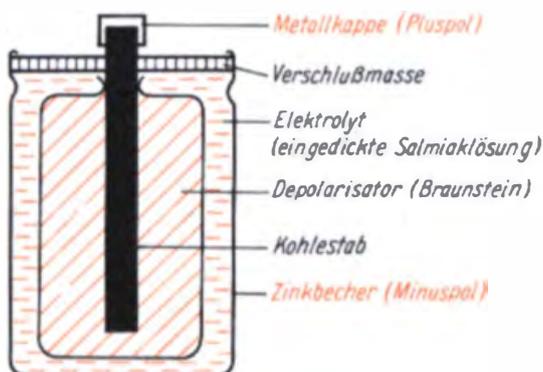


Bild 20. Ausführungsformen von galvanischen Elementen: a) Kohle-Zink-Zelle R 6 (Mignon), b) NK-Zelle R 6 (Mignon), c) NK-Knopfzelle 1,2 V/500 mAh, d) Batterie aus NK-Knopfzellen 6,0 V/500 mAh

Als Elektrolyt dient eine von saugfähigen Stoffen (Weizenmehl, Sägemehl, Papier u. a.) aufgenommene Ammoniaklösung. Der Zinkbehälter der Zelle ist gleichzeitig die negative Elektrode. Er wird durch Teer oder Paraffin luftdicht verschlossen (daher die Bezeichnung Trockenelement) und ist deshalb in jeder beliebigen Lage zu gebrauchen. Neben den einzelnen Elementen sind auch *Batterien* gebräuchlich, in denen mehrere Elemente zusammengeschaltet und zu einer Einheit montiert sind.

Das Element R 6, als *Mignonzelle* bekannt, ist das kleinste handelsübliche Stabelement und sollte nur dort verwendet werden, wo es auf

Bild 21. Aufbau eines Kohle-Zink-Elements (R 20)



geringe Abmessungen ankommt. Es läßt bei intermittierender Entladung einen Strom von 20 mA zu. Der Kurzschlußstrom I_K beträgt 6 A. Für größere Belastungen müssen leistungsfähigere Elemente vorgesehen werden.

Unter dem Namen *Monozelle* ist das Element R 20 bekannt. Es wird in den Ausführungsformen *Stabelement* ($I_K \approx 7$ A), *Heizelement* ($I_K \approx 9$ A) und *Leak-Proof* (lecksicher, $I_K \approx 18$ A) hergestellt, wobei das Heizelement auch als *Geräte-zelle* bezeichnet wird. Das Heizelement hat gegenüber dem Stabelement wesentlich verbesserte Gebrauchseigenschaften (doppelte Kapazität und verbesserte Zellenabdichtung) und läßt eine intermittierende Entladung mit 180 mA zu.

Um beim Einsatz der Trockenelemente keine Fehlschläge zu erleiden, müssen wir uns noch einige Kenntnisse über ihr Verhalten aneignen. Die Klemmenspannung einer unbelasteten Zelle liegt bei 1,55...1,75 V, bei Belastung sinkt sie auf 1,3...1,6 V. Die Spannung ist also stark von der Belastung, der Zellenart und deren Entladungsgrad abhängig.

Die Abhängigkeit der Klemmenspannung einer Mignonzelle von der Belastung und Entladedauer überprüfen wir in einem Experiment (Bild 22a). Wir belasten jeweils eine neue Zelle R 6 mit den Widerständen $4,7 \Omega/0,5$ W; $22 \Omega/0,25$ W sowie $150 \Omega/0,25$ W und messen die Klemmenspannung zu Beginn der Meßreihen, nach 12 und 25 Minuten sowie nach 1, 2, 10, 40 und 100 Stunden. Die gemessenen Werte tragen wir in ein Meßproto-

koll ein und zeichnen mit ihrer Hilfe die Entladekennlinie für die drei Belastungsfälle. Um den typischen Verlauf über eine so große Zeitspanne besser darstellen zu können, wird die Zeitachse logarithmisch geteilt. Wir erkennen aus den Kennlinien nach Bild 22b die starke Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Belastung und vom Entladungsgrad. Für die Anwendung in Fernsteuergeräten ergibt sich daraus:

1. Um die Primärelemente voll auszunutzen, sollten sie möglichst gering belastet werden.
2. Bei Grenzfällen der Belastung wird der Elementtyp mit der nächstgrößeren Kapazität verwendet (Kosteneinsparung!).
3. In elektronischen Schaltungen ist die Betriebsspannung zu stabilisieren.

Infolge *Selbstentladung* erschöpft sich ein Kohle-Zink-Element auch bei längerer Lagerung ohne Belastung. Beim Kauf achten wir daher immer auf das Herstellungsdatum, das auf das Element bzw. die Batterie aufgedruckt ist. Es sollte nicht länger als sechs Monate zurückliegen. Um den Ladezustand eines Kohle-Zink-Elements selbst feststellen zu können, steht uns ein einfaches Hilfsmittel zur Verfügung: Wir messen

den *Kurzschlußstrom*. Das Kennzeichen erschöpfter bzw. überlagerter Trockenelemente ist der gestiegene Innenwiderstand, infolgedessen der Kurzschlußstrom sinkt. Dieser Strom wird mit dem Vielfachmesser (Meßbereich 6 A) bestimmt (außer bei Monozellen). Ist er auf 50% des Nennwertes oder weniger gesunken bzw. geht er während der Messung stark zurück, so ist das Trockenelement erschöpft oder überlagert und damit unbrauchbar. Die Messung darf nicht länger als zwei Sekunden dauern. Da die Werte für den Kurzschlußstrom des jeweiligen Elements bzw. Batterietyps je nach Hersteller voneinander abweichen, sind die Angaben nur Richtwerte.

Zum Einsatz von Trockenelementen noch einen Hinweis. Es gibt keinen Element- bzw. Batterietyp, der gegen das Austreten von Ammoniaklösung oder aggressiven Dämpfen absolut sicher ist. Besonders besteht diese Gefahr bei unsachgemäßer Behandlung oder im Fall eines Defektes (Belassen entladener Batterien oder

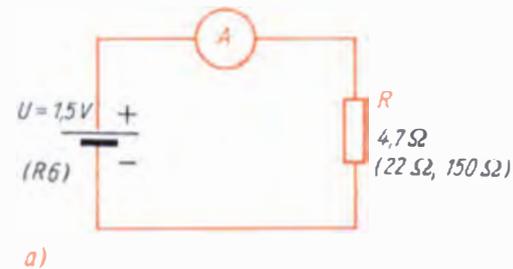
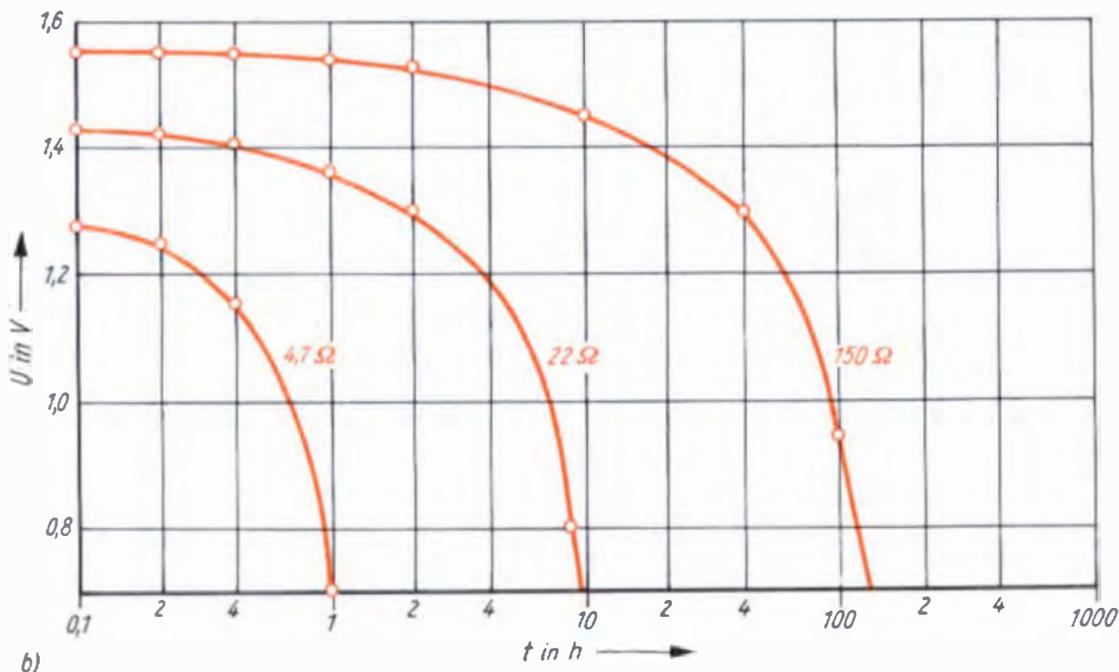


Bild 22. Entladung eines Kohle-Zink-Elements (R6) in Abhängigkeit von der Belastung: a) Schaltung, b) Kennlinien



Elemente im Gerät, Tiefentladung, Überhitzung des Gerätes, Kurzschluß o. ä.). Deshalb bringen wir die Spannungsquellen so in den Geräten unter, daß eventuell austretende Ammoniaklösung keinen Schaden anrichten kann.

Wirtschaftlicher sind Akkumulatoren

Neben den Primärelementen haben die *Sekundärelemente* in zunehmendem Maße Bedeutung erlangt. Das ist besonders auf ihre günstigen technischen Eigenschaften zurückzuführen. Sekundärspannungsquellen werden nach dem Elektrodenmaterial eingeteilt. Für unsere Fernsteuergeräte kommen nur die handelsüblichen gasdichten Ausführungen von *NK-Akkus* (Nickel-Kadmium-Akkus) in Frage. Auf die Erläuterung der chemischen Vorgänge wird hier verzichtet, da sie für uns von untergeordneter Bedeutung sind.

Im Vergleich zu anderen Elementen bietet uns der NK-Akku einige Vorzüge:

- hohe mechanische Festigkeit und Schüttelfestigkeit. Diese Eigenschaften sind bei beliebiger Einbaulage wesentliche Voraussetzungen für die Betriebssicherheit der Fernsteueranlagen.
- relativ konstante Entladespannung im Arbeitsbereich,
- Wiederaufladbarkeit bei langer Lebensdauer. (Unter genauer Einhaltung der Pflege- und Behandlungsvorschriften kann ein Akku eine Lebensdauer bis zu 10 Jahren bzw. 1000 Ladezyklen und mehr erreichen.)
- kein auslaufender Elektrolyt – gasdicht!
- geringer Wartungsaufwand,
- günstige Speichereigenschaften. Selbst bei längerer Lagerung tritt nur eine geringe Selbstentladung auf.

Nachteile des NK-Akkus sind:

- seine relativ hohe Masse und
- der im Vergleich zu Kohle-Zink-Elementen hohe Anschaffungspreis.

Für den Betrieb von Fernsteuergeräten interessieren uns in erster Linie *Knopfzellen* und daraus hergestellte Batterien. Der Aufbau einer NK-Knopfzelle ist im Bild 23 dargestellt. Das Zellengefäß, als Becher ausgebildet, ist der positive Pol. Im Becher befinden sich die positive

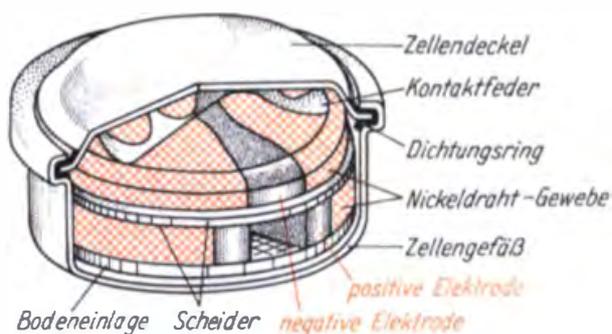


Bild 23. Aufbau einer gasdichten NK-Knopfzelle

Elektrode aus Nickelhydroxid und Graphit sowie die negative Elektrode aus Kadmiumoxid, beide in Tablettenform. Die Elektroden sind mit Elektrolyt getränkt. Sie werden durch einen feinsporigen Scheider getrennt und sind in ein Körbchen aus Nickeldrahtgewebe eingepreßt. Das Zellengefäß wird von einem Deckel, dem negativen Pol und einem isolierenden Dichtungsring abgeschlossen. Der gasdichte NK-Akkumulator stellt ein in sich abgeschlossenes System dar. *Er darf nicht geöffnet werden, und es darf auch kein Elektrolyt nachgefüllt werden.*

Das Betriebsverhalten erkennen wir wieder am besten anhand der *Entladekennlinie*. Da der NK-Akku geladen gekauft wird, können wir in einem Experiment die Entladekennlinie, z. B. die des Empfängerakkus (4,8 V/450 mAh), aufnehmen. Haben wir dann das Ladegerät aufgebaut, nehmen wir auch noch die *Ladekennlinie* auf. Der Akku wird nach der Schaltung (Bild 24a) mit einem Widerstand ($240\ \Omega/0,5\ \text{W}$) belastet. Wir messen die Klemmenspannung im Abstand von je einer Stunde, bis sie auf den Wert von 4,4 V gesunken ist. Die gemessenen Werte übertragen wir in ein Diagramm und erhalten den Kennlinienverlauf nach Bild 24b. Wir können daraus ablesen, daß die Klemmenspannung bei der Entladung eines Akkus wesentlich langsamer absinkt als bei einem Kohle-Zink-Element. Neben der *Wiederaufladbarkeit* (mehr als 1000 Ladezyklen) und der großen Lebensdauer (mehr als 5 Jahre) ist die *konstante Klemmenspannung* ein wesentlicher Vorzug des NK-Akkus. Messen wir die Klemmenspannung beim Laden, so können wir die Ladekennlinie nach Bild 25 zeichnen. Die Aufladung wird bei Erreichen der Ladeschlußspannung von 6,0 V (entspricht 1,5 V pro Zelle) abgebrochen. War der

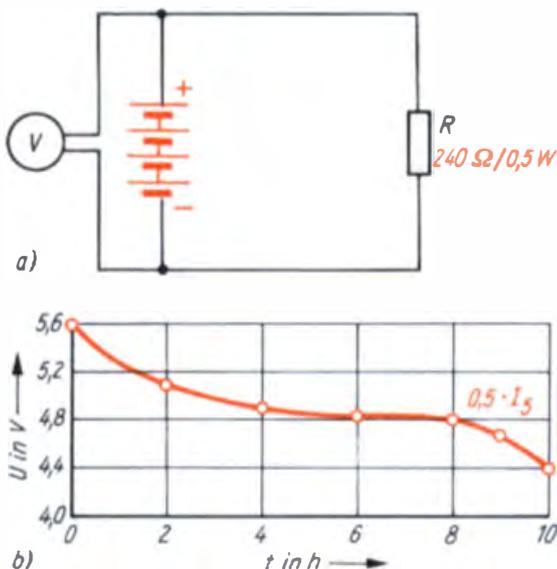


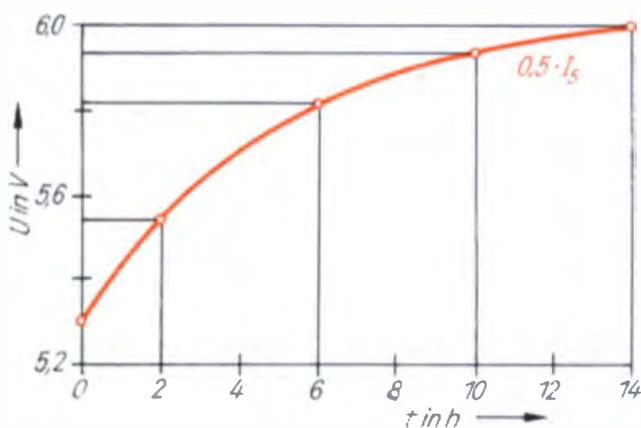
Bild 24. Entladung einer gasdichten NK-Batterie (4,8 V/450 mAh): a) Schaltung, b) Entladekennlinie

Akku vorher ganz entladen (4,4 V Klemmenspannung), so benötigen wir eine Ladezeit von ungefähr vierzehn Stunden.

Der NK-Akku ist ein relativ teures Bauteil unserer künftigen Fernsteueranlage. Eine Anschaffung wird sich nur dann rechtfertigen lassen, wenn wir durch Einhaltung der Pflege- und Wartungsvorschriften alle die genannten Vorzüge voll zur Geltung bringen. Der Hersteller von gasdichten NK-Akkus in der DDR (VEB Kombinat Galvanische Elemente, Werk Zwickau) gibt dazu unter anderem folgende Hinweise:

»Die Wartung besteht nur im Ladevorgang, evtl. Säuberung der Kontaktstellen. Verschiedene

Bild 25. Ladekennlinie einer gasdichten NK-Batterie (4,8 V/450 mAh)



Zellentypen sind mit Lötösen versehen, und nur an diesen darf gelötet werden. In die Zellen bzw. Batterien ist das Herstellungsdatum, gekennzeichnet durch Monats- und Jahreszahl, eingepreßt.

Laden

Das Laden der gasdichten NK-Akkumulatoren ist mit konstantem Strom durchzuführen. Es kann nur mit Gleichstrom geladen werden. Die Ladeschlußspannung liegt bei ca. 1,5 V/Zelle. Der Nennladestrom ($0,5 I_5$) soll zu Beginn ein Maximum von $0,55 I_5$ nicht überschreiten. Der Ladefaktor der gasdichten NK-Akkumulatoren beträgt 1,4, d. h., es ist jeweils das 1,4fache der entnommenen Kapazität wieder einzuladen. Überladen ist zu vermeiden. Es schadet der Lebensdauer der gasdichten Akkumulatoren.«

Anmerkung: I_5 ist der konstante Strom, der bei fünfstündiger Entladung der vollen Kapazität fließt (z. B. ist bei einer 450 mAh-Zelle $I_5 = 90$ mA).

»Entladen

Der Nennladestrom beträgt I_5 . Auf ihn baut sich die Nennkapazität auf. Es gibt Einsatzgebiete, bei denen der Nennladestrom nicht eingehalten werden kann. Jedoch soll bei Dauerentladung der maximale Entladestrom von $2,5 I_5$ nicht überschritten werden. Bei kurzzeitiger Entladung ist wegen des maximalen Entladestromes Rückfrage erforderlich. Beim Entladen ist darauf zu achten, daß die Entladeschlußspannung nicht überschritten wird. Wird mit größeren Strömen als dem Nennladestrom entladen, verringert sich die Kapazität der Akkumulatoren. Die nutzbare Kapazität bei Entladung mit $2,5 I_5$ beträgt ca. 70% der Nennkapazität (K_5). Auch für das Entladen ist ein Temperaturbereich festgelegt. Dieser liegt in den Grenzen von -20°C bis $+35^\circ\text{C}$. Bei -20°C beträgt die nutzbare Kapazität bei Entladen mit I_5 ca. 30% und bei $+35^\circ\text{C}$ ca. 90% der Nennkapazität. Außerhalb dieses Temperaturbereiches sind die gasdichten Akkumulatoren nicht funktionsunfähig; jedoch treten bei Temperaturen unter -20°C größere, nicht im voraus bestimmbare Kapazitätsschwankungen auf, und bei häufiger Entladung über 35°C ist mit einer Verringerung der Lebensdauer zu rechnen.«

Anmerkung: Von den Herstellern wird die Entladeschlußspannung mit 1,0...1,1 V je Zelle angegeben.

Die Kenntnis des Akkuladestandes ist für den Fernsteueramateur ähnlich wichtig wie die Kenntnis des Kraftstoffstandes für den Autofahrer. Machen wir es uns deshalb zur Regel, vor jedem Fernsteuerstart den Ladezustand der Akkus zu kontrollieren.

Wir bauen einen Akkuprüfer

Die Schaltung des Akkuprüfers, den wir zur Kontrolle unserer Akkus bauen wollen, ist im Bild 26 wiedergegeben.

Wir stellen zunächst die Leiterplatte der gedruckten Schaltung in den angegebenen Maßen aus Leiterplattenrohmaterial her und verwenden dabei nach Möglichkeit einseitig beschichtetes Material der Stärke 1,5 mm. GFP-Leiterplattenmaterial ist oft zweiseitig beschichtet. Um daraus einseitig beschichtetes Material zu bekommen, ziehen wir eine Schicht Kupferfolie ab. Die Leiterplatte ist nach Bild 27 mit der Laubsäge auszusägen und zu bohren. Für die drei Unterbrechungen der Leiterbahn ritzen wir die Kupferschicht mit dem Zuricht- oder Balsamesser zweimal im Abstand von 2 mm und ziehen die entstehenden Kupferbahnen mit der Pinzette ab. Nun wird die Kupferschicht mit feinem Scheuersand (z. B. ATA) blankgerieben und mit in Spi-

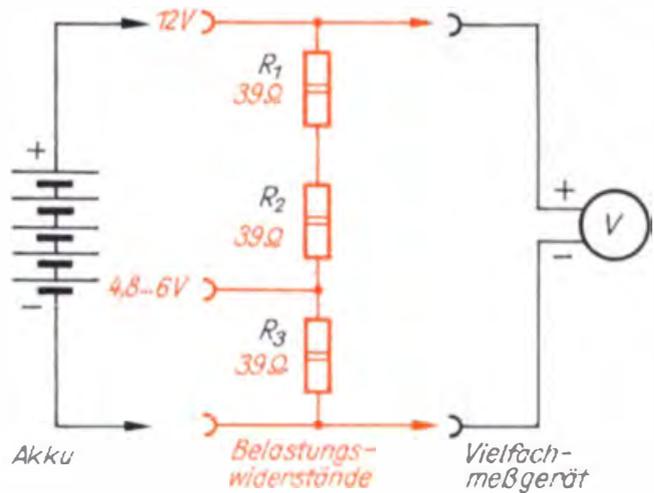
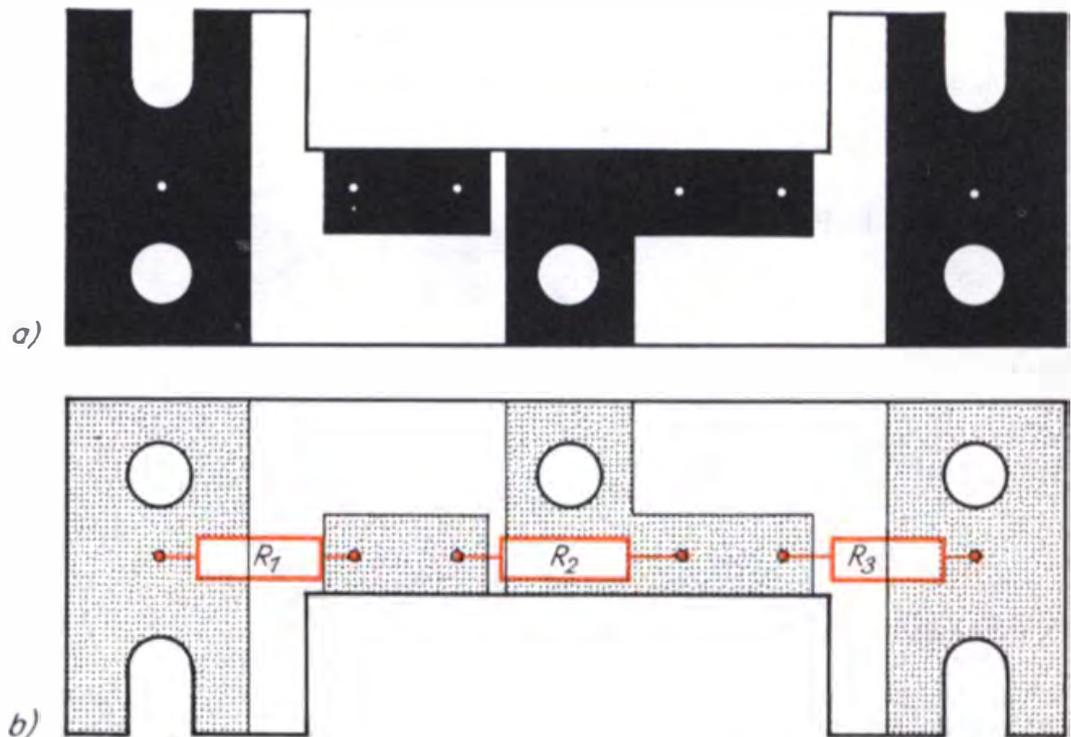


Bild 26. Schaltbild des Akkuprüfers

ritus gelöstem Kolophonium eingestrichen. Anschließend schrauben wir die drei Telefonbuchsen ein und löten die Widerstände an. Den fertigen Prüfer sehen wir auf Bild 28.

Da die Widerstände den NK-Akku mit I_5 belasten, können wir am Vielfachmesser direkt die Klemmenspannung unter Belastung ablesen. Um den Akkuprüfer an die jeweilige Klemmenspannung der Akkus anpassen zu können, ist ein

Bild 27. Akkuprüfer: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan



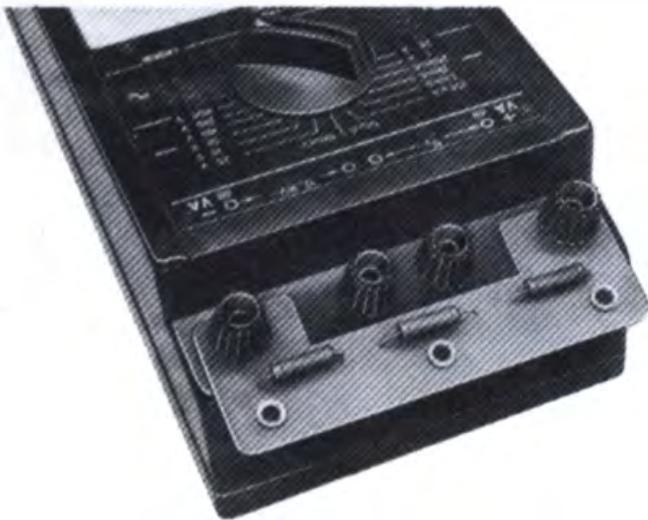


Bild 28. Ansicht des Akkuprüfers

Abgriff für kleinere Spannungen bei 2,4 V, 4,8 V und 6 V vorgesehen. Zum Anschluß des Akkus an den Prüfer verwenden wir einfach das Ladekabel. Aus Tabelle 3 im Anhang ist ersichtlich, welche Kapazität der Akku noch besitzt, bzw. wie lange der Akku geladen werden muß. Die in der Tabelle angegebenen Werte sind dabei aber nur Richtwerte. Da sich die Entladecharakteristik mit zunehmendem Alter ändert, prüfen wir in jedem Jahr einmal mit einer Kontrollentladung (mit I_5 belasten und halbstündlich die Klemmenspannung messen), ob unsere Tabelle noch mit der Charakteristik des Akkus übereinstimmt. Treten Abweichungen auf, korrigieren wir die Tabelle entsprechend.

Wir bauen ein Ladegerät

Damit unsere Akkumulatoren vorschriftsmäßig gepflegt werden, bauen wir als nächstes ein Ladegerät. Dabei stellen wir folgende Forderungen: Es sollen alle gebräuchlichen NK-Akkus für die Fernsteuergeräte, aber auch die Fahrakkus für das Motorschiffsmodell geladen werden können. Deshalb benötigen wir für jeden Akkutyp eine bestimmte Ladespannung und einen bestimmten Ladestrom. Ferner soll die gleichzeitige Ladung mehrerer Kleinakkus möglich sein.

Die Schaltung des Ladegerätes ist aus Bild 29 ersichtlich. Wir erkennen, daß die Akkus in Reihe

mit Vorwiderständen an den Gleichrichter angeschlossen werden. Durch entsprechende Dimensionierung dieser Vorwiderstände werden die erforderlichen Ladeströme eingestellt. Aus den Behandlungsvorschriften für NK-Akkus wissen wir, daß der Anfangsladestrom maximal $0,55 I_5$ betragen und bei Ladeschluß $0,5 I_5$ auf keinen Fall überschreiten darf. Das Erreichen der Ladeschlußspannung (1,5 V je Zelle) kontrollieren wir mit einem zum Akku parallelgeschalteten Vielfachmesser. Die Vorwiderstände berechnen wir nach der Formel

$$R_V = \frac{U_A - U_{Lmin}}{I_N}$$

Hierin bedeuten

- R_V Vorwiderstand,
- U_A Klemmenspannung des Ladegerätes,
- U_{Lmin} Anfangsladespannung,
- I_N Nennentladestrom.

Für die Ladung eines 12-V-Fahrakkus mit 250 mA erhalten wir

$$U_A = 25 V, \quad U_{Lmin} = 11 V, \quad I_N = 250 mA$$

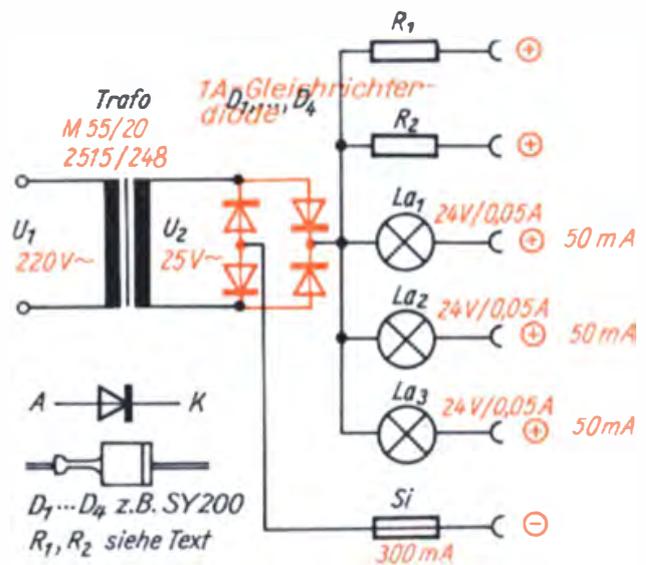
$$R_V = \frac{25 V - 11 V}{250 mA} = \frac{14 V}{250 mA} = 56 \Omega.$$

Die Verlustleistung beträgt im Vorwiderstand

$$P_V = (U_A - U_{Lmin}) I_N = 14 V \cdot 250 mA = 3,5 W.$$

Wir wählen einen Widerstand der Größe

Bild 29. Schaltbild des Ladegerätes



56 Ω /5 W. Während wir nun noch für den Ladebereich 6 V/250 mA den Vorwiderstand selbst berechnen, werden wir für die drei Ladebereiche 50-mA-Glühlampen 24 V/0,05 A (Telefonstecklampen) als Vorwiderstände nehmen. Das hat folgende Gründe und Vorteile:

1. Wir können beliebig Akkus mit der Klemmenspannung 1,2...12 V und annähernd konstantem Strom von 50 mA laden.
2. Alle drei Ladebereiche sind untereinander austauschbar.
3. Die Ladebereiche sind kurzschlußfest.

Wenn wir vom Fernsteuerausflug heimkehren, bestimmen wir mit dem Akkuprüfer die einzuladende Kapazität bzw. die Ladezeit und schließen Empfänger- sowie Senderakku je an eine Ladebuchse an. Das Aufleuchten der Lampen ist gleichzeitig eine gute Kontrolle für den Ladevorgang. Beim Laden wird der Pluspol des Akkus an den Pluspol des Ladegerätes und der Minuspol des Akkus an den Minuspol des Ladegerätes geschaltet. Bei der ersten Ladung kontrollieren wir die Höhe des Ladestromes.

Nun noch ein paar Bemerkungen zum Aufbau. Der Transformator hat die Daten $U_1 = 220$ V, $U_2 = 25$ V und $I_2 = 250$ mA. Sollten wir ihn nicht käuflich erwerben können oder keine Werkstatt finden, die ihn herstellt, wickeln wir ihn selbst. Hinweise dazu werden in dem Buch *König: Rundfunk und Fernsehen selbst erlebt* aus dem URANIA-Verlag Leipzig · Jena · Berlin gegeben.

Die Leiterplatte für den Gleichrichter stellen wir wieder in der Ritztechnik her (Bild 30). Für die im Bild 29 angegebenen Ladebereiche sind die Werte der Vorwiderstände in die Schaltung eingetragen. Der Aufbau des Gerätes selbst ist denkbar einfach gehalten und aus Bild 31 ersichtlich. Außer den erwähnten Bauelementen wurden noch eine Lötösenleiste für die Vorwiderstände, drei Lampenfassungen und Antennenbuchsen für die Ausgänge verwendet. Die Sicherung (250 mA) schützt Trafo und Gleichrichter vor Überlastung. Alle Teile sind auf einen Blechwinkel aus 1,5 mm Aluminiumblech montiert. Der Aufbau richtet sich wesentlich nach den vorhandenen Materialien, deshalb wurde hier auf Detailzeichnungen verzichtet.

Da das Ladegerät mit Netzwechselspannung (220 V) betrieben wird, müssen die geltenden

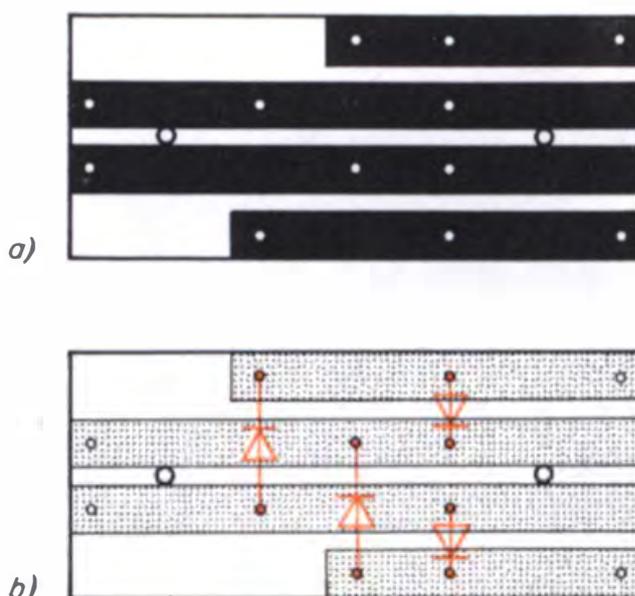
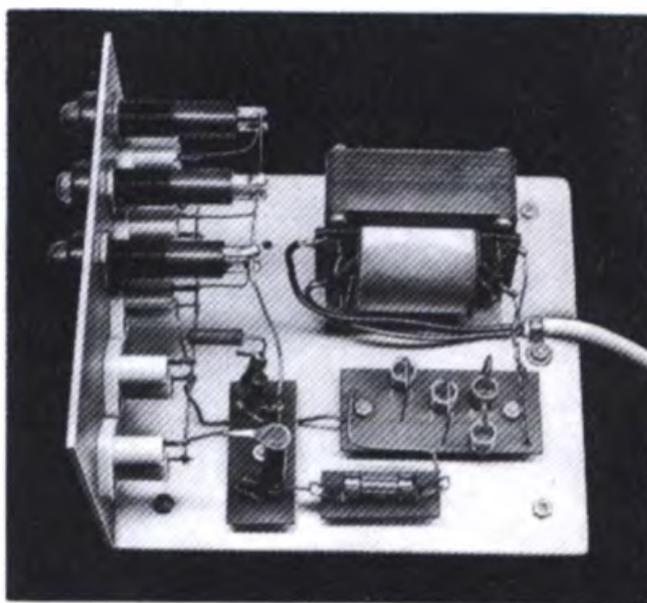


Bild 30. Ladegerät: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan

Sicherheitsvorschriften streng eingehalten werden. Alle netzspannungsführenden Leitungen sind gut isoliert und berührungssicher (Ladegerät in ein Gehäuse einbauen!) zu verlegen. Das fertige Gerät stellen wir einem Elektrofachmann zur Abnahme vor. Er überprüft die sachgemäße Ausführung unserer Arbeit und die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen. Diese Inanspruchnahme eines Fachmannes ist nur beim Aufbau des Ladegerätes erforderlich. Alle anderen selbstgebauten Geräte arbeiten ganz ohne

Bild 31. Ansicht des Ladegerätes ohne Gehäuse



Spannungsquelle oder mit Spannungen, die unter der Grenze der zulässigen Berührungsspannung von 42 V liegen.

Bleibe zum Schluß unserer Betrachtungen noch die Frage zu beantworten, welche Elementart wir für welchen Zweck verwenden. Generell läßt sich dazu kaum eine Antwort geben, da viele Faktoren den Einsatz beeinflussen. Für eine Fernsteueranlage können die genannten Arten der Stromversorgung verwendet werden. Die zunächst billigste Lösung scheint die Ausrüstung mit Trockenelementen zu sein. Für erste Experimente und seltenen Fernsteuerbetrieb reichen sie auch vollkommen aus (Sender $10 \times R6$ und Empfänger $4 \times R6$). Bei häufigerem Betrieb wird man zu aufladbaren Zellen greifen. Wenn wir die Fernsteueranlage wöchentlich benutzen, so sollten wir unbedingt die wartungsarmen NK-Akkus wählen. Sie sind auf die Dauer die billigste Lösung, da sie mehrere Jahre benutzt werden können. Zudem kann ein Digitalempfänger mit mehr als zwei Servos wegen des erforderlichen geringen Innenwiderstandes nur mit NK-Akkus betrieben werden.

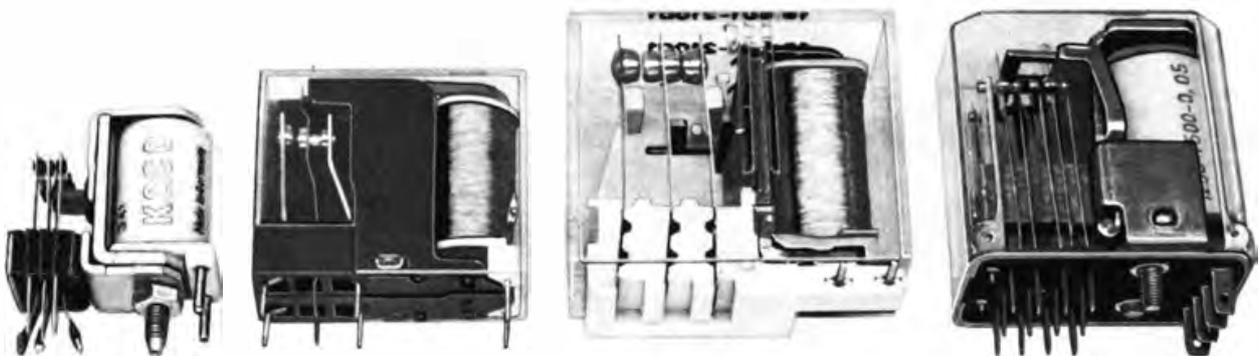
Das Relais ist ein elektromechanischer Schalter

Das Relais ist das erste elektromechanische Bauelement, das wir kennenlernen. Im Zeitalter vollelektronischer Schaltungen werden die Relais auch in der Fernsteuertechnik immer mehr

durch den Transistor verdrängt. Bei bestimmten Anwendungen sind sie aber wegen ihrer vorteilhaften Eigenschaften nicht entbehrlich. Aus der Vielfalt der bisher entwickelten Relaisarten seien die handelsüblichen *Kleinrelais* herausgegriffen (Bild 32). Sie werden mit hoher Präzision hergestellt und garantieren die für die Fernsteuerung erforderliche Betriebssicherheit. Kleinrelais können in einer beliebigen Lage eingebaut werden und sind weitgehend erschütterungsunempfindlich.

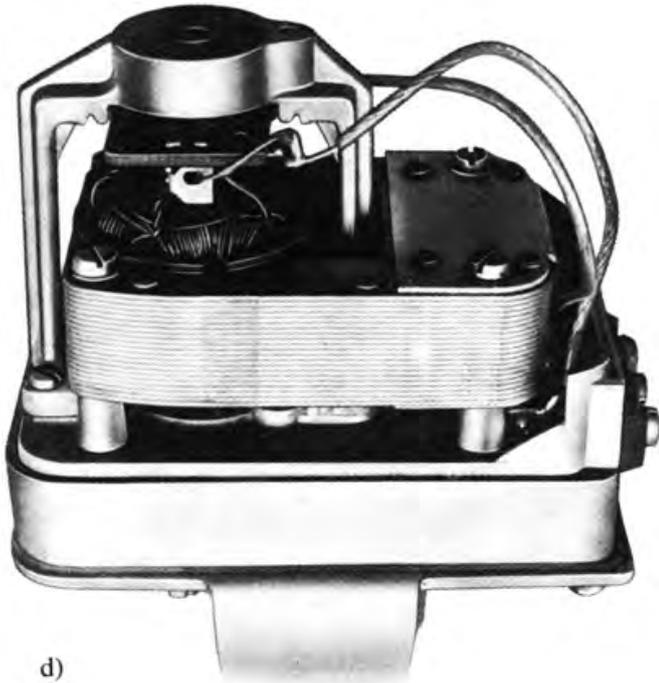
Doch nun einige Worte zur Funktion und Verwendung: Ein Relais ist ein *elektromechanischer Schalter*. Es wird durch einen elektrischen Strom, den *Steuerstrom*, betätigt und ermöglicht die Signalübertragung von einem Stromkreis auf einen anderen oder mehrere andere. Sein großer Vorteil besteht darin, daß wir mit kleinen Steuerströmen (von einigen mA) wesentlich größere Ströme (1 A und mehr) schalten können. Für den Aufbau der Fernsteueranlage kann kein bestimmter Relais typ angegeben werden, da eine große Anzahl geeigneter Relais angeboten wird und sich Bezeichnungen und Werte im Laufe der Zeit schnell ändern. Beim Kauf achten wir auf die Nennspannung. Für unsere Zwecke benötigen wir Kleinrelais mit der Nennspannung 6 V (auch 4 V geeignet). Gesonderte Hinweise erfolgen bei den einzelnen Geräten.

Bild 32. Ausführungsformen von Kleinrelais, die für die Modellfernsteuerung geeignet sind



Die auf die Schaukel wirkende Kraft ist am größten, wenn die Richtungen der drei Größen F , B und I senkrecht aufeinander stehen.

Beim Elektromotor wird nun aus der Schaukelbewegung des Leiters eine fortlaufende *Drehbewegung* gemacht. Dazu wandelt man die Schaukel in eine drehbar gelagerte Drahtwindung um, deren beide Enden an je eine Hälfte eines



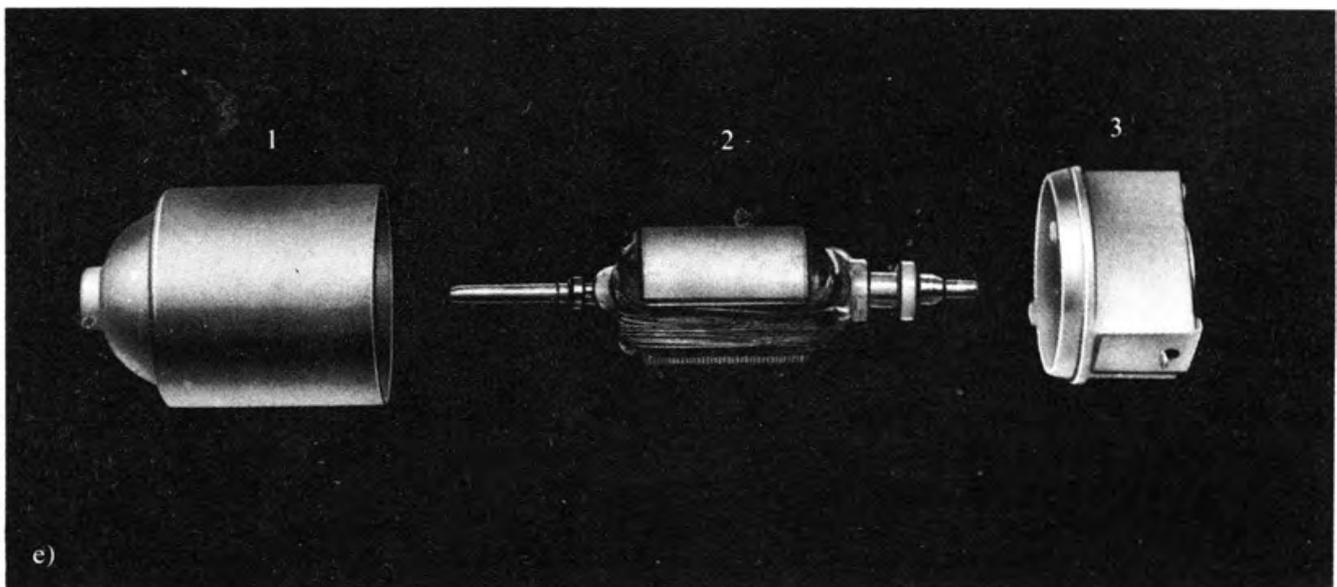
d)

d) geöffneter Scheibenwischermotor,
e) Einzelteile eines Kleinstmotors (1 – Stator mit eingeklebtem Dauermagnet, 2 – Anker mit Kollektor, 3 – Bürstenbrücke mit Kohlebürsten)

geteilten Stromabnehmers (als *Stromwender*, *Kollektor* oder *Kommutator* bezeichnet) angeschlossen werden (Bild 35). Die Stromzuführung bzw. -abnahme erfolgte früher über Drahtbürsten, heute werden Kohlebürsten verwendet, die aus einem Gemisch von Graphit und Kupferpulver bestehen. Die Bezeichnung des Stromabnehmers als Kommutator oder Stromwender weist auf seine zweite Funktion hin, nämlich den Strom zu wenden. Hat sich z. B. die obere Windungshälfte infolge der Kraftwirkung aus dem Feld herausbewegt, wäre damit der Antrieb für die Drehbewegung beendet. Infolge der Trägheit wird sich aber die zunächst unter dem Nordpol befindliche Windungshälfte zum Südpol hinbewegen. Blicke die alte Stromrichtung erhalten, erfolgte hier eine Abstoßung entgegen der ursprünglichen Drehrichtung. Soll die Drehbewegung aber fortgesetzt werden, muß die Stromrichtung in der Windungshälfte umgekehrt (gewendet) werden. Das übernimmt der Stromwender (Kommutator). Analoge Überlegungen gelten auch für die andere Windungshälfte. Da der Kommutator die Stromrichtung jeweils nach einer Drehung der Drahtwindung um 180° umkehrt, entsteht so eine fortlaufende Drehbewegung.

Ziel ist es, mit möglichst hohem Wirkungsgrad eine Kraft bzw. ein Drehmoment an der Welle zu erzeugen. Durch die Umformung der Gleichung $F = B \cdot I \cdot l$ erhalten wir die Gleichung

$$M = c_1 \cdot \Phi \cdot I.$$



e)

Der Elektromotor wandelt elektrische in mechanische Energie um

Elektromotoren brauchen wir für den Antrieb von Ruder- oder Stellmaschinen im Modell und für den Modellantrieb (z. B. im Automodell und im Motorboot). Entsprechend den unterschiedlichen Aufgaben sind auch die Bauformen der *Elektrokleinmotoren* (Bild 33) vielfältig, die wir in der Modellbaupraxis benötigen. Ehe wir aber auf ihre Verwendung näher eingehen, wollen wir die physikalische Wirkungsweise und das Betriebsverhalten dieses elektromechanischen Bauelements kennenlernen.

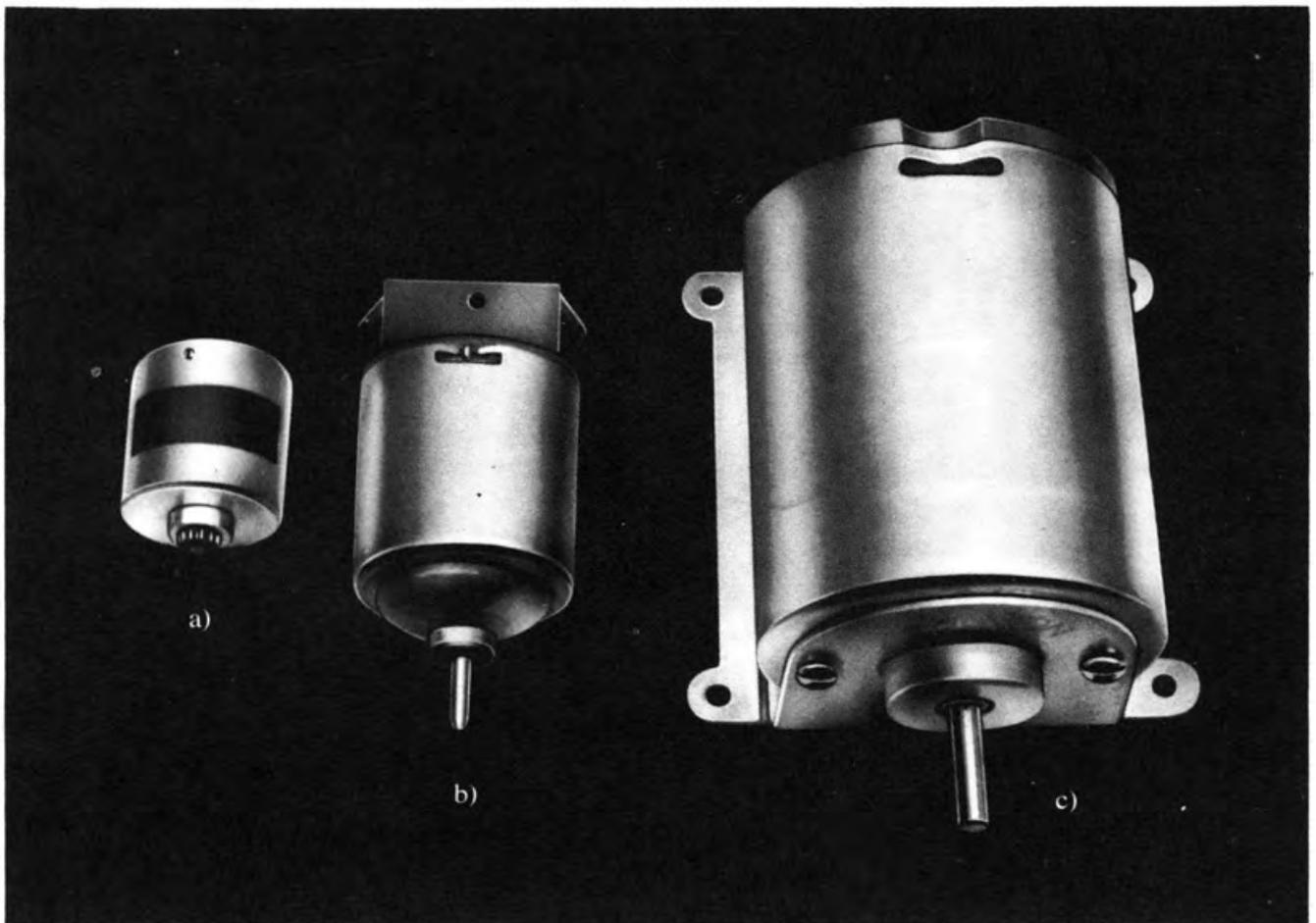
Bild 33. Ausführungsformen von Elektromotoren: a) Servomotor (2,4 V), b) Kleinstmotor 3040 (3 V/4,5 V), c) Kleinmotor,

An den Anfang unserer Betrachtungen stellen wir ein einfaches Experiment. Wir bringen nach Bild 34a eine *Schaukel* aus kräftigem Kupferdraht (2 mm Durchmesser) so an, daß sich der waagerechte Schenkel im Feld eines *Dauermagneten* befindet. Lassen wir durch die Schaukel kurzzeitig einen kräftigen Gleichstrom (aus einem Motorradakku) fließen, so bewegt sie sich senkrecht zu den Magnetfeldlinien. Zur Erläuterung des Sachverhaltes dient das Bild 34b. Links sind die Magnetfelder des Dauermagneten und des stromdurchflossenen Leiters dargestellt. Beide Felder überlagern sich zu einem gemeinsamen Feld (rechtes Bild). Infolge der Überlagerung der Feldlinien wird eine Kraft F auf den stromdurchflossenen Leiter ausgeübt:

$$F = B \cdot I \cdot l.$$

Hierin bedeuten

F Kraft,
 B magnetische Induktion $\left(B = \frac{\Phi}{A}\right)$,
 I fließender Strom,
 l Leiterlänge im Magnetfeld.



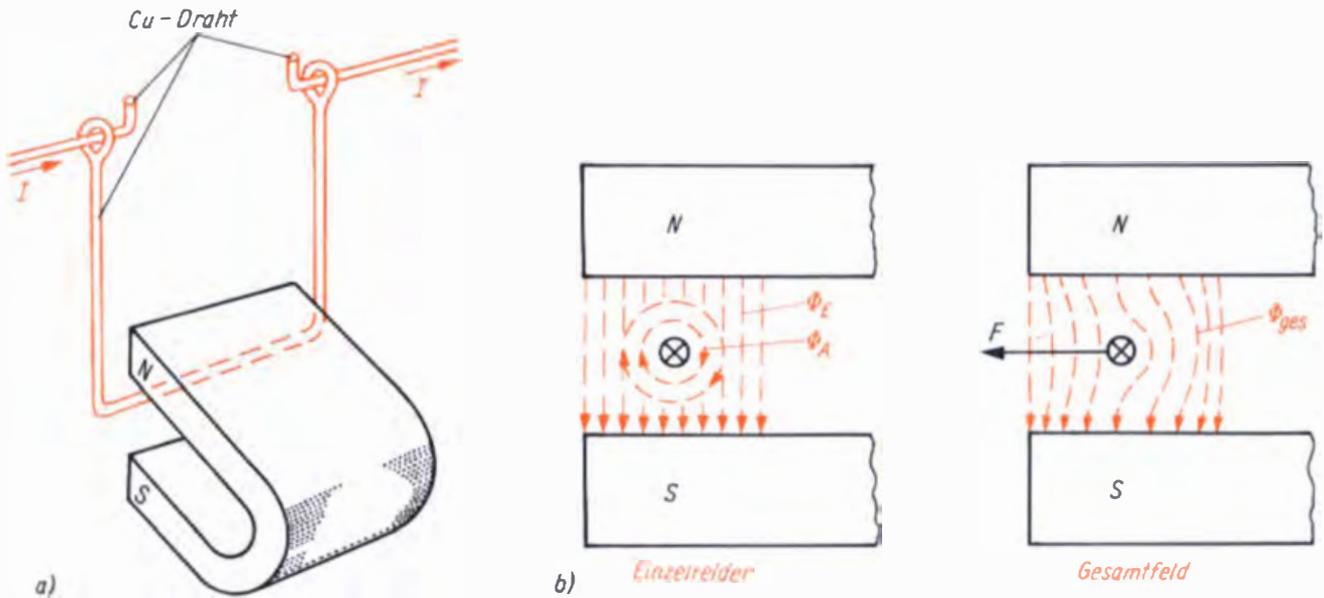
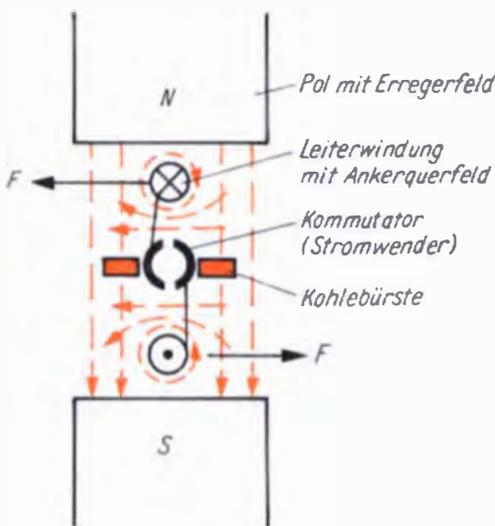


Bild 34. Entstehung der Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld: a) Experimentalaufbau, b) physikalische Wirkungsweise

Sie beschreibt uns ausreichend das Verhalten des Elektromotors und seiner physikalischen Parameter, denen wir in den folgenden Überlegungen zum Aufbau des Elektromotors wieder begegnen.

Im Bild 36 sehen wir schematische Darstellungen von zwei Kleinmotoren. Die Schemata sollen uns helfen, den Aufbau der Kleinmotoren besser zu verstehen. Um nach der oben genannten Gleichung ein Drehmoment M erzeugen

Bild 35. Schematische Darstellung des Elektromotors



zu können, ist ein *Fluß* (Φ) bestimmter Größe erforderlich. Bei Kleinmotoren erzeugt man diesen Fluß durch einen kräftigen *Dauermagnet* (auch als Permanentmagnet bezeichnet) aus Sinterwerkstoff. Wird der Motor für höhere mechanische Leistungen ausgelegt, so ist ein stärkerer Magnetfluß erforderlich, der durch eine *Erregerspule* erzeugt wird. Für Modellantriebe und Stellmotoren werden wir möglichst Kleinmotoren mit Dauermagnet verwenden, da sie keine zusätzliche Erregerleistung erfordern. Damit sich nun der Fluß Φ zur Erzeugung des Drehmoments M gut ausbreiten kann, wird ein möglichst geschlossener *magnetischer Kreis* verwendet, der dem Fluß einen geringen Widerstand entgegensetzt. Dieser Kreis besteht aus dem *Joch*, den *Polschuhen* und dem *Anker*. Da Luft im Vergleich zu Eisen einen hohen magnetischen Widerstand hat, macht man den *Luftspalt* zwischen Anker und Polschuhen so klein wie möglich. Bei Kleinmotoren (Bild 33e) wird das Erregerfeld durch einen Dauermagnet erzeugt, der den Anker ringförmig umschließt. Aus den eben erläuterten Gründen ist die *Ankerwicklung*, im Bild 35 bestand sie nur aus einer Windung, ebenfalls auf einen Eisenkern, den Anker, gewickelt. Bei Kleinmotoren wird dieser als *Doppel-T-Läufer* oder *Dreifach-T-Läufer*, bei Kleinmotoren mit größeren Leistungen (*Scheibenwischermotor*) als *Trommelanker* ausgebildet. Daraus geht auch hervor, daß wir am Eisenkreis eines Elektromotors, etwa zum Zweck der Masseinsparung, *keine Veränderungen*

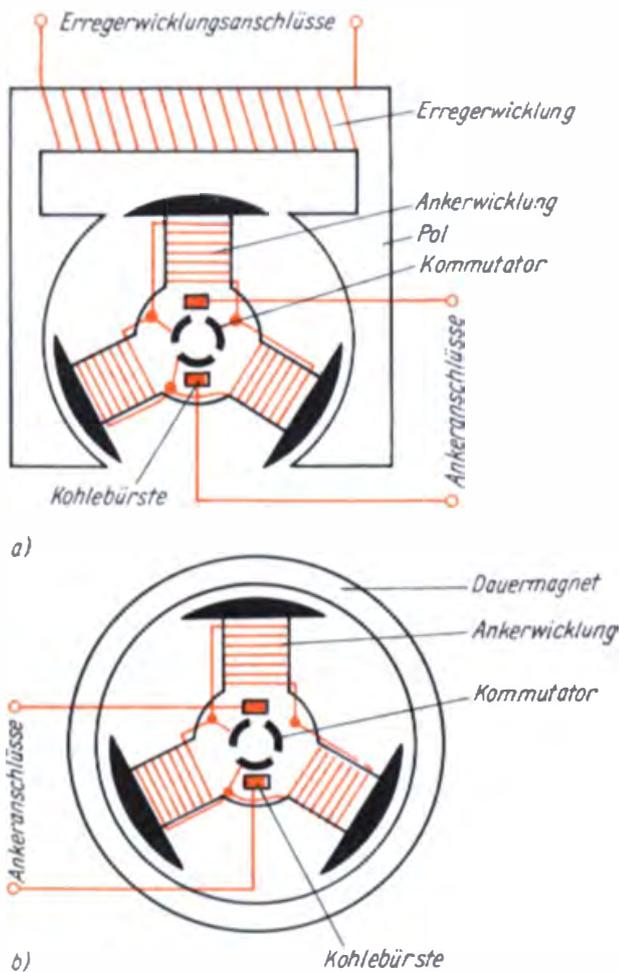


Bild 36. Schematische Darstellung von Kleinmotoren: a) mit Erregerspule, b) mit Dauermagneterregung

gen vornehmen sollten, es sei denn, wir haben eine Möglichkeit, den Luftspalt zu verringern.

Betrachten wir noch einmal Bild 35, so erkennen wir zwei Magnetfelder, das *Erregerfeld* des Dauermagneten und das *Ankerfeld*. Die Stärke des Ankerfeldes, auch als *Querfeld* bezeichnet, ist vom Strom in den Ankerspulen abhängig. Von der Größe beider Felder hängt letztlich auch das Drehmoment ab. Wird nun bei starker Belastung das Ankerfeld infolge großer fließender Ströme ebenfalls stark, so kommt es zu einer Rückwirkung des Ankerfeldes auf das Erregerfeld. Diese Ankerrückwirkung kann bei hohen Motorbelastungen so stark werden, daß eine Verzerrung und Schwächung des Erregerfeldes eintritt.

Um Elektromotoren zweckentsprechend einzusetzen, müssen wir noch einiges über ihr *Be-*

triebsverhalten erfahren, für das wir am besten ihre Kennlinien heranziehen (Bild 37). Den folgenden Betrachtungen legen wir das Kennlinienfeld des Kleinmotors 3040 zugrunde. Dieser Motor ist für die Nennspannung 3 V ausgelegt. Im Bild sind auch die Kennlinien für die Betriebsspannung 4,5 V enthalten. Aus dem Vergleich der Betriebsfälle können wir gewisse *Schlußfolgerungen* für den Betrieb von Kleinmotoren mit *Überspannung* ableiten. Die interessierenden Motorparameter Strom I , Drehzahl n , abgegebene Leistung an der Welle P_{ab} und Wirkungsgrad η sind in Abhängigkeit vom Drehmoment M , also der Belastung, dargestellt. Wir *sehen* zunächst, daß die Drehzahl vom Leerlaufwert $n_0 = 3800 \text{ min}^{-1}$ linear auf den Wert $n_n = 1800 \text{ min}^{-1}$ absinkt. Wird der Motor mit *Überspannung* betrieben, zeigt die Drehzahl ein analoges Verhalten, allerdings ist sie dann wesentlich größer. Der Strom I steigt für beide Betriebsfälle linear mit der Belastung, wobei nur geringe Unterschiede in den Werten vorhanden sind. Interessant sind für den Modellbauer die *abgegebene Leistung* und der *Wirkungsgrad* eines Motors. Aus den Kennlinien lesen wir ab, daß die abgegebene Leistung ein Maximum hat. Erhöht man die Belastung des Motors über dieses Leistungsmaximum hinaus, so arbeitet er unwirtschaftlich, da dann P_{ab} trotz steigender zugeführter elektrischer Leistung wieder abnimmt. Wir werden den Motor im Modell also möglichst mit dem Drehmoment belasten, das im Diagramm der maximal abgegebenen Leistung entspricht. Wichtig ist das vor allem bei Schiffsantrieben, für die die Schiffsschraube entsprechend ausgesucht werden muß. Dem Diagramm bzw. dem Datenblatt des Herstellers entnehmen wir den zur maximalen Leistung benötigten *Betriebsstrom*.

Der Vergleich der Kurven von P_{ab} und η zeigt uns, daß man in gewissen Grenzen eine größere abgegebene Leistung bei vertretbarem Wirkungsgrad durch den Betrieb des Motors mit *Überspannung* erreicht. Man kann aber die Betriebsspannung nicht beliebig steigern, da dann infolge der Ankerrückwirkung starkes Bürstenfeuer und somit ein starker Verschleiß von Bürsten und Kommutator auftreten. Sind für den Antrieb eines Modellbootes höhere Leistungen erforderlich, so hilft nur der Einbau von zwei

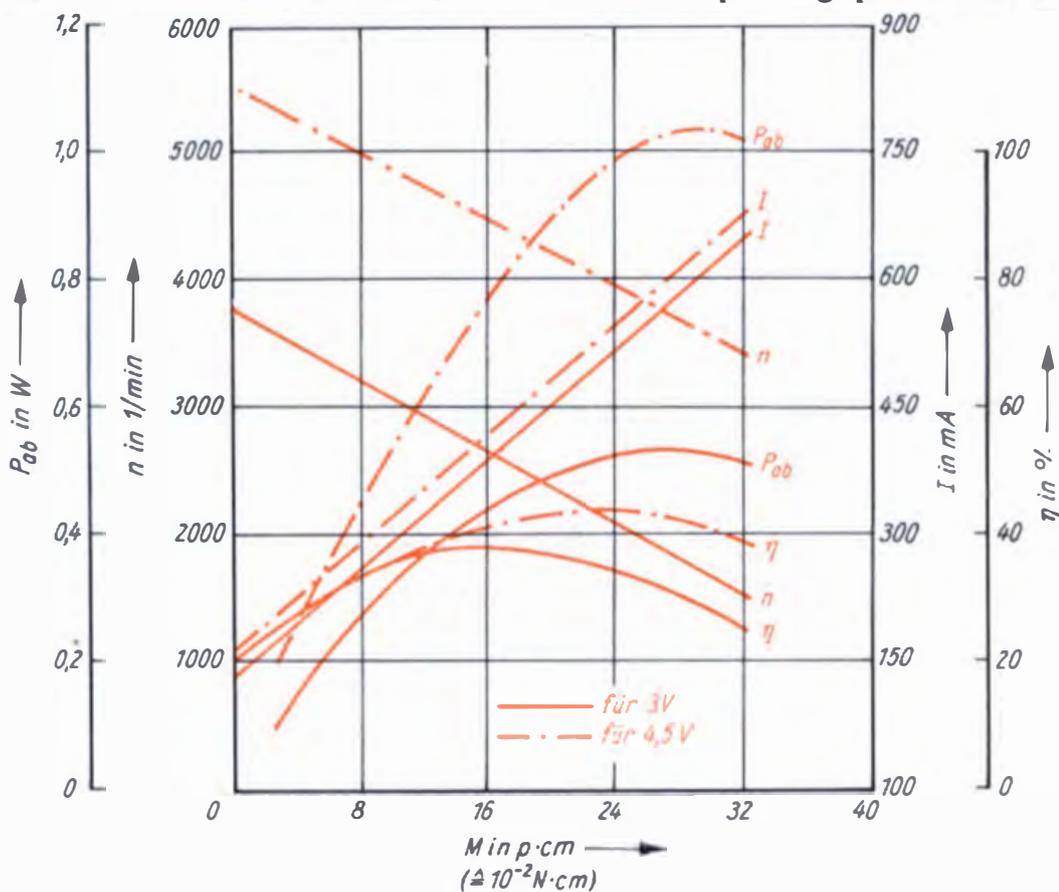
gleichen Motoren oder eines stärkeren Motors. Für Boote bis 50 cm Länge erzielt man mit einem Kleinstmotor vorbildgetreue Geschwindigkeiten.

Wie aus den Erläuterungen zu Bild 35 hervorgeht, dreht sich der Anker eines Elektromotors bei gegebenem Strom- und Magnetfluß in eine ganz bestimmte Richtung. Wollen wir die Drehrichtung des Motors ändern, müssen wir nur die Stromrichtung *oder* die Magnetflußrichtung umkehren. Würden wir beides gleichzeitig umpolen, bliebe die alte Drehrichtung erhalten. Beim permanenterregten Motor wird die Drehrichtungsumkehr also einfach durch das Umpolen der Klemmenspannung vorgenommen. Beim Elektromotor mit Erregerspule muß man deren **Anschlüsse** oder aber die Ankeranschlüsse vertauschen.

Der Elektromotor wird entstört

Diesen Abschnitt wollen wir mit einigen Hinweisen zur Entstörung von Elektromotoren abschließen. Betrachten wir den laufenden und leicht belasteten Kleinstmotor (mit den Fingern abbremsten) einmal etwas genauer, so werden wir feststellen, daß zwischen Kommutator und Kohlebürsten winzige Schaltfunken auftreten, die als Bürstenfeuer bezeichnet werden. Sie sind auf die Induktivität der Ankerwicklung des Motors zurückzuführen. Mit dem Bürstenfeuer wird ein breites Spektrum von Störfrequenzen erzeugt und über die angeschlossenen Leitungen abgestrahlt. Stellen wir fest, daß die Empfangsanlage durch die Störstrahlung von Elektromotoren (Rudermaschinen- oder Antriebsmotoren) beeinflusst wird, so gilt für uns der Grundsatz: Die Störung ist an der Quelle zu beseitigen, denn Störungen werden durch eine gemeinsame Spannungsquelle direkt und ungeschwächt übertragen. Daher sehen wir als erstes für die Empfangsanlage (Empfänger und Rudermaschine) und für den Antriebsmotor gesonderte Spannungsquellen vor. Des weiteren wird die

Bild 37. Motorkennlinien des Kleinstmotors 3040



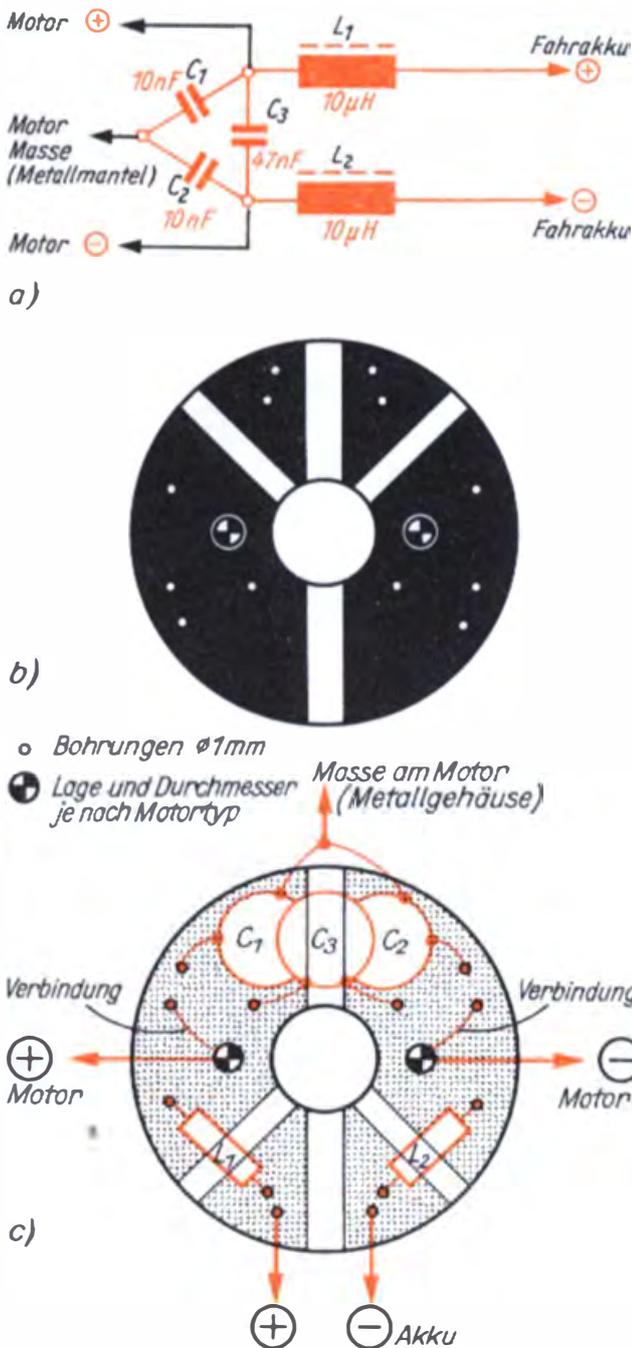


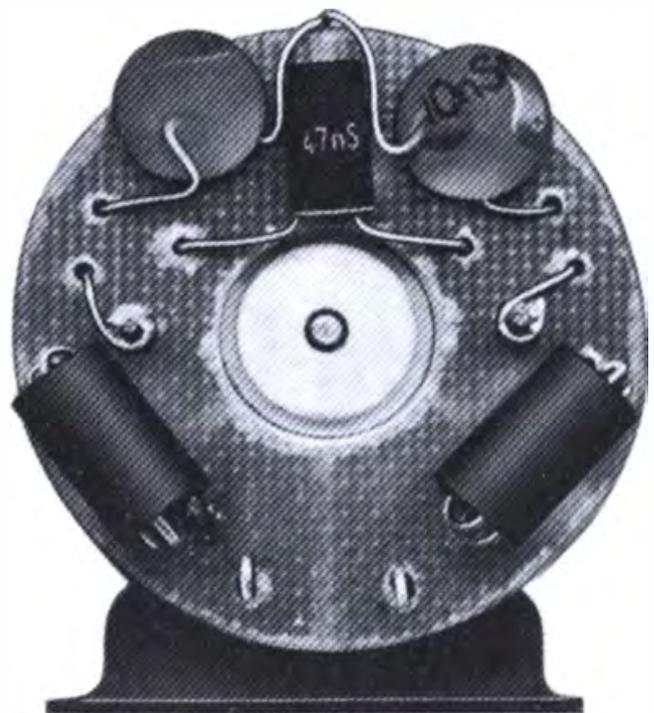
Bild 38. Entstörfilter: a) Schaltbild, b) Leitungsführung, c) Bestückungsplan

gesamte Empfangsanlage (Antenne, Empfänger, Rudermaschine und Empfängerspannungsquelle) entsprechend den räumlichen Gegebenheiten im Modell so weit wie möglich von der Antriebsanlage (Antriebsmotor, Leitungen und Antriebsspannungsquellen) entfernt untergebracht. Außerdem werden wir nur gut verarbeitete Motoren für die verschiedenen Antriebs-

zwecke auswählen. Motoren minderer Qualität neigen zu starkem Bürstenfeuer und stören damit erheblich.

Helfen alle diese Maßnahmen nicht, muß der Motor auf andere Art und Weise entstört werden. Dabei beachten wir, daß Motoren mit Metallmantel leichter zu entstören sind als solche mit vollständigem Plastikgehäuse. In den meisten Fällen führt folgende Schaltung zum Erfolg: Nach Bild 38a werden die Kollektoranschlüsse des Motors durch einen Keramikkondensator (47nF) überbrückt und gleichzeitig durch zwei weitere Keramikkondensatoren (10nF) mit Masse (Metallmantel) verbunden. Die Störstrahlung wird gewissermaßen kurzgeschlossen. Um die dann noch vorhandenen Störstrahlungsreste von den Zuleitungen fernzuhalten, wird die Spannung über Drosseln zugeführt, die für den Nennstrom belastbar sein müssen. Dabei sind alle Zuleitungen zum Motor so kurz wie möglich zu halten. Diese gesamte Entstörschaltung wird auch als *Entstörfilter* bezeichnet. Das Entstörfilter wird direkt auf einem Stück Platinenmaterial (Bild 38b) montiert und mit den Motoranschlüssen verlötet. Die Platine für das Entstörfilter stellen wir wieder in Ritztechnik her. So ist durch kürzestmögliche Leitungen auch

Bild 39. Musteraufbau des Entstörfilters



die beste Entstörungswirkung gewährleistet. Für Kleinstmotoren mit Nennströmen bis 1 A können als Drosseln die handelsüblichen UKW-Drosseln ($10\mu\text{H}$ oder $20\mu\text{H}$) verwendet werden. Bei Nennströmen $> 1\text{ A}$ stellt man die Drossel aus einem Ferritkern mit vier oder sechs Längsbohrungen selbst her, indem man Kupferlackdraht ($\text{CuL } 0,5\dots 0,7$) mehrfach durch die Bohrungen fädelt. Der Mustersaufbau des Entstörfilters ist im Bild 39 dargestellt.

Wird die Fernsteueranlage nun immer noch gestört, so können wir unter Umständen die Störungen dadurch mindern, daß wir die Last verringern (Schiffsschraube mit kleinerem Durchmesser bzw. geringerer Steigung verwenden) und den Motor nicht mit Überspannung betreiben.

Dioden als Gleichrichter – wir lernen die ersten Halbleiterbauelemente kennen

Die Halbleitertechnik hat in den letzten Jahren sehr große Fortschritte gemacht. Sie ermöglicht es uns, recht ökonomisch funktionssichere Fernsteueranlagen selbst zu bauen und dabei physikalische Naturgesetze praktisch zu erleben.

Aus der Vielzahl der Halbleiterbauelemente werden wir nun zwei, die Diode und den Transistor, näher kennenlernen.

Der Leitungsmechanismus im Halbleiter

Wir wollen zuerst überlegen, wie eine Halbleiterdiode funktioniert.

Zunächst zum Begriff *Halbleiter*. Stoffe mit recht unterschiedlicher Leitfähigkeit wie Kupfer (mit sehr kleinem elektrischem Widerstand als Leitungsmaterial), Kohle oder Widerstandsdraht (als Widerstandsmaterial) und die verschiedenen Plaste (mit sehr hohem elektrischem Widerstand als Isoliermaterial) sind uns bereits begegnet. Der

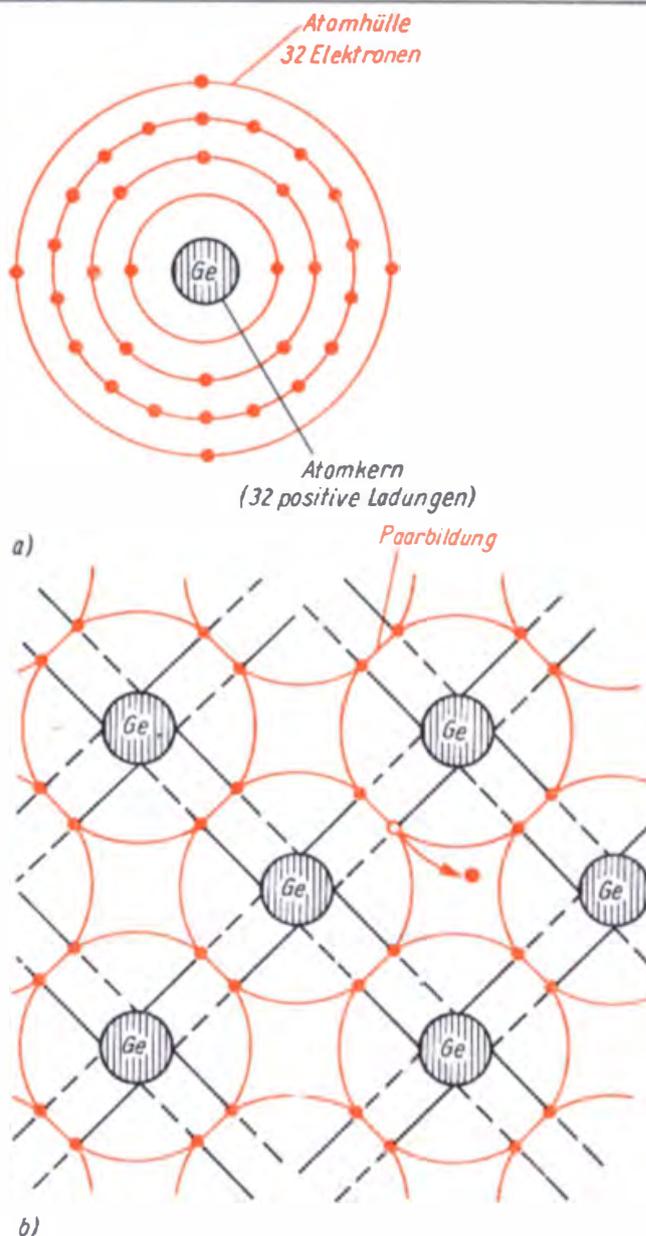


Bild 40. Germanium: a) Aufbau eines Atoms, b) Aufbau des Gitters und Mechanismus der Eigenleitung

Halbleiter nimmt eine Stellung zwischen dem Leiter und dem Isolator ein. Unter bestimmten Bedingungen verhält er sich wie ein elektrischer Leiter, unter anderen Bedingungen dagegen wie ein Isolator. Warum ist das so? Als Grundmaterial für Halbleiterdioden werden fast ausschließlich *Germanium* und *Silizium* verwendet (abgekürzt Ge und Si). Aus dem Chemie- und Physikunterricht ist uns noch der Atomaufbau bekannt. Wir wissen, daß ein Atom aus dem positiv geladenen Kern und negativ geladenen Elektronen besteht, die den Kern auf stabilen Bahnen umkreisen. Germanium hat in seiner

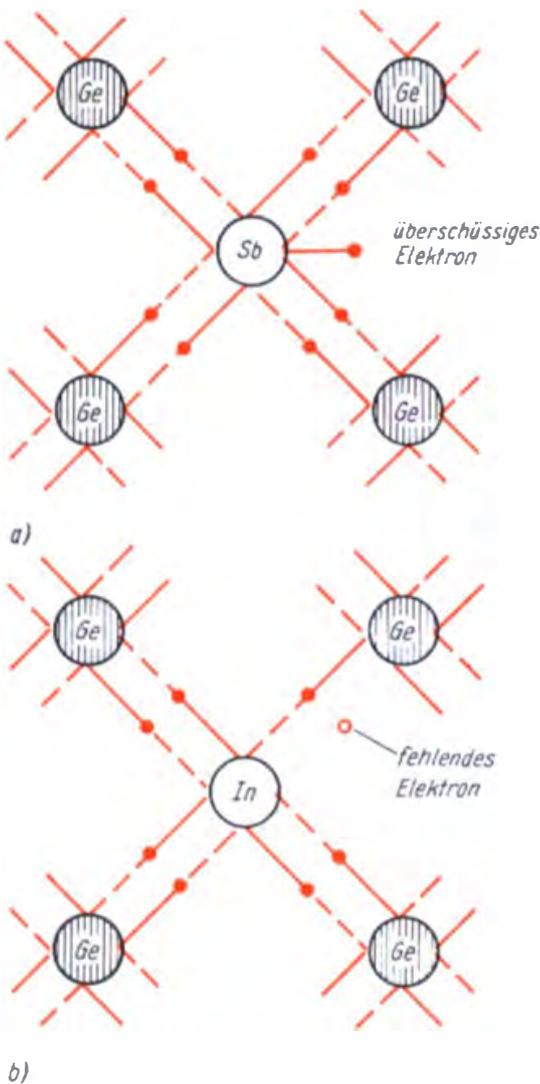
Elektronenhülle 32 Elektronen, davon vier auf der ganz äußeren Bahn (Bild 40a). Diese vier Elektronen bestimmen wesentlich sein Verhalten. Sie werden als *Valenzelektronen* bezeichnet. Das Germaniumatom ist nun bestrebt, die besonders stabile *Edelgaskonfiguration* einzunehmen, indem es noch vier Elektronen in seine äußere Elektronenhülle aufnimmt. Edelgaskonfiguration bedeutet, daß auf der äußeren Elektronenbahn immer eine ganz bestimmte Anzahl von Elektronen vorhanden ist (z. B. 2, 8, 18 usw.). Praktisch sieht das so aus, daß sich jedes Valenzelektron mit einem Valenzelektron des Nachbaratoms zu einem *Elektronenpaar* ver-

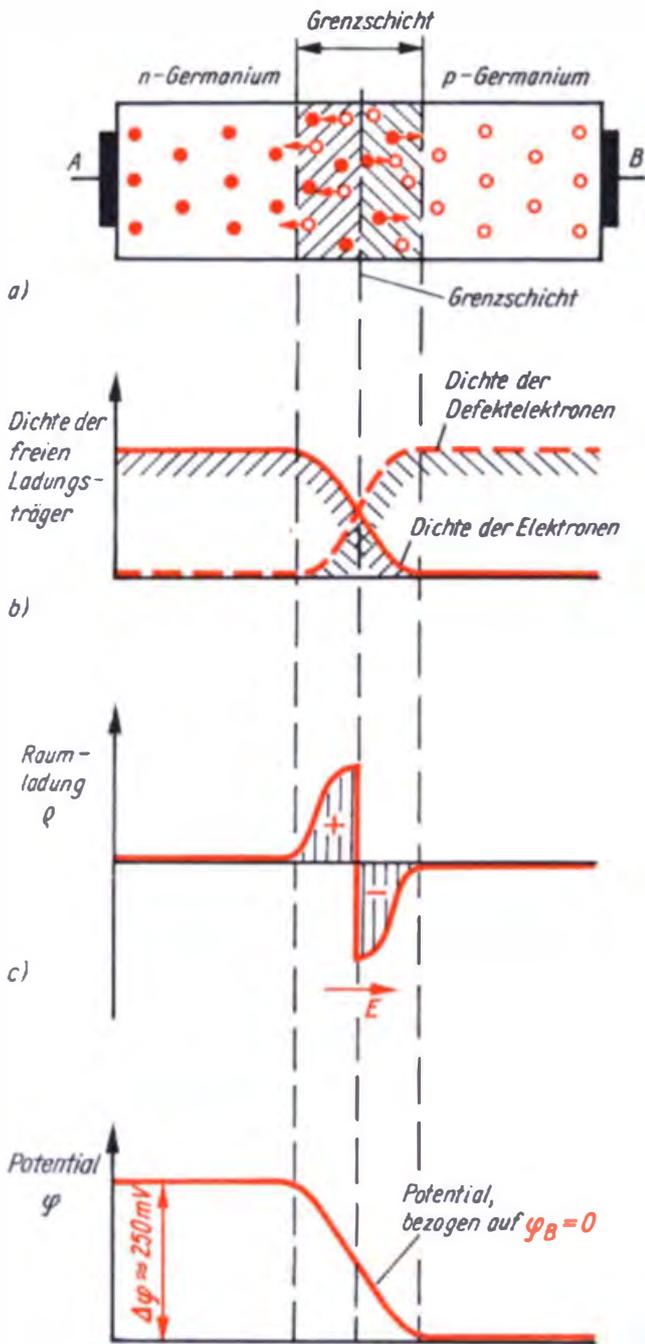
bindet. In der räumlichen Anordnung kann jedes Atom mit vier von den Nachbaratomen „geborgen“ Elektronen diesen Edelgaszustand erreichen. So entstehen die Bindungen im Germaniumkristall, die man als *Elektronenpaarbindungen* bezeichnet.

Mehr interessiert uns aber das elektrische Verhalten der Halbleiter. Wie wir im Bild 40b sehen, sind alle Elektronen der äußeren Hülle gebunden; es gibt keine freien Elektronen. Ein solcher Kristall verhält sich elektrisch wie ein Isolator. Infolge der Umgebungstemperatur führen Atome im Kristallgitter Temperaturschwingungen um ihre Ruhelage aus. Aus verschiedenen Gründen können einige Elektronen zeitweise aus ihren Bindungen gelöst und im Kristallgitter frei beweglich werden. An einer solchen Stelle, wo ein Elektron fehlt, fehlt folglich auch eine negative Ladung. Es bleibt eine positive Raumladung (auch als *Fehlstelle*, *Defektelektron* oder *Loch* bezeichnet) zurück, die nun durch ein freies Nachbaratom aufgefüllt werden kann. Damit wird das Nachbaratom positiv; das Defektelektron ist gewissermaßen gewandert. Legt man an den Kristall eine elektrische Spannung, so wandern die Elektronen zum Pluspol und die in gleicher Zahl vorhandenen Defektelektronen scheinbar zum Minuspol. Wichtig für uns ist die Erkenntnis, daß am *Leitungsvorgang* im Halbleiter gleichermaßen Elektronen als negative Ladungsträger und Defektelektronen als positive Ladungsträger beteiligt sind. Die *Eigenleitung* nimmt mit steigender Temperatur im Kristall immer mehr zu. Bei tiefen Temperaturen verhält sich Germanium wie ein Isolator, bei hohen wie ein elektrischer Leiter. Der Vorgang der Eigenleitung ist also über die Temperatur steuerbar.

Die Leitfähigkeit des Germaniums kann aber auch beeinflußt werden, indem man in das Kristallgitter *Fremdatome* als Störstellen einbaut (als *Dotierung* bezeichnet), die entweder fünf oder nur drei Valenzelektronen haben. Störstellen mit drei Valenzelektronen werden als *Akzeptoren* (Aufnehmer), mit fünf Valenzelektronen als *Donatoren* (Geber) bezeichnet. Für die Bildung der Paarbindung sind aber nur vier Valenzelektronen erforderlich. Wie wir aus Bild 41 ersehen, entstehen dadurch im Kristall Überschusselektronen oder Defektelektronen,

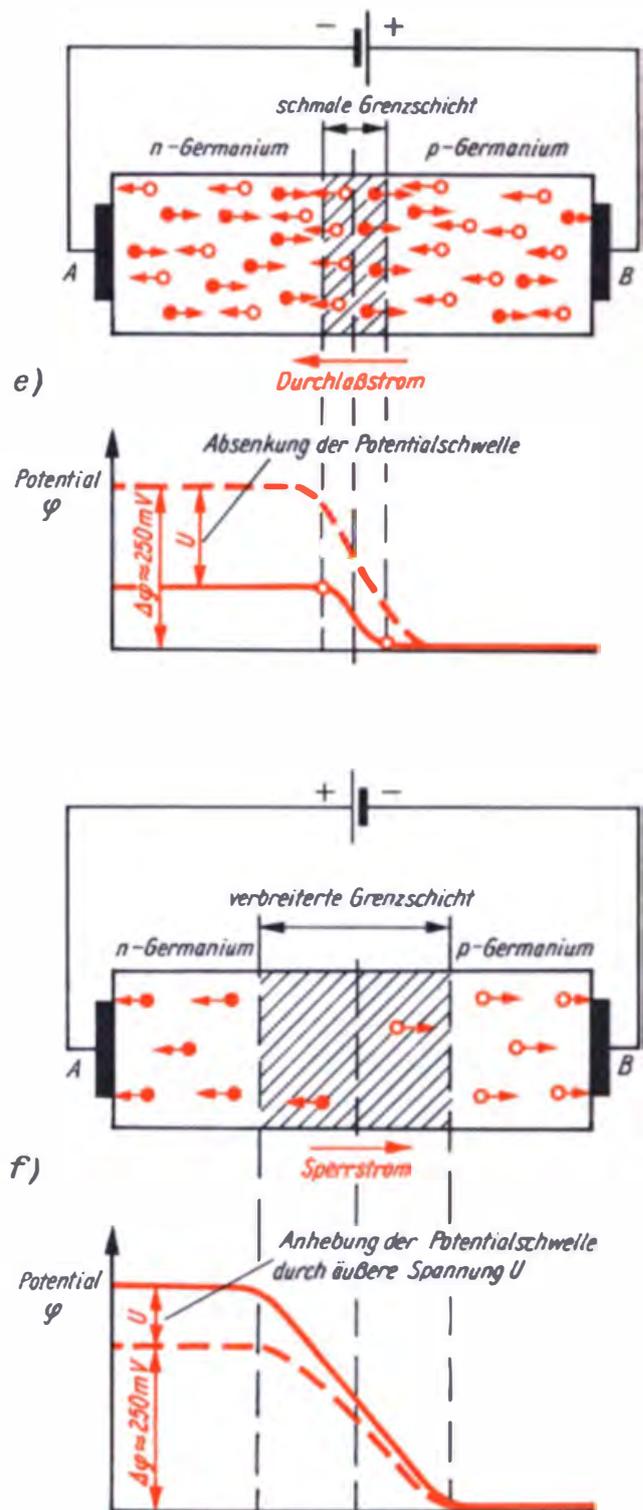
Bild 41. Entstehung der Störstellen im Germaniumgitter: a) n-leitendes Germanium, mit Antimon (Sb) dotiert, b) p-leitendes Germanium, mit Indium (In) dotiert





d) Bild 42. Physikalische Vorgänge im pn-Übergang: a) Lage der Grenzschicht, b) Verlauf der Ladungsträgerdichte, c) Verlauf der Raumladung, d) Potentialverlauf, e) angelegte Spannung in Durchlaßrichtung, f) angelegte Spannung in Sperrichtung

die schon bei Zimmertemperatur voll beweglich sind. Aus diesem Grunde nimmt die Leitfähigkeit wesentlich zu. Germanium mit Überschusselektronen bezeichnen wir als *n-Germanium*, mit Defektelektronen als *p-Germanium*. Da beim p-Germanium die Defektelektronen den Lei-



tungsvorgang bestimmen, bezeichnet man sie als *Majoritätsträger* und die Elektronen als *Minoritätsträger*. Beim n-Germanium ist es genau umgekehrt.

Wir wollen nun überlegen, welche physikalischen Vorgänge sich an der pn-Übergangsstelle

abspielen. Bilden nach Bild 42a p- und n-leitendes Germanium einen elektrischen Übergang, so entsteht eine *Grenzschicht*, in der sich die p- und n-Ladungsträger gegenseitig beeinflussen. Durch Diffusion der Ladungsträger bildet sich im n-Gebiet eine positive und im p-Gebiet eine negative Raumladung aus (Bild 42). Der Potentialunterschied zwischen n- und p-Gebiet entspricht einer Spannung, die man als *Diffusionsspannung* (bei Germanium $\approx 0,25\text{ V}$) bezeichnet. Legen wir jetzt an den Germaniumkristall eine elektrische Spannung an, wird das Gleichgewicht in der Grenzschicht gestört. Im Bild 42e ist die Spannung der Diffusionsspannung entgegengerichtet. Sie unterstützt den Ladungsträgeraustausch in der Grenzschicht. Dadurch verringert sich der Potentialunterschied, und die Grenzschicht wird sehr schmal (geringer elektrischer Widerstand). Der pn-Übergang ist in *Durchlaßrichtung* geschaltet, der Strom kann gut fließen. Vertauscht man die Polung der angelegten Spannung, so werden die Majoritätsträger aus der Grenzschicht herausgesaugt. Es entsteht eine hohe Potentialdifferenz, gegen die praktisch kein Majoritätsträgerstrom fließen kann (hoher elektrischer Widerstand). Der pn-Übergang ist in *Sperrichtung* geschaltet. Für die Minoritätsträger (freie Elektronen im p-Gebiet und freie Defekt-elektronen im n-Gebiet) gilt das eben Gesagte nicht. Die anliegende Spannung behindert deren Austausch durch die Grenzschicht nicht. Es entsteht ein Minoritätsträgerstrom, den man als *Sperrstrom* bezeichnet.

Doch zurück zum Begriff Halbleiterdiode. *Halbleiterdioden* sind Bauelemente, die aus einer (oder mehreren) Kombinationen von p- und n-Germanium (bzw. -Silizium) bestehen und in der oben beschriebenen Weise auf das Anlegen einer Spannung reagieren. Zur Verdeutlichung ihrer Wirkungsweise werden wir nun wieder ein Experiment durchführen.

Wir nehmen die Kennlinien von Dioden auf

Da Dioden, wie bereits erläutert, bei Betrieb in Durchlaßrichtung ein wesentlich anderes Verhalten zeigen, als bei Betrieb in Sperrichtung, verwenden wir dazu zwei Schaltungen. Überlegen wir zuerst, welche Eigenschaften die Meß-

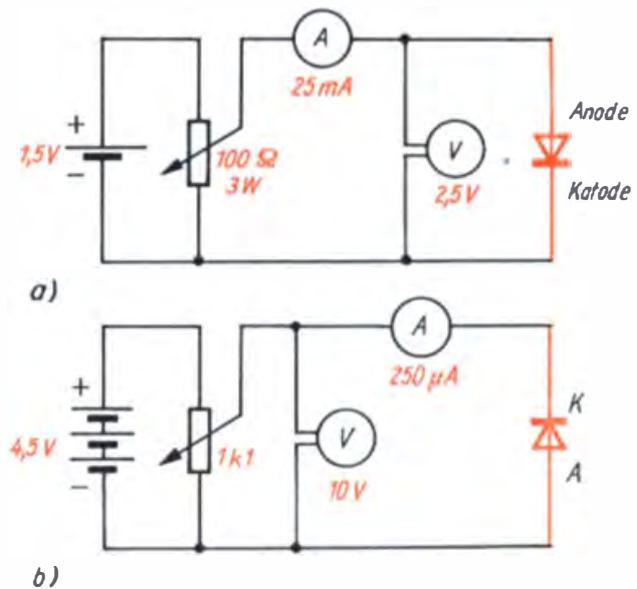


Bild 43. Schaltungen zur Aufnahme der Kennlinien von Dioden: a) in Durchlaßrichtung, b) in Sperrichtung

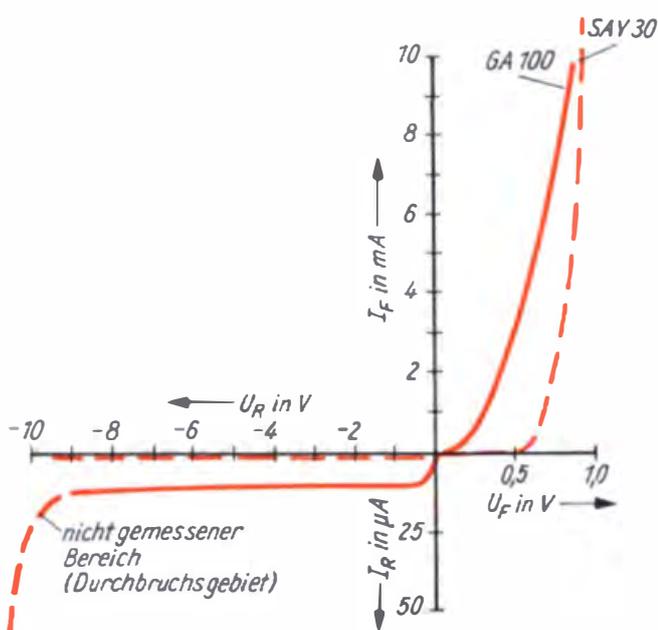
schaltungen haben. In der Schaltung zur Aufnahme der *Durchlaßkennlinie* (Bild 43a) mißt das Amperemeter die Summe von Durchlaßstrom und Meßstrom des Voltmeters. Wir bezeichnen diese Schaltung als *Stromfehlerschaltung*, da wir bei der Strommessung einen Fehler machen. Die Ungenauigkeit ist allerdings gering, denn der Strom durch das Voltmeter liegt in der Größenordnung von $50\mu\text{A}$, und der gemessene Strom beträgt $1\text{...}10\text{ mA}$. Wenn wir das Voltmeter vor das Amperemeter schalten, wird der Spannungsabfall am Amperemeter mit gemessen. Wir haben dann eine *Spannungsfehlerschaltung*. Bei Spannungen von $0,2\text{...}0,7\text{ V}$ würde aber ein größerer Meßfehler (Spannungsabfall am Amperemeter $\approx 0,2\text{ V}$) als bei der Anwendung der Stromfehlerschaltung auftreten. Vor jedem Meßvorgang ist also das Meßverfahren zweckmäßig auszuwählen. Bei der Aufnahme der *Sperrkennlinie* werden wir aus den gleichen Überlegungen heraus die Spannungsfehlerschaltung (Bild 43b) benutzen, da der Strom durch die Diode in der Größenordnung des Stromes durch das Voltmeter liegt.

Wir nehmen zunächst die Kennlinie in Durchlaßrichtung auf, indem wir die Spannungswerte so einstellen, daß die Meßpunkte für den Strom im Bereich von $0\text{...}10\text{ mA}$ liegen. Die gewonnene

Meßreihe tragen wir in ein entsprechendes Diagramm ein. Im zweiten Experiment nehmen wir die Sperrkennlinie auf. Selbst wenn die Sperrspannung ein Vielfaches der Durchlaßspannung beträgt, ist der Strom wesentlich geringer. Bei der Germaniumdiode beträgt er einige Mikroampere, und bei der Siliziumdiode ist er so klein (einige Nanoampere), daß wir ihn mit dem Vielfachmesser gar nicht messen können. Um die unterschiedlichen Ströme im Kennlinienfeld übersichtlich darstellen zu können, wählen wir verschiedene Maßstäbe für Durchlaßstrom und Sperrstrom.

In der Kennlinie (Bild 44) sehen wir unsere Überlegungen zur Wirkungsweise der Diode bestätigt. In Durchlaßrichtung fließt schon bei relativ geringer Spannung der gesamte Durchlaßstrom, bei Betrieb in Sperrichtung dagegen trotz wesentlich höherer Spannung nur ein verschwindend kleiner Sperrstrom, dessen Größe lediglich von der Eigenleitung im Kristall abhängt. Berühren wir die Diode mit den Fingern, so führt bereits die Handwärme zu einer merklichen Steigerung des Sperrstromes. Würden wir die Sperrspannung über den im Datenblatt angegebenen Maximalwert (bei der GA 100 ist $U_R = 20\text{ V}$) steigern, so stiege der Strom in Sperrichtung ebenfalls sehr stark an (gestrichelter Kennlinienteil). Das ist darauf zurückzuführen,

Bild 44. Kennlinien der Germaniumdiode GA 100 und der Siliziumdiode SA Y 30



daß infolge starker elektrischer Kräfte in der Sperrschicht Ladungsträger aus der Kristallbindung herausgerissen werden. Die Eigenleitung wächst dabei lawinenartig an. Diese Erscheinung bezeichnet man als *Spannungsdurchbruch*; sie wird bei Spezialdioden (Z-Dioden) ausgenutzt.

Temperatureinfluß und Spannungsdurchbruch sind bei den Dioden unerwünscht, da der Strom möglichst nur in einer Richtung fließen soll. Im Vergleich zu den Germaniumdioden sind bei Siliziumdioden beide Einflüsse wesentlich geringer (kleinerer Sperrstrom und Temperatureinfluß, höhere Sperrspannung). Dieses Verhalten ist auf die spezifischen Eigenschaften von Silizium als Halbleiterwerkstoff zurückzuführen. Um einen Vergleich zu haben, nehmen wir nun noch die Durchlaßkennlinie einer Siliziumdiode auf. Für die Aufnahme der Sperrkennlinie dieser Diode (Ströme im nA-Bereich) fehlen uns die Meßmittel.

In unseren Experimenten werden wir unter Umständen bei verschiedenen Dioden gleichen Typs unterschiedliche Zahlenwerte ermitteln. Das ist eine typische Eigenschaft der Halbleiterbauelemente, deren Kennwerte und Kennlinien in einem gewissen Bereich streuen. In den meisten Anwendungsfällen wird das von vornherein berücksichtigt. Für uns ist nur wichtig, daß alle einem bestimmten Diodentyp zugeordneten Exemplare einen gleichartigen Kennlinienverlauf haben und mit ihren Kennwerten im Toleranzbereich liegen.

Was wir außerdem von den Dioden wissen müssen

Aus den bisherigen Darlegungen geht hervor, welche Parameter für den Betrieb von Dioden wichtig sind. In den Datenblättern werden als wichtige *Kenndaten* angegeben:

- U_F Flußspannung (Spannung in Flußrichtung, bisher als Durchlaßrichtung bezeichnet) für bestimmte Werte des Durchlaßstromes,
- I_F Durchlaßstrom,
- U_R Sperrspannung für bestimmte Werte des Sperrstromes,
- I_R Sperrstrom.

Daneben sind noch die *Grenzdaten* wichtig, die auf keinen Fall überschritten werden dürfen:

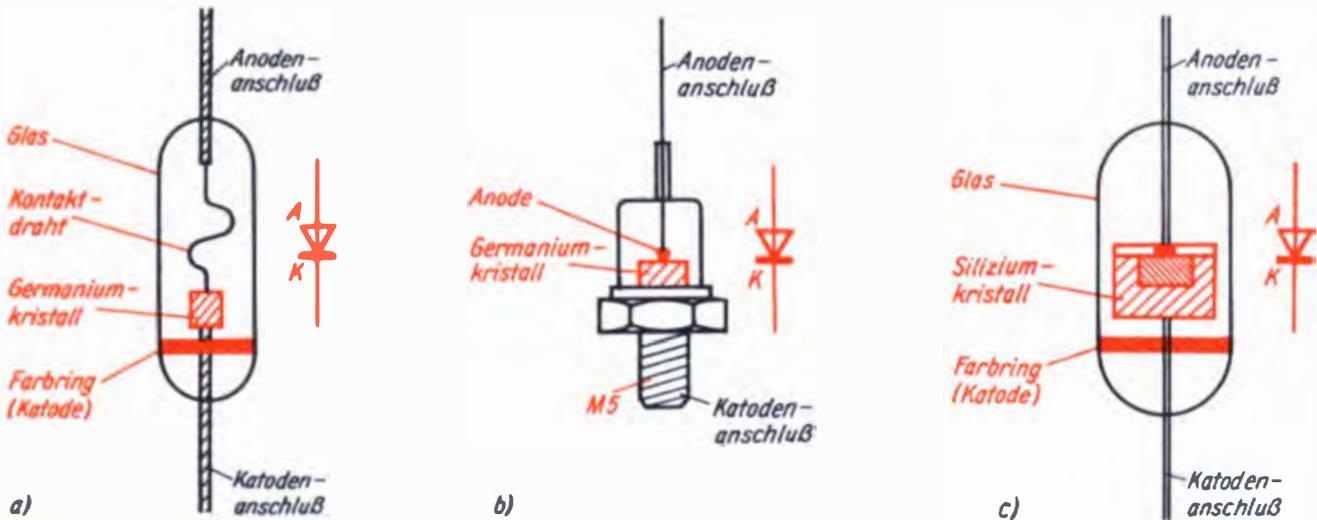


Bild 45. Aufbau von Dioden: a) Germanium-Spitzdiode, b) Germanium-Flächendiode, c) Silizium-Planardiode

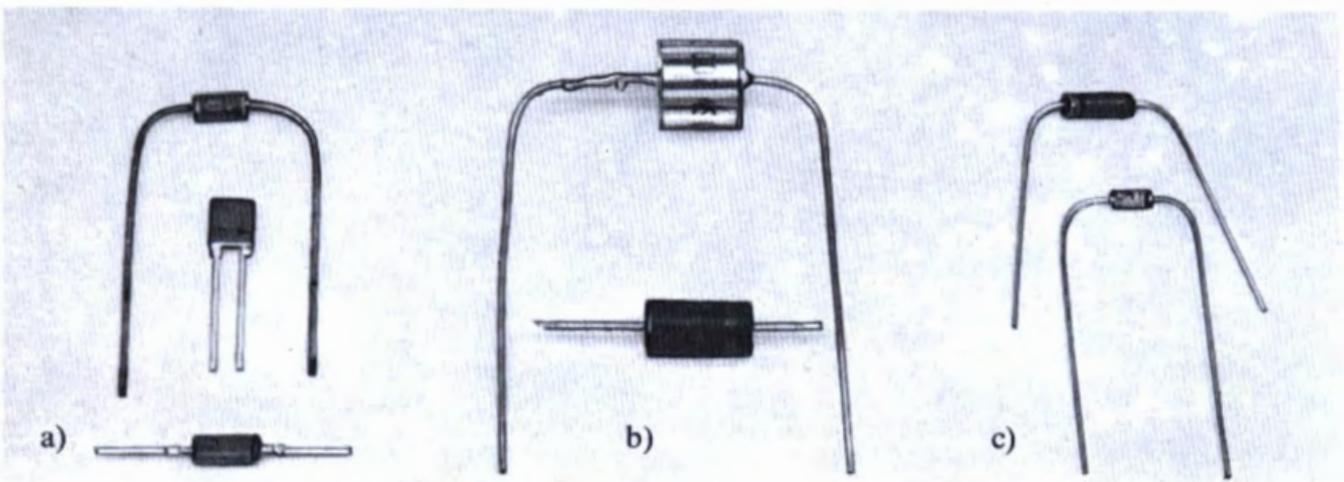
U_{RM} maximale Scheitelsperrspannung (bei Überschreiten wird infolge Spannungsdurchbruchs die Sperrschicht zerstört),

I_{FM} maximaler Spitzendurchlaßstrom (bei Überschreiten wird die Diode infolge zu starker Erwärmung zerstört),

P_{tot} Gesamtverlustleistung (totale Verlustleistung).

Diese Diodendaten beziehen sich auf bestimmte Umgebungstemperaturen (meist 25°C). Weitere Kenndaten sind für uns von untergeordneter Bedeutung.

Bild 46. Ausführungsformen von Dioden: a) Si-Schaltioden im Plastgehäuse, b) Si-Gleichrichterioden, c) Si-Z-Diode im Glasgehäuse



Nachdem wir bisher die Funktion der Halbleiterdiode kennengelernt haben, wollen wir jetzt die einzelnen Typen und ihre Anwendungen näher betrachten (Bilder 45 und 46). Bei den *Spitzendioden* setzt man meist auf n-leitendes Germanium (Kathode) eine federnde Wolfram- oder Golddrahtspitze (Anode) und erzeugt durch einen Stromstoß um die Spitze herum die Grenzschicht. Zum Schutz vor Beschädigung wird dieses System in ein Glasröhrchen eingeschmolzen. Der Katodenanschluß ist durch einen (meist farbigen) Ring gekennzeichnet. Die in der DDR produzierten Germaniumdioden sind mit den Buchstaben GA und einer Zahl versehen. Wegen der geringen Verlustleistung werden wir sie bei der *HF-Gleichrichtung* und in der *Digitaltechnik* anwenden.

Sollen durch Dioden größere Ströme fließen, so müssen *Flächendioden* mit einer wesentlich größeren Grenzschichtfläche verwendet werden

(sonst Zerstörung durch Erwärmung). Solche Dioden werden hergestellt, indem z. B. in einen n-leitenden Germaniumkristall eine *Indiumperle* einlegiert wird. Dadurch dringen Indiumatome in den Kristall ein und bilden eine p-leitende Zone. Es entsteht der pn-Übergang als Grenzschicht. Je nach Verlustleistung gibt es recht unterschiedliche Bauformen mit Glas- oder Plastgehäuse. Typen für größere Verlustleistungen haben Metallgehäuse (meist mit Gewindestift, der die Anbringung einer Kühlfläche zur Wärmeableitung ermöglicht).

Flächendioden werden heute in steigendem Maße aus Silizium durch *Diffusion* hergestellt und haben damit wesentlich günstigere Eigenschaften als Germaniumdioden, die z. B. in Netzgleichrichtern bereits von ihnen verdrängt wurden.

Eine Sonderform der Silizium-Flächendioden sind die *Planardioden*, die wir wegen ihrer hohen Zuverlässigkeit und des geringen Preises vielseitig anwenden werden. Im Bild 44 ist die Kennlinie einer solchen Planardiode dargestellt. Aus ihr können wir eine ganz typische Eigenschaft ablesen. Es ist der steile Anstieg des Sperrstromes beim Überschreiten eines kritischen Spannungswertes. Diese Erscheinung ist bei den Z-Dioden sehr stark ausgeprägt. Sie werden in der Hauptsache zur Spannungsstabilisierung und zur Gewinnung von Bezugsspannungen verwendet. Die Wirkungsweise einer Stabilisator-schaltung wird uns in einem einfachen Experiment klar. Wir bauen auf der Experimentierplatte die Schaltung nach Bild 47 auf. Erhöhen wir die Eingangsspannung U_E mit dem Potentiometer R_1 von 0 auf 13,5 V, so steigt auch U_A in

gleichem Maße bis etwa 6,8 V und bleibt dann konstant. Wir erkennen, daß die Stabilisierungswirkung erst bei einer Mindestspannung ($U_E \approx U_Z$) einsetzt, dann aber über einen weiten Bereich wirksam ist. Für elektronische Geräte wird meist gefordert, daß die Speisespannung (im Beispiel: U_A) auch bei abnehmender Batteriespannung konstant bleibt. Sinkt die Eingangsspannung U_E infolge zunehmender Entladung der Spannungsquelle ab, muß der Spannungsabfall U_V am Vorwiderstand (R_V) kleiner werden, damit U_A konstant bleiben kann. Deshalb muß wiederum I_E kleiner werden, folglich auch der Strom I_Z durch die Z-Diode. Daraus sehen wir schon, daß eine Stabilisierung nur über einen bestimmten Bereich erfolgt. Sie ist um so besser, je größer wir U_E im Vergleich zu U_A wählen können. Da aber beide Spannungen vorgegeben sind, können wir nur noch R_V variieren, und zwar so, daß der Strom I_E im Vergleich zu I_A groß wird (R_V möglichst klein wählen). Andererseits müssen wir aber auch beachten, daß die zulässige Verlustleistung der Z-Diode nicht überschritten wird. Deshalb darf R_V nicht zu klein werden:

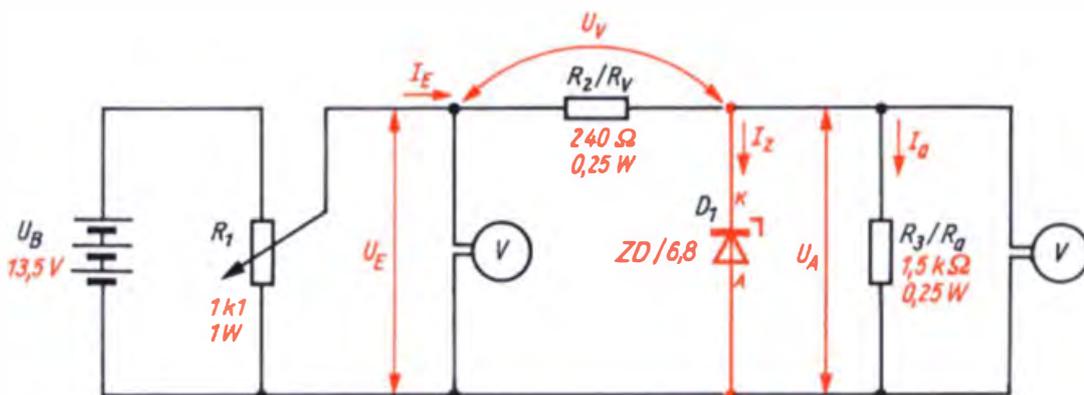
$$R_{V \min} = \frac{U_{E \max} - U_A}{I_{Z \max} + I_{A \min}}$$

Im Durchbruchgebiet der Z-Diode muß noch ein bestimmter Strom fließen, um einen Stabilisierungseffekt zu erzielen. R_V darf also auch nicht zu groß werden:

$$R_{V \max} = \frac{U_{E \min} - U_A}{I_{Z \min} + I_{A \max}}$$

Für die Berechnung entnehmen wir $I_{Z \max}$ dem Datenblatt. $I_{Z \min}$ wird mit 5...10% von $I_{Z \max}$ eingesetzt.

Bild 47. Experiment mit einer Z-Diode

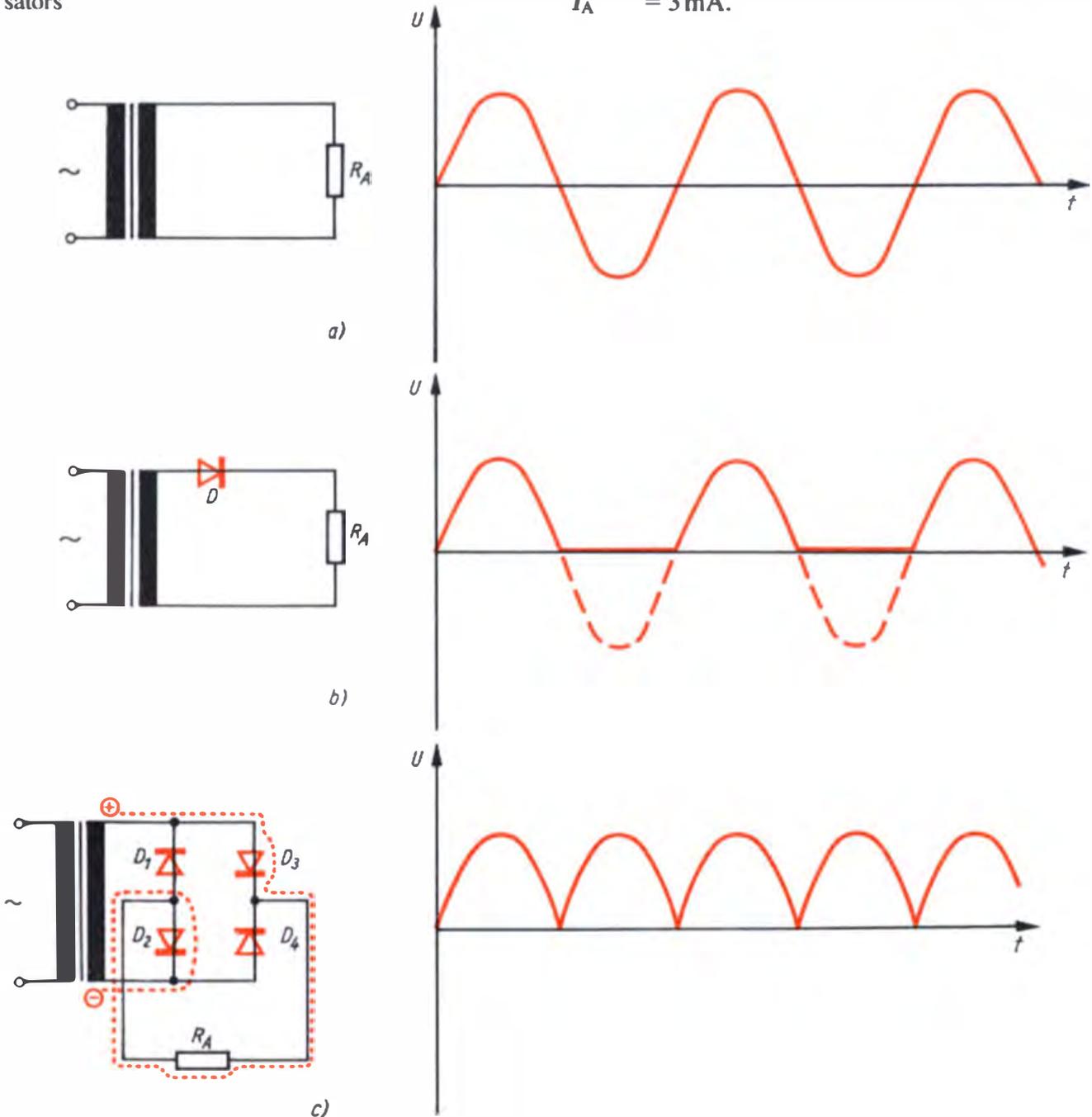


Bei der Auswahl einer geeigneten Z-Diode müssen wir auf die zulässige Verlustleistung achten. Es ist nicht günstig, sie bis zum Grenzwert auszunutzen, da bei größeren Diodenströ-

men eine starke Erwärmung der Diode auftritt, durch die sich der Wert der Durchbruchspannung ändert. Für eine gute Stabilisierungswirkung empfiehlt es sich, als Eingangsspannung möglichst den zweifachen Wert der stabilisierten Spannung zu wählen. Um diese Überlegungen besser zu verstehen, berechnen wir ein *Beispiel*:

$$\begin{aligned}
 U_{E_{\max}} &= 13 \text{ V (geladener Akkumulator),} \\
 U_{E_{\min}} &= 10 \text{ V (entladener Akkumulator),} \\
 U_A &= 6,8 \text{ V,} \\
 I_A &= 3 \text{ mA.}
 \end{aligned}$$

Bild 48. Arbeitsweise eines Gleichrichters: a) Wechselspannung am Außenwiderstand (Verbraucher), b) Einweggleichrichter und Verlauf der gleichgerichteten Spannung am Außenwiderstand, c) Graetzschaltung und Verlauf der gleichgerichteten Spannung am Außenwiderstand bei Einschaltung eines Ladekondensators



Gewählt wird die Z-Diode SZX 18/6,8 mit den Daten $U_Z = 6,8 \text{ V}$ und $P_{\text{tot}} = 250 \text{ mW}$.

Wir erhalten:

$$I_{Z_{\text{max}}} = \frac{P_{\text{tot}}}{U_Z} = \frac{250 \text{ mW}}{6,8 \text{ V}} = 36,8 \text{ mA},$$

$$R_{V_{\text{min}}} = \frac{U_{E_{\text{max}}} - U_A}{I_{Z_{\text{max}}} + I_{A_{\text{min}}}} = \frac{13 \text{ V} - 6,8 \text{ V}}{36,8 \text{ mA} + 3 \text{ mA}} \\ = \frac{6,2 \text{ V}}{39,8 \text{ mA}} = 153 \Omega,$$

$$R_{V_{\text{max}}} = \frac{U_{E_{\text{min}}} - U_A}{I_{Z_{\text{min}}} + I_{A_{\text{max}}}} = \frac{10 \text{ V} - 6,8 \text{ V}}{3,7 \text{ mA} + 3 \text{ mA}} \\ = \frac{3,2 \text{ V}}{6,7 \text{ mA}} = 478 \Omega.$$

Als Widerstand wählen wir $R_V = 470 \Omega$.

Diese Form der *Spannungsstabilisierung* werden wir beim Senderimpulsteil und beim Super anwenden. Um einen guten Stabilisierungseffekt durch geringe Belastung der Z-Diode zu erhalten, wird dieser eine Regeltransistor, gewissermaßen als Leistungsverstärker, nachgeschaltet. Damit erzielen wir eine Arbeitsteilung, die Z-Diode stabilisiert die Spannung, und der Transistor regelt die angeschaltete Leistung.

Abschließend wollen wir noch überlegen, wie der Gleichrichter im Ladegerät (Bild 29) funktioniert. Zu diesem Zweck lesen wir noch einmal den Abschnitt über galvanische Elemente durch. Für die Ladung der Akkus benötigen wir eine Gleichspannung in der Größe ihrer Klemmenspannung. Aus der vom Transformator abgegebenen niedrigen Wechselspannung werden wir durch *Gleichrichtung* die erforderliche Gleichspannung gewinnen. Diesen Vorgang betrachten wir einmal etwas näher.

Schalten wir an den Transformator ($U_2 = 25 \text{ V}$) einen Widerstand, z. B. $2,4 \text{ k}\Omega$ (Bild 48a), so fließt ein Strom von

$$I = \frac{U}{R} = \frac{25 \text{ V}}{2,4 \text{ k}\Omega} \approx 10 \text{ mA}.$$

Fügen wir nun zwischen Außenwiderstand und Transformator eine Diode ein, z. B. SY 200 (Bild 48b), so wirkt diese wie ein *Ventil* auf den Stromfluß. Wir wissen bereits, daß die Diode dem

Strom in einer Richtung nur einen geringen und in der entgegengesetzten Richtung einen großen Widerstand entgegensetzt. Der Strom kann also nur noch in einer Richtung fast ungehindert fließen. In der Anordnung nach Bild 48b wird die negative Halbwelle der Spannung gesperrt. Der Spannungsverlauf an R_A läßt dies deutlich erkennen. Wir haben also bereits eine Gleichspannung erhalten. Ihr Mangel besteht nur darin, daß sie noch sehr stark pulsiert, also zeitlich nicht immer die gleiche Größe hat. Dies beseitigen wir mit einer besonderen Schaltung von vier Dioden, der *Graetzschaltung*. Aus dem Spannungsverlauf im Bild 48c erkennen wir, daß bei dieser Art des Gleichrichters die zweite Halbwelle ebenfalls zur Erzeugung der Gleichspannung genutzt wird und damit die Welligkeit wesentlich geringer ist. Die Entstehung des Spannungsverlaufes erklären wir kurz so: Während der positiven Halbwelle kann der Strom über D_2 , R_A und D_3 zurück zum Transformator fließen. Die Dioden D_1 und D_4 sind dann gesperrt. Während der negativen Halbwelle fließt der Strom über D_1 , R_A und D_4 in der gleichen Richtung durch R_A ; die Dioden D_2 und D_3 sind während dieser Zeit gesperrt.

Der Transistor ist unser Verstärkerelement

Mit den Transistoren wollen wir die Reihe der hier vorzustellenden Bauelemente beschließen (Bild 49). Das Halbleiterelement Transistor erfuhr in sehr kurzer Zeit eine stürmische Entwicklung und hat beispielsweise in Fernsteuergeräten die Elektronenröhre vollständig abgelöst. Dies ist vor allem darin begründet, daß der Transistor bei niedrigen Betriebsspannungen (1,5...15 V) arbeitet, keine Heizleistung erfordert, geringes Volumen und geringere Masse aufweist und eine hohe Lebensdauer hat. Transistorschaltungen sind daher wesentlich wirtschaftlicher als vergleichbare Röhrenschaltungen.

Bevor wir auf die Anwendung von Transistoren in einfachen Schaltungen eingehen, müssen wir ihren Aufbau und ihre Arbeitsweise etwas näher betrachten. Dazu rufen wir uns noch ein-

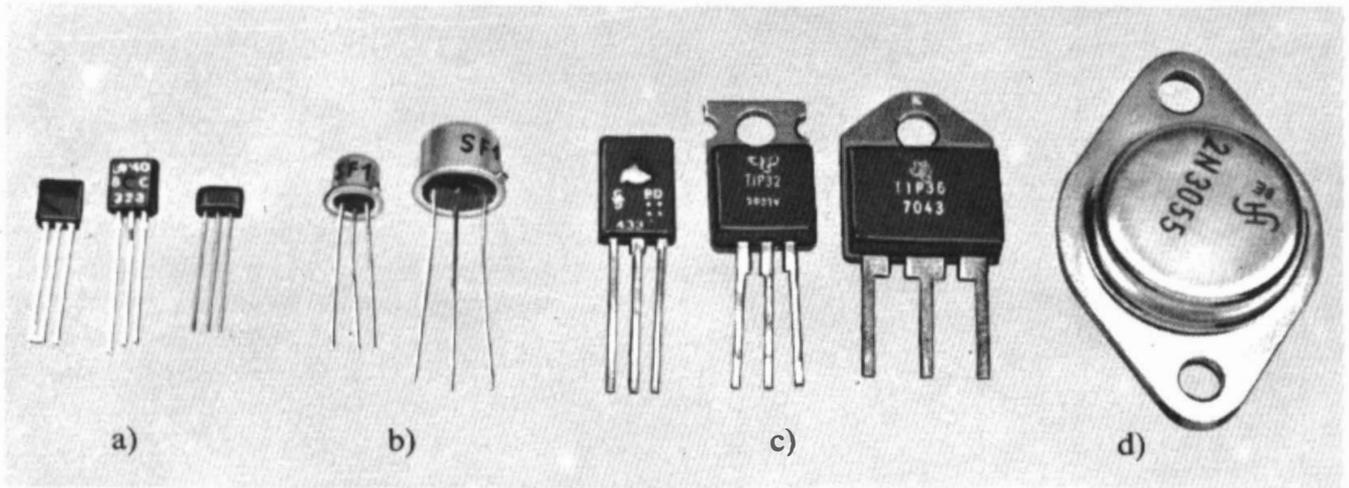


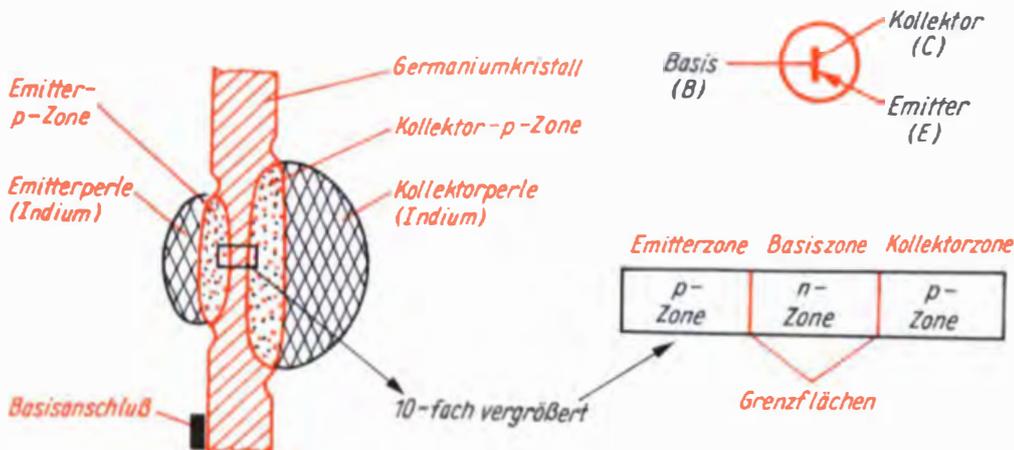
Bild 49. Ausführungsformen von Transistoren: a) Transistoren in Plastgehäuse, b) Transistoren in Metallgehäuse, c) Leistungstransistoren in Plastgehäuse, d) Leistungstransistoren im Metallgehäuse

mal Bild 42, auf dem der Aufbau der Flächendiode mit dem pn-Übergang dargestellt ist, ins Gedächtnis zurück. Legiert man in den Germaniumkristall der Flächendiode von der Gegenseite eine zweite Indiumperle ein (etwa nach dem Schema im Bild 50), dann entstehen zwei Grenzschichten (Übergänge) mit der Zonenfolge pnp. Man hat damit einen *pnp-Flächentransistor* erhalten. Die drei Anschlüsse des Transistors bezeichnet man als *Emitter*, *Basis* und *Kollektor*.

Wir sehen daraus, daß der Flächentransistor eng mit der Flächendiode verwandt ist. Bei der Erläuterung der Leitungsvorgänge können wir

also auf die Erkenntnisse zurückgreifen, die wir bei der Diode gewonnen haben. Für die folgenden Betrachtungen stellen wir uns den pnp-Transistor schematisch vor, gewissermaßen als Ausschnitt (Bild 51a). Zunächst schalten wir in Gedanken an den Kollektor den Minuspol einer Gleichspannungsquelle und an den Emitter ihren Pluspol. Da die Zonenfolge pnp ist, wird im Prinzip die Grenzschicht G_2 analog zu den Vorgängen bei der Diode in Sperrichtung und die Grenzschicht G_1 zwischen Basis und Emitter in Durchlaßrichtung gepolt. Die Folge davon ist, daß nur ein relativ kleiner Sperrstrom in der Größenordnung einiger μA fließen kann. Diesen bezeichnen wir als *Kollektorreststrom* I_{CE0} (lies: I-C-E-Null). Insofern unterscheidet sich der Transistor in seinem Verhalten nicht von der Diode. Ganz anders aber sieht es aus, wenn wir zusätzlich zwischen Basis und Emitter eine entgegengesetzt gepolte Spannung anlegen. Wir machen uns das Verhalten des Transistors für diesen Fall mit Hilfe des Leitungsvorganges (Bild 51a) und des Po-

Bild 50. Prinzip des Germanium-pnp-Flächentransistors und Schaltzeichen



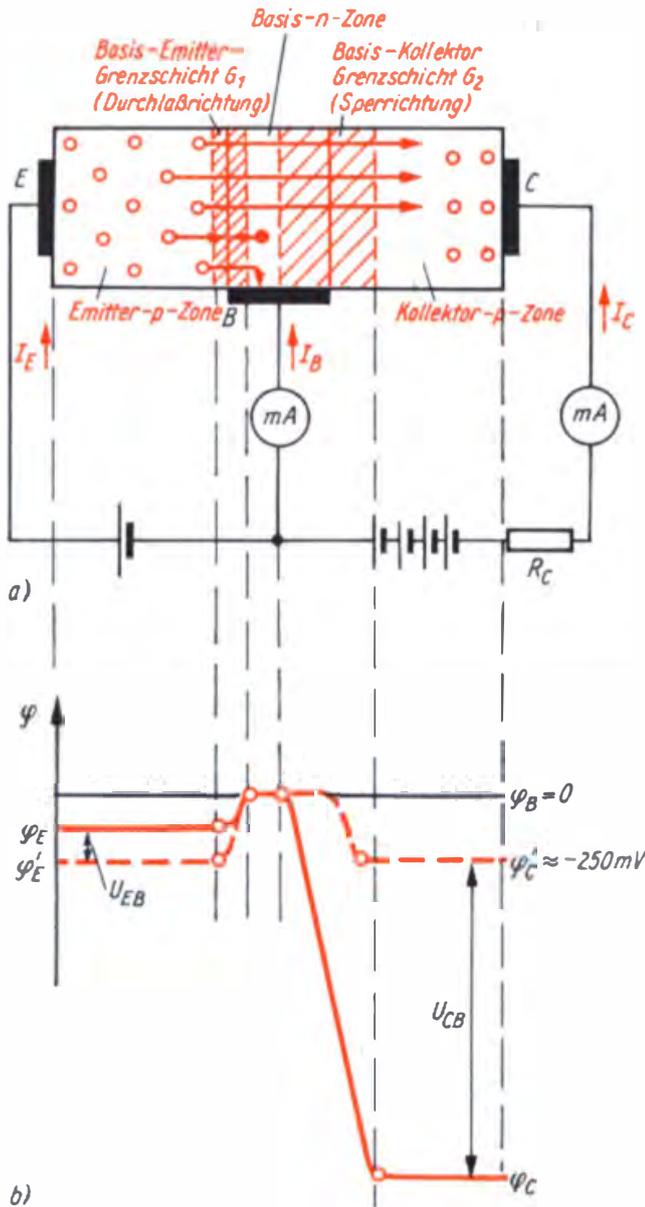


Bild 51. pnp-Transistor: a) Leitungsvorgang, b) Potentialverlauf

tentialverlaufs (Bild 51b) klar. Die gestrichelte rote Linie stellt den Potentialverlauf in den beiden Grenzschichten in Analogie zur Diode dar. Legen wir die Kollektor- und Basisspannung an, so wird das Basis-Emitter-Potential φ_E um den Betrag der Basis-Emitter-Spannung herabgesetzt. Die Grenzschicht G_1 ist also in Durchlaß gepolt. Schon bei geringer Basis-Emitter-Spannung U_{BE} kann ein großer Emitterstrom I_E fließen. Das Basis-Kollektor-Potential dagegen wird um den Betrag der Kollektor-Basis-Spannung U_{CB} gesenkt, so daß die Grenzschicht G_2 in

Sperrichtung gepolt ist. Gelangen nun Defektelektronen vom Emitter durch die in Durchlaß gepolte Grenzschicht G_1 in die Basis, was ja wegen der erniedrigten Potentialschwelle φ_E schon bei kleinen Spannungswerten U_{BE} geschieht, so geraten sie dort in das starke Potentialgefälle der Grenzschicht G_2 . Sie werden gewissermaßen zum Kollektor hingezogen. Ein kleiner Teil der in die Basis übergetretenen Defektelektronen rekombiniert hier mit den Elektronen und fließt als Basisstrom I_B ab. Durch die Kollektor-Basis-Spannung U_{CB} werden die Defektelektronen stark beschleunigt. Sie nehmen dabei so viel Energie auf, daß sie im Außenkreis auch größere Widerstände überwinden können. Vom Kollektor werden aber nur die Defektelektronen eingefangen, die infolge der angelegten Basis-Emitter-Spannung in den Basisraum übergetreten sind. Damit haben wir eine Möglichkeit, mit der Basisspannung bzw. dem Basisstrom den Kollektorstrom zu steuern.

Welchen Vorteil hat das nun? Je nach Art und Exemplar des Transistors rekombinieren im Basisraum etwa 2% oder weniger Ladungsträger. Das bedeutet aber, daß der Basisstrom 2% oder weniger vom Kollektorstrom beträgt. Da die Basis-Emitter-Strecke in Durchlaßrichtung betrieben wird, ist zur Steuerung des Kollektorstromes nur eine kleine Leistung erforderlich. An der in Sperrichtung gepolten Kollektor-Basis-Strecke liegt eine größere Spannung an als an der Basis-Emitter-Strecke. Mit einer kleinen Eingangs- bzw. Basisleistung $P_E = I_B \cdot U_{BE}$ wird also eine große Ausgangs- bzw. Kollektorleistung $P_A = I_C \cdot U_{CE}$ gesteuert. Dieses Verhalten wollen wir als Verstärkung bezeichnen. Damit wird uns auch klar, wozu wir den Transistor verwenden werden. Er ist für uns das Bauelement, mit dem wir fast alle Verstärkungsprobleme der Fernsteuertechnik lösen können. Bleibt an dieser Stelle noch hinzuzufügen, daß der erläuterte Leitungsmechanismus in analoger Weise abläuft, wenn wir statt des pnp- einen npn-Transistor verwenden und die Polung der Spannungsquellen vertauschen. An diese Gedankengänge müssen wir uns von vornherein gewöhnen, da beide Transistortypen in unseren Schaltungen (manchmal sogar in einer Schaltung nebeneinander) auftreten.

Wir experimentieren mit Transistoren

Wie ein Transistor funktioniert, wissen wir nun. Um sein Betriebsverhalten besser verstehen zu können, wollen wir wieder in bekannter Weise seine Kennlinien aufnehmen. Dazu bauen wir die Schaltung nach Bild 52 auf. Als Regelwiderstand verwenden wir ein Kohleschichtpotentiometer (2 Watt). Die Basisspannung liefert uns eine Flachbatterie 3 R 12, die Kollektorspannung ent-

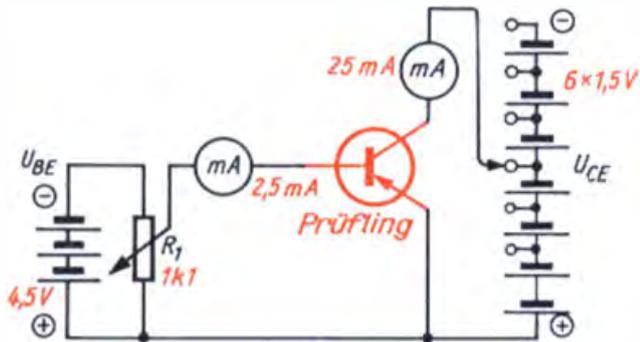


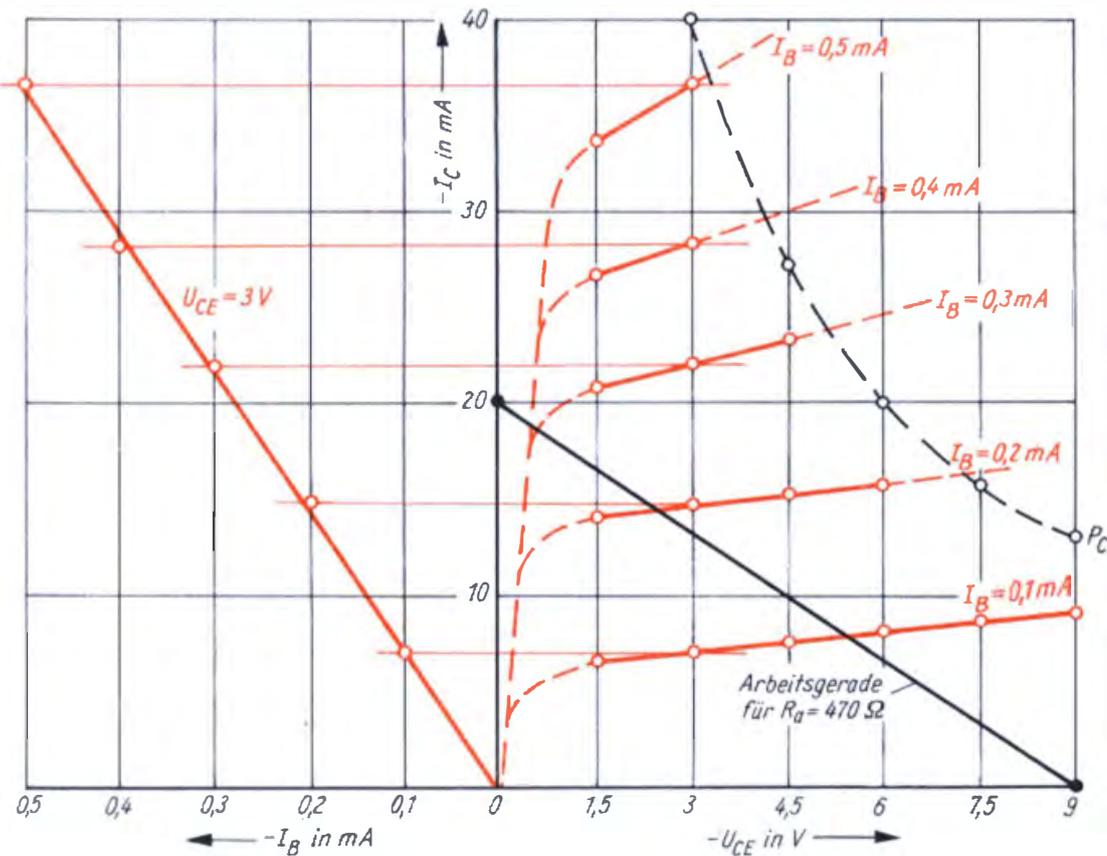
Bild 52. Schaltung zur Aufnahme einer Transistorkennlinie

Bild 53. Kennlinienfelder des Transistors GC 122

nehmen wir sechs Monozellen. Zur Strommessung benötigen wir zwei Vielfachmesser. Die Kennlinien zeichnen wir in das aus Bild 53 ersichtliche Diagramm ein.

Bevor wir aber mit dem Versuch beginnen, gilt es noch einiges zu überlegen. Wir haben gelernt, daß Halbleiter temperaturempfindlich sind. Durch die im Transistor umgesetzte Leistung wird Wärme frei, was zur Zerstörung des Transistors führen kann. Deshalb werden von den Herstellern die *Gesamtverlustleistung* P_{tot} bzw. die *maximale Sperrschichttemperatur* angegeben. Die Gesamtverlustleistung ist der höchste dauernd zulässige Wert der im gesamten Transistor in Wärme umgesetzten elektrischen Leistung bei definierten Bedingungen. Für den Transistor GC 122 wird bei 20°C eine Verlustleistung von 120 mW angegeben. Leiten wir die entstehende Verlustwärme durch einen Kühlstern ($h = 9 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ mm}$) ab, so kann er mit 200 mW Verlustleistung betrieben werden. Wir sehen daraus, daß die Kühlung bei den Transistoren eine große Rolle spielt.

Welche Schlußfolgerungen müssen wir daraus ziehen? Um den Transistor nicht zu zerstören,



darf der zulässige Wert von P_{tot} nicht überschritten werden. Da die *Kollektorverlustleistung* den weitaus größten Anteil an der Verlustleistung hat, können wir die *Emitterverlustleistung* vernachlässigen und setzen $P \approx P_C$. Die jeweiligen Werte für P_C berechnen wir nach $P_C = I_C \cdot U_{CE}$ für $U_{UC} = 1,5 \dots 9 \text{ V}$ und tragen sie in das Kennlinienfeld ein. Die einzelnen Punkte ergeben einen Kurvenzug, den man als *Verlustleistungshyperbel* bezeichnet (s. auch Bild 53). Diese Hyperbel dürfen wir auf keinen Fall überschreiten.

Bei Aufnahme der Transistorkennlinien gehen wir folgendermaßen vor: Mit dem Potentiometer stellen wir den Basisstrom auf den Wert $I_B = 0,1 \text{ mA}$ ein. Nun messen wir jeweils den Kollektorstrom I_C für die Werte $U_{CE} = 1,5 \text{ V}$; 3 V ; ...; 9 V , tragen ihn in das Diagramm ein, verbinden die Punkte und erhalten die Ausgangskennlinie für den Basisstrom $0,1 \text{ mA}$. Die anderen Kennlinien ermitteln wir nach dem gleichen Verfahren für die Basisströme $0,2 \text{ mA}$, $0,3 \text{ mA}$, $0,4 \text{ mA}$ und $0,5 \text{ mA}$. Wenn wir die Kennlinien aufgenommen haben, werden wir wieder (wie schon bei der Flächendiode) feststellen, daß es mehr oder weniger große Abweichungen zu Bild 53 gibt.

Bevor wir uns nun mit den eigentlichen Verstärkerschaltungen befassen, müssen wir noch zwei weitere Transistorkenngrößen kennenlernen, die eine davon ist der *Kollektorreststrom* I_{CE0} . Wir messen ihn bei unserem Experimentiertransistor mit der Schaltung nach Bild 52, indem wir die Kollektorspannung auf 6 V einstellen und die Basis vom Potentiometer abklemmen. Der nun fließende Reststrom I_{CE0} muß kleiner als $100 \mu\text{A}$ sein. Ist er größer oder steigt er während der Messung, so ist der Transistor für Verstärkerzwecke ungeeignet. Die zweite wichtige Kenngröße entnehmen wir dem Kennlinienfeld. Zu diesem Zweck greifen wir uns einen Abschnitt auf der I_C - I_B -Kennlinie zwischen zwei I_B -Werten heraus und bestimmen die Steigung. Dieser Steigungsfaktor wird als *Kurzschlußstromverstärkung* (oft auch als *Stromverstärkungsfaktor* β bzw. h_{21e}) bezeichnet (s. auch Bild 53).

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Der Stromverstärkungsfaktor β ist nicht mit der Stromverstärkung v_i zu verwechseln, auf die wir an anderer Stelle noch zurückkommen. Anhand des Kennlinienfeldes berechnen wir

$$\beta = \frac{7 \text{ mA}}{0,1 \text{ mA}} = 70.$$

β wird auch als *Kleinsignalverstärkung* im Unterschied zur *Großsignalverstärkung* B bezeichnet:

$$B = \frac{I_C - I_{CE0}}{I_B}$$

Damit ist bei $U_{CE} = 3 \text{ V}$, $I_{CE0} = 0,05 \text{ mA}$, $I_C = 14,5 \text{ mA}$ und $I_B = 0,2 \text{ mA}$ für den Experimentiertransistor:

$$B = \frac{14,5 \text{ mA} - 0,05 \text{ mA}}{0,2 \text{ mA}} = \frac{14,45 \text{ mA}}{0,2 \text{ mA}} \approx 72.$$

Der Unterschied zwischen B und β ist also recht geringfügig.

Bei der *Kleinsignalverstärkung* verwendet man den Transistor so, daß nur ein kleiner Teil des verfügbaren Arbeitsbereiches ausgenutzt wird. Kleinsignalverstärkung wird uns in der Regel in den Fernsteuerempfängern begegnen. Dazu sind Transistoren mit guten Verstärkungseigenschaften für den Arbeitsfrequenzbereich erforderlich. Die in den Transistoren auftretenden Verlustleistungen und folglich auch die Eigenerwärmung sind gering. Bei der *Großsignalverstärkung* hingegen sind die Werte der Eingangs- und Ausgangsspannungen und -ströme nicht mehr klein gegen die verfügbaren Arbeitsspannungs- und Arbeitsstrombereiche. Wir müssen besonders darauf achten, daß die maximal zulässige Verlustleistung innerhalb des gesamten Arbeitstemperaturbereiches nicht überschritten wird. Ein typisches Beispiel für Großsignalverstärkung sind die Endstufen der Fernsteuersender.

Da wir die Großsignalverstärkung mit einfachen Mitteln selbst bestimmen können, werden wir den weiteren Betrachtungen immer den Stromverstärkungsfaktor B zugrunde legen, er ist für uns ein Gütekriterium für den Transistor. Je größer B ist, um so größer kann die Verstärkerwirkung in einer Schaltung sein. Aus diesem Grund werden Transistoren im Handel auch nach *Stromverstärkungsgruppen* sortiert angeboten.

Nun aber erst einmal genug der Theorie. Jetzt wollen wir ein Gerät bauen, mit dem der Stromverstärkungsfaktor B bestimmt werden kann.

Wir bauen einen Transistorprüfer

Mit diesem Prüfgerät sind Grobmessungen der Stromverstärkung und des Kollektorreststromes von npn- und pnp-Transistoren möglich. Außerdem können wir damit Dioden und Elektrolytkondensatoren prüfen. Den ermittelten Werten fehlt zwar eine hohe Genauigkeit, sie genügen uns aber vollauf zur Beurteilung der zur Verfügung stehenden Transistoren.

Das Gerät bauen wir nach der Schaltung in Bild 54 auf. Das fertige Gerät ist auf Bild 55 zu sehen. Durch Umschaltung der Batterie und des Meßinstruments können wir gleichermaßen pnp- und npn-Transistoren messen. Mit Rücksicht darauf, daß bei bestimmten Transistortypen die Anschlußfolge nicht wie normal EBC, sondern BCE ist, wird die Transistorfassung für beide Varianten ausgelegt. Als Meßgerät verwenden wir den Vielfachmesser. Stecken wir den pnp-Transistor in die Steckfassung, so schlägt das Meßgerät aus – wir messen den Reststrom, der, wie bereits erwähnt, kleiner als 0,1 mA sein soll. Bei Siliziumtransistoren liegt der Reststrom im nA-Bereich, unser Meßgerät darf also keinen

Bild 54. Schaltung des Transistorprüfers

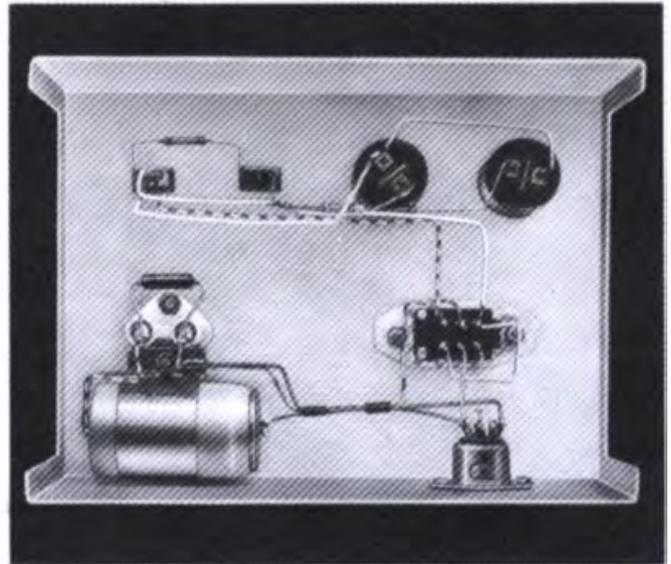
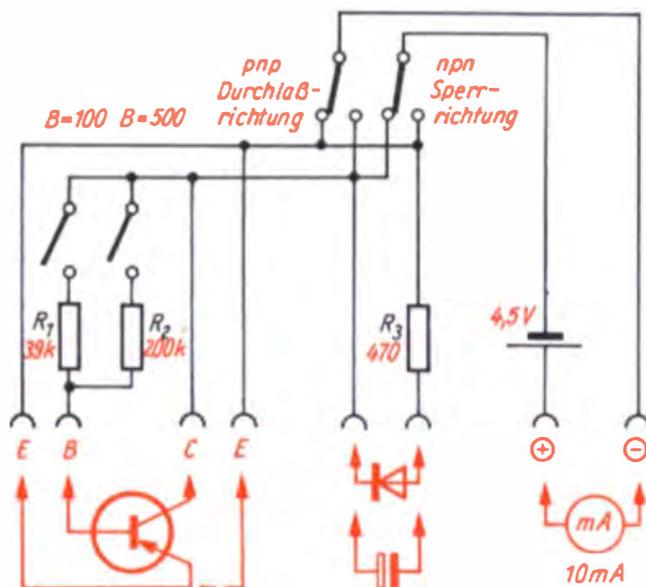


Bild 55. Aufbau des Transistorprüfers (Innenansicht)

Ausschlag erkennen lassen. Für die Messung der Stromverstärkung lassen wir über die Vorwiderstände R_1 bzw. R_2 einen bestimmten, bekannten Basisstrom fließen, ermitteln dann einfach das

Verhältnis von $\frac{I_C}{I_B}$ und können so B direkt ablesen.

Wir legen den Transistorprüfer für die beiden Meßbereiche bis $B = 100$ bzw. $B = 500$ aus, um auch Transistoren mit großen Stromverstärkungsfaktoren (Si-Typen) prüfen zu können. Da I_{CE0} mit etwa $5\mu A$ sehr klein ist gegenüber I_C mit 10 mA, wird unter Vernachlässigung von I_{CE0} die Gleichung

$$B = \frac{I_C - I_{CE0}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

Für $B = 100$ ist $I_C = 10\text{ mA}$, es muß der Basisstrom

$$I_B = \frac{I_C}{100} = \frac{10\text{ mA}}{100} = 0,1\text{ mA}$$

fließen.

Dieser Strom wird mit dem Basiswiderstand eingestellt, dessen Größe wir aus der an der Basis anliegenden Spannung $U_B = U_0 - U_{BE}$ (U_0 Klemmenspannung, U_{BE} Basis-Emitter-Spannung) und dem Basisstrom I_B berechnen:

$$R_B = \frac{U_0 - U_{BE}}{I_B} = \frac{4,5 \text{ V} - 0,5 \text{ V}}{0,1 \text{ mA}} = 40 \text{ k}\Omega.$$

Wir wählen für R_B den nächstgelegenen Wert der Normreihe, also $39 \text{ k}\Omega$. Die Größe des Vorwiderstandes für den Bereich $B = 500$ rechnen wir analog aus.

Nach diesem Ausflug in die Praxis müssen wir wieder ein wenig Theorie betreiben. Unsere nächste Aufgabe soll sein, mit dem Transistor Signale zu verstärken. Elektrische Signale treten in Form von Spannungsschwankungen bzw. Wechselfspannungen auf. Diese Wechselfspannungen müssen verstärkt werden. Doch wie erfolgt das? Uns ist bekannt, daß wir mit einem kleinen Basisstrom einen wesentlich größeren Kollektorstrom steuern können, also eine *Stromverstärkung* erzielen. Wollen wir daraus eine *Spannungsverstärkung* gewinnen, muß der verstärkte Strom durch einen Widerstand fließen. Wir schalten also einen Widerstand in die Kollektorleitung der Schaltung von Bild 52. Dann entsteht am Kollektorwiderstand R_C nach $U_C = I_C \cdot R_C$ der Spannungsabfall U_C . R_C bezeichnen wir als *Arbeitswiderstand*. Wir wollen überlegen, in welchem Zusammenhang er mit dem Kennlinienfeld (Bild 53) steht, und wählen $R_C = 470 \Omega$. Dabei gehen wir von zwei Idealfällen aus:

1. Der Transistor stellt im Vergleich zu R_C einen großen Widerstand dar, wenn er gesperrt ist. Die Spannung $U_B = 9 \text{ V}$ fällt dann am Transistor ab. Wir erhalten den Punkt $U_{CE} = 9 \text{ V}$ bei $I_C = 0$ und tragen ihn in das Kennlinienfeld ein
2. Ist der Transistor durchgesteuert, stellt er im Vergleich zu R_C einen sehr kleinen Widerstand dar (ideal wäre $R = 0$). Jetzt fällt die Gesamtspannung von $U_0 = 9 \text{ V}$ am Widerstand R_C ab. Am Transistor ist der Spannungsabfall Null, und es fließt ein Strom von

$$I_C = \frac{U_0}{R_C} = \frac{9 \text{ V}}{470 \Omega} \approx 20 \text{ mA}.$$

Diesen Punkt $U_{CE} = 0$ bei $I_C = 20 \text{ mA}$ tragen wir ebenfalls in das Kennlinienfeld ein.

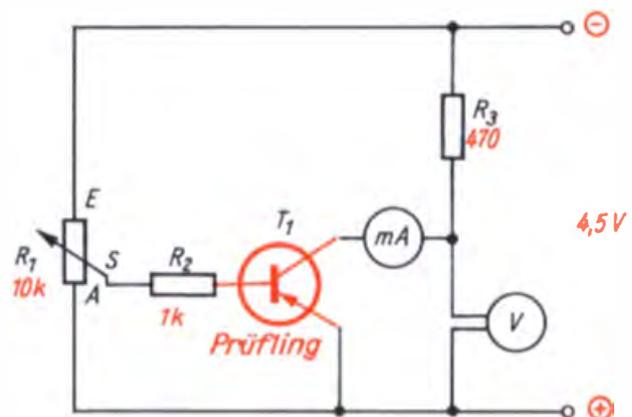
Verbinden wir beide Punkte durch eine Gerade miteinander, erhalten wir die *Arbeitsgerade*. Alle erreichbaren Werte liegen auf dieser Geraden. Sie schneidet jede Ausgangskennlinie im Kenn-

linienfeld, den Schnittpunkt mit einer Kennlinie bezeichnen wir als *Arbeitspunkt*. Wir erkennen, daß der Arbeitspunkt durch Veränderung des Basisstromes verschoben werden kann. Wir werden ihn so legen, daß auf der Arbeitsgeraden nach beiden Seiten eine **gleich** große Aussteuerung möglich ist. Dazu muß ein ganz bestimmter Basisstrom fließen. Im angenommenen Fall müßte I_B etwas größer als $0,1 \text{ mA}$ sein.

Der Transistor verstärkt

Zum besseren Verständnis führen wir ein einfaches Experiment durch. Auf der Experimentierplatine bauen wir die Schaltung nach Bild 56 auf. Befindet sich der Schleifer des Potentiometers am unteren Anschlag A (kein Basisstrom), so können wir am Amperemeter den Kollektorstrom I_{CE0} ablesen. In dem Maße, wie wir jetzt die Basisspannung U_{BE} steigern, fließt ein Basisstrom I_B , und auch der Kollektorstrom I_C steigt bis zu seinem Maximalwert von 10 mA an. Gleichzeitig fällt aber die Kollektorspannung U_{CE} bis zum Wert $U_{CE0} \approx 0,5 \text{ V}$ ab. In einem zweiten Versuch stellen wir mit R_1 den Basisstrom I_B so ein, daß $U_{CE} \approx 2 \text{ V}$ ist. Ändern wir nun I_B bzw. U_{BE} nur um kleine Beträge nach oben und unten (»Wackeln« an der Potentiometerachse), so ändert sich genau entgegengesetzt auch U_{CE} . Wird U_{BE} größer, so wird U_{CE} kleiner und umgekehrt. Den Basisstrom I_B bezeichnet man als *Steuerstrom*. In einem dritten Versuch löten wir statt R_3 eine Drahtbrücke ein und ändern ebenfalls U_{BE} mit R_1 . Vorsicht! I_C

Bild 56. Zur Verstärkerwirkung des Transistors



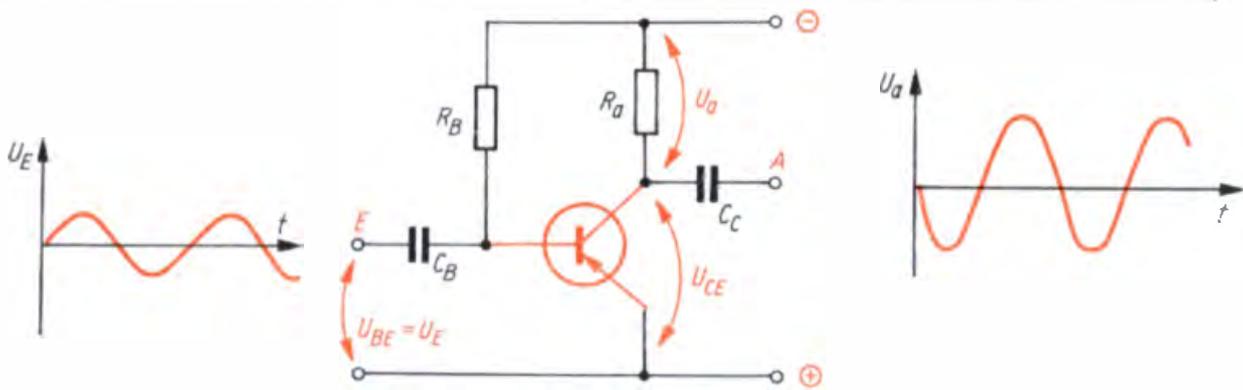


Bild 57. Der Transistor als Wechselspannungsverstärker (Emitterschaltung)

darf den Wert 20 mA nicht überschreiten, sonst ist der Transistor gefährdet! Erhöhen wir U_{BE} , so steigt zwar I_C vom Reststrom bis zum Maximalwert, aber U_{CE} bleibt konstant 4,5 V. Aus diesen drei Versuchen können wir schlussfolgern:

1. Wollen wir eine Wechselspannung verstärken, so müssen wir den Arbeitspunkt *möglichst in die Mitte der Arbeitskennlinie* (entspricht etwa $U_B/2$) legen, andernfalls würde eine Halbwelle nicht voll verstärkt werden.
2. Wenn U_{BE} kleiner wird, wächst U_{CE} . Zwischen U_{BE} und U_{CE} besteht also eine indirekte Abhängigkeit. Für eine zu verstärkende Wechselspannung bedeutet das, daß zwischen U_{BE} und U_{CE} eine *Phasenverschiebung* von 180° besteht.
3. Wenn $R_a = 0$ ist, ändert sich zwar I_C , aber nicht U_{CE} . Wollen wir also Wechselspannungen verstärken, so muß *im Kollektorkreis ein Arbeitswiderstand* eingeschaltet sein.

Noch ein Wort zur Dimensionierung von R_C . Verdoppeln wir seinen Wert, so können wir sofort die Arbeitsgerade im Kennlinienfeld einzeichnen. Dabei stellen wir fest, daß diese Gerade *wesentlich flacher* verläuft als die zuerst eingezeichnete. Da wir auch jetzt noch gleich große Spannungsschwankungen an R_C , aber bei kleineren Werten von I_C , also bei geringerem Leistungsbedarf, erzielen, ergibt sich die Frage: Warum machen wir dann R_C nicht so groß wie möglich? Nun, einmal schon deswegen nicht, damit überhaupt noch ein Kollektorstrom fließen und den Spannungsabfall U_a hervorrufen kann. Zum anderen wissen wir, daß in den Transistor

zur Steuerung ein Basisstrom hineinfließen muß. Da aber eine Verstärkerstufe, wie sie im Bild 57 dargestellt ist, meist nicht die erforderliche Verstärkung erzielt, sind weitere Verstärkerstufen nachzuschalten. Die vorangegangene Stufe muß damit immer den Steuerstrom für die folgende Stufe liefern, der Kollektorstrom I_C also einen Mindestwert haben, um die folgende Stufe aussteuern zu können. Wir sehen hier schon, daß der Transistor für recht unterschiedliche Aufgaben (z. B. Klein- oder Großsignalverstärkung) herangezogen wird und daß davon natürlich die Wahl des Arbeitspunktes abhängt.

Mit den beiden Bauelementen R_B und R_C haben wir Arbeitspunkt und Aussteuerbereich des Transistors gleichstrommäßig festgelegt. Wir wollen aber Wechselspannungen bzw. -ströme verstärken. Deshalb sind die einzelnen Verstärkerstufen durch Kondensatoren (im Bild C_B und C_C) *gleichstrommäßig getrennt*, aber *wechselstrommäßig gekoppelt*. Die gleichstrommäßige Trennung ist auch deshalb erforderlich, weil der Arbeitspunkt für jede Verstärkerstufe unabhängig voneinander eingestellt werden muß.

Ein Problem haben wir allerdings bisher außer acht gelassen: Die Temperaturabhängigkeit des Reststromes (besonders bei Germaniumtransistoren). Mit der Schaltung nach Bild 54 können wir recht eindrucksvoll feststellen, daß der eingestellte Kollektorstrom bei Erwärmung erheblich ansteigt. Das kann im Extremfall zur Zerstörung des Transistors führen. Wir müssen also den Strom durch schaltungstechnische Maßnahmen so stabilisieren, daß er trotz Temperatureinfluß seinen Wert nicht ändert. Eine Möglichkeit dazu bietet sich mit der Veränderung des Basisstromes an. Das Produkt aus Basisstrom und Stromverstärkung $I_B \cdot B$ muß etwa um

den Betrag kleiner werden, um den bei Temperaturerhöhung der Kollektorstrom I_C ansteigt. Wir erreichen das, indem wir den Basiswiderstand R_B nach Bild 58a zwischen Basis und Kollektor schalten. Steigt infolge Temperatureinfluß der Kollektorstrom I_C , so wird die Spannung U_{CE} kleiner, damit auch der Basisstrom I_B , so daß I_C auf einen bestimmten Wert zurückgeführt (stabilisiert) wird.

Einen ähnlichen Effekt erzielen wir, wenn wir den Basisstrom durch einen Basisspannungsteiler erzeugen und zusätzlich den Emitter-Widerstand R_E einfügen (Bild 58b). Steigt I_C infolge Erwärmung des Transistors, so wird auch der Spannungsabfall an R_E größer. Damit wird aber die Spannung U_{BE} kleiner, die durch das Verhältnis R_{B1}/R_{B2} bestimmt und »festgehalten« ist. In gleichem Maße nimmt I_B ab, so daß I_C stabilisiert wird. Es sei noch erwähnt, daß Siliziumtransistoren wesentlich temperaturstabiler ar-

beiten, so daß sich in den meisten Fällen besondere Stabilisierungsmaßnahmen erübrigen.

Da wir durch die Dimensionierung der Bauelemente die Verstärkereigenschaften einer Transistorstufe in weiten Grenzen beeinflussen können, muß zur Unterscheidung von der Kurzschlußstromverstärkung des Transistors eine *Stufenverstärkung* definiert werden. Daher gibt man für eine Verstärkerstufe die *Spannungsverstärkung* als das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsspannung:

$$v_u = \frac{U_E}{U_A},$$

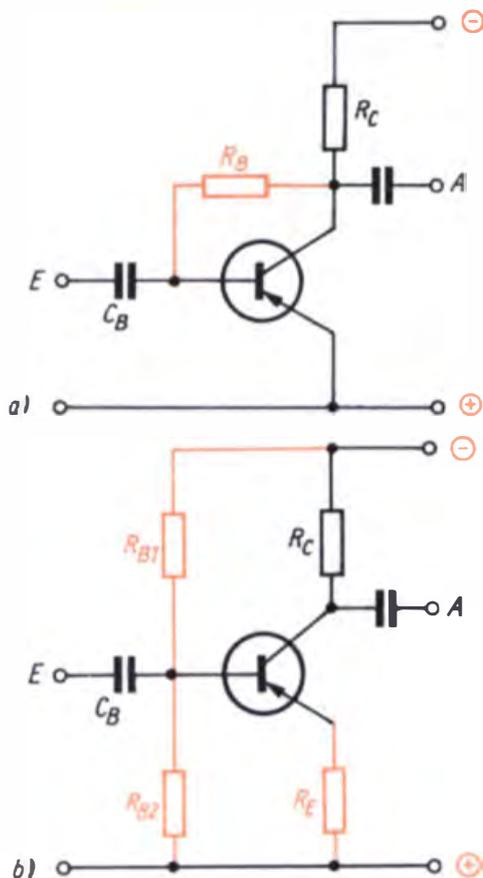
die *Stromverstärkung* als das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsstrom:

$$v_i = \frac{I_E}{I_A}$$

und die *Leistungsverstärkung* als das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsleistung an:

$$v_p = \frac{P_E}{P_A}.$$

Bild 58. Stabilisierung des Arbeitspunktes: a) durch gleitende Basisvorspannung, b) durch Emitterwiderstand und Basisspannungsteiler



Betrachten wir noch einmal den Transistor der Verstärkerstufe (Bild 57), so können wir feststellen, daß der Eingang von den Anschlüssen Basis und Emitter und der Ausgang von den Anschlüssen Kollektor und Emitter gebildet werden. Da der Emitter der gemeinsame Anschluß für Ein- und Ausgang ist, bezeichnet man diese Grundschaltung als *Emitterschaltung*. In analoger Weise können wir den Transistor in *Basisschaltung* mit der Basis als gemeinsamen Anschluß oder in *Kollektorschaltung* mit dem Kollektor als gemeinsamen Anschluß betreiben (Bild 59). Auch bei diesen beiden Grundschaltungen werden Arbeitspunkt- und Arbeitsbereichseinstellung sowie Stufentrennung durch Einschaltung von Widerständen und Kondensatoren vorgenommen. Jede Schaltungsart der Transistoren hat spezifische Eigenschaften. Die Begründung im einzelnen würde zu weit führen, wir prägen uns aber für spätere Arbeiten mit den Grundschaltungen ihre wichtigsten Eigenschaften ein (siehe Tabelle im Anhang).

Vielfältig sind die Aufgaben der Transistoren in der Fernsteuertechnik, so z. B. bei der Kleinsignalverstärkung, der Großsignalverstärkung

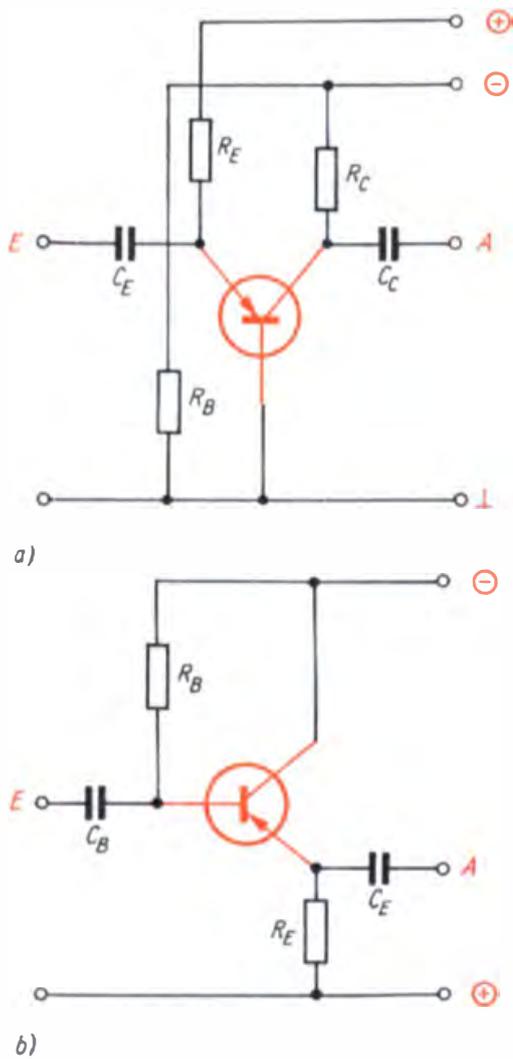


Bild 59. Transistorgrundschaltungen: a) Basisschaltung, b) Kollektorschaltung

und als elektronische Schalter. Die speziellen Probleme der jeweiligen Verstärkungsart werden bei den betreffenden Anwendungen besprochen.

Wir haben bisher die für uns wichtigen Eigenschaften des Transistors als Bauelement kennengelernt. Nun ist es notwendig, auch die für die jeweiligen Schaltungen geeigneten Typen auszuwählen und zu beschaffen. In dieser Hinsicht wurde die Mehrzahl der Schaltungen in diesem Buch so ausgelegt, daß Transistoren und Dioden vorgesehen sind, die man im Fachhandel erhält. Trotz einer großen Typenvielfalt der von den verschiedensten Herstellern produzierten Halbleiterbauelemente besteht bei vielen eine weitgehende Übereinstimmung der technischen Daten. Sie unterscheiden sich oft nur in der

Typenbezeichnung, der Anordnung der Anschlüsse und der Gehäuseform. Diese universell einsetzbaren Transistoren können wir in den meisten Schaltungen verwenden. Daher werden in diesen Fällen keine bestimmten Transistor- oder Diodentypen angegeben, sondern nur folgende Bezeichnungen:

TUP = Transistor-Universal-PNP

TUN = Transistor-Universal-NPN

DUG = Diode-Universal-Germanium

DUS = Diode-Universal-Silizium

Diese Bauelemente müssen die aus Tabelle 5 (Anhang) ersichtlichen Mindestanforderungen erfüllen. Mit diesen Daten und dem entsprechenden Datenblatt können wir uns aus dem Angebot im Fachgeschäft die geeigneten Typen auswählen. Da wir solch wichtige Daten wie B und f_T bedingt auch selbst bestimmen können, haben wir sogar die Möglichkeit, aus ungetypten Transistoren (*Basteltypen*) geeignete Exemplare auszusuchen. Diese ungetypten Transistoren werden in den Fachgeschäften meist sehr billig angeboten, sind aber für unsere Zwecke voll geeignet.

Bei den Transistoren und Dioden müssen wir die Anordnung bzw. Folge der Anschlüsse beachten, die wir für den entsprechenden Typ den Datenblättern der Hersteller entnehmen können. Wichtig ist, daß die Anschlußanordnung für Transistoren immer gilt, wenn man *auf die Anschlüsse* schaut. Bei Dioden mit axialen Anschlüssen (Glas- oder Plastauführung) ist die Katode durch einen Punkt oder Ring am Gehäuse gekennzeichnet. Die Bezeichnungen TUP, TUN, DUG und DUS werden in den Veröffentlichungen der Zeitschrift »Elektor« seit Jahren verwendet und wurden hier wegen der damit verbundenen Vorteile übernommen.

Der Transistor als elektronischer Schalter

Bisher lernten wir den Transistor nur als Verstärkerelement kennen. Welche Vorgänge laufen aber in ihm ab, wenn er als Schalter wirkt? Für einen Schalter sind allgemein zwei *Schaltzustände* charakteristisch. In dem einen Zustand wird der Stromdurchgang gesperrt, wobei am Schalter die volle Betriebsspannung anliegt. Im anderen Zustand kann der Strom weitgehend

ungehindert fließen, wobei am Schalter selbst nur eine geringe Restspannung auftritt. Ein ähnliches Schaltverhalten können wir bei einem Transistor feststellen. Betrachten wir dazu das Kennlinienfeld im Bild 60 und rufen uns gleichzeitig die Ergebnisse des Experimentes mit der Schaltung nach Bild 56 ins Gedächtnis zurück. Im Punkt A fließt ein solcher Basisstrom, daß der Transistor voll durchgesteuert ist. An ihm liegt nur noch die Kollektorrestspannung, auch als *Kniespannung* bezeichnet, an. Dieser Betriebszustand entspricht dem geschlossenen Schalter. Im Punkt B fließt kein Basisstrom, dafür aber der Kollektorreststrom; am Transistor fällt die volle Betriebsspannung ab. Er ist gesperrt, entspricht also einem geöffneten Schalter.

Dieses Verhalten des Transistors muß etwas näher erläutert werden. Um die Art des Ein- und Ausschaltens kennzeichnen zu können, teilt man das Kennlinienfeld in drei Bereiche ein, in *Sperrbereich*, *aktiven Bereich* und *Übersteuerungsbereich*. Zunächst sollen das Einschalten von B nach A und das Ausschalten umgekehrt erfolgen. Steuern wir die Basis mit einer idealen Rechteckspannung an, so steigt der Kollektorstrom mehr oder weniger gekrümmt nach einer Exponentialfunktion an (Bild 61a). Das ist auf die Verteilung der Ladungsträger im Transistor und auf ihre endliche Beweglichkeit zurückzuführen. Ähnlich ist es beim Ausschalten. Um annähernd Rechteckform des Kollektorstromes zu erreichen, wählt man die Steuerspannung

Bild 60. I_C-U_{CE} -Kennlinienfeld (schematisch)

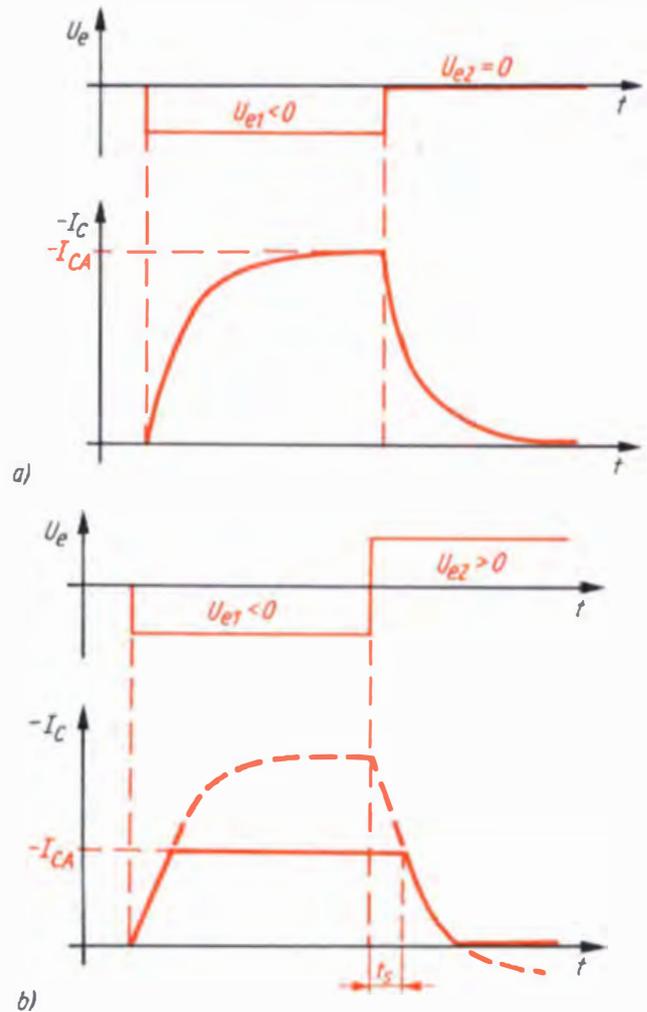
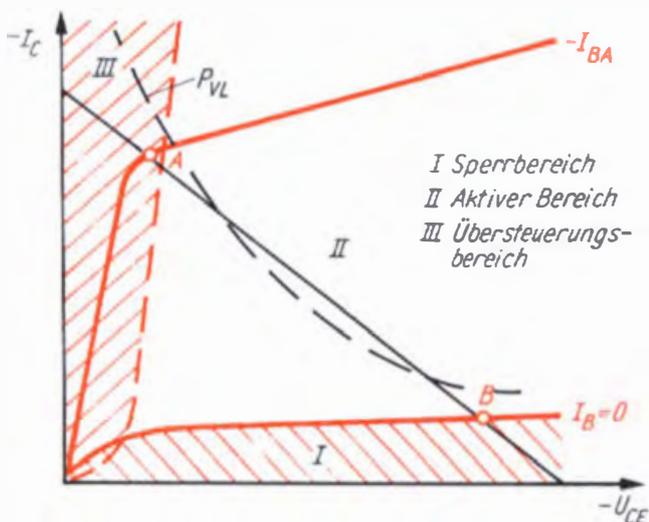


Bild 61. Verlauf der Steuerspannung und des Kollektorstromes beim Ein- und Ausschalten des Transistors: a) ohne Übersteuerung, b) mit Übersteuerung

so groß, daß der Punkt A auf der Arbeitsgeraden in den Übersteuerungsbereich verschoben wird (Bild 61b). Der Kollektorstrom steigt nun auf einen Wert I_{CA} an, den er infolge Begrenzung durch U_B und R_A beibehält. Nachteilig ist allerdings bei der Übersteuerung das Auftreten der zusätzlichen *Speicherzeit* t_s . Sie entspricht der Zeit, die erforderlich ist, um die in der Basischicht gespeicherten Ladungsträger abzusaugen.

Ist der Transistor gesperrt, so entsteht in ihm eine geringe Verlustwärme, da er nur von einem sehr kleinen Reststrom durchflossen wird. In Durchlaßrichtung ist die Verlustleistung ebenfalls gering, weil nur eine kleine Restspannung abfällt. Während des Übergangs von einem zum anderen Schaltzustand kann die Verlustleistung

jedoch erhebliche Werte annehmen. Dabei ist es sogar möglich und zulässig, daß die maximal zulässige Verlustleistung P_{tot} (bzw. die Verlustleistungshyperbel) überschritten wird, wenn die Übergangszeit sehr kurz ist.

Zwei Schalter schalten sich gegenseitig

Wir wollen die Richtigkeit des eben Gesagten überprüfen. Zu diesem Zweck schalten wir zwei über Kondensatoren gekoppelte Verstärkerstufen so zusammen, daß jeweils der Eingang der einen Stufe mit dem Ausgang der anderen verbunden wird und umgekehrt (Bild 62).

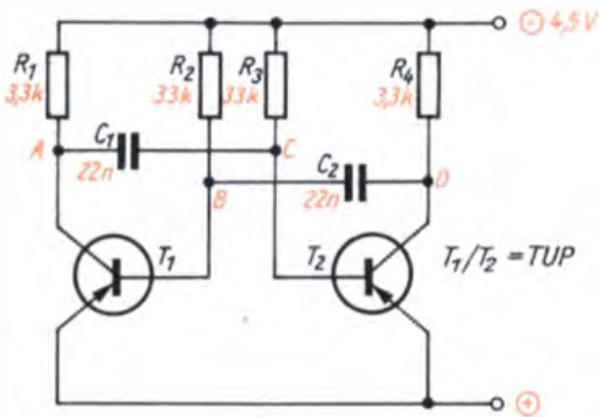
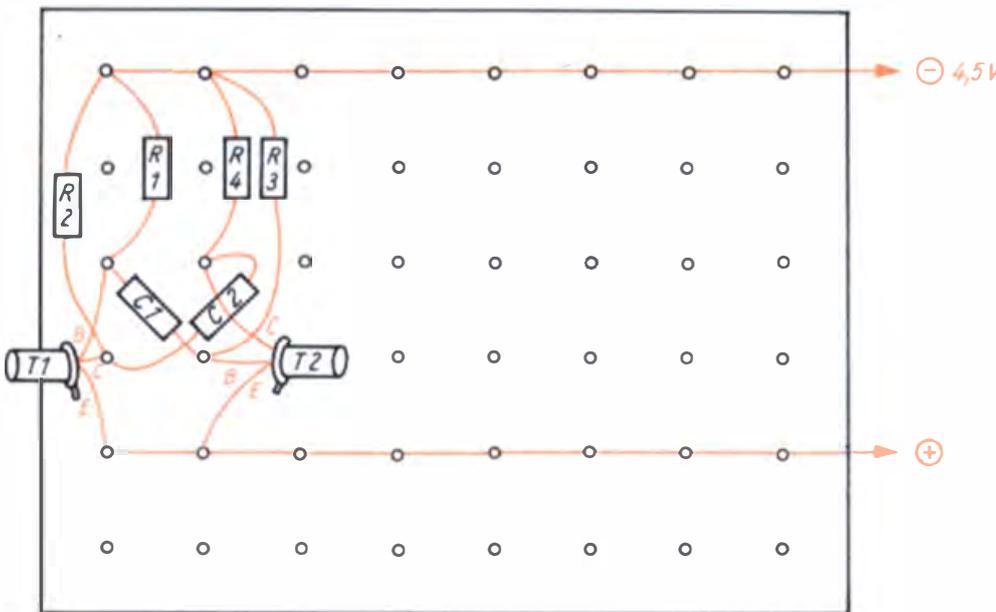


Bild 62. Schaltbild des astabilen Multivibrators

Bild 63. Aufbau des astabilen Multivibrators auf der Experimentierplatine (siehe auch Bild 3)



Die Schaltung bauen wir auf der Experimentierplatine auf (Bilder 3 und 63). Für die beiden Transistoren T_1 und T_2 löten wir Transistorfassungen ein, um die Transistoren im Bedarfsfall leicht auszuwechseln zu können. Vergleichen wir die Kurvenzüge des Diagramms (Bild 64) mit den uns bereits bekannten Vorgängen bei der Ladung bzw. Entladung eines Kondensators und dem Schaltverhalten des Transistors, so erkennen wir, daß im *astabilen Multivibrator* Lade- und Schaltvorgänge ablaufen. Als Beweis schalten wir einen Kopfhörer zwischen Kollektor von T_1 oder T_2 und die Plusleitung und können so einen Ton von etwa 1000 Hz hören. Damit wird uns auch die Bezeichnung *astabiler Multivibrator* klar. *Multivibrator* bedeutet soviel wie Vielfachschwinger und *astabil*, daß die Schaltung von selbst anschwingt und keine Grundstellung hat, in der sie verharrt.

Wie kommen diese Kippschwingungen überhaupt zustande? Wir gehen davon aus, daß im Augenblick des Einschaltens ein Transistor schneller den leitenden Zustand erreicht als der andere. Das kann z. B. die Ursache haben, daß die Stromverstärkung der Transistoren verschieden ist oder die Widerstände und Kondensatoren der beiden Zweige nicht gleich groß sind. Selbst wenn alle Werte genau übereinstimmen, genügt schon die unterschiedliche Erwärmung zweier Bauelemente, um das erforderliche Ungleich-

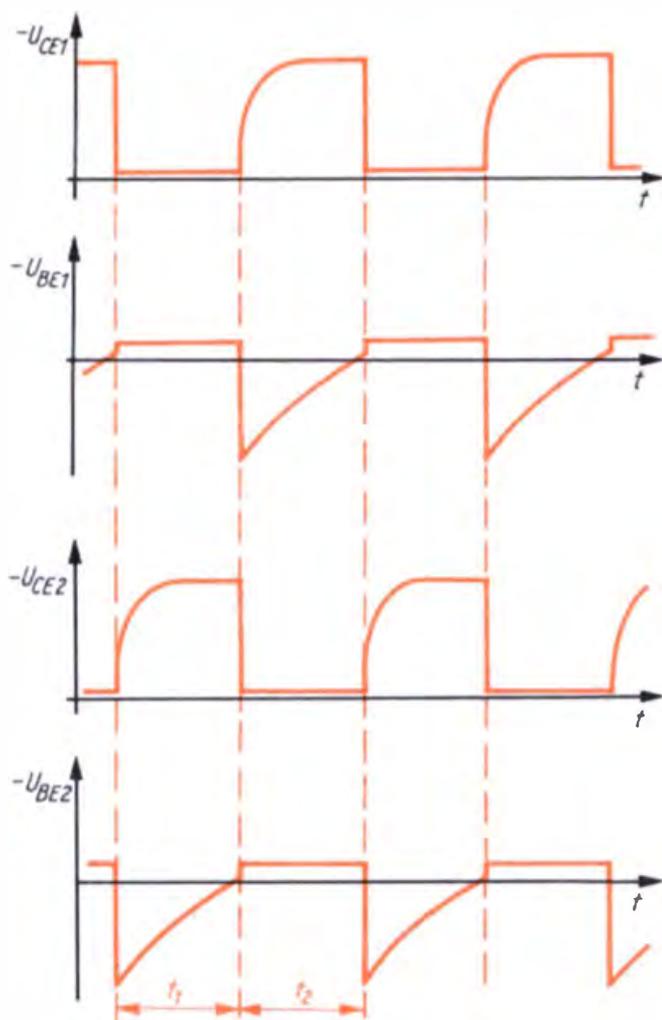


Bild 64. Impulsschema des astabilen Multivibrators

gewicht herzustellen. Wir nehmen an, daß T_2 schneller den leitenden Zustand erreicht, also im Punkt D eine Spannungsänderung in positiver Richtung auftritt. Dieser positive Impuls gelangt über C_2 auf die Basis von T_1 und sperrt ihn vollständig. Dadurch kommt es im Punkt A (Kollektor von T_1) zu einem negativen Impuls, der, über C_1 auf die Basis von T_2 rückgekoppelt, diesen in den leitenden Zustand überführt. Nunmehr entlädt sich C_2 über R_2 , so daß der Punkt B und damit die Basis von T_1 nach der Zeit $t_1 \approx 0,7 \cdot R_2 \cdot C_2$ über R_2 an negativem Potential anliegt und T_1 leitend wird. Der nun an A auftretende negative Impuls, der über C_1 auf die Basis von T_2 rückgekoppelt wird, sperrt diesen. Jetzt ist also T_1 leitend und T_2 gesperrt. Dieser Zustand bleibt so lange erhalten, bis sich C_1 nach der Zeit $t_2 \approx 0,7 \cdot R_3 \cdot C_1$ über R_3 entladen hat und ein

neuerliches Umkippen einsetzt. Die Schaltzustände sind nicht stabil, sie wechseln sich mit der Frequenz

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_1 + t_2}$$

ab. Legen wir den astabilen Multivibrator symmetrisch aus, so wird

$$R = R_2 = R_3, C = C_1 = C_2 \quad \text{und} \quad f = \frac{1}{1,4 \cdot R \cdot C}$$

Der astabile Multivibrator von Bild 69 schwingt bzw. kippt bei der angegebenen Dimensionierung mit der Frequenz

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{1,4 \cdot R \cdot C} = \frac{1}{1,4 \cdot 33 \cdot 10^3 \Omega \cdot 22 \cdot 10^{-9} \text{ F}} \\ &= \frac{10^6}{1,4 \cdot 33 \cdot 22 \text{ s}} \approx \frac{10^6}{1016 \text{ s}} \approx 1000 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

Mit einem astabilen Multivibrator können wir also Kippschwingungen ganz bestimmter Frequenz erzeugen und haben somit in ihm einen Oszillator oder Generator für Impulse kennengelernt.

Proportionale Fernsteuerung mit Digitaltechnik

Was ist Impuls- und was Digitaltechnik?

Wir wollen uns nun mit einigen Problemen der sich in den letzten Jahren stürmisch entwickelten Digitaltechnik, angewendet in der Fernsteuerung, vertraut machen und werden dabei auf den bisher erworbenen Kenntnissen aufbauen.

Ausgangspunkt unserer weiteren Überlegungen ist der elektrische Impuls bzw. die Impulstechnik. Unter einem *Impuls* verstehen wir

- das kurzzeitige Auftreten oder Ausbleiben einer elektrischen Größe (Strom, Spannung) oder
- allgemein das kurzzeitige Abweichen einer Größe von ihrem Grundwert.

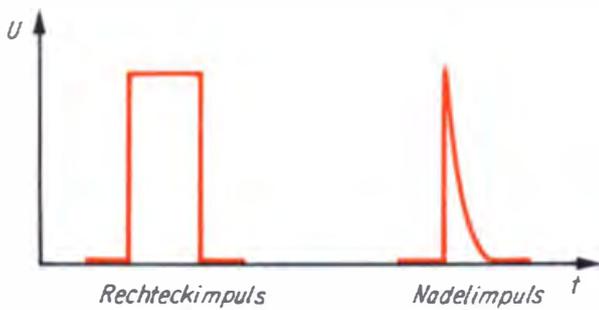


Bild 65. Impulsformen

Die wesentlichen uns interessierenden Impulsformen sind der *Rechteckimpuls* und der *Nadelimpuls* (Bild 65).

In diesem Kapitel werden Schaltungen zur Impulserzeugung, -formung und -verarbeitung eine wesentliche Rolle spielen. Welcher Zusammenhang besteht nun zwischen der Impuls- und der Digitaltechnik? Zunächst kann festgestellt werden, daß die Impulstechnik Grundlage der Digitaltechnik ist. Die digital kodierte Information tritt nämlich in Impulsform auf. In digital arbeitenden Geräten werden die Informationen *binär*, d. h. durch ein Zweierzahlensystem, dargestellt. Die physikalische Größe (Strom oder Spannung), die die Information enthält, wird durch Schaltelemente verarbeitet, die nur zwei diskrete Zustände annehmen können. Diese beiden Zustände (ein–aus oder leitend–nichtleitend) werden mit den Symbolen H (high, engl. = hoch) und L (low, engl. = tief, klein) bezeichnet. Für die Fernsteuerung, besonders aber für die Proportionalsteuerung, bedeutet die konsequente Anwendung der Digitaltechnik einen großen Fortschritt. Zu den wesentlichen Vorteilen der Digitaltechnik zählen

- die Verwendung weniger, einfacher und betriebssicherer Grundschaltungen,
- eine hohe Betriebssicherheit infolge der für beide Signalpegel (H und L) zulässigen Toleranzen,
- die Möglichkeit einfacher Signalregenerierung,
- die Ausnutzung der Eigenschaften von Dioden und Siliziumtransistoren als Schalter und
- die Anwendung der Schaltungsintegration zur Verringerung des Schaltungsaufwandes.

Ehe wir uns an den Aufbau der Digitalfernsteueranlage heranwagen, werden wir uns in

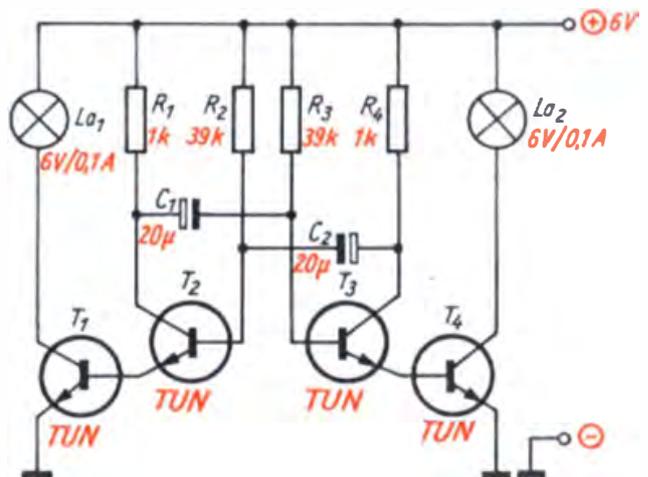
einigen einfachen Experimenten mit den Besonderheiten der Impulstechnik vertraut machen. Alle beschriebenen Geräte sind so konzipiert, daß wir bei Aufbau und Inbetriebnahme ohne den Oszillographen auskommen. Sollten wir aber infolge eines schadhafte Bauelements oder Beschädigung der Anlage (z. B. durch Modellabsturz) zur systematischen Fehlersuche gezwungen sein, so werden wir auf ihn zurückgreifen müssen. Aus diesem Grunde sind auch die Impulsbilder wichtiger Meßpunkte in den Schaltungen wiedergegeben. Um keine Zeit bei der Fehlersuche zu vergeuden, sollten wir unbedingt vor dem Aufbau einer Schaltung alle Bauelemente mit unseren Hilfsmitteln sorgfältig prüfen bzw. ausmessen.

Mit einfachen Impulsschaltungen beginnen wir

Der Blinkgeber – eine interessante Schaltung

Eine Grundschaltung zur Impulserzeugung lernen wir bereits kennen – den astabilen Multivibrator. Nun wollen wir mit ihm langsame elektrische Impulse erzeugen und damit kleine Glühlampen aufblincken lassen. Für Schiffs- und Automodelle, aber auch für Flugmodelle lassen

Bild 66. Schaltbild des Blinklichtgebers



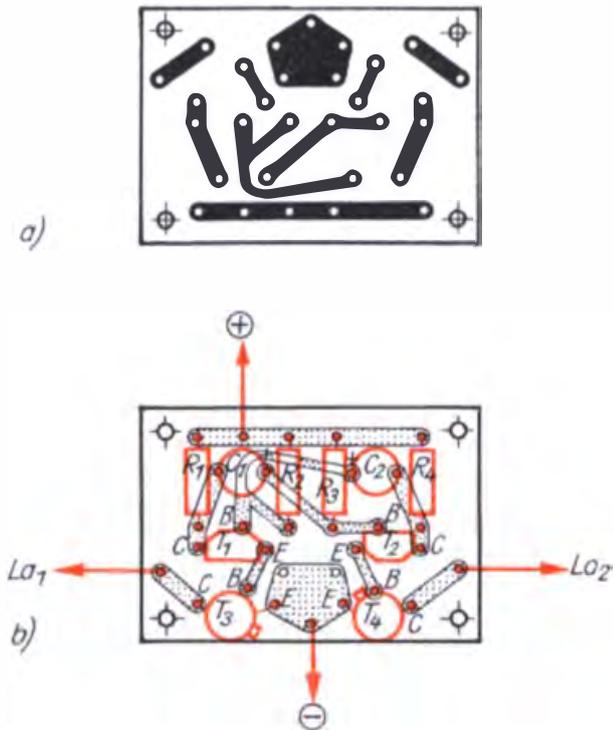


Bild 67. Blinklichtgeber: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan

sich durchaus sinnvolle Anwendungen der Blinkerschaltungen finden. Nach der Gleichung $f = \frac{0,7}{R \cdot C}$ können wir bei entsprechender Dimensionierung von R und C recht niedrige Kippfrequenzen einstellen.

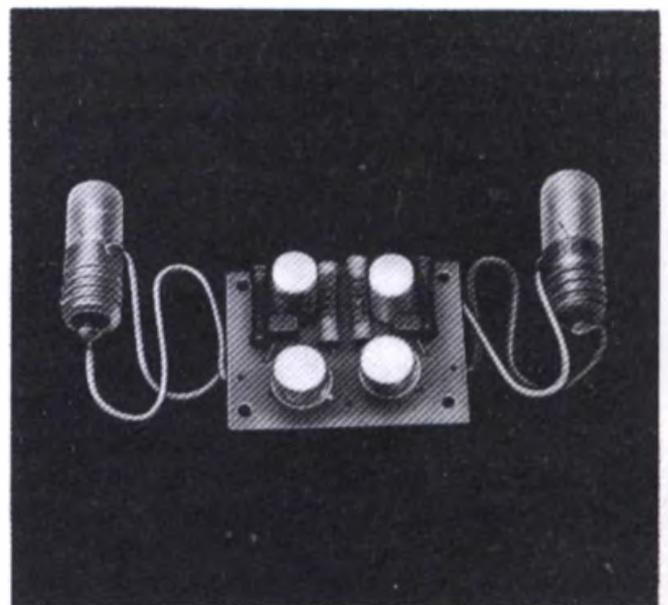
Die Blinkschaltung weicht etwas von der bereits bekannten Schaltung ab. Wir verwenden jeweils zwei Transistoren in Tandemschaltung (Bilder 66 bis 68). Das hat den Vorteil, daß Transistoren mit geringer Stromverstärkung (Basteltypen) eingesetzt werden können. Die Schaltung erproben wir zunächst wieder auf der Experimentierplatine und können dabei die Blinkzeiten durch Variation von R und C verändern. Soll nur eine Lampe blinken, so lassen wir z. B. T_1 weg und schalten den Emitter von T_2 auf Masse. Bei der angegebenen Dimensionierung erzielen wir eine Taktzeit von etwa 1,1 s. Dabei leuchtet jede Lampe bei gleicher Hell- und Dunkelzeit etwa 0,5 s.

Wir erzeugen Impulse von einstellbarer Dauer

Dazu verwenden wir das Schaltbild nach Bild 69. Der Multivibrator besteht aus zwei Verstärkerstufen, die im Unterschied zum astabilen Multivibrator, bei dem beide Verstärkerstufen kapazitiv wechselseitig miteinander gekoppelt waren, eine kapazitive Stufenkopplung über C_1 und eine galvanische Kopplung (Basis von T_2 am Kollektor von T_1) haben. Diese Schaltung weist nicht nur im Aufbau Gemeinsamkeiten mit dem astabilen Multivibrator auf, sondern auch in der Funktion. Untersuchen wir sie daher zunächst experimentell: Wir bauen die Schaltung nach Bild 69 auf der Experimentierplatine auf und variieren R_1 zwischen halbem und vollem Wert. Der Schalter S_1 wird betätigt.

Ergebnis: Nach dem kurzzeitigen Schließen des Schalters S_1 leuchtet die Lampe La_1 auf und verlöscht nach einer gewissen Zeit wieder. Die Leuchtdauer ist mit R_1 einstellbar. Die Schaltung hat also einen *stabilen Schaltzustand* (Grundstellung \triangleq Lampe dunkel) und einen *instabilen Schaltzustand* (Arbeitsstellung \triangleq Lampe leuchtet). Sie wird daher als *monostabiler Multivibrator* bezeichnet. Der astabile Multivibrator hat im Unterschied dazu *zwei* instabile bzw. astabile Schaltzustände, die einander ständig abwechseln.

Bild 68. Ansicht der bestückten Leiterplatte des Blinklichtgebers



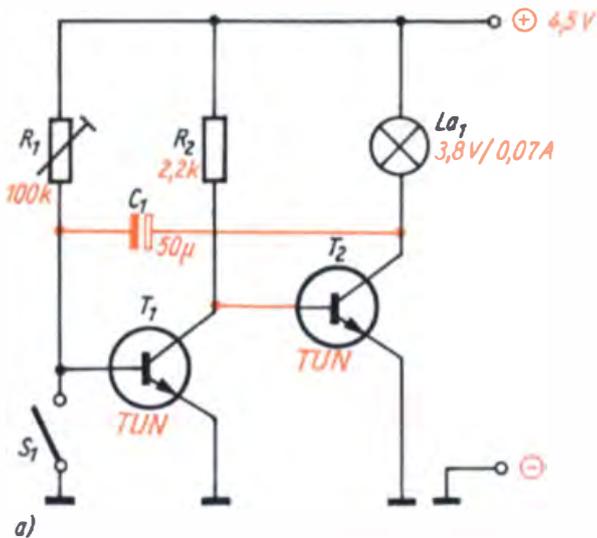


Bild 69. Schaltbild des monostabilen Multivibrators

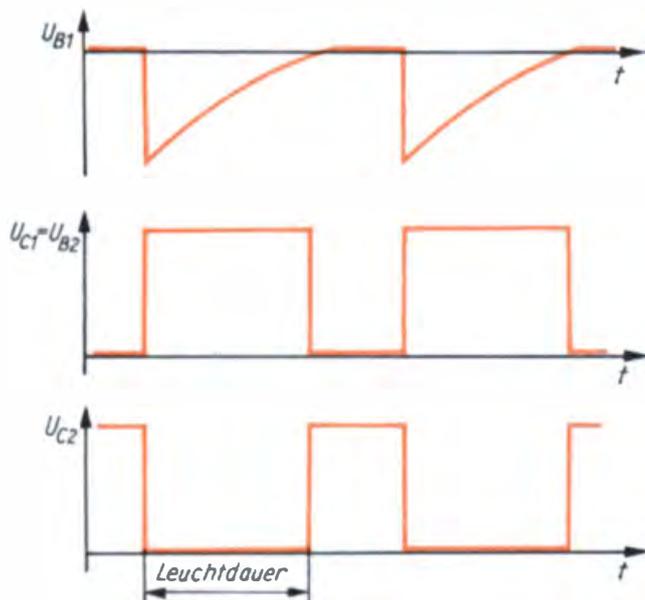


Bild 70. Impulsdiagramme des monostabilen Multivibrators

Überlegen wir, wie dieses Schaltverhalten zustande kommt. Da der Transistor T_1 über R_1 eine feste Basisspannung erhält, ist er in der Grundstellung leitend, während T_2 durch die galvanische Kopplung über R_2 gesperrt ist. Trifft nun auf einen der beiden Eingänge ein Steuerimpuls bestimmter Polarität, kippt der monostabile Multivibrator in seine Arbeitsstellung, d. h., wenn der in Grundstellung leitende Transistor (T_1) durch einen negativen Impuls angesteuert wird. Diesen Steuerimpuls erzeugen wir durch kurzzeitiges Schließen des Schalters S_1 ,

wodurch der leitende Transistor T_1 gesperrt wird. Es entsteht an dessen Kollektor ein L-H-Potentialsprung, der die Basis von T_2 so steuert, daß am Kollektor von T_2 ein H-L-Potentialsprung auftritt. Diesen überträgt C_1 auf die Basis von T_1 und unterstützt damit den negativen Eingangsimpuls. C_1 entlädt sich mit $t_1 = 0,7 \cdot R_1 \cdot C_1 \approx 1,4$ s über R_1 . Ist die Basisspannung des Transistors T_1 wieder schwach positiv geworden, kehrt er in den leitenden Zustand zurück, das am Kollektor auftretende L-Potential wird auf die Basis von T_2 übertragen und sperrt diesen. Die Zeitkonstante des monostabilen Multivibrators ist durch die Dimensionierung von C_1 und R_1 einstellbar. Mit R_1 wird gleichzeitig der Arbeitspunkt von T_1 so eingestellt, daß er sich ohne Signal am Eingang im leitenden Zustand befindet. Bild 70 zeigt die Spannungsverläufe an der Basis und am Kollektor von T_1 sowie am Kollektor von T_2 . Das typische Verhalten des monostabilen Multivibrators, unabhängig von Dauer und Form des Steuerimpulses einen exakten Rechteckimpuls bestimmter Dauer zu erzeugen, werden wir noch anwenden. Vorher wollen wir aber eine Schaltung mit Gedächtnis kennenlernen.

Der Flip-Flop hat ein Gedächtnis

Bei der Schaltung im Bild 71 handelt es sich offensichtlich wieder um zwei Verstärkerstufen mit T_1 und T_2 , die aber diesmal beide wechselseitig galvanisch (über R_1 und R_2) gekoppelt sind. Wir führen dazu ein Experiment durch: Wir bauen die Schaltung auf der Experimentierplatte auf und betätigen abwechselnd die Schalter S_1 und S_2 .

Ergebnis: Beim Einschalten der Betriebsspannung nimmt die Schaltung eine beliebige Schaltstellung ein; angenommen, La_1 leuchtet, und La_2 ist dunkel. Wird der Schalter S_1 kurzzeitig geschlossen, wechselt der Schaltzustand. La_1 verlischt, und La_2 leuchtet. Dieser Zustand bleibt so lange erhalten (die Schaltung merkt ihn sich gewissermaßen), bis Schalter S_2 geschlossen wird. S_1 stellt dann den Ausgangszustand (La_1 leuchtet, La_2 ist dunkel) wieder her. Da die Schaltung zwei stabile Schaltzustände hat, wird sie als *bistabiler Multivibrator* oder Flip-Flop (FF) bezeichnet.

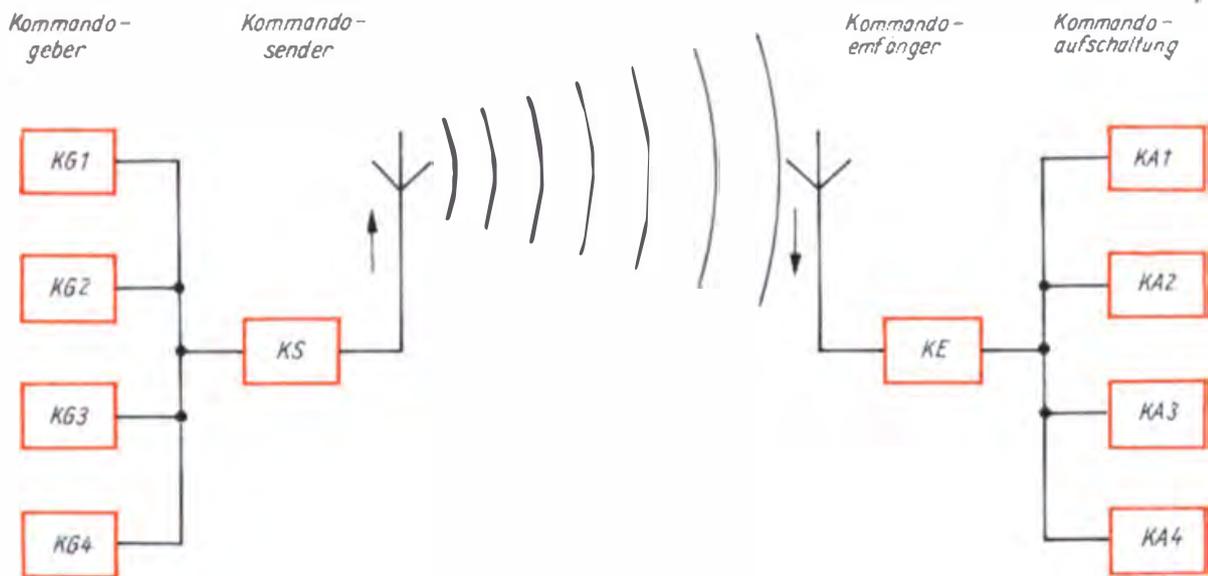


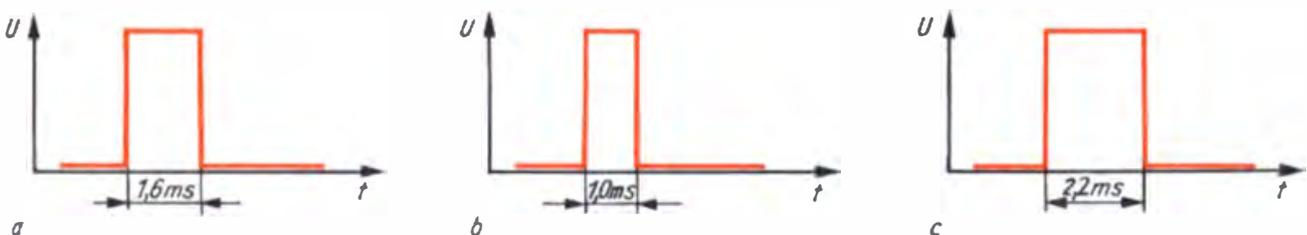
Bild 73. Schema einer Fernsteuerung

entsprechenden *Kommandoaufschalteinrichtung* zugeführt. Kommandoaufschalteinrichtung kann z. B. die Rudermaschine zur Lenkung eines Modells oder der Schalter zum Ein- und Ausschalten des Fahrmotors sein.

Für die Kodierung und Dekodierung bieten sich verschiedene technische Möglichkeiten an. In der Praxis hat sich folgendes Verfahren sehr gut bewährt, das den Vorteil hat, recht einfach zu sein, so daß wir es mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln anwenden können.

Jedem Kommando ist ein Impuls zugeordnet, der nach Übertragung in der Aufschalteinrichtung des Modells einen entsprechenden Vorgang bewirkt. Damit der Steuervorgang ausgelöst werden kann, muß die Länge des Kommandoimpulses zwischen 1,0 ms und 2,2 ms (Bild 74) veränderlich bzw. einstellbar sein. Die Impulslänge 1,0 ms entspricht dann z. B. dem

Bild 74. Kommandoimpulse der Fernsteuerung: a) mittlere Impulsdauer 1,6 ms, b) kürzeste Impulsdauer 1,0 ms, c) größte Impulsdauer 2,2 ms



Kommando »Ruder rechts« oder »Motor 1 – EIN« und die Impulslänge 2,2 ms analog dazu dem Kommando »Ruder links« oder »Motor 2 – EIN«. Bei der mittleren Impulslänge von 1,6 ms steht das Ruder in Mittel- bzw. Neutralstellung, oder beide Motoren sind ausgeschaltet. Daß wir mit dieser Impulslängenänderung noch andere Vorgänge schalten (steuern) können, werden wir noch sehen.

Wollen wir mehrere Funktionen fernsteuern, benötigen wir auch mehrere Kommandoimpulse, d. h. so viele Kommandoimpulse wie Funktionen. Dabei setzen wir voraus, daß alle Funktionen gleichzeitig und unabhängig voneinander betätigt werden können. Eine solche Steuerung bezeichnet man als *Simultansteuerung*. Wenn wir nämlich unabhängige Funktionen miteinander kombinieren, erhalten wir eine wesentlich höhere Zahl, jedoch voneinander abhängige Funktionen. Das bedeutet für die Praxis, daß zur gleichen Zeit immer nur eine Funktion betätigt werden kann. Für die in diesem Buch vorgeschlagenen ferngesteuerten Modellfunktionen ist der Simultanbetrieb erforderlich.

In der ersten Ausbaustufe können wir mit

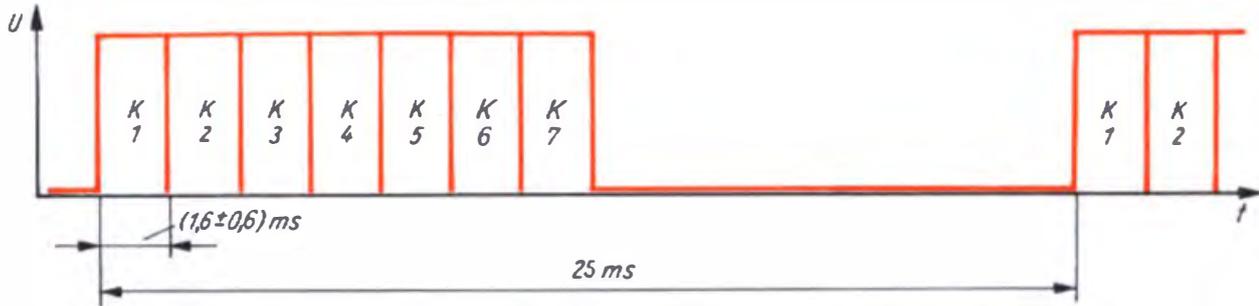


Bild 75. Kommandoimpulsfolge für 7 Kanäle

unserer Fernsteueranlage zwei Funktionen fernsteuern, voll ausgebaut sind es dann sieben. Diese Fernsteueranlagen werden, bedingt durch die historische Entwicklung der Begriffe, nun nicht als Zwei- bzw. Siebenfunktionsanlage, sondern als Zwei- bzw. Siebenkanalanlage bezeichnet. Dies ist erwähnenswert, da wir den Begriff »Kanal« dann später noch für einen anderen Sachverhalt verwenden.

Technisch wird das Problem der Mehrkanalübertragung so gelöst, daß die Kommandoimpulse von $(1,6 \pm 0,6)$ ms Länge aneinandergereiht und als Telegramm übertragen werden. Dieses Telegramm wird alle 22 ms, also mit einer Frequenz von etwa 50 Hz, wiederholt. Die zeitlich geschachtelte Übertragung der Impulse wird in der Technik als *zeitmultiplexe Übertragung* bezeichnet (Bild 75). Die Pause von $22 \text{ ms} - 7 \cdot 2,2 \text{ ms} = 22 \text{ ms} - 15,4 \text{ ms} = 6,6 \text{ ms}$ wird zur Synchronisation des Dekoders im Modell mit dem Impulsteil (Koder) des Senders genutzt. Dadurch erreicht man, daß alle 22 ms im Modell der Kanalimpuls 1 auch am Kanalausgang 1 herauskommt, selbst wenn auf der Übertragungstrecke infolge Störung ein Impuls hinzugekommen sein sollte. Nach diesem kleinen Exkurs in die Theorie wollen wir unsere erste Steuerung aufbauen und in einem Modell praktisch erproben.

Wir erzeugen die Kanalimpulse

Unsere erste Steuerung werden wir mit einem Kanal bzw. einer Funktion erproben. Die nächste Aufgabe ist daher zu überlegen, wie wir den periodisch wiederkehrenden Einzelimpuls von $(1,6 \pm 0,6)$ ms Dauer mit den uns bereits bekannten Grundsaltungen im Kommandogeber

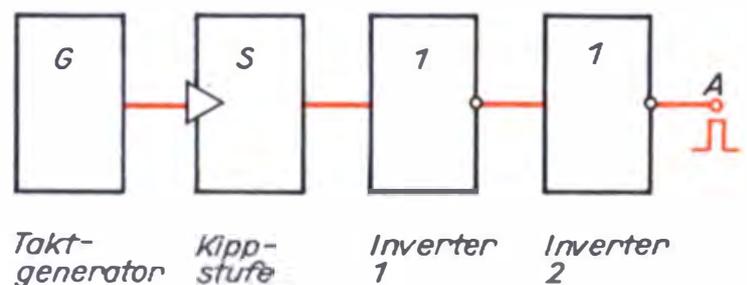
erzeugen können. Um den Kommandoimpuls alle 22 ms zu senden, benötigen wir einen *Taktgenerator*, der die entsprechende Zeitbasis liefert (Bild 76). Dieser Taktgenerator stößt eine *Kippstufe* an, die den variablen Kommandoimpuls, im weiteren als *Kanalimpuls* bezeichnet, erzeugt. Die beiden nachgeschalteten Verstärkerstufen invertieren den Kanalimpuls zweimal und formen ihn zu einem exakten Rechteck. Außerdem erreichen wir damit eine Entkopplung der Kippstufe von der angeschlossenen Aufschalteneinrichtung, so daß die Impulszeiten von dieser nicht beeinflußt werden können.

Als Taktgenerator verwenden wir einen astabilen Multivibrator (Bild 77), der auf die Taktzeit

$$T = 1,4 \cdot R \cdot C = 1,4 \cdot 82 \text{ k}\Omega \cdot 0,22 \mu\text{F} \approx 25 \text{ ms}$$

eingestellt ist. Kippt der Transistor T_2 vom gesperrten in den leitenden Zustand, so wird C_3 von dem Spannungssprung umgeladen. Dadurch sperrt der Transistor T_3 der Verstärkerstufe (im weiteren als Kippstufe bezeichnet), denn an der Basis liegt jetzt negatives Potential. Über die Widerstände R_5/R_6 entlädt sich der Kondensator C_3 , so daß T_3 nach Ablauf der Zeitkonstanten $T = 0,7(R_5 + R_6) \cdot C_3$ wieder in den leitenden Zustand zurückkehrt. Die Zeit des Kippvorganges von T_3 ist abhängig

Bild 76. Blockschaltbild des Kanalimpulsgebers



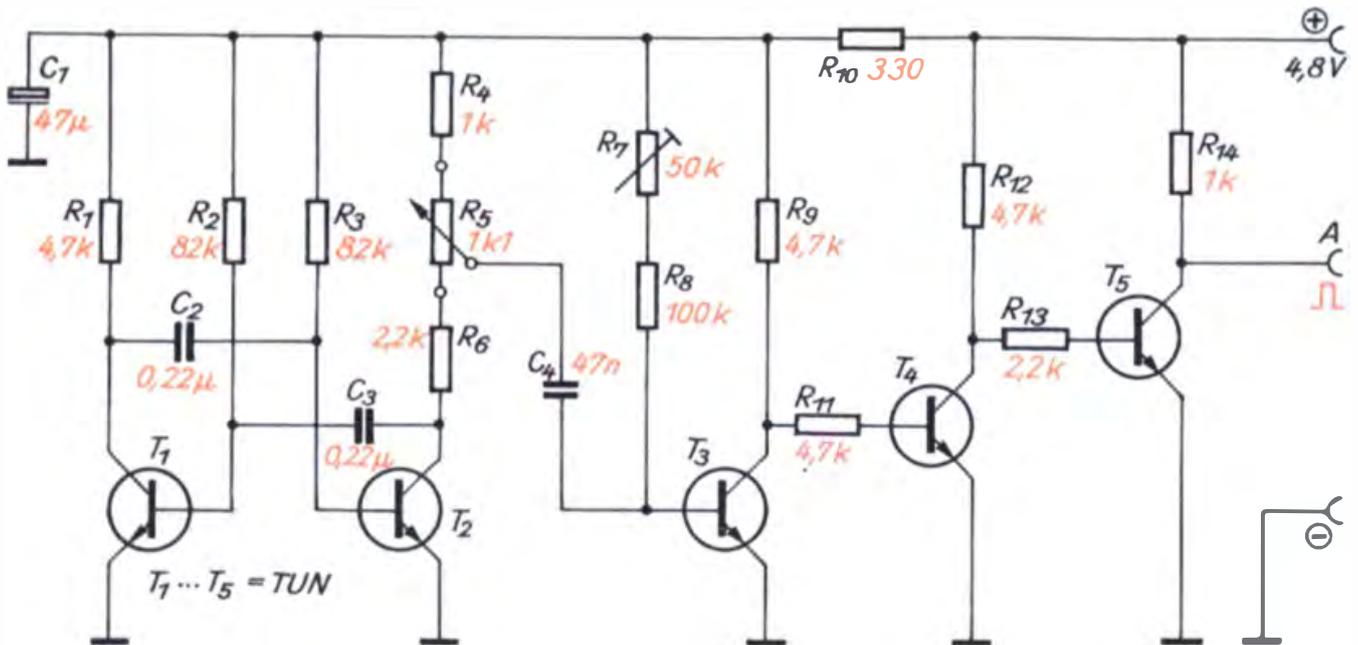
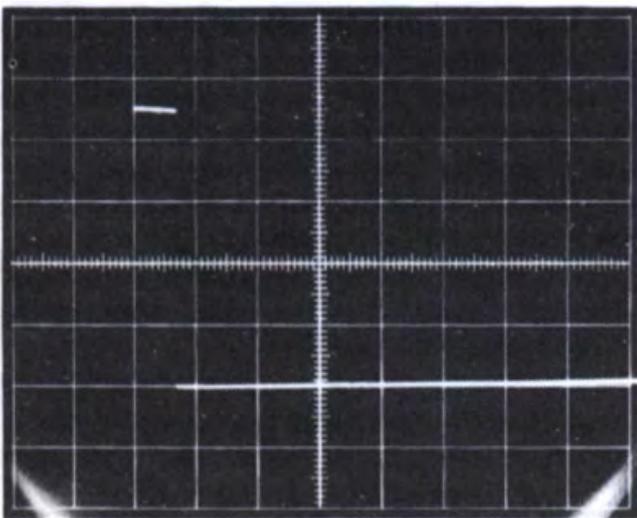


Bild 77. Schaltbild des Kanalimpulsgebers (Servoprüfer)

- von dem Kapazitätswert des Koppelkondensators C_3 , denn dieser bestimmt die Zeitkonstante des Umladevorganges;
- von den Widerständen R_5/R_6 , da diese ebenfalls nach $t = 0,7 \cdot C \cdot R$ den Entladevorgang beeinflussen, und
- von der Höhe des Spannungssprunges beim Umladen von C_3 , da die Spannung die Menge der in C_3 gespeicherten Ladung bestimmt ($Q = C \cdot U$).

Bild 78. Oszillogramm des Kanalimpulses (Zeitbasis: 2 ms/cm, Ablenkempfindlichkeit: 1 V/cm)



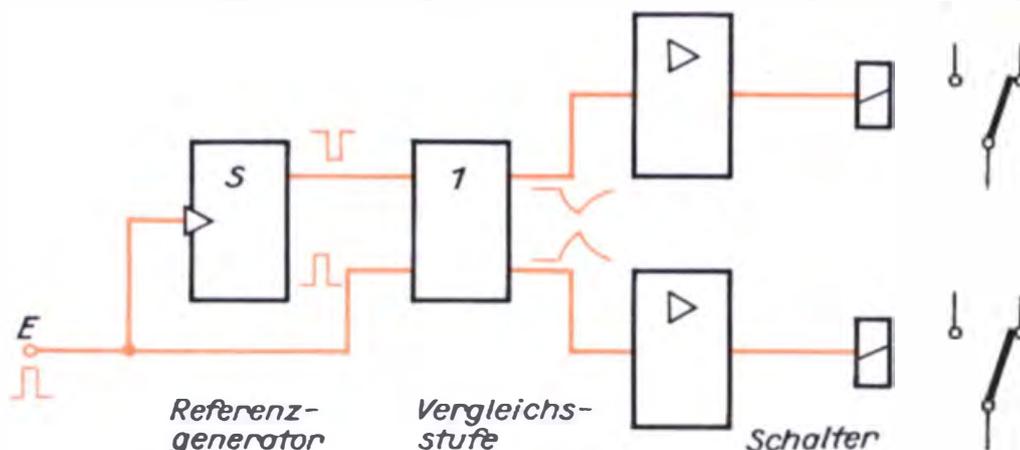
Mit R_5 können wir die Zeit des Entladevorganges von C_3 beeinflussen und stellen damit die Variationsbreite eines Kanalimpulses von $\pm 0,6$ ms ein. Die Grundzeit des Kanalimpulses (1,6 ms) wird durch die Mittellage bzw. Neutralage des Schleifers am Kanalpotentiometer R_4 eingestellt. Da wir dort den Spannungssprung für den Kippvorgang von T_3 variabel abgreifen können, nutzen wir diese Möglichkeit zur Impulsvariation. Die Welle des Potentiometers R_4 wird später direkt mit dem Steuerknüppel verbunden. In der Impulslängenvariation steckt die Proportional- bzw. Kommandoinformation des Kanals. Damit haben wir den in der Länge variablen Kommando- bzw. Kanalimpuls von T_3 ($1,6 \pm 0,6$) ms gewonnen, der etwa alle 25 ms wiederholt wird. Die nachfolgenden Stufen mit T_4 und T_5 verstärken und formen ihn zu einem exakten Rechteckimpuls. Die Schaltung bauen wir zuerst auf der Experimentierplatte auf. Nehmen wir den Kommandogebber in Betrieb, so ist im Kopfhörer ein tiefer Brummtone zu vernehmen, dessen Tonhöhe sich bei Betätigung von R_4 verändert. Mit einem Oszillographen erhalten wir das Bild des Rechteckimpulses (Bild 78).

Der Kanalimpuls wird ausgewertet

Der Kanalimpuls wird in der *Aufschalteinrichtung* ausgewertet. Als erste Aufschalteinrichtung lernen wir den *Schaltverstärker* kennen, der aus den Funktionsgruppen Referenzgenerator, Vergleichsstufe und Schalter (Bild 79) besteht. In der Längenvariation des Kanalimpulses von $\pm 0,6$ ms steckt die Kommandoinformation. Um diese Information vom Impuls zu trennen und in eine entsprechende elektrische Größe umzuformen, gibt es verschiedene Verfahren. Für die vorliegende Aufgabe hat sich das Verfahren des *Impulsvergleichs* wegen seiner Einfachheit und Zuverlässigkeit bewährt. Um den Impulsvergleich durchführen zu können, müssen wir in der Aufschalteinrichtung einen Vergleichsimpuls, in der Technik als *Referenzimpuls* bezeichnet, erzeugen. Diesen Impuls gewinnen wir mit dem *Referenzgenerator*, einem monostabilen Multivibrator. Der Referenzgenerator wird vom Kanalimpuls angestoßen – getriggert – und liefert so den Referenzimpuls definierter Länge. Kanal- und Referenzimpuls werden in der *Vergleichsstufe* verglichen. Sind beide Impulse gleich lang, heben sie sich gegenseitig auf. Bei unterschiedlicher Länge entsteht ein positiver oder negativer Restimpuls, der je nach Polarität einen der beiden angeschlossenen Schalter ansteuert.

Nun kennen wir die prinzipielle Funktion der Kommandoauswertung. Als nächstes überlegen wir, wie diese Funktion mit elektronischen Grundschaltungen realisiert werden kann. Den Referenzgenerator bildet der monostabile Multivibrator mit den Transistoren T_1 und T_2 (Bild 80).

Bild 79. Blockschaltbild des Schaltverstärkers



Da wir diesen Generator später auch in anderen Schaltungen (Segelwinde und Servo) verwenden, weist er gegenüber dem von Bild 69 einige Änderungen auf. Die kapazitive Rückkopplung wird durch C_6 , die galvanische Rückkopplung durch R_6 hergestellt. Da wir für weitere Anwendungen die Impulsdauer zweifach beeinflussen müssen, werden diese Möglichkeiten bereits jetzt vorgesehen. Mit R_4 gleichen wir den Referenzgenerator auf die mittlere Impulsdauer von 1,6 ms ab. Das Potentiometer R_2 führt bei Anwendung im Nachlaufverstärker die Impulsdauer im Bereich von 1,0...2,2 ms dem Kanalimpuls nach.

Um die weiteren Erläuterungen besser zu verstehen, betrachten wir neben dem *Schaltbild* auch immer das *Impulsdiagramm* (Bild 81) und die *Oszillogramme* (Bild 82). Der positive Kanalimpuls wird im Vergleichspunkt MP2 mit dem negativen Referenzimpuls verglichen. Sind beide gleich lang und gleich groß, verbleibt kein Restimpuls. Ist aber der Kanalimpuls länger als der Referenzimpuls, entsteht an MP2 ein positiver Restimpuls. Auf den positiven Restimpuls spricht aber nur der npn-Transistor T_4 an, der dadurch leitend wird. Das bedeutet aber, daß T_6 ebenfalls über R_{16} leitend wird, d. h., das Relais 2 zieht an.

Da der Restimpuls aber nur eine Dauer von maximal 0,6 ms haben kann und dazwischen eine Impulspause von ≈ 20 ms auftritt, würde das Relais in schneller Folge anziehen und abfallen – es würde schnarren. Zur Verhinderung dieser unerwünschten Erscheinung müssen wir die Impulspause überbrücken bzw. den Restimpuls dehnen. Diese Aufgabe übernimmt C_6 . Wenn T_4 leitend ist, lädt sich C_6 negativ auf und kann sich in der Impulspause langsam entladen. Aus dem

kurzen rechteckigen Restimpuls wird so ein langgestreckter Dreiecksimpuls. C_6 muß also so groß sein, daß T_6 nur wenig verzögert anzieht und nicht schnarrt.

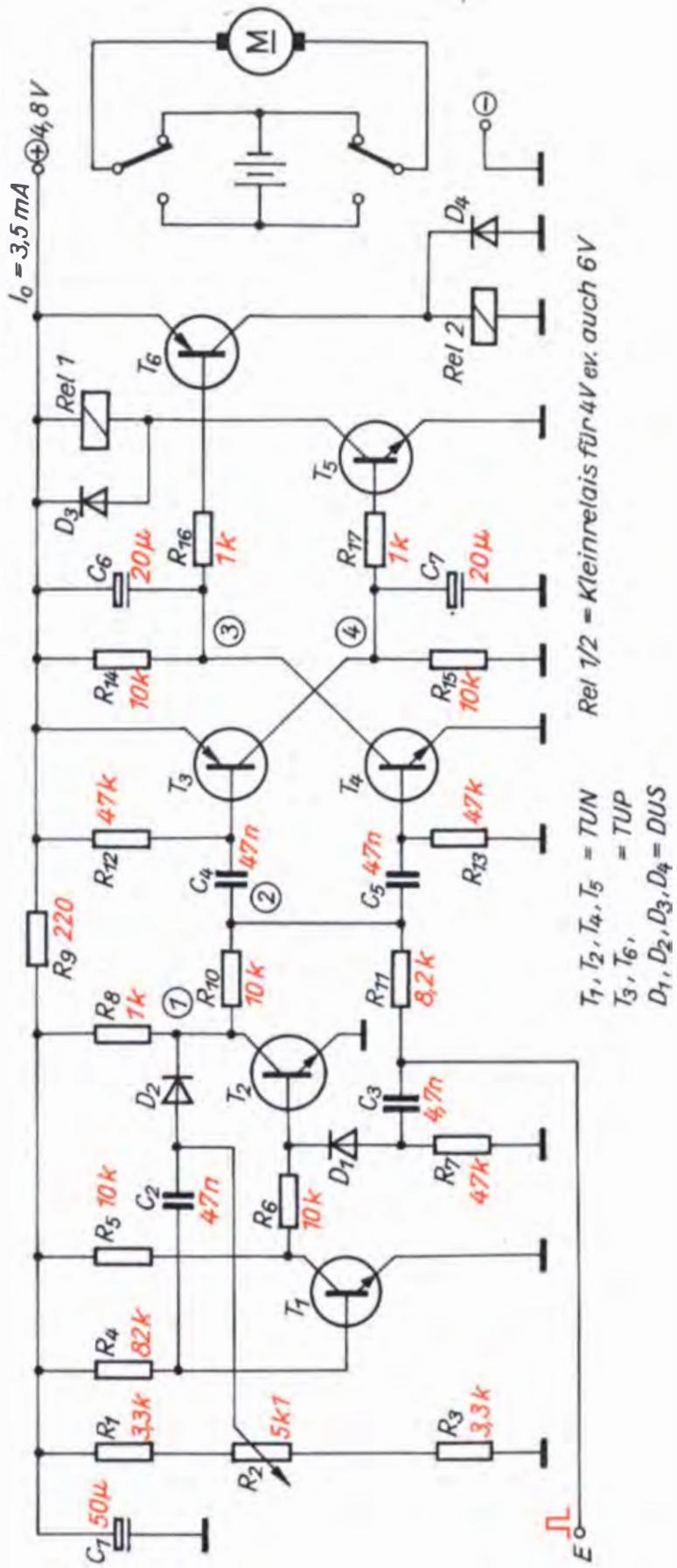
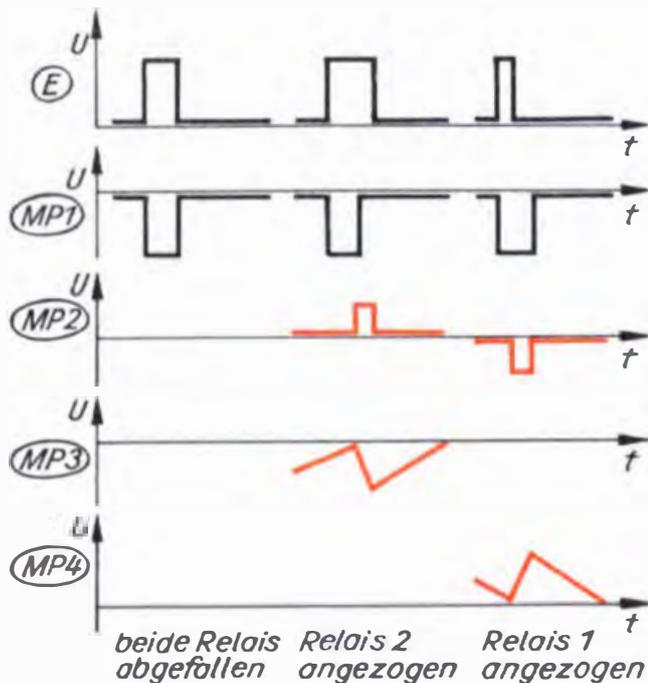
Wird nun der Kanalimpuls kürzer als der Referenzimpuls, entsteht an MP2 ein negativer Restimpuls. Durch ihn werden T_3 und über R_{17} T_5 leitend, so daß Relais 1 anzieht. Die Impulsdehnung übernimmt C_7 .

Durch diese Schaltungsauslegung haben wir erreicht, daß immer nur ein Relais anzieht und bei Mittelstellung des Kanalimpulsgebers beide Relais sicher abgefallen sind. Funktionieren beide Schaltungen auf der Experimentierplatte einwandfrei, stellen wir uns für den endgültigen Aufbau die Leiterplatten her. Da wir diese in die Geräte bzw. Gehäuse einbauen, müssen sie meist eine vorgegebene Größe erhalten. Den Kanalimpulsgeber werden wir zu einem kleinen Gerät entwickeln, der uns dann später bei der Funktionsprüfung einzelner Anlagenteile, besonders der Aufschalteneinrichtung, gute Dienste tut.

Dieses Gerätchen bezeichnen wir im weiteren kurz als *Servoprüfer*. Sein Gehäuse erlaubt einen recht großzügigen Leiterplattenentwurf. We-

Bild 80. Schaltbild des Schaltverstärkers

Bild 81. Impulsdiagramm des Schaltverstärkers



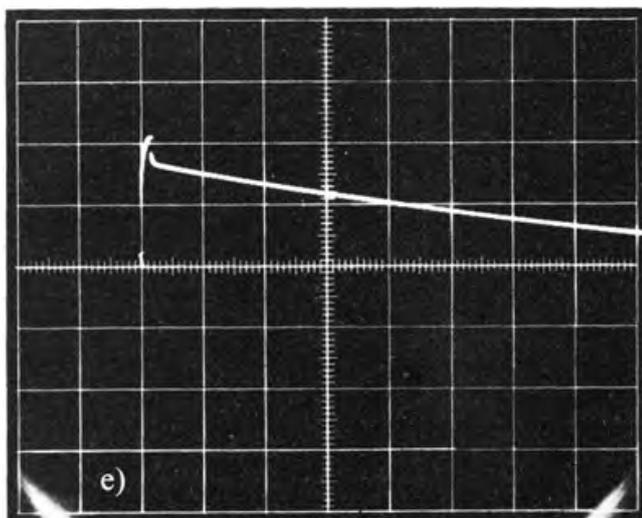
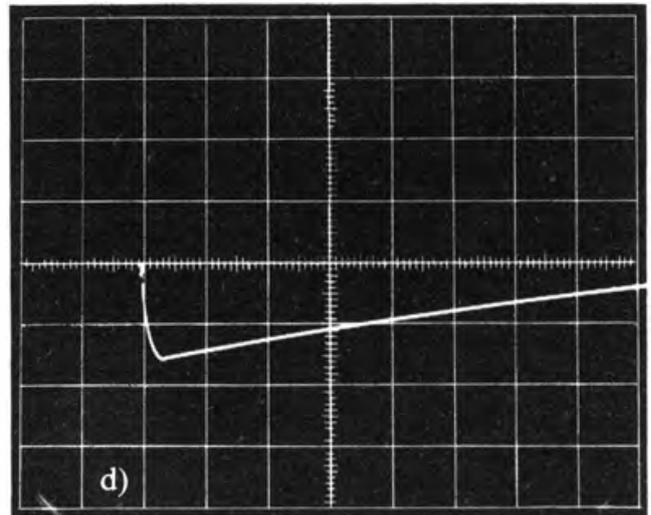
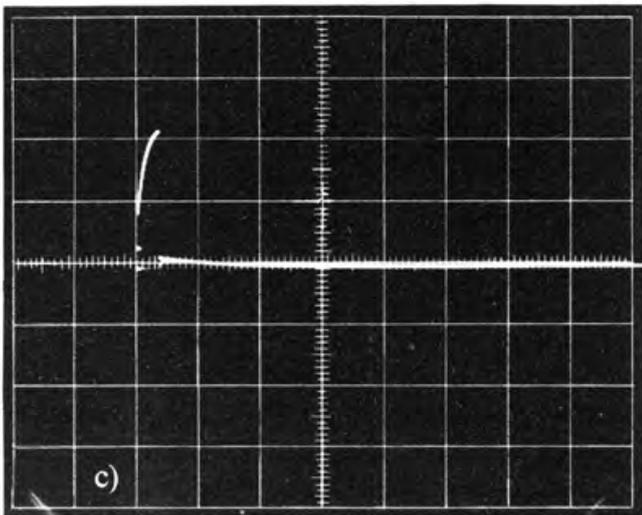
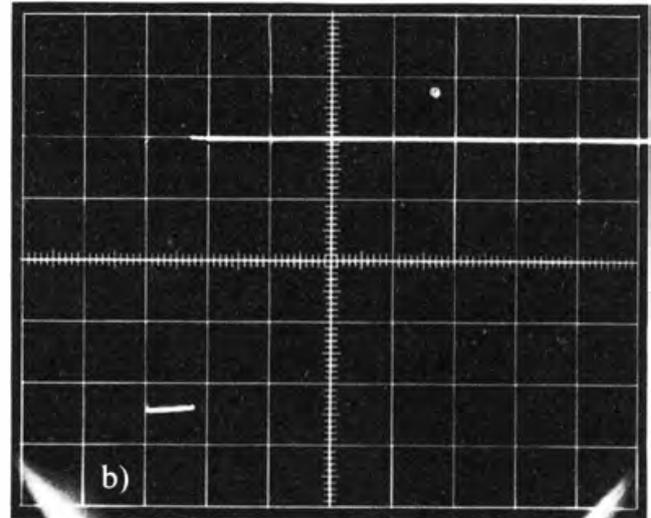
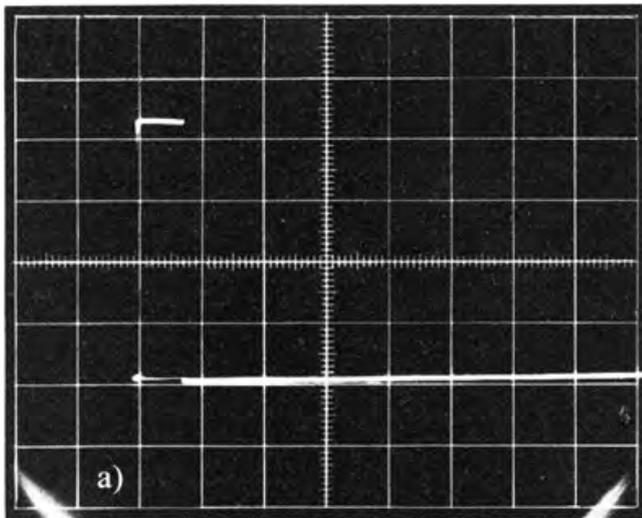


Bild 82. Oszillogramme des Schaltverstärkers (Zeitbasis: 2 ms/cm, Ablenkempfindlichkeit a)...c): 1 V/cm, d), e): 0,25 V/cm): a) Kanalimpuls an E, b) Referenzimpuls am MP1, c) Restimpuls am MP2, d) gedehnter Restimpuls an MP3, e) gedehnter Restimpuls an MP4

sentlich enger geht es bei dem Schaltverstärker zu, dessen Leiterplattengröße vom Einbauraum der Relais vorgegeben wird.

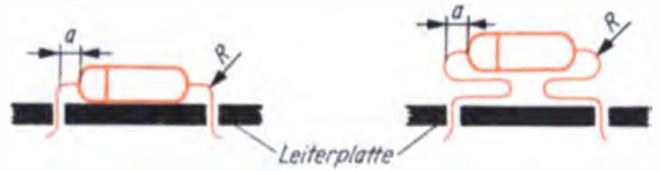
Wir stellen eine gedruckte Schaltung her

Da es sich um einen recht gedrängten Aufbau handelt, können wir nicht mehr mit der Ritztechnologie arbeiten, sondern werden ein anderes Verfahren, die Technik der gedruckten Schaltung, anwenden.

Gedruckte Schaltung heißen solche Schaltungen bzw. die Leiterplatten deshalb, weil sie bei der industriellen Fertigung in einem Druckverfahren hergestellt werden. Wir fertigen sie maßgerecht nach den entsprechenden Vorlagen in

diesem Buch an; die Leiterplatten sind deshalb alle im Maßstab 1:1 abgebildet. Der Vorzug dieser Verdrahtungstechnik liegt vor allem im übersichtlichen, stabilen und platzsparenden Aufbau. Für die Anfertigung einer gedruckten Schaltung stehen uns jeweils zwei Bilder zur Verfügung. Die *Leitungsführung* ist die Zeichnung der Leiterbahnen auf der mit Kupferfolie belegten Seite der Leiterplatte (der Unterseite). Wie wir die Bauelemente von der anderen Seite (der Oberseite) in die Schaltung einfügen müssen, entnehmen wir dem *Bestückungsplan*. Wir beachten dabei, daß die Bauelemente von oben gesehen eingezeichnet sind. Die Sockelanschlußbilder zeigen die Bauelemente von unten. Das ist vor allem bei den Halbleiterbauelementen in *Plastgehäusen* wichtig.

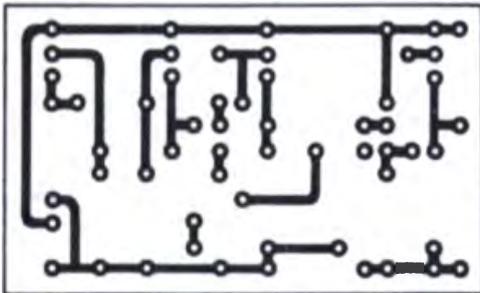
Die Leiterplatte legen wir paßgerecht unter die



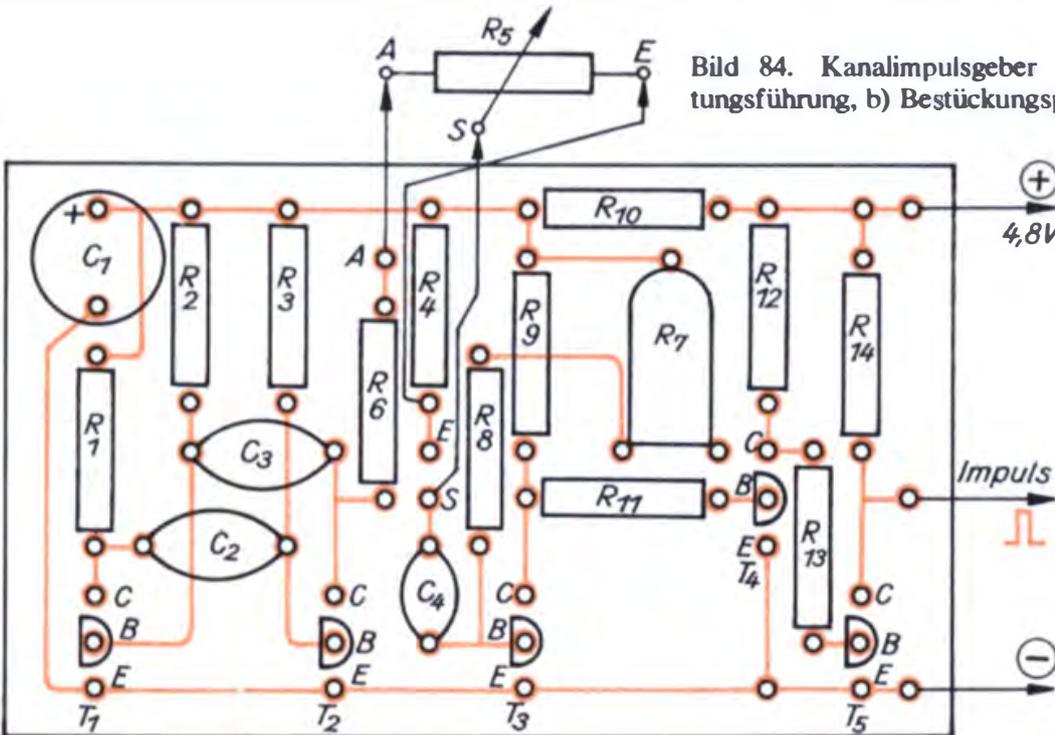
Kleinsten Biegeradius der Anschlußdrähte: $R = 1,5\text{ mm}$
 Abstand zwischen Biegestelle und Glas- bzw. Keramikkörper $a \approx 2\text{ mm}$

Bild 83. Zum Biegen der Anschlüsse von Widerständen und Allglasdioden

Leiterplattenzeichnung (mit der vorher gründlich gesäuberten Kupferfolie nach oben) und drücken mit einer Reißnadel alle Bohrungsmittelpunkte von der gedruckten Vorlage der Leitungsführung auf die Leiterplatte durch. Nun ziehen wir mit verdünntem Nitro-Reparatlack und einer feinen Röhrenfeder 0,7 mm die Leiterbahnen auf der Kupferschicht nach. Zuerst decken wir die Lötunkte, d. h. die Punkte, die wir vorher durchgedrückt haben, mit Lack ab (kreisförmiger Lackfleck von 2,5...3 mm Durchmesser) und verbinden sie danach durch Leiterbahnen. Die Leitungsführung dient uns dabei als Muster. Ist die Leiterplatte fertig, kontrollieren wir sie nochmals, indem wir Punkt für Punkt und Leiterbahn für Leiterbahn mit der Vorlage vergleichen. Dabei müssen zwischen voneinander getrennten Leiterbahnen und Lötunkten Mindestabstände von 0,5...1 mm vorhanden sein. Rücken wir die



a) M1:1



b)

Bild 84. Kanalimpulsgeber (Servoprüfer): a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan

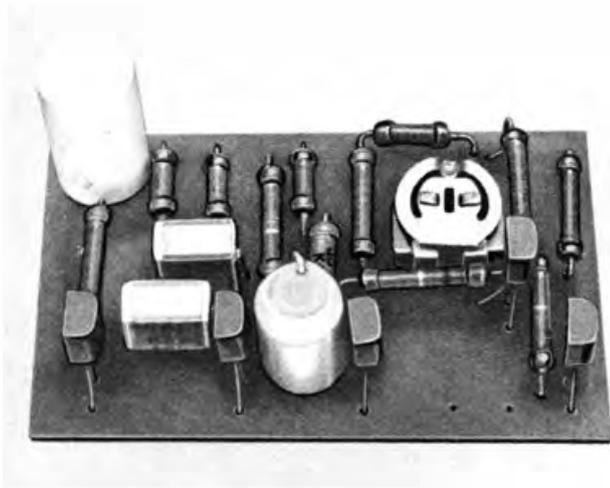


Bild 85. Musteraufbau des Kanalimpulsgebers

Leiterbahnen zu eng zusammen, besteht beim Löten die Gefahr der Brückenbildung. Ferner beachten wir, daß die gesäuberte Leiterplatte beim Lackieren nicht mit den Fingern berührt wird. Fett und Handschweiß führen zu unsauberen Ätzstellen und auch zu schlechten Lötstellen.

Die nicht mit Lack abgedeckte Kupferschicht muß nun durch Ätzen entfernt werden. Die Ätzflüssigkeit dazu stellen wir selbst her, indem wir nach Bedarf Eisen(III)-chlorid in Wasser lösen (50g FeCl_3 in 100 cm^3 Wasser). Diese Lösung bewahren wir in einer entsprechend gekennzeichneten Plastflasche auf. Bei mehrmaliger Verwendung verlängert sich die Ätzzeit, so daß wir schließlich die Lösung neu ansetzen müssen. Zum Ätzen geben wir eine ausreichende Menge davon in eine Fotoschale und legen die Leiterplatte mit der Kupferschicht nach unten hinein. Erwärmung und ständige Bewegung des Bades beschleunigen den Ätzvorgang, den wir etwa alle fünf Minuten kontrollieren. Er ist beendet, wenn das nicht vom Lack bedeckte Kupfer restlos abgetragen ist. Nun spülen wir die Leiterplatte gründlich mit Wasser ab und entfernen die Lack-schicht mit Nitroverdünnung. Anschließend bohren wir alle Lötunkte von der Kupferseite her mit einem 0,8-mm- bzw. 1-mm-Bohrer. Alle anderen Bohrungen und Durchbrüche werden, wie im Bild angegeben, angebracht. Damit das jetzt noch völlig blanke Kupfer seine Löt-fähigkeit behält, decken wir es mit einem geeigneten Flußmittel ab, das auf jeden Fall nichtätzend sein muß. Löt-wasser und Löt-fett sind ungeeignet, da

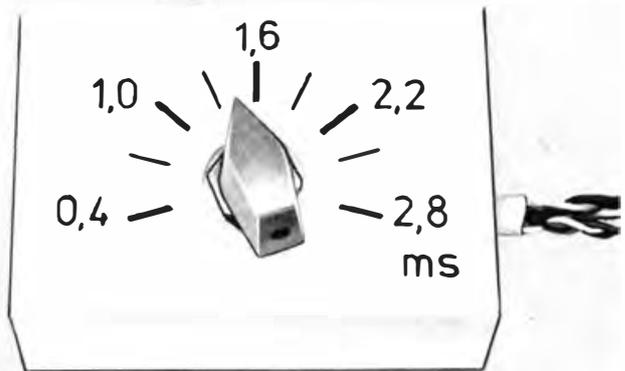
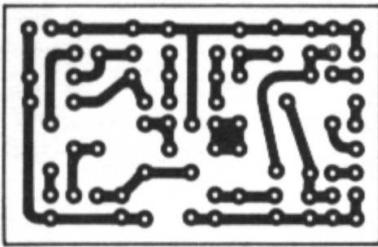


Bild 86. Aufbau als Servoprüfer

sie infolge ihrer Zusammensetzung die empfindlichen Lötstellen nach kurzer Zeit angreifen und zerstören würden. Wir verwenden deshalb Löt-lack, den wir selber herstellen, indem wir Kolo-phonium in Spiritus bis zur Sättigung lösen.

Für unsere Lötarbeiten genügt ein 20-Watt-Löt-kolben, dessen Spitze pyramidenförmig ge-feilt und sauber sein soll. Beim Löten muß sie so warm sein, daß das Zinnlot gut läuft, sonst ent-stehen kalte Lötstellen – Fehler, die man nur schwer findet. Da Halbleiterbauelemente und Elektrolytkondensatoren wärmeempfindlich sind, leiten wir nur soviel Wärme zu, wie für ein einwandfreies Löten nötig ist. Längeres Löten an einer Stelle führt außerdem zum Ablösen der Leiterbahnen vom Trägermaterial. Zum Schluß noch ein Hinweis. Die Anschlüsse der Bauelemente biegen wir nicht direkt am Gehäuse oder an der Kappe, sondern, wie Bild 83 zeigt, in einem Abstand von mindestens 3 mm, da sonst die Gefahr besteht, daß das Gehäuse (besonders bei Glas) beschädigt wird oder der Anschluß ab-bricht. Wir haben uns nun die erforderlichen Kenntnisse und Fertigkeiten für die Herstellung einer gedruckten Schaltung angeeignet. Alle anderen Schaltungen der Fernsteuer- und Hilfs-geräte werden nach der gleichen Technologie hergestellt, so daß darauf nicht noch einmal eingegangen wird.

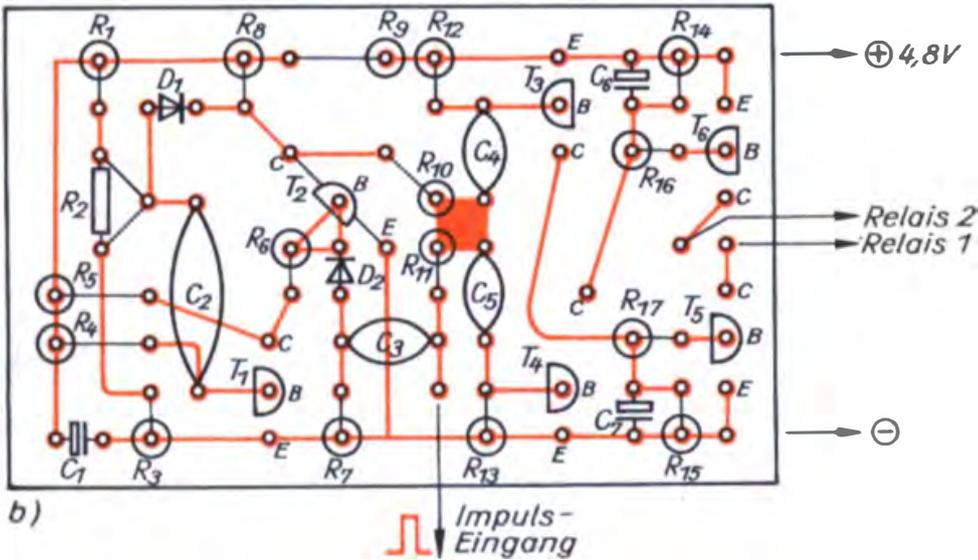
Die Vorlage für die erste gedruckte Schaltung, die wir nach dem beschriebenen Verfahren an-fertigen, ist die Leiterplattenzeichnung des Ka-nalimpulsgebers (Bild 84a). Haben wir die Leiter-platte gebohrt und mit Kolophonium konserviert,



M 1:1

Bild 87. Schaltverstärker: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan

a)



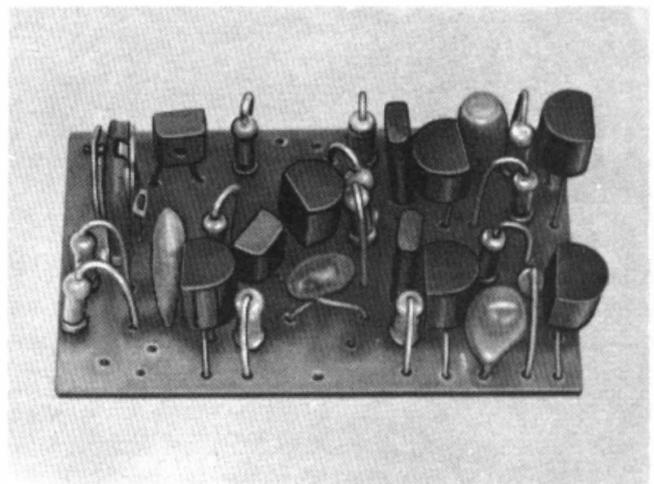
b)

werden die Bauelemente Stück für Stück und immer im Vergleich von Schaltbild und Bestückungsplan (Bild 84b) auf die Leiterplatte übertragen und angelötet. Nach dem Löten schneiden wir die überstehenden Anschlußdrähte in 1 mm Abstand von der Leiterbahn sauber ab. Danach kontrollieren wir noch einmal alle Lötstellen auf saubere Ausführung und auf Brückenbildung (übergelaufenes Zinn) zwischen Lötunkten oder Leiterbahnen. Am Musteraufbau (Bild 85) orientieren wir uns über Lage und Anordnung der Bauelemente.

Die fertig bestückte Leiterplatte unterziehen wir einer ersten Funktionsprüfung mit dem noch auf der Experimentierplatine aufgebauten Schaltverstärker. Beim ersten Anschließen der Batterie kontrollieren wir die Stromaufnahme, die bereits Anhaltspunkte für eventuelle Fehler gibt. Funktioniert der Kanalimpulsgeber zufriedenstellend, stellen wir für ihn ein Gehäuse her und erhalten damit unseren *Servoprüfer* (Bild 86). Der Servoprüfer hat einen Stecker für den Batterieanschluß ($2 \times 2,4\text{ V}$) und eine Buchse für den Servoanschluß. Die Leitung $+2,4\text{ V}$ führen wir direkt vom Stecker zur Buchse, da sie für die

Funktion des Servoprüfers keine Bedeutung hat, aber später bei der Prüfung des Servos benötigt wird. Zum Einstellen des Servoprüfers auf die Impulszeiten $1,0, \dots, 2,2\text{ ms}$ und das Anzeichnen der Markierungen mit den Zwischenwerten auf der Gehäuseoberseite benutzen wir ein geliehenes Servo einer anderen Anlage oder besser einen geeichten Oszillographen.

Bild 88. Musteraufbau des Schaltverstärkers



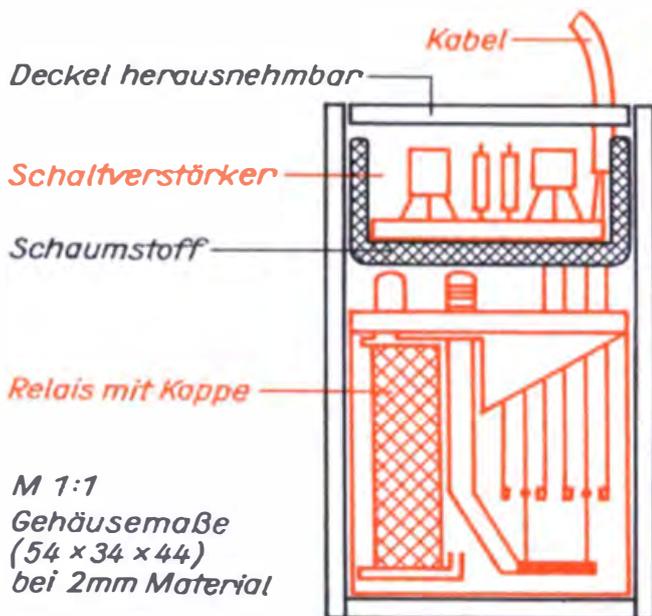


Bild 89. Einbau des Schaltverstärkers im Gehäuse

In gleicher Weise stellen wir die Leiterplatte für den Schaltverstärker (Bild 87a) her. Da hier die Bauelemente wesentlich gedrängter angebracht sind (Bild 87b), ist das eine gute Vorübung für den späteren Aufbau weiterer Geräte, bei denen es noch enger zugeht. Den Schaltverstärker (Bild 88) bringen wir (in Schaumstoff verpackt) zusammen mit den beiden Relais in einem kleinen Gehäuse (Bild 89) unter. Das Gehäuse stellen wir aus Polystyrol von 2mm Dicke (Plastfliesen) her.

Das ist ein Werkstoff, der sich gut bearbeiten (bohren, sägen) und mit Plastkleber für Polystyrol auch sehr gut kleben läßt. Die Gehäuseabmessungen richten sich vor allem nach den Relais und können daher durchaus von den angegebenen abweichen. Nun wollen wir aber unsere erste Fernsteuerung im Modell erproben. Dafür genügt zunächst noch eine Kabelfernsteuerung.

Unser erstes ferngesteuertes Modell ist ein Landfahrzeug

Groß ist die Zahl der Vorbilder für unser erstes Modell (Pkws, Lkws, Spezialfahrzeuge). Da es lediglich zum Ausprobieren der Fernsteueranlage und damit zum Sammeln erster Erfahrungen dienen soll, wollen wir auf komplizierte mechanische Konstruktionen zur Lenkung verzichten und wählen ein Raupenfahrzeug, wie es Bild 90

zeigt. Wir müssen uns nur noch entscheiden, ob wir ein solches Fahrzeug selbst aufbauen wollen oder es im Spielwarenhandel kaufen und für unsere Zwecke umbauen. Da preiswerte Modelle von Landfahrzeugen angeboten werden, die unseren Vorstellungen entsprechen, lohnt es sich, eines davon auszusuchen und damit einige zeitraubende Arbeiten zu umgehen. Ein solches Modell müssen wir ohnehin erst für die drahtlose Fernsteuerung verändern (wir achten darauf, daß wir für den Einbau der Fernsteuerung genügend Platz lassen!), so daß später Raum für eigene Konstruktionen bleibt.

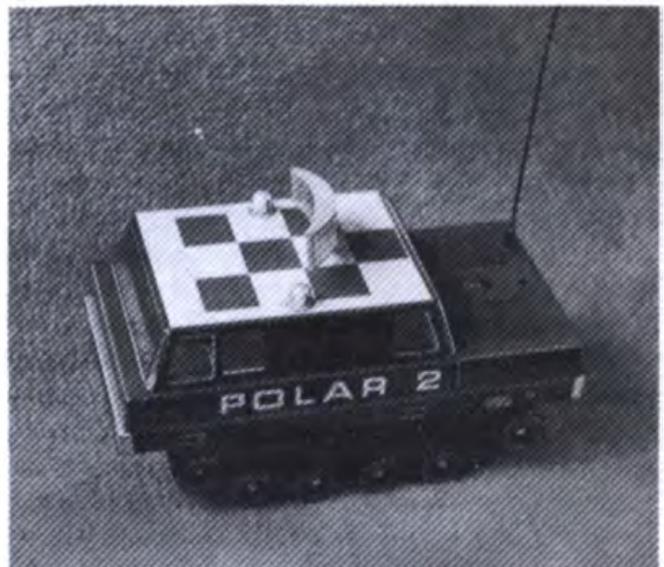
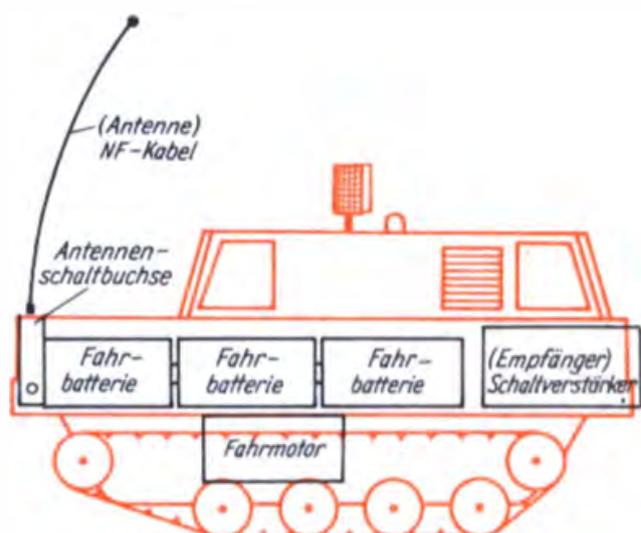
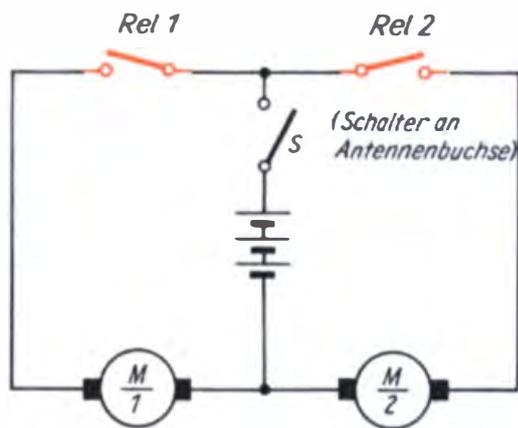


Bild 90. So sieht unser erstes Modell aus

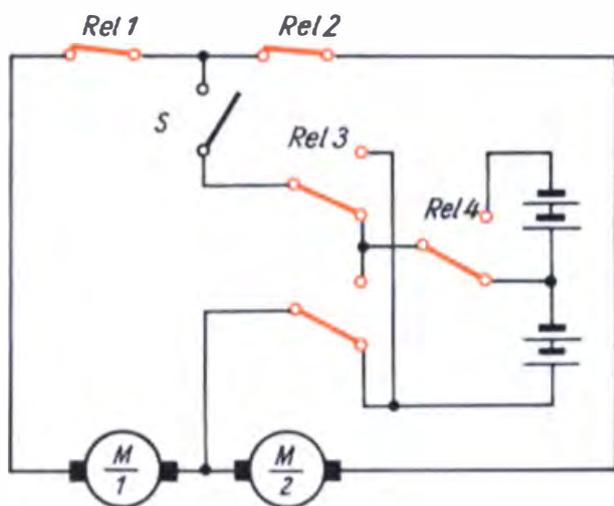
Bild 91. Der Einbau des Schaltverstärkers und der Fahrbatterien im Modell





S = Schalter oder Schaltkontakt der Antennenbuchse

a)



Rel 1 = rechts
 Rel 2 = links
 Rel 3 = vorwärts - rückwärts
 Rel 4 = langsam - schnell
 S = EIN - AUS
 alle Relaiskontakte im abgefallenen Zustand

b)

Bild 92. Schaltung der Fahrmotoren: a) für Fahrtrichtungswechsel, b) für Fahrtrichtungs- und Geschwindigkeitswechsel

Wir montieren also den Schaltverstärker in das Fahrzeug (Bild 91) und übertragen die Steuerkommandos (»Rechts«, »Geradeaus«, »Links«) vorläufig über Draht. Die Verbindung zwischen dem Kommandogebner und dem Schaltverstärker stellen wir über dreiadrige Kupferlitze (≈ 2m) her. Mit dieser Kabelfernsteuerung können wir das Modell bereits im Zimmer um-

herfahren lassen, es gehorcht unseren Steuerkommandos. Durch entsprechendes Ein- und Ausschalten der beiden Fahrmotoren können wir das Modell in jede gewünschte Richtung lenken. Deshalb bauen wir zunächst den Antrieb auf Zweimotorenbetrieb um (Schaltung nach Bild 92). Beide Fahrmotoren sollen unabhängig voneinander steuerbar sein; sie werden über den Schalter S an die Fahrbatterie angeschlossen. Der Strom fließt jeweils über die Ruhekontakte beider Relais. Wird ein Kanal betätigt, zieht das entsprechende Relais an, und nur ein Motor läuft weiter. Bleibt z. B. der rechte Motor stehen, fährt das Modell eine Rechtskurve.

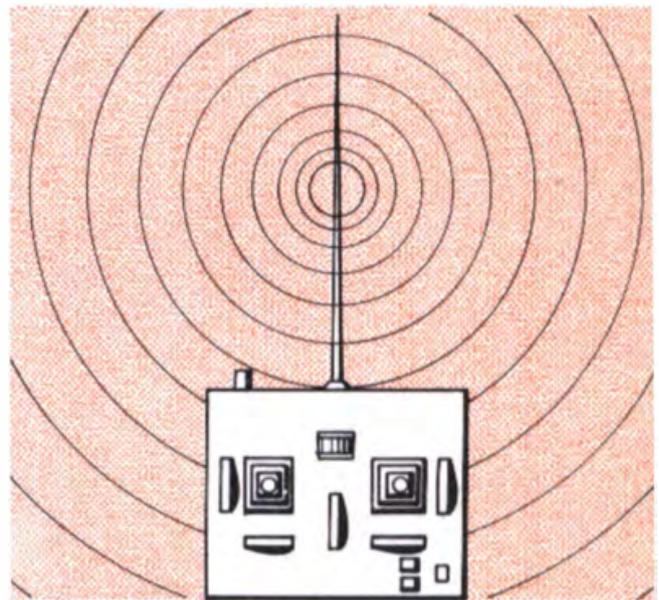
Für die Steuerversuche benötigen wir zwei Spannungsquellen, eine für den Betrieb des Kommandogebners und des Schaltverstärkers im Modell und die zweite für den Antrieb. Die Verbindung zwischen Kommandogebner und Modell wird durch die Plus-, die Impuls- und die Masseleitung hergestellt. Im Fahrzeug verwenden wir zwei getrennte Spannungsquellen, damit die Schaltstufen auch dann noch sicher funktionieren, wenn die Fahrbatterie schon fast erschöpft ist. Sind die ersten Fahrversuche gemacht, so wird sich bald der Wunsch nach weiteren Steuerfunktionen, z. B. »Fahrt voraus«, »Stop«, »Fahrt zurück«, einstellen.

Um auch diese Funktionen zu realisieren, benötigen wir einen zweiten Kanalimpulsgeber und einen weiteren Schaltverstärker. Für den zweiten Schaltverstärker haben wir später sicher eine Verwendung, da er recht vielseitig einsetzbar ist. Ob sich der Leser allerdings noch einen zweiten Servoprüfer nur für diese Erprobung aufbaut, muß er selbst entscheiden. Aufbau und Anschluß im Modell erfolgen analog zur Richtungssteuerung nach der Schaltung von Bild 92b.

Selbst wenn die Kabelfernsteuerung des Modells noch so gut funktioniert, es immer an der Leine zu führen, wird mit der Zeit lästig. Wir wollen deshalb das Modell frei und unabhängig von unserem Standort ferngesteuert fahren lassen. Unsere nächsten Experimente werden sich also darauf konzentrieren, die Kommandoübertragung nicht mehr mittels Draht, sondern über Funk vorzunehmen.

2. Kapitel

Drahtlose Fern- steuerung



Wir lernen die Hochfrequenz kennen

Bei unseren ersten Fernsteuerversuchen haben wir das Modell am Kabel geführt. Dieses Kabel als **Signalübertragungsstrecke** wollen wir nun durch eine **drahtlose Übertragung** der Steuerkommandos zum Modell ersetzen. Im Prinzip eignen sich dazu die bekannten physikalischen Felder, wie z. B. Schall oder elektromagnetische Schwingungen. Für die Signalübertragung über Entfernungen $> 10\text{m}$ erreicht man mit den Mitteln des Amateurs nur durch Anwendung elektromagnetischer Felder im Hochfrequenzbereich zufriedenstellende Ergebnisse. Für die Signalübertragung werden wir daher elektromagnetische hochfrequente Schwingungen (abgekürzt HF) einsetzen.

Die HF-Schwingungen mit dem Signalinhalt erzeugen wir im **Fernsteuersender** und senden sie über die **Antenne** (Bild 93) aus. Sie werden vom **Empfänger** im Modell über eine Antenne aufgenommen, verstärkt und den **Aufschalteinrichtungen** zugeführt. Die Aufschalteinrichtungen, wie Rudermaschine, kurz als **Servo** bezeichnet, oder Motorschalter, setzen dann den Kommandoinhalt des Signals in einen entsprechenden Steuervorgang um.

Die für unseren Anwendungszweck vorteil-

Bild 93. Zur prinzipiellen Wirkungsweise einer Modellfernsteuerung

hafte Eigenschaft der elektromagnetischen Schwingungen besteht darin, daß wir sie in elektronischen Schaltungen erzeugen können und sie sich unter bestimmten Bedingungen frei im Raum als elektromagnetische Wellen ausbreiten.

Die Schwingungen (bzw. Wellen) können Frequenzen von 50 Hz (Netzwechselfrequenz), 100...8000 Hz (Sprachfrequenzen) und noch wesentlich mehr (Rundfunk- und Fernsehsender) haben. Auch das Licht breitet sich als elektromagnetische Welle aus, nur mit noch höherer Frequenz als Funkwellen. Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** ist für alle elektromagnetischen Wellen gleich groß und beträgt etwa $300\,000\text{ km s}^{-1}$. Zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit, der Frequenz und der Wellenlänge besteht der Zusammenhang

$$c = f \cdot \lambda.$$

Hierin bedeuten

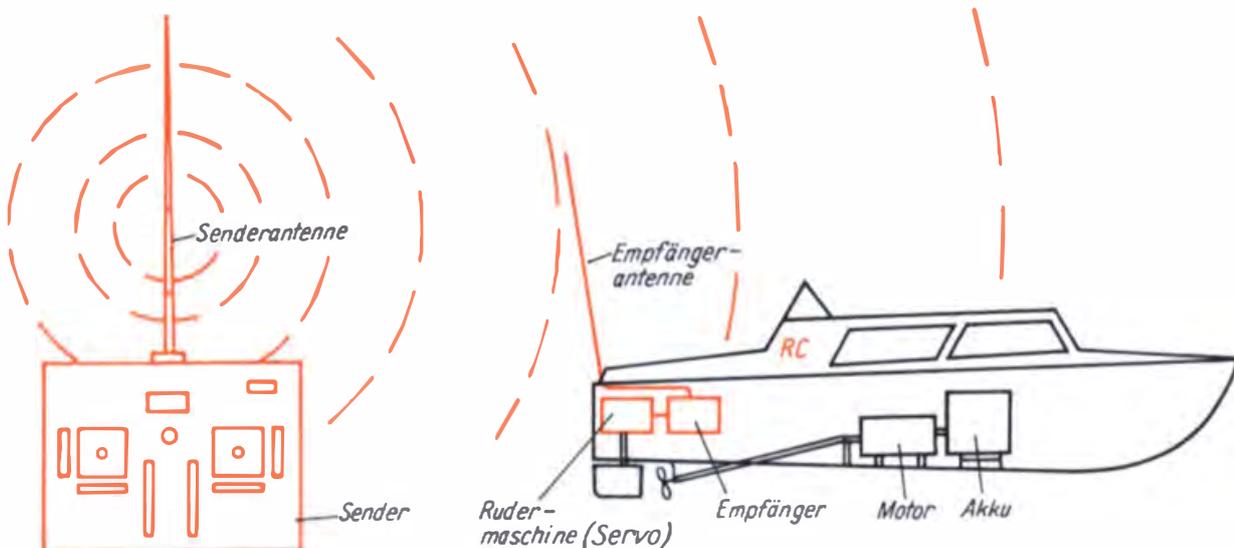
c Lichtgeschwindigkeit = $300\,000\text{ km s}^{-1}$,

f Frequenz,

λ Wellenlänge.

Elektromagnetische Wellen werden in dem Bereich, der uns interessiert, von **Antennen** abgestrahlt und auch empfangen. Der Wirkungsgrad von Antennen ist besonders dann günstig, wenn ihre Länge mindestens ein Viertel der Wellenlänge beträgt, also $l_{\text{Ant}} \approx \frac{\lambda}{4}$ ist. Zum Aus-

senden eines Tones von 3 kHz benötigen wir demnach eine Antenne der Länge



$$l_{\text{Ant}} = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{f \cdot 4} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}}{3 \cdot 10^3 \cdot 4 \text{ s}} = \frac{10^5 \text{ m}}{4} = 25 \text{ km}.$$

Wir sehen sofort, daß dies eine undiskutable Lösung ist und müssen schon aus Gründen einer praktikablen Antennenlänge das Signal mit einer höheren Frequenz übertragen. Von den drei durch die Post genehmigten Frequenzbereichen wählen wir den Bereich 27,12 MHz. Diese Hochfrequenz ist unser Träger für das Signal. Mit

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{c}{f \cdot 4} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}}{27,12 \cdot 10^6 \cdot 4 \text{ s}} = 2,75 \text{ m}$$

erhalten wir bereits eine »handliche« Antennenlänge für den Sender. Nun müssen wir die Hochfrequenz von 27,12 MHz erzeugen und ihr die Signalfrequenz aufprägen.

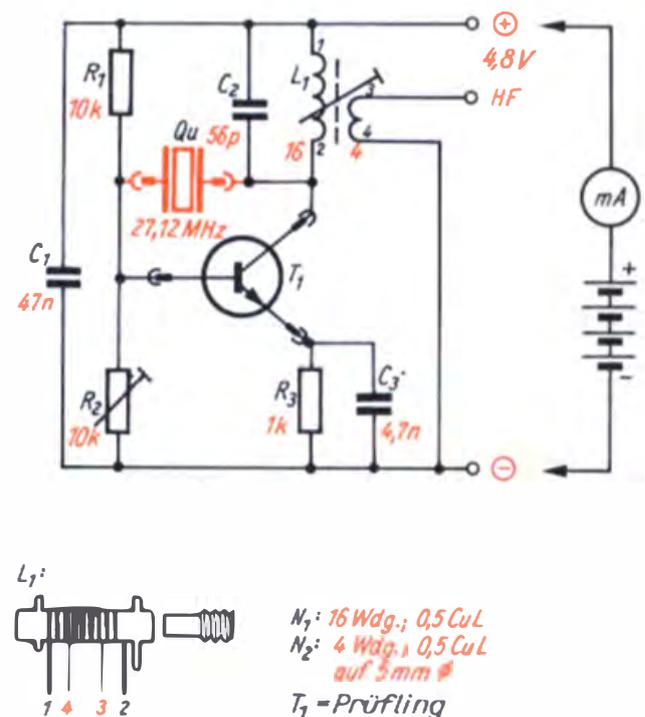
Wir bauen einen Hochfrequenzoszillator

Schwingungserzeuger werden allgemein als Generatoren oder Oszillatoren bezeichnet. Zur Unterscheidung vom Impulsgenerator bezeichnen wir den Hochfrequenz-Schwingungserzeuger als *HF-Oszillator* (kurz Oszillator).

Schauen wir uns erst einmal den Impulsgenerator (Bild 62) an. Würden wir bei ihm die Koppelkondensatoren und in gewissen Grenzen auch die Basisvorwiderstände immer weiter verkleinern, so setzten bei einer ganz bestimmten Frequenz die Schwingungen aus. Das ist darauf zurückzuführen, daß mit steigender Frequenz die Verstärkerwirkung des Transistors immer mehr abnimmt, bis sich die Schaltung nicht mehr selbst erregen kann. Die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung ist eine typische Eigenschaft der Transistoren. Um sie in dieser Hinsicht zu charakterisieren, wird die *Grenzfrequenz* definiert. Wir wollen darunter die Transitfrequenz (Übergangsfrequenz) verstehen, bei der die Stromverstärkung in Emitterschaltung auf den Wert 1 abgesunken ist. Germanium-Legierungstransistoren haben eine relativ niedrige Transitfrequenz (bis 100 kHz, in Ausnahmefällen bis 500 kHz). Deshalb können wir sie nicht für Hochfrequenzzwecke einsetzen, denn in den von uns gebauten Fernsteueranlagen treten Frequenzen bis zu 30 MHz auf. Für HF-Anwendungen und schnelle Schalter wurden Siliziumtransistoren

entwickelt, die die geforderten Grenzfrequenzkennwerte aufweisen. Nun wollen wir die Grenzfrequenz im Experiment überprüfen. Dazu sind vorher noch einige Überlegungen erforderlich. Im Handel werden recht preiswert unsortierte und in den Kennwerten außerhalb der Toleranz liegende Transistoren als Basteltransistoren angeboten. Oft genügen sie unseren Anforderungen, so daß wir mit diesen Bauelementen durchaus funktionssichere Geräte erhalten und dabei Geld sparen. Der Einsatz von Basteltransistoren erfordert jedoch, daß jeder einzelne geprüft wird. Wie wir Reststrom und Stromverstärkung prüfen können, lernten wir bereits kennen. Haben wir nun die Möglichkeit, das Schwingverhalten der Transistoren bei der Frequenz 27,12 MHz (der Frequenz unserer Fernsteuergeräte) zu untersuchen, so können wir die Transistoren in zwei Gruppen einteilen. Diejenigen, die bei 27,12 MHz noch sicher schwingen, verwenden wir für HF-Oszillator, Senderendstufe, Empfängereingangsstufe und Zwischenfrequenzverstärker. Die Transistoren, die bei dieser Frequenz nicht mehr oder nur noch schwach schwingen, werden dagegen für NF-Verstärker, Impulsschaltungen und Gleichspannungsverstärker genutzt.

Bild 94. Schaltbild des HF-Oszillators für 27,12 MHz



Zur experimentellen Untersuchung des Schwingverhaltens benutzen wir eine Oszillatorschaltung für 27,12 MHz (Bild 94), die auch in den Fernsteuergeräten eingesetzt wird. Da sie sich durch geringen Aufwand und hohe Betriebssicherheit auszeichnet, wird sie heute fast ausschließlich für solche Zwecke verwendet. Betrachten wir das Schaltbild, so werden wir einige schon bekannte Details wiedererkennen. Die Widerstände R_1/R_2 bilden für den Transistor den Basisspannungsteiler und stellen den Arbeitspunkt ein. Durch R_3 wird der Arbeitspunkt stabilisiert. Damit die entstehende HF-Spannung am Arbeitswiderstand, der durch den Schwingkreis L_1/C_2 gebildet wird, abfällt, ist der Emitterwiderstand R_3 durch den Kondensator C_3 HF-mäßig überbrückt. Die Rechnung ergibt für C_3 bei 27,12 MHz den Blindwiderstand

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1 \text{ s} \cdot \text{V}}{2 \cdot 3,14 \cdot 27,12 \cdot 10^6 \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ As}}$$

$$= 1,25 \Omega.$$

Mit etwa 1Ω stellt C_3 im Emitterkreis im Vergleich zu R_3 mit $1 \text{ k}\Omega$ für die HF-Spannung annähernd einen Kurzschluß dar. Als Arbeitswiderstand verwenden wir den Schwingkreis L_1/C_3 . Wir wissen bereits, daß der Parallelschwingkreis bei Resonanz einen recht hohen Widerstand darstellt. Entscheidend ist, daß wir den Oszillator mit Hilfe des Spulenkerns genau auf Resonanz abstimmen können.

Mit dem *Schwingquarz* Q_u begegnet uns ein neues Bauelement. Aus den Bestimmungen der *Landfunkordnung* geht hervor, daß für die Sendefrequenzen nur ganz geringe Abweichungen ($27,12 \text{ MHz} \pm 0,6\%$) zugelassen sind. Der HF-Oszillator muß also so frequenzstabil arbeiten, daß er diese Toleranzen einhält. Deshalb wurde der Schwingquarz in den HF-Oszillator eingebaut. Außerdem wirkt er als Rückkopplungsglied bei der Schwingungserzeugung. Der Quarz besteht aus einem Kristall, in dem beim Anlegen einer elektrischen Spannung mechanische Spannungen oder Dimensionsänderungen entstehen. Ändert sich die anliegende Spannung periodisch, so wird der Kristall zu mechanischen Schwingungen angeregt. Wenn die mechanische Eigenfrequenz des Quarzes mit der elektrischen Erregerfrequenz übereinstimmt, tritt Resonanz

auf. Das Wesentliche ist dabei, daß der Quarz seine Frequenz sehr genau einhält. Bei den von uns verwendeten Schwingquarzen beträgt die Frequenztoleranz im Temperaturbereich $-20 \dots +70^\circ\text{C}$:

$$\frac{\Delta f}{f} = \pm 5 \cdot 10^{-5} \quad \text{und im}$$

Temperaturbereich $+22 \dots +28^\circ\text{C}$:

$$\frac{\Delta f}{f} = \pm 3 \cdot 10^{-5}.$$

Anders ausgedrückt sind das 0,005% der Grundfrequenz. Da für $27,12 \text{ MHz} \pm 0,6\%$ zulässig sind, können wir die Forderungen der Landfunkordnung mit Sicherheit einhalten. Wir werden sehen, daß die geringe Frequenztoleranz noch einen weiteren Vorzug hat. Sie gestattet es nämlich, mehrere Fernsteuersender gleichzeitig im 27,12 MHz-Band zu betreiben.

Im Vergleich zu einem normalen Schwingkreis mit der Dämpfung von $d \approx 3,5\%$ weist der Schwingquarz mit $d \approx 0,005\%$ eine wesentlich geringere Dämpfung auf. In der Technik benutzt man zur Charakterisierung dieser Eigenschaft des Schwingkreises auch den Kehrwert der Dämpfung und bezeichnet diese Größe als *Güte*

$$Q = \frac{1}{d}.$$

Für den praktischen Gebrauch werden die Schwingquarze in kleinen Metallgehäusen, in sogenannten *Subminiaturhaltern*, geliefert. Es gibt die größere Bauform HC-6/U und die kleinere HC-25/U (Bild 95). Beide Versionen sind steckbar. Die Bauform HC-6/U wird noch in älteren Fernsteuergeräten verwendet.

Wir wählen die Bauform HC-25/U. Zur besseren Handhabung der Quarze sowie als zusätzlichen Schutz schieben wir über sie PVC-Isolierschlauch, der in einer Lasche ausläuft. Auf diese Lasche schreiben wir die Kanal-Nr. und die Angabe, ob es ein Empfänger- oder Senderquarz ist. Geeignet sind alle im Handel befindlichen Quarze, die auf den entsprechenden Kanalfrequenzen, auf die später noch eingegangen wird, schwingen. Die mit 13,56 MHz schwingenden Quarze für FM-Sender sind nicht geeignet.

Um die Schwingquarze in den Fernsteuergeräten entsprechend der Kanalwahl auszuwechseln

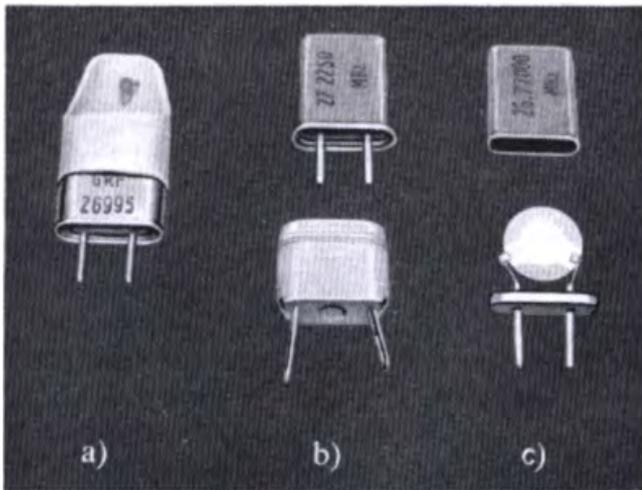
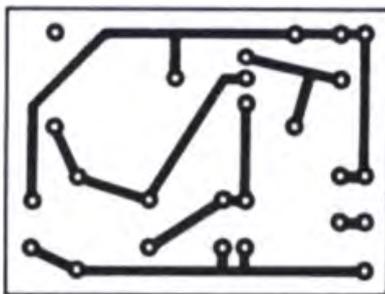


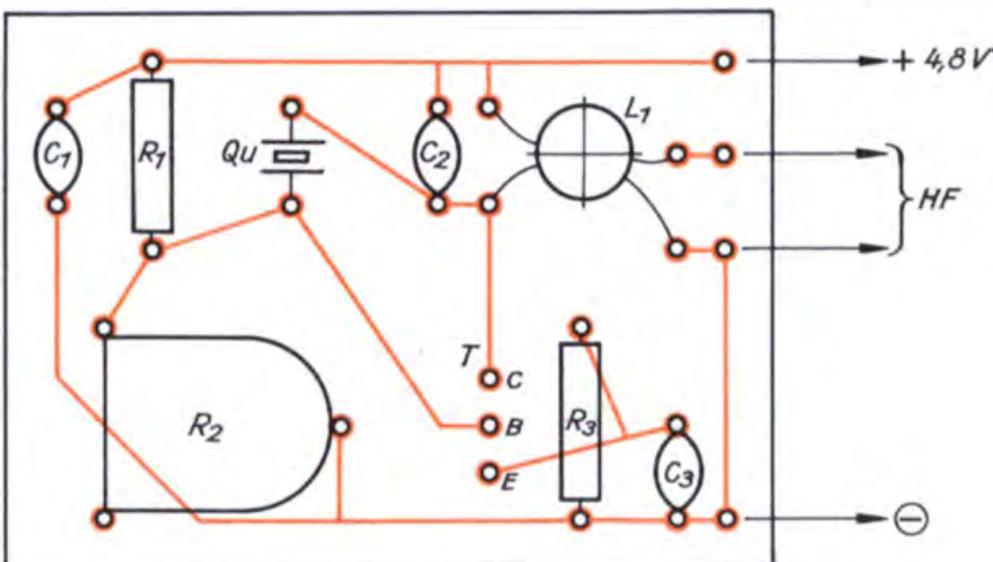
Bild 95. Schwingquarz für Sender und Super:
a) Quarz mit Lasche, b) Quarz mit Fassung, c) Quarz geöffnet

Bild 96. HF-Oszillator: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan



M 1:1

a)



b)

zu können, wählen wir die steckbare Form und verwenden deshalb auf den Leiterplatten geeignete Steckfassungen.

Bei unseren Experimenten müssen wir die gesetzlichen Bestimmungen beachten. Wir erzeugen und senden mit dem HF-Oszillator, der später auch Bestandteil des Fernsteuersenders sein wird, HF-Schwingungen. Bereits dafür brauchen wir die Genehmigung der Deutschen Post! Bevor wir also mit dem Bau beginnen, stellen wir einen Antrag zum Errichten und Betreiben einer Funkanlage zur Fernsteuerung von Modellen. Mit der Zusendung der Urkunde erhalten wir die Erlaubnis für die Durchführung der HF-Experimente und den Aufbau des Fernsteuersenders.

Nun aber zurück zum HF-Oszillator. Nachdem wir die Leiterplatte (Bild 96) mit den Bauelementen bestückt haben (Bild 97), kontrollieren wir noch einmal alle Lötstellen, ob sie richtig durchgelötet sind und sich keine Brücken gebildet haben. Da wir die Schaltung auch für die Prüfung des Schwingverhaltens von Transistoren verwenden wollen, wird für den Transistor ebenfalls eine Steckfassung eingelötet. Wir schalten die Empfängerbatterie (4,8 V) an den Oszillator und messen die Stromaufnahme in der Plusleitung mit einem Vielfachmesser. Bei völlig herausgedrehtem Kern der Spule L_1 stellen wir mit R_2 den Gesamtstrom auf 5 mA ein. Nun drehen wir mit einem Plastschraubenzieher (entsprechend angefeilte Plaststricknadel) den Kern

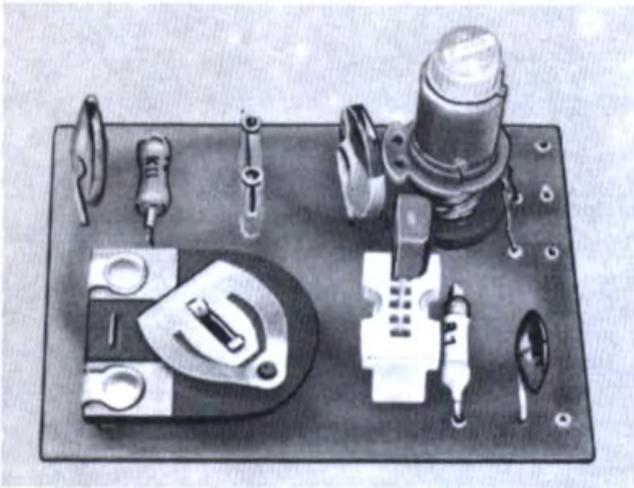


Bild 97. Musteraufbau des HF-Oszillators

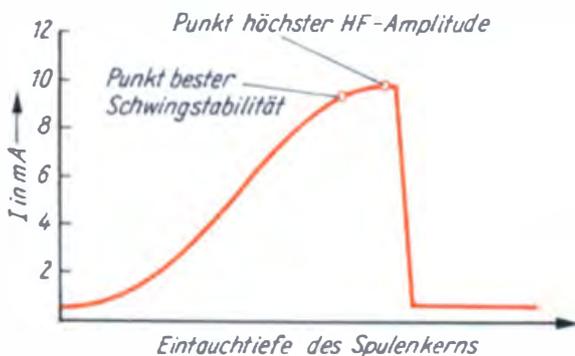


Bild 98. Stromaufnahme des HF-Oszillators in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe des Spulenkerns

in die Spule hinein und beobachten dabei, daß der Strom langsam steigt. Mit R_2 wird der Arbeitspunkt so eingestellt, daß der Strom nie mehr als 10 mA beträgt. Bei einer bestimmten Stellung des Kerns in der Spule erreichen wir die Resonanzfrequenz des Schwingquarzes. Stimmt diese mit der Frequenz des Schwingkreises überein, ist der aufgenommene Strom am größten. Drehen wir den Kern weiter, hören die Schwingungen schlagartig auf, und der Strom sinkt wieder auf einen kleinen Wert ab (Bild 98). Wir entfernen nun den Kern aus der Spule und wiederholen den Abgleichvorgang. Ist der Resonanzpunkt erreicht, drehen wir den Kern eine halbe Umdrehung zurück. Dadurch verstimmen wir zwar den Schwingkreis ein wenig, stellen den Oszillator aber auf den Punkt höchster Schwingstabilität ein.

Entscheidend für einen guten HF-Oszillator ist, daß er von selbst anschwingt. Das An-

schwingverhalten überprüfen wir, indem die Betriebsspannung ab- und wieder angeschaltet wird. Trotz Unterbrechung muß der Strom sofort seinen alten Wert erreichen. Um den Oszillator für Prüfzwecke verwenden zu können, bauen wir ihn mit einem getypten Transistor (z. B. SF 135c) auf. Wenn wir dann Basteltransistoren auf ihr Schwingverhalten prüfen wollen, brauchen wir nur die Stromaufnahme zu messen. Bei den für HF-Zwecke vorgesehenen Basteltransistoren muß mindestens ein Strom von 8 mA fließen. Liegt er darunter, verwenden wir die Exemplare für NF- und Impulszwecke. In der beschriebenen Form können mit dem Oszillator npn-Transistoren geprüft werden. Für pnp-Transistoren muß die Polung der Betriebsspannung vertauscht werden.

Wir messen Hochfrequenzleistungen

Im »Antrag auf Erteilung einer Genehmigung zum Herstellen, Errichten und Betreiben einer Funkanlage zur Fernsteuerung von Modellen« müssen wir die *Ausgangsleistung des Senders* angeben. Als Richtwert dafür kann der bei den Senderschaltungen angegebene Wert gelten. Bei der Abnahme wird dann allerdings eine möglichst genaue Angabe der HF-Leistung des Senders gefordert. Sie kann mit recht einfachen Mitteln und ausreichender Genauigkeit bestimmt werden: Würden wir an den Anschluß 3 der Koppelwicklung des Prüfoszillators etwa 1,5 m Kupferdraht anlöten, so bildete dieser Draht eine Sendeantenne, über die die im Schwingkreis L_1/C_3 erzeugte Hochfrequenzschwingung zum Teil abgestrahlt werden könnte. Zur Messung wollen wir sie aber nicht aussenden, sondern in einer Ersatzantenne in Wärme umsetzen. Diese Ersatzantenne wird von den parallelgeschalteten Widerständen R_1, \dots, R_4 gebildet, an denen die vom Oszillator erzeugte Hochfrequenz abfällt. Zur eigentlichen Messung wird die HF-Spannung mit einer Germaniumdiode gleichgerichtet und vom Ladekondensator C_2 geglättet (Bild 99). Gleichstrommäßig trennen wir durch C_1 den Lastwiderstand vom HF-Kreis. Verwenden wir zur Spannungsmessung ein hochohmiges Voltmeter mit $R_i \geq 20 \text{ k}\Omega/\text{V}$, ideal wäre ein Röhrevoltmeter, so stellt das Meßgerät für diese Meß-

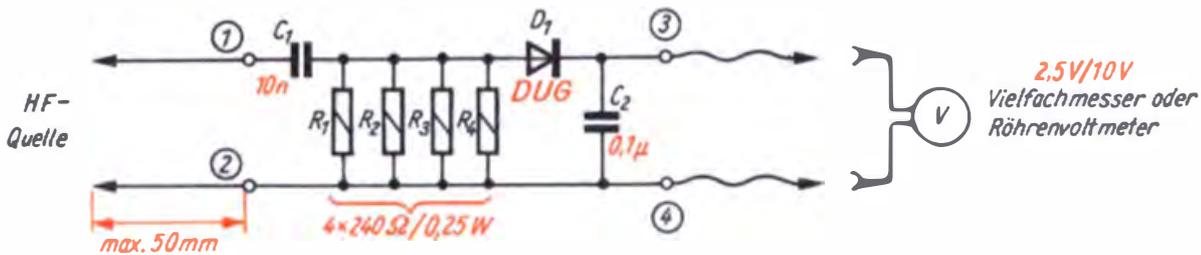


Bild 99. Schaltbild der HF-Leistungsmeßeinrichtung

größe kaum eine Belastung dar. Infolgedessen müssen wir der Messung und Berechnung der HF-Leistung P_{HF} die Spitzenwerte der HF-Wechselspannung zugrunde legen. Wir berechnen also P_{HF} mit

$$U_m = U_{\text{eff}} \sqrt{2} \quad \text{aus} \quad P_{\text{HF}} = \frac{U_{\text{eff HF}}^2}{R},$$

$$\text{wobei} \quad U_{\text{eff HF}} = \frac{U_{m \text{ HF}}}{\sqrt{2}}.$$

Also ist

$$P_{\text{HF}} = \frac{U_{m \text{ HF}}^2}{2R}.$$

Lesen wir z. B. am Voltmeter den Wert $U_{\text{HF}} = 6,02 \text{ V}$ ab, dann ist

$$P_{\text{HF}} = \frac{6,02^2 \text{ V}^2}{2 \cdot 60 \Omega} = \frac{36,24 \text{ V} \cdot \text{V} \cdot \text{A}}{120 \text{ V}} \approx 300 \text{ mW}.$$

Damit können wir für jeden der gemessenen HF-Spannungswerte die zugehörige HF-Leistung berechnen. Richtwerte zur Bestimmung der Sendeleistung enthält die Tabelle auf Seite 87 oben (für $R_{\text{Ant}} = 60 \Omega$), Zwischenwerte berechnen wir selbst.

Beim Aufbau der Schaltung nach Bild 99 sind einige Dinge zu beachten. Wir wissen, daß bei der Frequenz 27,12 MHz nur wenige Windungen der Spule genügen, um eine Schwingkreisinduktivität zu bilden. So stellt also bereits ein kurzes Drahtstück eine (meist unerwünschte) Induktivität dar, und eng benachbarte Leiterzüge bilden einen Kondensator. Deshalb müssen wir HF-führende Leitungen, sofern es sich nicht um Antennen handelt, so kurz wie möglich auslegen.

Der Aufbau des HF-Leistungsmessers erfolgt nach den Bildern 100 und 101. Für den Anschluß

der HF-Spannungsquelle (im Experiment ist das die Koppelwicklung von L_1) verwenden wir zwei kurze Stücke (bis 5 cm) Kupferlitze. Die Ersatzantenne wird durch vier Kohleschichtwiderstände von je 240Ω gebildet. Die Widerstände löten wir gewissermaßen gebündelt ein, so daß wir den Wert 60Ω erhalten. Welche Bedeutung diese 60Ω haben, werden wir im Kapitel »Antenne« beim Senderaufbau noch erfahren. Da normale Kohleschichtwiderstände mit Wendeschliff hergestellt werden, stellen sie infolgedessen bei 27,12 MHz bereits eine wirksame Induktivität dar. Bündeln wir nun die vier Widerstände, so heben sich die Magnetfelder zum Teil auf, und die Gesamtinduktivität wird geringer als eine Einzelinduktivität. Die Zuleitung zum Vielfachmesser machen wir so lang, daß bequem damit gearbeitet werden kann. Nun verbinden wir die Anschlüsse 1 und 2 des HF-Leistungs-

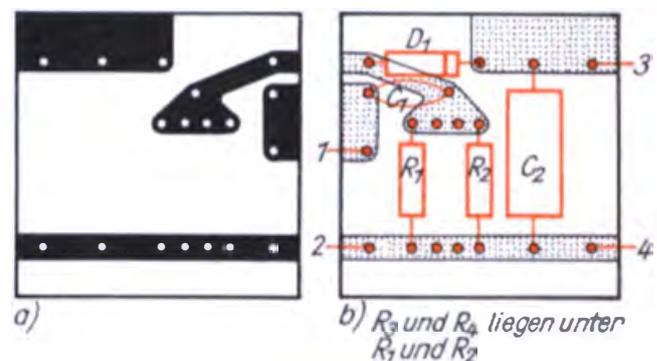
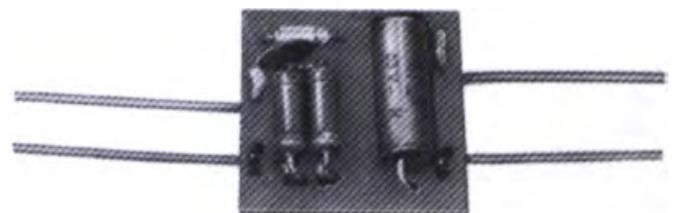
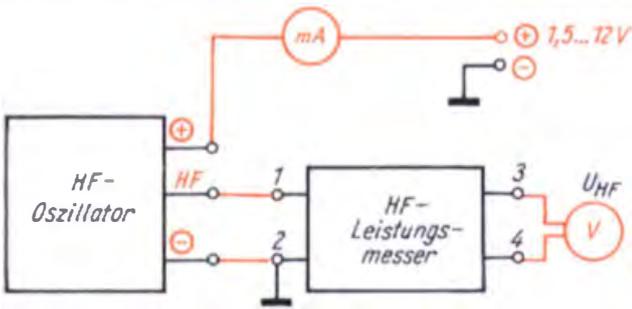


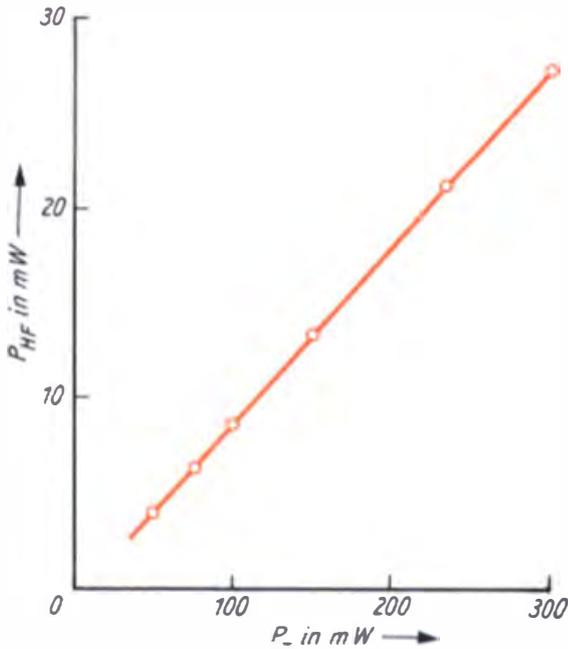
Bild 100. HF-Leistungsmeßeinrichtung: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan

Bild 101. Ansicht der bestückten Leiterplatte der HF-Leistungsmeßeinrichtung





a)



b)

Bild 102. Zur Leistungsmessung am HF-Oszillator:
a) Schaltung, b) Kennlinie

messers mit der Koppelwicklung des zu prüfenden Oszillators und schalten den Vielfachmesser an die Anschlüsse 3 und 4 (Bild 102). Steht uns ein zweiter Vielfachmesser zur Verfügung, messen wir mit ihm die Stromaufnahme des Oszillators. Wir werden bei 10 mA Stromaufnahme je nach Güte des Transistors eine HF-Spannung von $\approx 0,65$ V messen. Das entspricht einer HF-Leistung von etwa 3,5 mW. Wiederholen wir nun noch einmal den Abgleich des Oszillators mit angeschaltetem Leistungsmesser, so beobachten wir an einer bestimmten

Stelle ein HF-Leistungsmaximum. Interessant ist, daß dieses Maximum bei der Kernstellung für höchste Schwingstabilität auftritt. Da mit der vom HF-Oszillator abgegebenen Leistung im Sender die nachfolgende HF-Stufe angesteuert wird, haben wir also einen weiteren Grund dafür, den Oszillator auf den Punkt höchster Schwingstabilität und maximaler Leistungsabgabe einzustellen.

Jetzt wollen wir die abgegebene HF-Leistung in Abhängigkeit von der Klemmenspannung untersuchen. Dazu wird der Oszillator bei der Klemmenspannung 4,5 V auf 10 mA Stromaufnahme eingestellt. Im Experiment steigern wir die Klemmenspannung von 1,5 V in Schritten von 1,5 V bis auf 12 V. Dabei messen wir die Gleichstromaufnahme und die abgegebene HF-Leistung. Die Werte notieren wir in einer Tabelle und berechnen die Gleichstrom- und die HF-Leistung, die wir in ein Diagramm eintragen (Kurvenverlauf nach Bild 102b). Abweichungen sind dabei durchaus möglich, da die Werte sehr stark vom Transistortyp und seinen Daten abhängen. Aus dem Verlauf der Oszillatorkennlinie ersehen wir, daß die abgegebene HF-Leistung direkt proportional zur aufgenommenen Gleichstromleistung steigt. Wollen wir also für einen leistungsfähigen Fernsteuersender mit dem HF-Oszillator die erforderliche HF-Leistung erzeugen, so müssen wir ihn mit einer entsprechend hohen Klemmenspannung betreiben.

Wir senden und empfangen

Die mit dem HF-Oszillator erzeugten HF-Schwingungen haben, wie wir bereits wissen, die Eigenschaft, daß sie sich über eine Antenne abstrahlen lassen. Löten wir an die Klemme (HF) des HF-Oszillators nach Bild 94 etwa 1 m Kup-

P_{HF} in mW	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
U_{HF} in V	2,45	3,46	4,26	4,92	5,50	6,02	6,51	6,95	7,33	7,78

ferlitzte als Antenne und spannen sie vertikal, so haben wir einen einfachen, zunächst noch leistungsschwachen Hochfrequenzsender. Damit können wir erste Sendeversuche durchführen. Zum Nachweis der ausgesendeten Schwingungen bauen wir einen einfachen Empfänger, den wir später als wichtiges Hilfsmittel beim Abgleich des Fernsteuersenders benutzen. Dieser Empfänger ist der Detektor (HF-Gleichrichter) für 27,12 MHz (Bilder 103 und 104). Mit seiner 50 cm langen Antenne empfängt er die HF-Schwingungen und führt sie dem auf die Senderschwingung von 27,12 MHz (des HF-Oszillators) abgestimmten Schwingkreis L_1/C_1 zu. Infolge Resonanz tritt an dessen Klemmen nur die Wechselspannung mit der Frequenz 27,12 MHz auf. Sie wird von der Diode D_1 gleichgerichtet (Bild 105), die nur die positiven Halbwellen der HF-Schwingung durchläßt. Der Kondensator C_2 dient als Ladekondensator, so daß am Punkt 2 die gleichgerichtete und geglättete HF-Spannung abgegriffen bzw. mit dem Vielfachmesser gemessen werden kann. Der Aufbau des HF-Empfängers ist so ausgelegt, daß er direkt unter den Meßklemmen des Vielfachmessers befestigt werden kann (Bild 106). Für das Einstecken des Antennendrahtes ist eine Buchse vorgesehen, so daß dieses Zusatzgerät recht handlich bleibt. In unserem ersten Sende- und

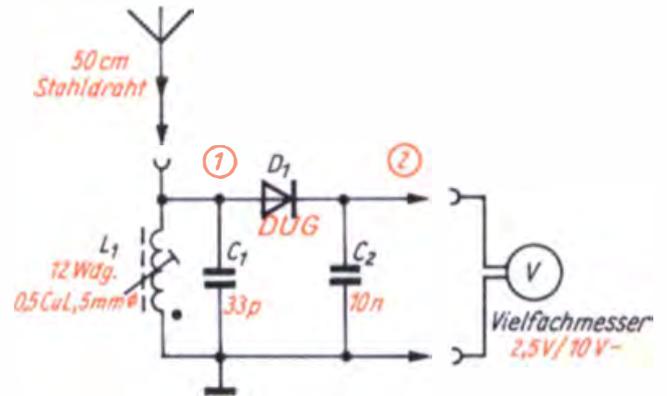


Bild 103. Schaltbild des HF-Empfängers für 27,12 MHz

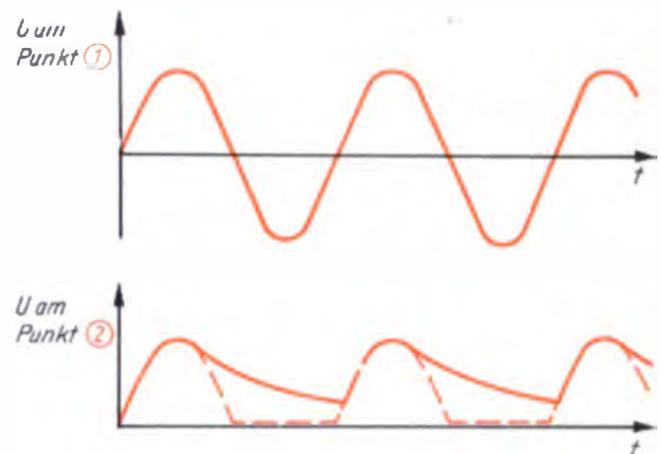
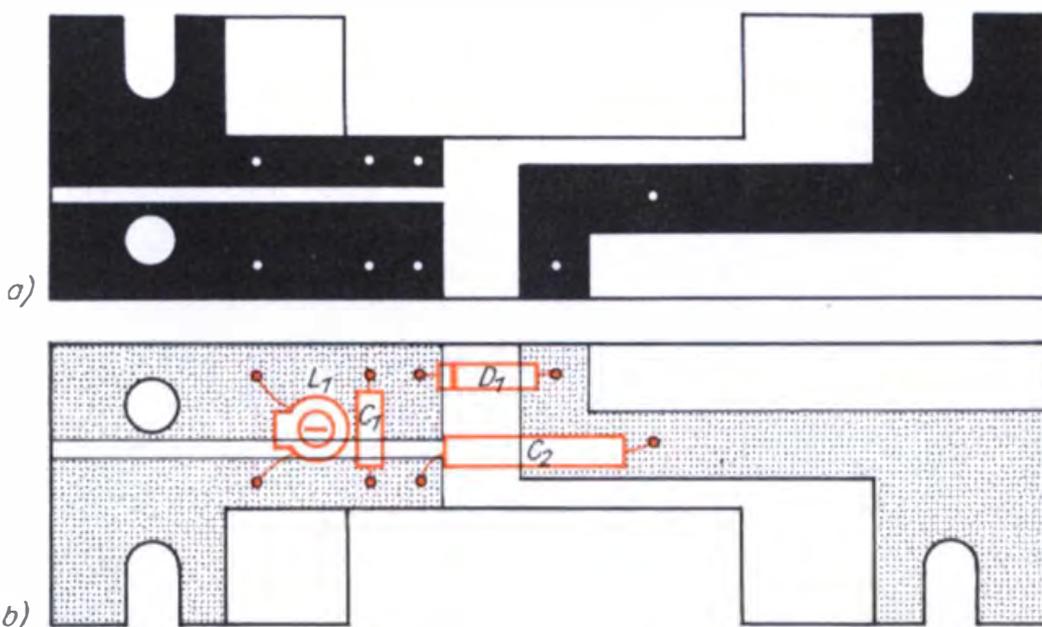


Bild 105. Arbeitskennlinie des HF-Gleichrichters

Bild 104. HF-Empfänger: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan



Empfangsversuch betreiben wir den abgeglichenen HF-Oszillator mit 9 V Klemmenspannung. Den HF-Empfänger mit der aufgesteckten Antenne stellen wir in etwa 20 cm Abstand auf. Nun drehen wir den Kern von L_1 im HF-Empfänger langsam so weit in die Spule, bis der Zeigerausschlag am Vielfachmesser (Meßbereich 100 mV) sein Maximum erreicht. Der Spulenkern wird in dieser Stellung mit einem Tropfen Wachs (Wachskerze an Lötkolbenspitze halten) festgelegt. Damit ist der Empfänger abgeglichen. Nun führen wir drei Experimente durch, um Eigenschaften der Hochfrequenz kennenzulernen.

1. Experiment: Wir betreiben den HF-Oszillator mit 4,5 V und 9 V Klemmenspannung. Empfängerabstand 20 cm.

Ergebnis: Bei 4,5 V Klemmenspannung ist die gemessene HF-Spannung nur etwa halb so groß wie bei 9 V.

Schlußfolgerung: Bei halber Klemmenspannung ist die abgegebene Leistung des Oszillators auch nur halb so groß. Damit werden die Sendefeldstärke und auch die empfangene HF-Spannung nur halb so groß sein. Wir können also mit dem HF-Empfänger die Größe von HF-Spannungen beurteilen (relative Messung) und dadurch die Sendeleistung bzw. -feldstärke einschätzen. Der HF-Empfänger wird uns später als HF-Feldstärkemesser noch gute Dienste leisten.

2. Experiment: Wir betreiben den HF-Oszillator mit 9 V Klemmenspannung und vergrößern den Empfängerabstand von 20 cm schrittweise auf 1 m.

Ergebnis: Die gemessene HF-Spannung wird mit zunehmendem Abstand zwischen Sender und Empfänger immer geringer.

Schlußfolgerung: Die Sendefeldstärke wird mit zunehmendem Abstand geringer. Da wir für die sichere Funktion der Modellfernsteuerung eine entsprechend große Signalspannung am Ausgang des Empfängers benötigen, kann der Abstand zwischen Sender und Empfänger nicht beliebig vergrößert werden. Man spricht hierbei von der *Sendefeldstärke* (HF-Feldstärke am Sendeort) und der *Empfangsfeldstärke* (HF-Feldstärke am Empfangsort). Die Empfangsfeldstärke darf deshalb ein Minimum nicht unterschreiten; das



Bild 106. Musteraufbau des HF-Empfängers, am Vielfachmesser montiert

ist aber, wie wir noch sehen werden, auch von den Eigenschaften des Empfängers abhängig. Mit dem HF-Empfänger nach Bild 103 läßt sich im Abstand von mehr als 2 m kein Zeigerausschlag am Vielfachmesser mehr nachweisen. Zur Vergrößerung der Reichweite müssen wir einen Sender höherer Leistung (d. h. größerer Sendefeldstärke) oder/und einen empfindlicheren Empfänger (d. h. geforderter Steuerspannung bei stark verringerter Empfangsfeldstärke) einsetzen.

3. Experiment: Wir betreiben den HF-Oszillator mit 9 V Klemmenspannung. Empfängerabstand 30 cm. Die zunächst parallele Senderantenne wird aus der Vertikalen um jeweils 90° nach zwei Richtungen geschwenkt. Damit wir die Senderantenne nicht direkt berühren, führen wir sie an einem 50 cm langen Faden, der am Antennenende befestigt ist.

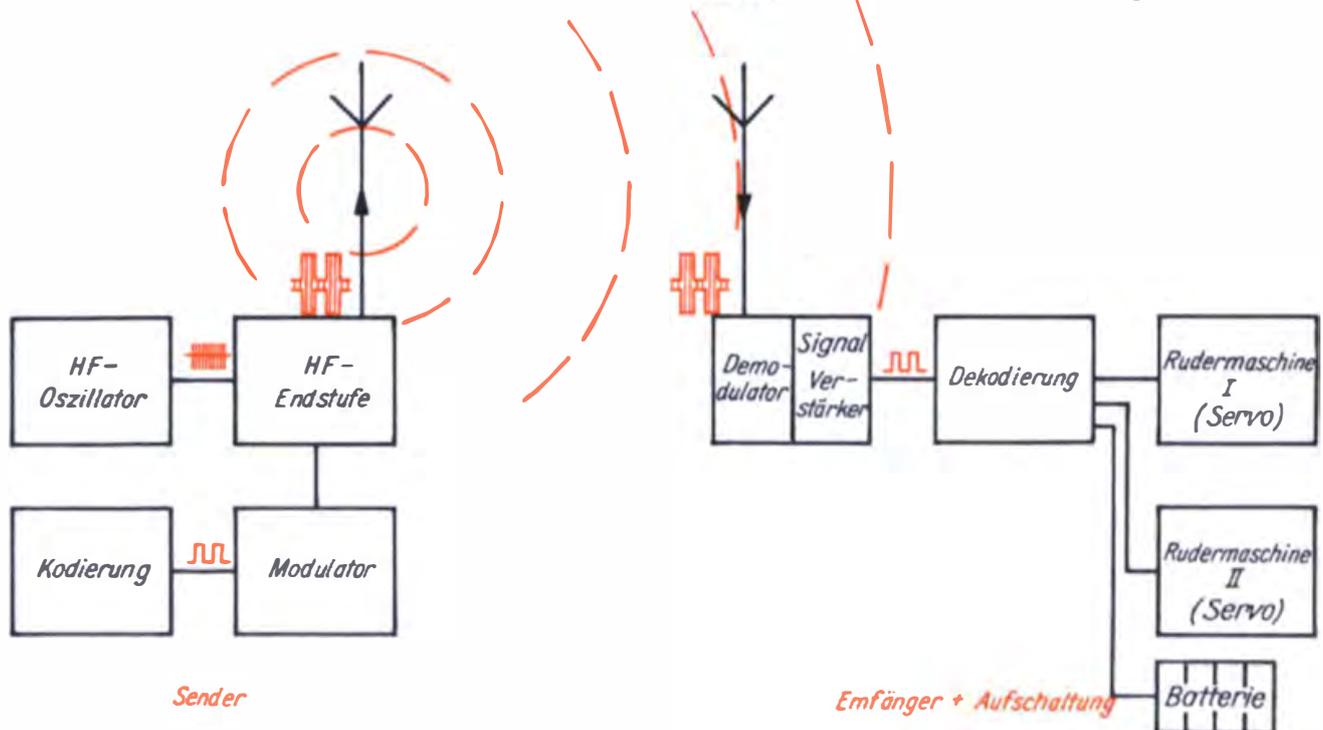
Ergebnis: Die gemessene HF-Spannung sinkt vom Maximalwert bei paralleler Richtung von Sender- und Empfängerantenne fast auf den Wert Null bei senkrecht zueinander gerichteten Antennen ab. Dabei ist gleichgültig, in welche Richtung die Antenne geschwenkt wird.

Schlußfolgerung: Da wir die ausgesendete Hochfrequenz so vollständig wie möglich empfangen wollen, achten wir darauf, daß Sender- und Empfangsantenne immer in die gleiche Richtung weisen und **nie** senkrecht zueinander stehen. Das ist besonders dann wichtig, wenn sich die Empfangsfeldstärke wegen großer Entfernung zwischen Modell und Sender ohnehin schon sehr stark verringert hat.

Die Hochfrequenz wird verstärkt und moduliert

Zwei wesentliche Probleme müssen wir nun noch lösen. Es sind einerseits das Aufprägen der Signalschwingung auf die Trägerschwingung im Sender (*Modulation*) und andererseits die Rückgewinnung der Signalschwingung aus der modulierten Trägerschwingung im Empfänger (*Demodulation*). Daneben müssen wir auch die zunächst einzeln kennengelernten Funktionsstufen zu einer komplexen Schaltung, der Senderschaltung, zusammenfassen und den Sender als komplettes Gerät aufbauen. Wir werden also auch einige mechanische Arbeiten durchführen. Bild 107 zeigt, welche Funktionsstufen im Sender und welche im Empfänger zusammengefaßt werden. Konzentrieren wir uns zunächst auf den Sender. Das *Blockschaltbild* verdeutlicht uns die Funktion der einzelnen Stufen und deren Zusammenwirken. Mit seiner Hilfe wollen wir auch das Senderschaltbild (Bild 108) »lesen«. Ein solch komplexes Schaltbild ist für uns neu. Wir suchen daher erst einmal die bekannten Schaltungsteile

Bild 107. Blockschaltbild einer Funkfernsteuerung

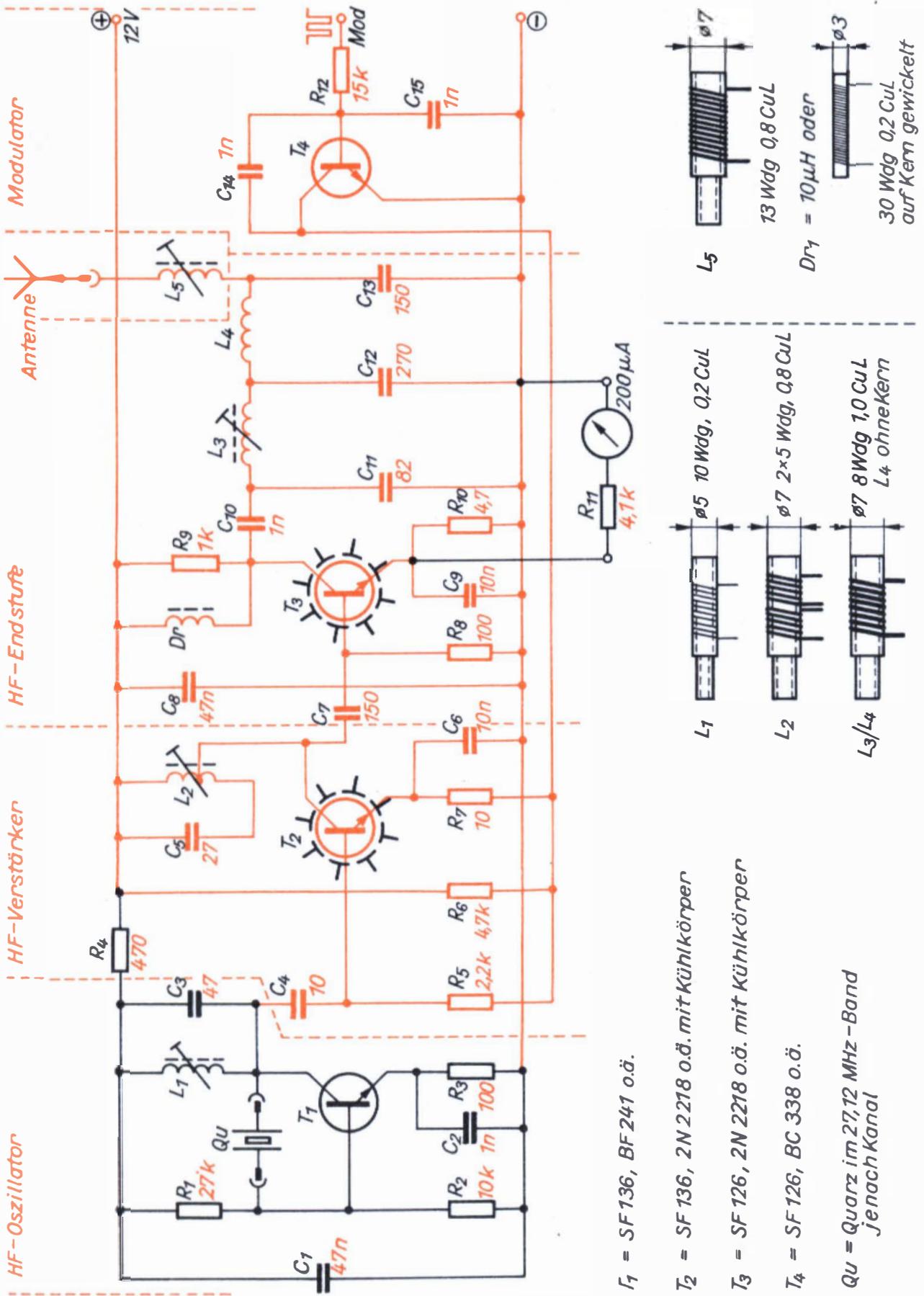


heraus. Links erkennen wir den HF-Oszillator. Er entspricht dem experimentell untersuchten Oszillator von Bild 94.

Um Wirkungsweise und Verhalten der HF-Endstufe, der Antenne und des Modulators kennenzulernen, bauen wir die Versuchsschaltung nicht erst auf der Experimentierplatine auf, sondern gleich auf der Senderplatine. Das ist notwendig, weil das Verhalten der Hochfrequenzschaltungen stark von ihrem mechanischen Aufbau bestimmt wird. So könnte ein Versuchsaufbau ein ganz anderes Verhalten zeigen als der Senderplatinenaufbau.

Der Hochfrequenzverstärker

Prinzipiell können wir die vom HF-Oszillator erzeugte HF-Spannung mit dem Impulssignal modulieren, würden aber wegen der geringen Leistung nur kleine Reichweiten erzielen. Deshalb müssen wir die HF-Spannung entsprechend verstärken. Für diesen Zweck sind die beiden *Verstärkerstufen* mit T_2 und T_3 vorgesehen. Betrachten wir zunächst die Stufe mit T_2 (Bild 109). Gegenüber der uns bekannten Verstärkerstufe weist diese einige Besonderheiten auf. Da wäre als erstes die Parallelschaltung von Spule und Kondensator im Kollektorkreis. Diese Schaltung haben wir bereits als *Schwingkreis*, also als



T₁ = SF 136, BF 241 o.ä.

T₂ = SF 136, 2N 2218 o.ä. mit Kühlkörper

T₃ = SF 126, 2N 2218 o.ä. mit Kühlkörper

T₄ = SF 126, BC 338 o.ä.

QU = Quarz im 27,12 MHz - Band
 Jenach Kanal

Bild 108. Schaltbild des Sender-HF-Teils

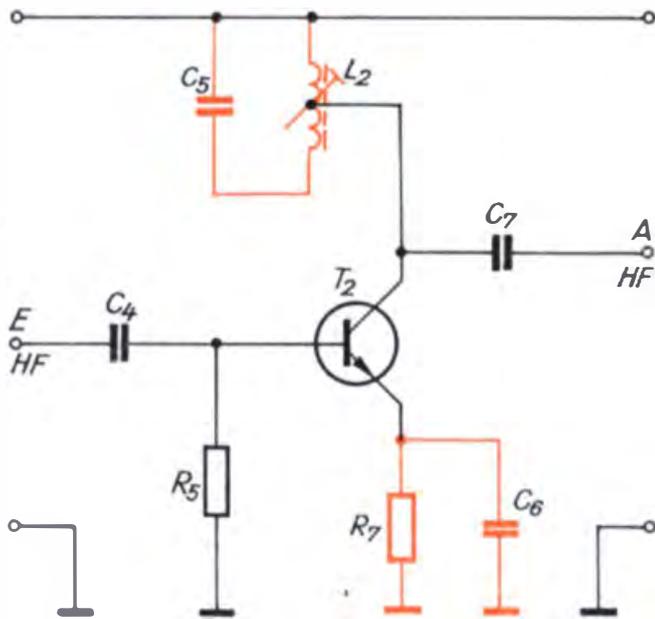


Bild 109. HF-Verstärkerstufe

Schaltung mit besonderen Eigenschaften, kennengelernt.

Warum wählen wir als Arbeitswiderstand für den Transistor T_2 , der als Verstärker arbeitet, einen solchen Schwingkreis? Wir können dadurch für die Resonanzfrequenz in einfacher Weise einen relativ hohen Wechselstromwiderstand realisieren. Da der Schwingkreis für alle anderen Frequenzen einen geringeren Widerstand hat, werden sie auch entsprechend weniger verstärkt. Das ist wichtig, da die Funkordnung nur einen ganz bestimmten *Oberwellengehalt* der HF-Schwingung zuläßt. Was sind *Oberwellen*?

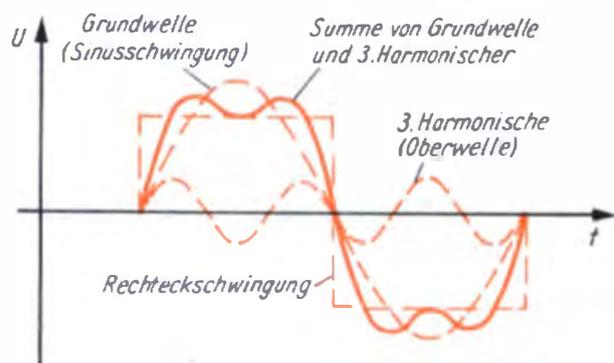
Solange wir es mit rein sinusförmigen Schwingungen zu tun haben, existiert nur eine Schwingung – die *Grundschwingung*. Sobald eine sinusförmige Schwingung durch irgendein Schaltglied begrenzt wird, entsteht eine fast rechteckförmige Schwingung. Wir können nach Bild 110 grafisch ermitteln, welche Sinusschwingungen erforderlich sind, um als Summe eine Rechteckschwingung zu ergeben. Umgekehrt kann man die Rechteckschwingung als Summe von Sinusschwingungen darstellen. Zur Berechnung dient ein mathematisches Verfahren, die *Fourieranalyse*. Sie gestattet es, die Anzahl und den Anteil von Sinusschwingungen an einer Schwingung mit beliebiger Kurvenform genauestens zu bestimmen. Wir wollen auf die Erläuterung der Fourieranalyse verzichten; aus Bild 110 erkennen wir

schon, daß außer der Grundwelle immer nur *ganzzahlige Vielfache* davon auftreten, aber mit geringerer Amplitude. Diese Schwingungen mit dem Vielfachen der Grundfrequenz bezeichnet man als *Oberwellen*. Nach den gesetzlichen Bestimmungen dürfen die Amplituden der Oberwellen bestimmte Werte nicht überschreiten. Da der Schwingkreis bei $2 \cdot f_0$ oder $3 \cdot f_0$ bereits total verstimmt bzw. außer Resonanz ist, werden diese Frequenzen nur gering verstärkt. Trotzdem kann ihr Anteil noch so hoch sein, daß Maßnahmen zur Oberwellenunterdrückung erforderlich werden. Diese werden wir bei der HF-Endstufe anwenden. Bei der Verstärkerstufe mit T_1 genügt die Oberwellendämpfung des einfachen Parallelschwingkreises. Damit die Grundwelle bzw. Resonanzfrequenz durch den Transistor nicht zu stark gedämpft wird, liegt der Kollektor von T_1 an einer Anzapfung von L_2 . Betrachten wir nun die anderen Bauelemente der Verstärkerstufe.

Der aufmerksame Leser wird sich bestimmt schon gefragt haben: Wenn das eine Verstärkerstufe ist, wo ist dann der Basisspannungsteiler? Man unterscheidet drei grundsätzliche Betriebsarten von Verstärkern, die mit den Buchstaben A, B und C gekennzeichnet werden. Der Verstärker, den wir schon früher kennenlernten, arbeitete im *A-Betrieb*. Dabei wird durch eine geeignete Schaltung, in unserem Fall war das der Basisspannungsteiler, der Arbeitspunkt so eingestellt, daß beiderseits von ihm ein annähernd gleich großer Teil der Kennlinie ausgesteuert wird. Ohne Ansteuerung fließt durch den Transistor ein Ruhestrom

$$I_0 \approx \frac{I_{Cmax}}{2}$$

Bild 110. Grundwelle und Oberwellen einer Rechteckschwingung



Beim *B-Betrieb* wird keine Basisvorspannung erzeugt und dadurch auf der Kennlinie nur die positive Halbwelle wirksam. Es verbessert sich der Wirkungsgrad des Transistors, der theoretisch 78,5% betragen kann. Außerdem ist die thermische Belastung des Transistors im Vergleich zum A-Betrieb verringert.

Die weitaus größte Bedeutung hat für Senderanwendungen der *C-Betrieb*, da sich mit ihm theoretisch der Wirkungsgrad 89,7%, praktisch 85%, erreichen läßt. Bei dieser Betriebsart wird der Arbeitspunkt noch weiter in den Sperrbereich verschoben, so daß der Transistor nur noch die Spannungsspitzen verstärkt (Bild 111). Deswegen ist die Verstärkung im C-Betrieb geringer, dafür besteht aber eine gute thermische Stabilität. Bei C-Betrieb wird der Transistor im Vergleich zu den anderen Betriebsarten bei jeweils gleicher HF-Leistung thermisch am geringsten belastet. Außerdem ist die Schaltung denkbar einfach. Die Vorspannung zur Verschiebung des Arbeitspunktes auf der U_{BE} -Achse nach links wird durch die *RC*-Kombination in der Emitterleitung erzeugt. Da nur Teile der Steuerspannung verstärkt am Transistorausgang auftreten, ist die Ausgangsspannung sehr stark verzerrt und damit oberwellenhaltig. Nun wird auch klar, warum wir bei der Auslegung der nachfolgenden Schaltungsteile auf bestmögliche Oberwellenunterdrückung achten müssen.

Damit die durch die *RC*-Kombination in der Emitterleitung erzielte Arbeitspunktverschiebung an der Basis wirksam werden kann, legen wir diese über R_5 auf Minus. Die Wirkungsweise der Koppelkondensatoren C_4 und C_7 entspricht der, die wir beim *RC*-Verstärker kennengelernt

Bild 112. Collinsfilter: a) Parallelschwingkreis, b) Parallelschwingkreis mit geteilter Kapazität, c) Einfach-Collinsfilter, d) Zweifach-Collinsfilter

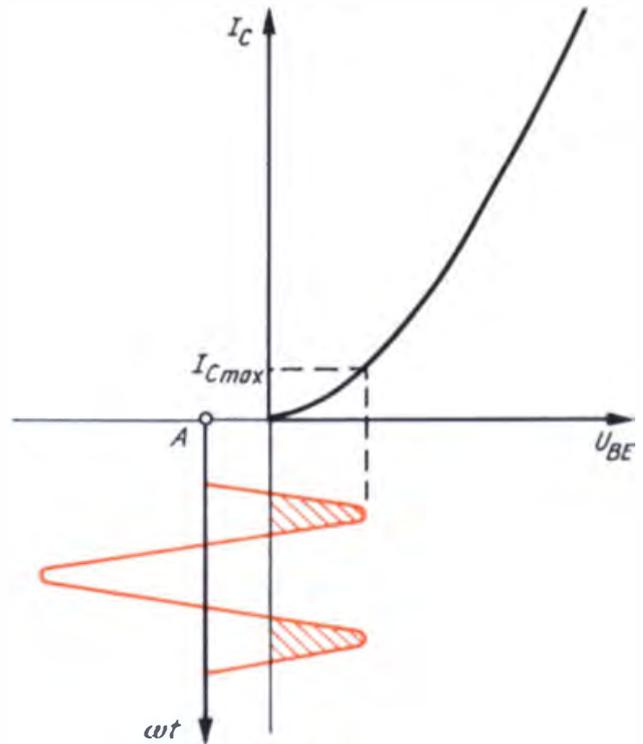
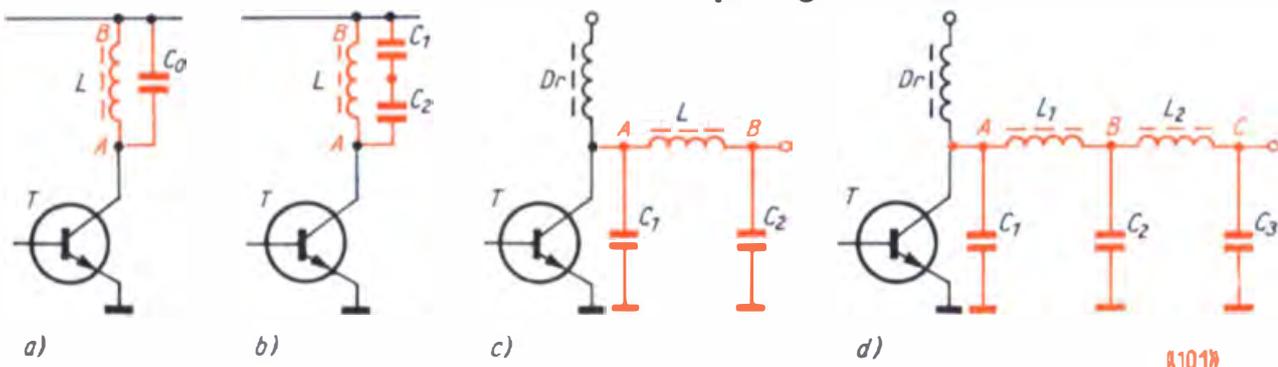


Bild 111. Kennliniendarstellung für C-Betrieb

haben. Die Widerstände R_5 und R_7 sind im Bild 109 gegen Minus geschaltet. Im Schaltbild (Bild 108) liegen sie am Kollektor des Modulatortransistors, der sie im Takt der Modulationsspannung auf Masse schaltet. In der Wirkungsweise von R_5 und R_7 für die HF-Verstärkung besteht dadurch kein Unterschied. Auf den Modulationsvorgang wird später noch näher eingegangen.

Jetzt betrachten wir die HF-Endstufe mit T_3 . Die zweistufige HF-Verstärkung wählen wir, um eine günstige *Stufenanpassung* zu erreichen. Der HF-Oszillator ist für hohe Schwingsicherheit und einwandfreies Arbeiten in allen HF-Kanälen ausgelegt. In der über C_4 nur schwach angekoppelten HF-Verstärkerstufe wird die Hochfrequenz gewissermaßen verstärkt und moduliert.

Die Endverstärkung auf die erforderliche HF-Leistung übernimmt dann T_3 . Da wir es in der Endstufe mit erheblich größeren HF-Leistungen zu tun haben, müssen zusätzliche Maßnahmen zur *Oberwellenunterdrückung* und *Stufenanpassung* getroffen werden. Zur Oberwellenunterdrückung nutzen wir wieder die Eigenschaften des Parallelschwingkreises aus. Das *LC*-Netzwerk in der Kollektorleitung von T_3 mag auf den ersten Blick verwirrend erscheinen, aber es ist auch ein Parallelschwingkreis. Betrachten wir es etwas näher. In der Fachliteratur wird diese typische Schaltung als *Collinsfilter* bezeichnet. Im Bild 112 ist dargestellt, wie wir das *Collinsfilter* aus dem normalen Parallelschwingkreis entwickeln. Zunächst teilen wir die Schwingkreis Kapazität C_0 in C_1 und C_2 . Dabei müssen C_1 und C_2 für die gleiche Resonanzfrequenz doppelt so groß sein wie C_0 . Der gemeinsame Punkt von C_1 und C_2 wird auf Masse geschaltet. Am Punkt B des Schwingkreises greift man die HF-Spannung ab, also muß dem Transistor die Betriebsspannung über die Drossel D_r zugeführt werden. Sie stellt mit $10 \dots 20 \mu\text{H}$ für die HF-Spannung mit $f = 27,12 \text{ MHz}$ einen großen induktiven Widerstand dar, läßt die Betriebsspannung (\triangleq Gleichspannung) aber ungehindert durch. Diese Schaltung wird als Collinsfilter bezeichnet, da sie für die Oberwellen eine Sperre darstellt und nur die Grundwelle ungehindert durchläßt. Wir können uns die Filterwirkung folgendermaßen erklären:

Nach $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ ist der Widerstand eines

Kondensators um so kleiner, je größer die Frequenz wird. Für die Grundwelle stellt C_1 also noch einen genügend großen Widerstand dar. Bei $3 \cdot f_0$, $4 \cdot f_0$ usw. wird X_C im Punkt A immer kleiner, so daß die Oberwellen höherer Ordnung annähernd zur Masse kurzgeschlossen werden. Eine analoge Betrachtung gilt für die dann noch am Punkt B vorhandenen Oberwellenreste. Wir werden also bestrebt sein, C_1 und C_2 möglichst groß zu machen. Da die Berechnung von C_1 , C_2 und L kompliziert ist, greifen wir bei der Auslegung der von uns verwendeten Senderschaltung auf eine bewährte Dimensionierung zurück.

Um die Oberwellenunterdrückung weiter zu verbessern, kann man das einfache Collinsfilter in ein zweifaches aufteilen. Dadurch wird er-

reicht, daß der mittlere Kondensator einen noch höheren Kapazitätswert annimmt und die Wirksamkeit des Filters erheblich verbessert wird. Mit einer solchen Endstufenschaltung können auch vom Amateur bei sauberem und sachgerechtem Aufbau ohne Schwierigkeiten die Bestimmungen über den Oberwellenanteil eingehalten werden. Das Collinsfilter, oft auch als π -Filter (sprich: Pi-Filter) bezeichnet, hat noch eine weitere gute Eigenschaft. Wir wissen, daß ein Transistor je nach Grundschaltung unterschiedliche Eingangs- und Ausgangswiderstände hat. Wollen wir mit einer Verstärkerstufe eine maximale Leistungsverstärkung erzielen, und das ist die Aufgabe der Senderendstufe, so müssen die Stufen angepaßt sein. Die Bedingung für die *Anpassung* lautet: $R_i = R_a$.

Das heißt, daß der Ausgangswiderstand einer Verstärkerstufe gleich dem Eingangswiderstand der folgenden Stufe sein muß. Um den Ausgang des HF-Oszillators an den Eingang der Endstufe anzupassen, sehen wir eine *induktive Ankopplung* vor. Da bei der Spule L_1 die Windungszahl N_2 nur $1/3$ von N_1 beträgt, wird die HF-Spannung induktiv geteilt (herabtransformiert) und damit die Stufenanpassung realisiert. Wir wissen aber, daß das Collinsfilter einen *kapazitiven Spannungsteiler* enthält, also können wir auch damit das Anpassungsproblem lösen. Je nach Belastung hat der Endstufentransistor einen Ausgangswiderstand von $50 \dots 300 \Omega$. Daran ist der *Antennenfußpunkt* Widerstand von etwa 35Ω anzupassen. Dem großen Widerstand entspricht die größere Teilspannung und damit im Collinsfilter der kleinere Kapazitätswert. Der kleinere Widerstand am Antennenfußpunkt wird durch einen größeren Kapazitätswert angepaßt. Betrachten wir die Dimensionierung des Collinsfilters, so finden wir diese Überlegungen bestätigt. Fassen wir zusammen: Das Collinsfilter als Endstufenschwingkreis erfüllt in genügendem Maße die Aufgabe der Oberwellenunterdrückung und der Antennenanpassung. Um den Endstufenschwingkreis genau auf die Resonanzfrequenz abstimmen zu können, wird die eine Spule des Filters mit einem Abgleichkern versehen.

Die Modulation der Hochfrequenz

Bisher erfahren wir, daß die Hochfrequenz bei der Übertragung gewissermaßen als Träger des Signals bzw. Kommandos verwendet wird und daß die eigentliche Kommandoinformation im Impulssignal steckt. Wie wir Hochfrequenz und Impulse erzeugen können, ist uns bekannt. Zur Übertragung muß das Impulssignal der HF-Schwingung aufgeprägt (moduliert) werden. Welche physikalischen Vorgänge laufen dabei ab? Die Modulation überblicken wir am besten anhand des Liniendiagramms (Bild 113). Wir wählen für ein Beispiel zwei Frequenzen, die nicht sehr stark voneinander abweichen. Der Schwingung f_1 überlagern wir die Schwingung f_{21} , wobei f_{21} eine kleinere Amplitude als f_1 hat und f_{21} kleiner als f_1 ist. Durch punktweise Addition der beiden Kurven (Bild 113a und b) erhalten wir die resultierende Schwingung von Bild 113d. Kennzeichnend für die Summenschwingung ist, daß ihre Frequenz dem Wert von f_1 entspricht, aber die Amplitude nach einer Hüllkurve, der *Schwebung*, schwankt. Die resultierende Schwingung enthält also auch die Frequenz der Hüllkurve f_3 . Die gleiche Frequenz f_3 erhalten wir, wenn die Schwingung f_1 mit der Schwingung f_{22} überlagert wird, wobei f_{22} größer als f_1 ist (Bild 113c).

Daraus lernen wir, daß neben einer Grundschwingung f_1 , deren Amplitude nach einer Hüllkurve f_3 schwankt, auch die Differenz- bzw. Summenfrequenzen $f_{21} = f_1 - f_3$ bzw. $f_{22} = f_1 + f_3$ auftreten. Genau das tritt bei der Modulation im Fernsteuersender ein. Die modulierte Hochfrequenz des Fernsteuersenders (Zweikanalbetrieb)

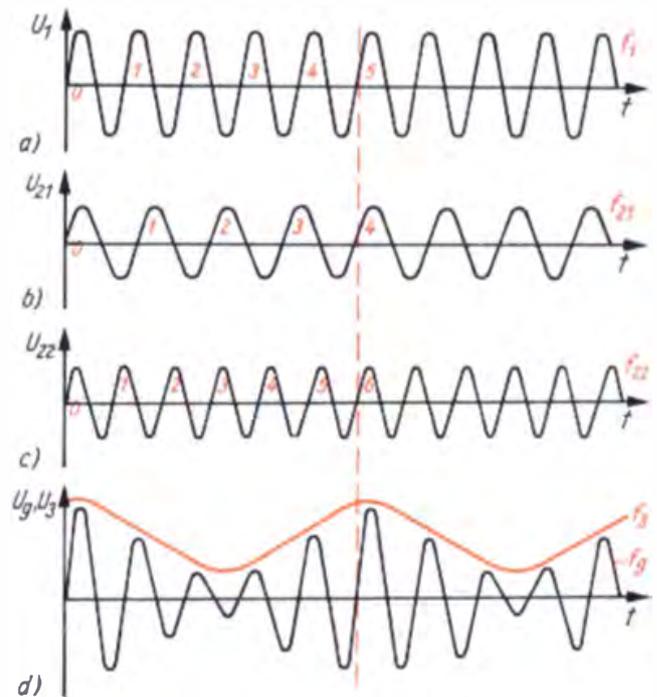
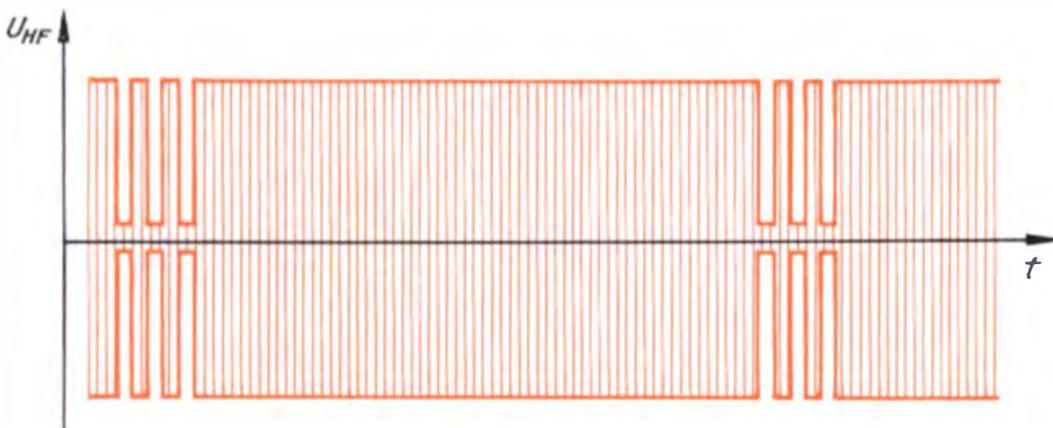


Bild 113. Überlagerung zweier Schwingungen: a) Grundschwingung f_1 , b) Überlagerungsschwingung f_{21} ($f_{21} < f_1$), c) Überlagerungsschwingung f_{22} ($f_{22} > f_1$), d) Summenschwingung mit der Hüllkurve f_3

quenz mit $f = 27,12$ MHz von Bild 114 entspricht der Frequenz f_1 aus unserem Beispiel und das modulierende Impulssignal der Frequenz f_3 der Hüllkurve. Daß die Hüllkurve von Bild 114 im Unterschied zu der Hüllkurve von Bild 113 Rechteckform hat, ist auf die Besonderheiten der Modulationsart zurückzuführen, ändert aber nichts am Prinzip. Uns ist ja bekannt, daß die Rechteckschwingung eine sinusförmige Grundschwingung und die NF-Oberwellen enthält. Wichtig ist nur, daß die modulierte Hochfrequenz aus folgenden Frequenzteilen besteht:

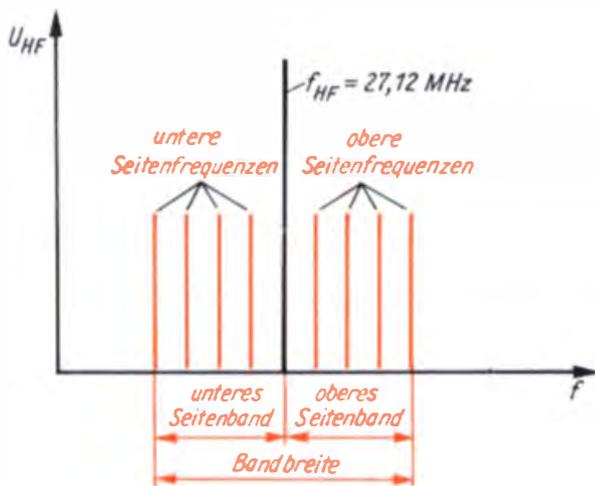


Bild 115. Trägerfrequenz und Seitenbänder bei der Modulation

$$f_1 - f_3 = f_{HF} - f_{NF} \quad (\text{untere Seitenfrequenz})$$

$$f_1 = f_{HF} \quad (\text{Trägerfrequenz})$$

$$f_1 + f_3 = f_{HF} + f_{NF} \quad (\text{obere Seitenfrequenz}).$$

Das Impulssignal steckt also in den Seitenfrequenzen bzw., bildlich gesehen, in der Hüllkurve, tritt aber selbst nicht mehr auf. Damit ist die eingangs für die Übertragung des Signals gestellte Forderung nach Transformation in eine höhere Frequenzlage erfüllt. Durch den Endstufenschwingkreis wird das durch Modulation entstandene Frequenzgemisch aus Trägerfrequenz und Seitenfrequenzen übertragen. Die Seitenfrequenzen weichen nur um $\approx 0,01\%$ von der Trägerfrequenz ab und liegen damit innerhalb der Bandbreite $d = 5 \dots 10\%$ des Endstufenschwingkreises. Die Niederfrequenz ist in den beiden Seitenfrequenzen enthalten, so daß die Signalinformation von diesen bzw. der Hüllkurve der modulierten Hochfrequenz übertragen wird.

Die Bezeichnungen obere und untere Seitenfrequenz werden uns sofort klar, wenn wir Bild 115 betrachten. Da sich der Impuls aus einer Summe von Sinusschwingungen im NF-Bereich zusammensetzt, sprechen wir von einem *unteren* und *oberen Seitenband*, in dem diese Frequenzen liegen.

Unteres und oberes Seitenband bzw. oberste Seitenfrequenz ($f_o - f_u$) ergeben die Bandbreite b des Senders. Wir wissen, daß der Impulsgenerator die Signalspannung und der HF-Oszillator die HF-Spannung (den Träger) erzeugt. Zur Über-

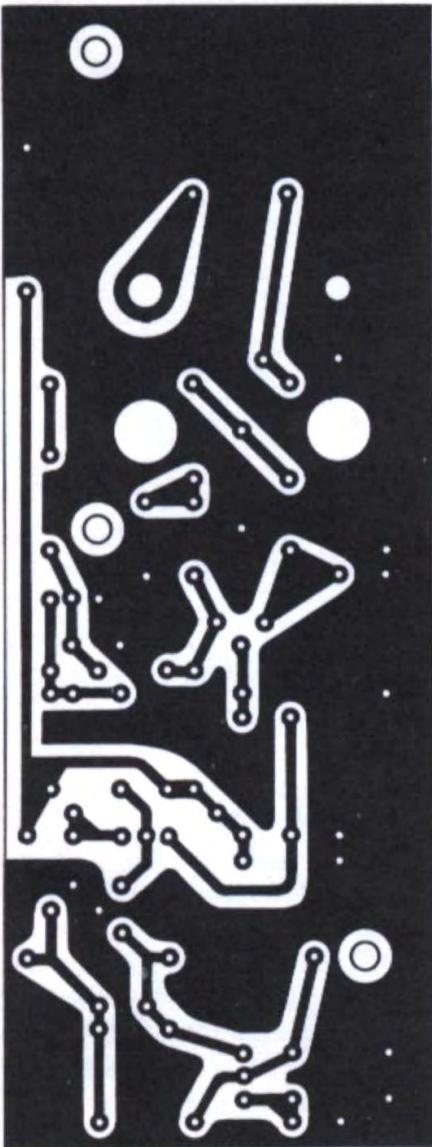
tragung der Signale muß die Hochfrequenz mit dem Impuls moduliert werden. Das Impulssignal ist eine annähernd rechteckförmige Wechselspannung. Wird ihre Form geringfügig geändert, bedeutet das keine Änderung des Signalinhalts. Mit anderen Worten, wir können mit dem Impuls einen elektronischen Schalter betreiben, vorausgesetzt, die Frequenz bleibt unverändert. Diesen Schalter stellt T_4 im Bild 114 dar, der über R_{12} direkt vom Impulsteil angesteuert wird. Da T_4 im Emitterkreis des HF-Verstärkertransistors T_2 liegt, schaltet er letzteren im Takt der Impulsfrequenz an die Betriebsspannung an und ab. Dadurch setzen die HF-Schwingungen in der Endstufe im Takt der Impulse aus und wieder ein; die Hochfrequenz wird mit dem Impulssignal moduliert. Nun beginnen wir den Aufbau und die Erprobung des Senders. Noch ein Hinweis an dieser Stelle. Wir müssen jetzt bereits die Genehmigungsurkunde der Deutschen Post in den Händen haben. *Wurde die Urkunde trotz Antragstellung noch nicht ausgehändigt, warten wir mit dem Aufbau des Senders, bis wir die Urkunde zugeschickt bekommen haben!*

Wir bauen den Fernsteuersender

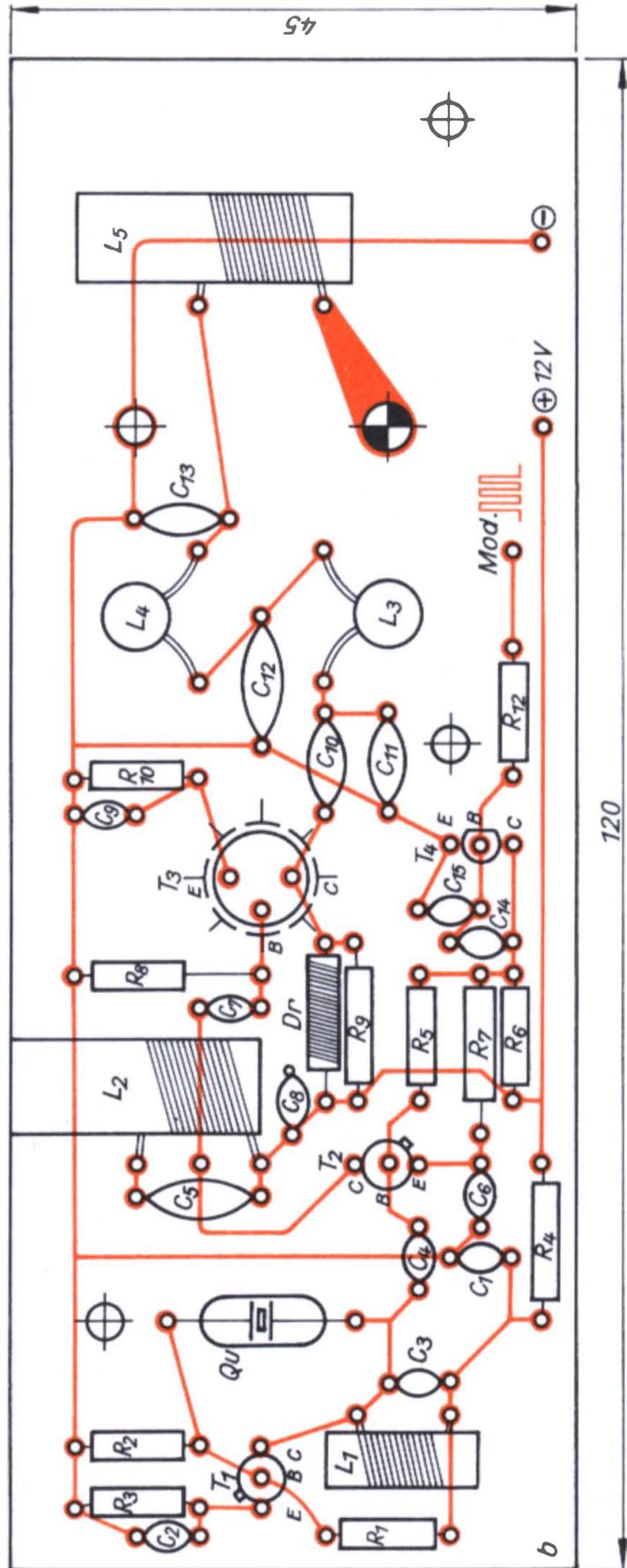
Haben wir die Senderplatine nach Bild 116 angefertigt, wickeln wir alle Spulen und kleben sie (außer Spule L_5) mit Zweikomponentenkleber auf die Platine, die über 17 mm lange Distanzstücke mit dem Sendergehäuse verschraubt wird. Da zum schnellen Quarzwechsel der Quarz von außen leicht einsteckbar sein soll, schieben wir ein Stück Lackschlauch über den Quarz. Der eingesteckte Quarz überragt die Gehäuseoberfläche mit der Lasche um etwa 4 mm und ist somit leicht zu fassen und zu wechseln.

Sind alle Bauelemente eingelötet (Bild 117), kontrollieren wir die Funktion ohne Quarz. Zuvor werden alle Spulenkerne herausgedreht. Die Schaltung muß jetzt einen Strom von etwa 6 mA aufnehmen. Zum Abschluß führen wir den *HF-Vorabgleich* durch. Dafür brauchen wir Zeit und Geduld. Von der Qualität dieser Arbeit wird ganz wesentlich abhängen, ob der Sender

M 1:1



a)



b)

4 mm Bohrung

3 mm Bohrung

120

45

Bild 116. Sender-HF-Teil: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan

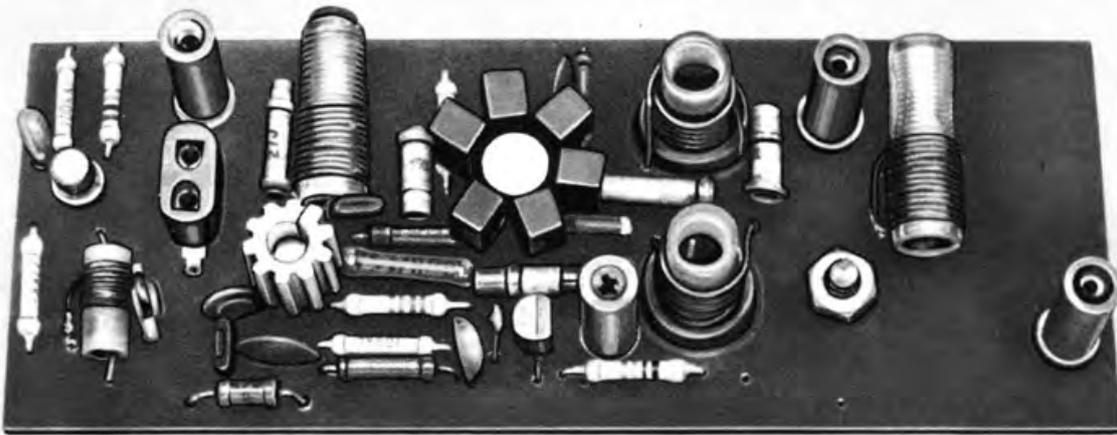


Bild 117. Musteraufbau des Sender-HF-Teils

seine maximale Leistung und damit natürlich auch Reichweite erlangt. Der exakte Impulsabgleich wiederum beeinflusst sehr stark die sichere Funktion der einzelnen Kanäle und damit die Betriebssicherheit der ganzen Anlage. Den HF-Vorabgleich nehmen wir auf einem Holztisch vor, von dem möglichst alle Metallteile (Werkzeuge u. ä.) entfernt worden sind. Wir benötigen dazu unseren kleinen Plastschraubenzieher (angefeilte PVC-Stricknadel) zum Eindrehen der Spulenkerns.

Der Sender-HF-Teil wird abgeglichen

Für den HF-Abgleich nehmen wir uns genügend Zeit und führen ihn mit Geduld durch. Die Maxima der einzelnen Abgleichpunkte sind scharf ausgeprägt; treffen wir sie nicht genau, entspricht das einem Fehlabbgleich. Die Folge davon ist, daß wir nicht die maximale Leistung und Reichweite erreichen.

Oszillatorabgleich

Wir schließen den HF-Teil an den geladenen 12-V-Senderakku an und schalten den Vielfachmesser (Meßbereich 30 mA) in die Pluszuleitung. Ist der Kern von L_1 ganz herausgedreht, messen wir einen Strom von etwa 6 mA (Quarz eingesteckt). Nun drehen wir den Kern langsam hinein und beobachten am Meßgerät ein Ansteigen des Stromes auf den Maximalwert von ≈ 12 mA. Danach drehen wir den Kern eine halbe

Umdrehung zurück. Besitzen wir Quarzpärchen für mehrere Kanäle, probieren wir alle Senderquarze in der Schaltung aus und müssen dabei immer annähernd gleiche Stromwerte erhalten. L_1 wird mit einem Tropfen Wachs fixiert und später **nicht** mehr verstellt!

Treiberstufenabgleich

Als nächstes löten wir eine Brücke von Modulatoreingang auf +12 V. Der aufgenommene Strom ist größer als 20 mA. Durch Eindrehen des Kerns von L_2 wird diese Stufe auf Stromminimum (< 20 mA) vorabgeglichen (Resonanz des Parallelschwingkreises).

Endstufenabgleich

Nun löten wir parallel zu C_{13} die HF-Meßeinrichtung nach Bild 100. Zunächst kontrollieren wir wieder den aufgenommenen Strom der Gesamtschaltung (Meßbereich umschalten!), der bei etwa 60 mA liegen soll. Haben wir ein zweites Vielfachmeßgerät, so benutzen wir es zusätzlich zur HF-Messung. Steht uns nur ein Vielfachmesser zur Verfügung, schalten wir ihn als HF-Leistungsmesser. Durch Eindrehen des Kerns von L_3 stellen wir eine große HF-Leistung ein, Abgleich von L_2 verbessert das Ergebnis noch. Der aufgenommene Strom soll dabei einen Wert $I \approx 75$ mA erreichen. Ist der HF-Teil abgeglichen, wird er etwa 20 Minuten lang mit voller Leistung betrieben. Danach stellen wir noch einmal mit L_2 und L_3 das HF-Maximum bei ≈ 75 mA Stromaufnahme ein. Die Brücke von R_{12} auf (+) entfernen wir erst wieder, wenn der Senderimpulsteil (Koder) angeschaltet wird.

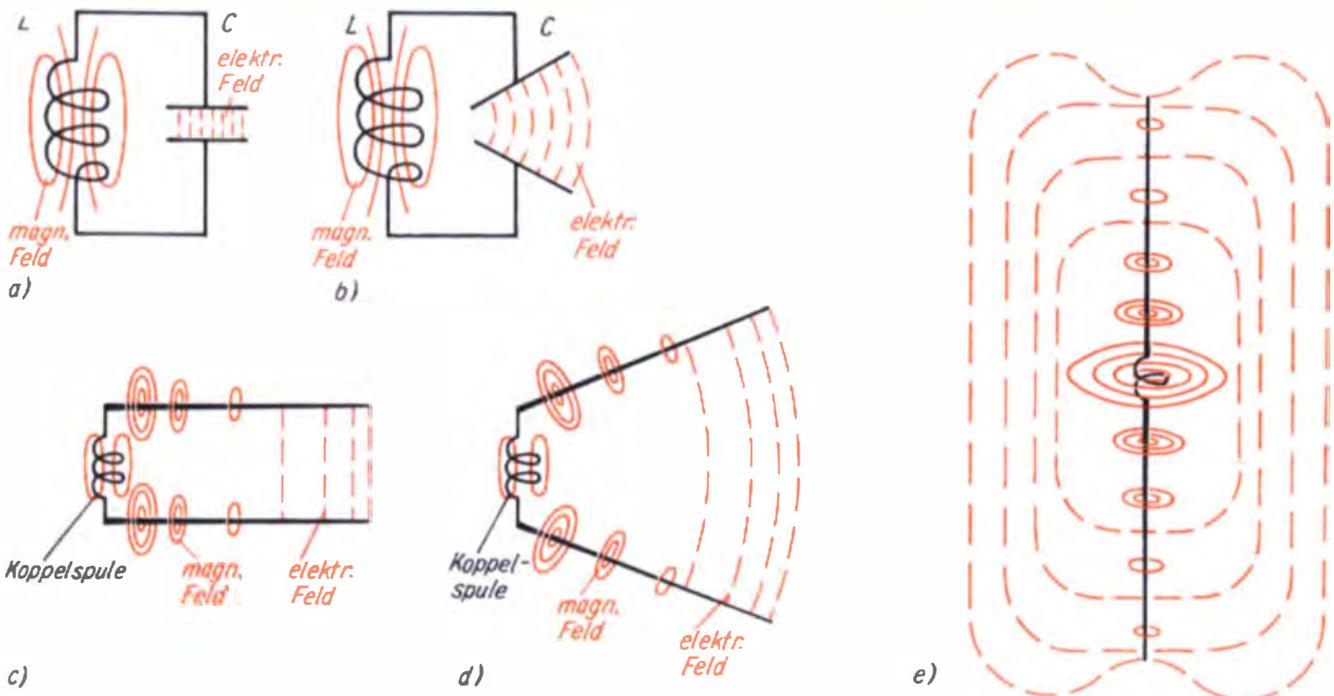
Die Antenne strahlt die Hochfrequenz ab

Die *Antenne* hat die Aufgabe, die eingespeiste Hochfrequenzenergie mit hohem Wirkungsgrad in elektromagnetische Feldenergie umzuwandeln. Maximale elektrische und magnetische Feldstärken bei minimaler Speiseenergie erzielt man, wenn der Schwingkreis mit seiner Eigenfrequenz erregt wird (Resonanzfall). Zur Abstrahlung der Energie sind die konzentrierten Felder von Spule und Kondensator so umzuformen, daß die Feldlinien einen möglichst großen Raum durchsetzen. Die Bauelemente müssen gewissermaßen »auseinandergezogen« werden, so daß aus dem *geschlossenen* ein *offener Schwingkreis* wird. Wir können uns das so vorstellen, daß zunächst die Kondensatorplatten zu Stäben umgeformt werden. Den Vorgang zeigt Bild 118. Das elektrische Feld durchsetzt dann den Raum dazwischen. Da die Ladungen auf die Stäbe fließen müssen, wird sich, entsprechend

der Wirkung des elektrischen Stromes, auch ein magnetisches Feld ausbilden. Nun biegen wir die beiden Stäbe so weit auseinander, daß einer die Verlängerung des anderen (mit gemeinsamer Achse) bildet, wir erhalten so eine *Antenne*. Die Spule hat ihre ursprüngliche Bedeutung als Schwingkreisinduktivität verloren, sie dient nur noch zur Einkopplung der Energie. Das elektromagnetische Hochfrequenzfeld erfüllt jetzt den Raum rings um die Antenne. Dabei tritt in der Mitte das stärkste magnetische Feld (*Induktivität*) und an beiden Enden das stärkste elektrische Feld (*Kapazität*) auf. Die Felder können sich von der Antenne lösen und mit Lichtgeschwindigkeit von ihr wegbewegen. Man bezeichnet eine solche Antenne als *Dipol* oder *Dipolantenne*.

Aus der Feldverteilung können wir auf Strom- und Spannungsverteilung schließen (Bild 119). Dort, wo das magnetische Feld am stärksten ist, ist auch der Strombelag am größten, man sagt, in der Dipolmitte hat der Strom einen Bauch (Strommaximum) und an den Dipolenden je einen Knoten (Stromminimum). Für das elektrische Feld und damit für die Spannungsverteilung gilt eine analoge Betrachtungsweise. Die Spannung hat in der Dipolmitte einen Knoten und an den Dipolenden je einen Bauch (Bild 119). Strom und Spannung entsprechen also längs der Antenne genau einer halben Wellenlänge. Der Dipol wird daher auch als $\lambda/2$ -Dipol bezeichnet.

Bild 118. Umformung des geschlossenen Schwingkreises zur Antenne (offener Schwingkreis): a) geschlossener Schwingkreis, b) das elektrische Feld erhält eine räumliche Verteilung, c) zwischen zwei parallelen elektrischen Leitern (Stäbe) sind magnetisches und elektrisches Feld bereits räumlich verteilt, d) die räumliche Feldverteilung verbessert sich durch das Auseinanderschwenken der Stäbe, e) Dipolantenne



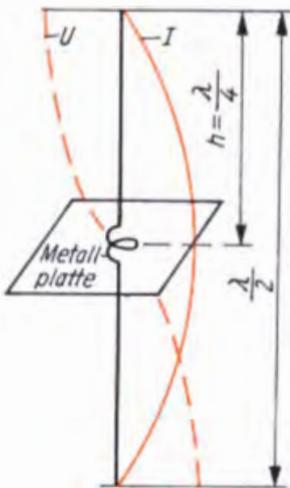


Bild 119. Strom- und Spannungsverteilung bei einer Antenne

Für die Frequenz 27,12 MHz ist dieser 5,53 m lang. Damit wäre die Antenne für den Fernsteuersender natürlich sehr unhandlich. Wir müssen also nach einem Weg suchen, die Antenne zu verkürzen. Legen wir durch ihre Mitte eine metallische Platte, so wird die Feldverteilung nicht beeinflusst, da hier Strombauch und Spannungsknoten liegen. Wir können also z. B. die untere Hälfte der Antenne weglassen, ohne daß sich am Feld der oberen Hälfte etwas ändert, wenn wir dafür im Speisepunkt eine Metallplatte bzw. den entsprechenden Ersatz einbauen. Die halbierte Antenne strahlt jedoch nur noch die halbe Leistung ab, hat demzufolge auch andere Kennwerte. Diese Möglichkeit wird bei der Funkfernsteuerung genutzt, da man die Erdoberfläche als gut leitende Schicht betrachten kann. Unsere Fernsteuerantenne ist eine geerdete $\lambda/4$ -Stabantenne, die man als *Marconi-Antenne* bezeichnet (Bild 120). Sie erzeugt bei senkrechter Aufstellung eine vertikal polarisierte Welle. Zur Erdung werden wir das Sendergehäuse aus Metall herstellen und die Zuleitungen zur Antenne so kurz wie möglich halten. Ebenso müssen wir eine sehr kurze und kontaktsichere Verbindung zwischen Masse in der Senderschaltung und dem Metallgehäuse herstellen. Das Gehäuse darf aber *nur an einem Punkt* mit der Masse verbunden werden. Dieser Punkt ist entweder der Fußpunkt bzw. das kalte Ende der Koppelpule oder das kalte Ende des zweiten bzw. dritten Kondensators im Collinsfilter, das die Antenne anpaßt. Die Senderschaltung

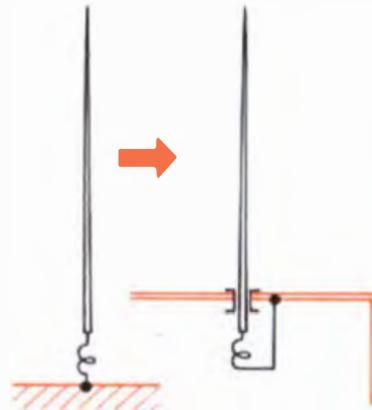
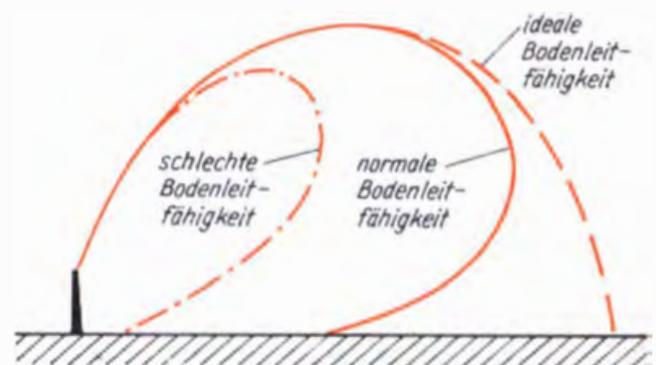


Bild 120. Die geerdete $\lambda/4$ -Antenne (Marconi-Antenne). Das Sendergehäuse »ersetzt« die Erdung. Wichtig sind sehr kurze und kontaktsichere Zuleitungen

darf an keiner anderen Stelle leitenden Kontakt mit dem Sendergehäuse haben, da sonst unliebsame Oberwellen bzw. wilde Schwingungen zustande kommen können. Die Maßnahmen zur optimalen Antennenspeisung und guten Erdung haben unmittelbaren Einfluß auf die Reichweite des Senders. Aus dem *Richtdiagramm* der Marconi-Antenne in Abhängigkeit vom Erdübergangs- und Erdwiderstand ist ersichtlich, daß die Reichweite in Wassernähe oder bei feuchtem Boden wesentlich zunimmt (Bild 121).

Wir wollen uns jetzt mit einer wichtigen Antennenkenngröße beschäftigen, dem Strahlungswiderstand. Da die Antenne Hochfrequenzenergie in Strahlungsenergie umwandelt, können wir sie uns (als Belastung für die HF-Endstufe) auch durch einen ohmschen Widerstand ersetzt denken. Dabei wollen wir unter dem Strahlungswiderstand der Antenne einen Ersatzwiderstand

Bild 121. Vertikales Richtdiagramm einer Marconi-Antenne bei unterschiedlicher Bodenleitfähigkeit



im Antennenfußpunkt verstehen, der, vom Antennenstrom durchflossen, die Wirkleistung aufnimmt, die der Strahlungsleistung entspricht. Der Strahlungswiderstand R_S des $\lambda/2$ -Dipols beträgt $73,2\Omega$ (für einen unendlich dünnen Antennenstab), der der geerdeten Stabantenne ($\lambda/4$ -Dipol) $36,6\Omega$. Der wirkliche Strahlungswiderstand ist jedoch kleiner als der theoretische. Nun wissen wir auch, welche Bedeutung der Wert von 35Ω hat, an den wir die Senderendstufe anpassen müssen. Um Verluste klein zu halten, werden wir bestrebt sein, den Strahlungswiderstand von $R_S = 35\Omega$ auch möglichst zu erreichen. Das ist problematisch, da selbst die geerdete Stabantenne von 2,26 m Länge noch unhandlich ist. Die in der Fernsteuertechnik gebräuchlichen Senderantennen sind 1,00...1,80 m lang. Betrachten wir die Antenne als offenen Schwingkreis, so wird die Kapazität gewissermaßen durch ihre Oberfläche und die Induktivität durch ihre Länge gebildet. Verkürzen wir sie, so bedeutet das eine Verringerung der Antenneninduktivität. Die beste Strahlungsleistung läßt sich aber nur bei Resonanz erzielen. Die $\lambda/4$ -Stabantenne, deren Induktivität durch die Kürzung verringert wurde, muß daher durch eine *Zusatzinduktivität* wieder verlängert und damit in Resonanz gebracht werden. Der wirksamste Punkt für die Einschaltung einer solchen *Verlängerungsspule* (Zusatz-

Bild 123. Flächen des Sendergehäuses

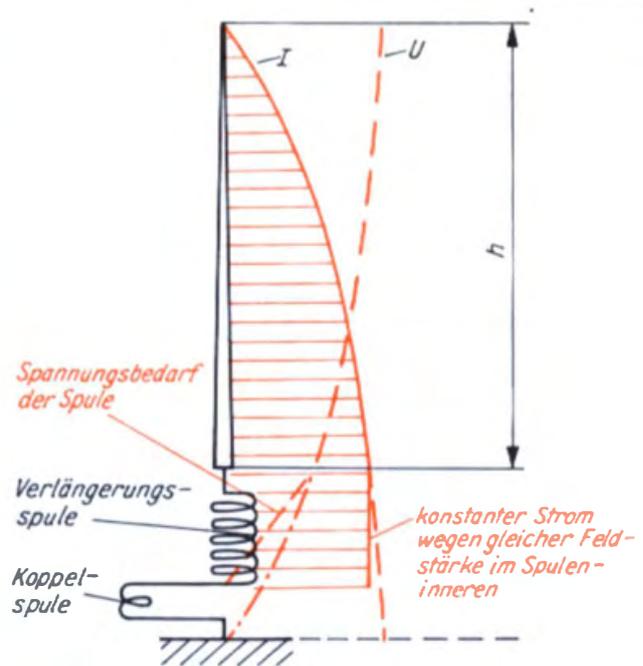
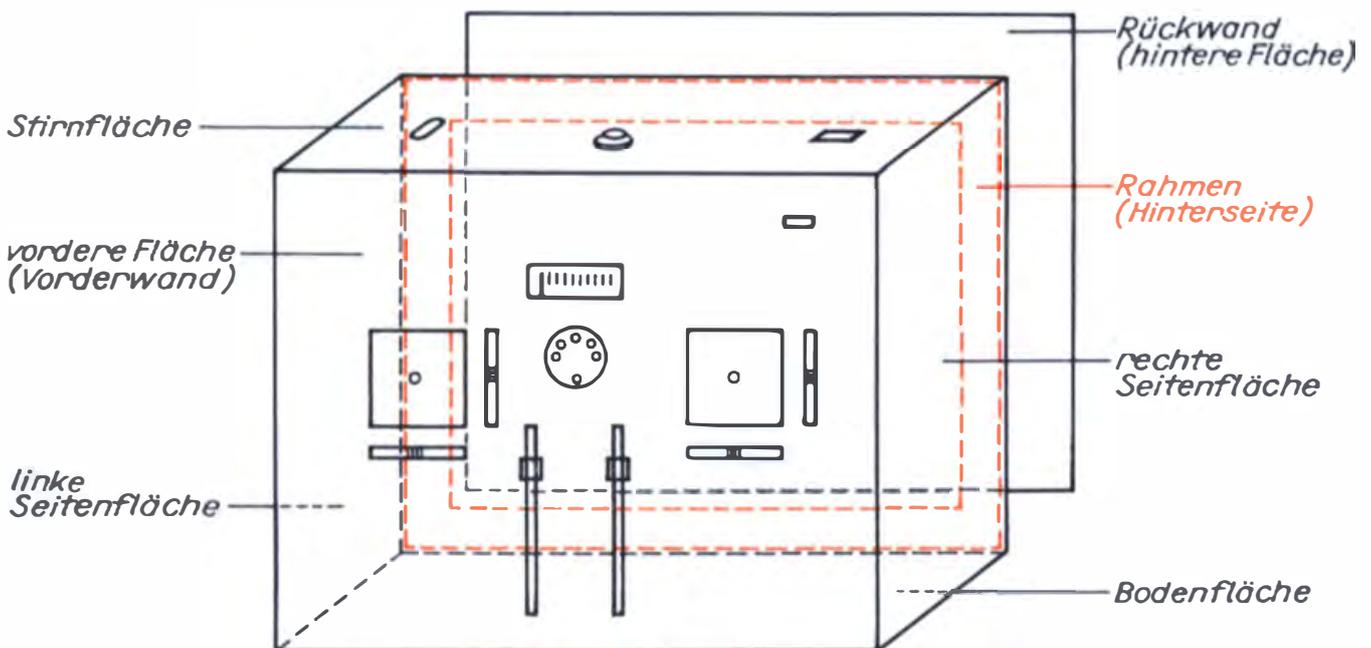


Bild 122. Stromverteilung in einer Antenne mit Verlängerungsspule im Antennenfußpunkt

induktivität) ist der **Antennenfußpunkt**, da hier der größte Antennenstrom fließt. Die Korrekturwirkung der Verlängerungsspule verdeutlicht uns recht gut Bild 122. Wir sehen, daß dadurch der ursprüngliche Antennenstrom wieder erreicht wird. Damit ist uns die Funktion der Spule L_4 im Bild 108 klar. Sie ist die Verlängerungsspule der Antenne und gehört nicht zum Collinsfilter. Wir wissen nun auch, daß diese Spule bei kurzen

Antennenstäben eine größere Induktivität (größere Windungszahl) haben muß als bei längeren Antennenstäben.

Als Antennenstab verwenden wir eine recht preiswerte Teleskopantenne von 1,10...1,50 m Länge, wie sie als Ersatzteil für Kofferradios in Rundfunkfachgeschäften erhältlich ist. Diese Antenne soll so weit wie möglich aus dem Sendergehäuse herausragen, gegenüber dem Gehäuse gut HF-isoliert und leicht, aber kontakt-sicher montierbar sein. Deshalb befestigen wir die Leiterplatte des Senders mit Abstandshülsen (22 mm lang) unter der Stirnseite des Gehäuses (Bild 123). Der Antennenstab wird vor dem Fernsteuerbetrieb direkt mit der Leiterplatte verschraubt. Die Masseverbindung mit dem Gehäuse stellt die mittlere Abstandshülse her.

Wir bauen die Sendermechanik

Der erste Arbeitsgang ist die Anfertigung des Sendergehäuses. Das *Sendergehäuse* stellen wir aus kupferkaschiertem Leiterplattenmaterial her. Dieses Material läßt sich mechanisch gut bearbeiten, ist fest und hat eine glatte Oberfläche, die wir gut lackieren oder mit Kunstleder beziehen können. Außerdem bietet die Kupferschicht als große Metalloberfläche das erwünschte Gegengewicht zur Senderantenne.

Das Sendergehäuse hat die Innenmaße 190 mm × 150 mm × 50 mm. Die in den Zeichnungen angegebenen Maße beziehen sich auf eine Materialdicke von 2 mm (Bild 124). Zunächst schneiden wir alle Flächen aus. Die Seitenflächen stoßen stumpf auf Stirn- und Bodenfläche, und diese vier Flächen sitzen stumpf auf Vorderfläche und Rückwand. Das müssen wir bei der Bemessung beachten. Die Rückwand besteht aus zwei Teilen, einem Rahmen von 20 mm Breite mit den gleichen Außenmaßen wie die Rückwand (Bild 123) und der eigentlichen Rückwand. Vorderfläche, Rahmen und Rückwand können wir an den Kanten mit 0,5 mm Maßzugabe zuschneiden. Die anderen vier Flächen müssen aber genau maßhaltig und winklig sein.

Nun können wir in der Stirnfläche (Bild 124a) und der Vorderfläche (Bild 124b) die für den Einbau der Armaturen (Steuermechaniken, Schalter, Milliampereometer, Buchsen) notwen-

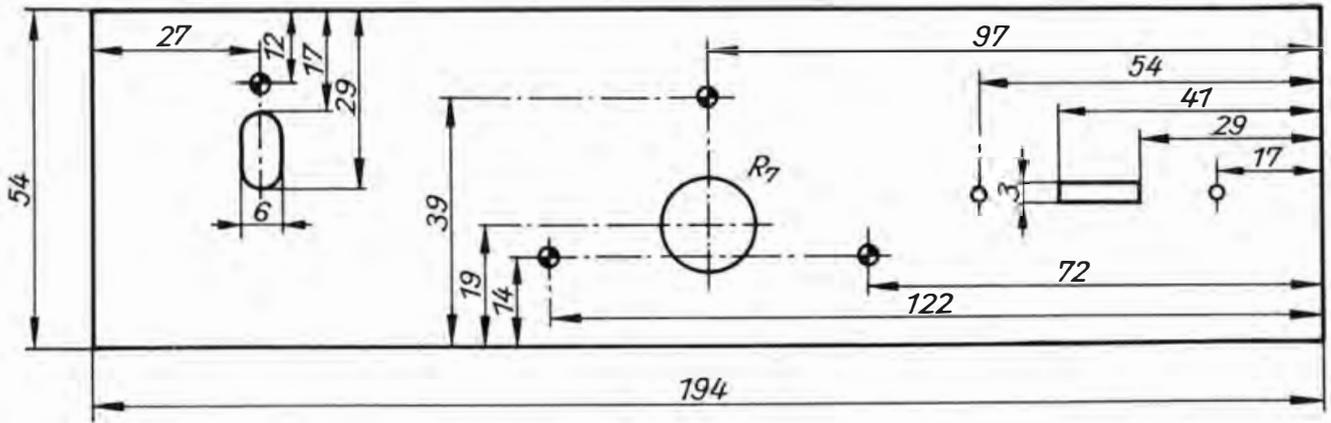
digen Durchbrüche anbringen. Die Abmessungen der Durchbrüche richten sich nach den Typen der Schalter, Schieberegler und des Milliampereometers. Sie können von den Angaben im Bild 124 abweichen.

Sind alle Flächen fertig bearbeitet, folgt der Zusammenbau. Dazu werden die Lötflächen an den Kanten gut gesäubert (wie eine Leiterplatte!) und mit Kolophonium eingestrichen.

Zuerst setzen wir Stirn- und Seitenflächen auf den Rahmen und heften jede Fläche mit zwei Lötunkten (100-W-LötKolben ohne Lötfett o. ä. Flußmittel benutzen) maßgerecht an den Rahmen an. Mit einem Winkel kontrollieren und korrigieren wir den Sitz. Nun kommt jeweils in die Winkel der Seiten-, Stirn- und Bodenfläche mit dem Rahmen je ein Lötunkt, der die genaue und gerichtete Lage fixiert. Mit dem Winkel und dem Millimetermaß kontrollieren wir noch einmal unser Werk. Stimmt alles, werden die Löt-nähte an den Kanten in einen Zug gezogen. Wir achten darauf, daß sich das Material nur so stark wie notwendig erwärmt, damit sich die Flächen nicht werfen. Zuerst löten wir die langen Nähte am Rahmen, dann an den schmalen Kanten. Danach legen wir das Werkstück paßgerecht auf die Vorderwand und heften sie ebenfalls mit Löt-punkten an. Durch eine Kontrolle überzeugen wir uns vom richtigen Sitz (winklig, richtige Lage!), ehe wir die letzten vier Löt-nähte in einen Zug durchziehen.

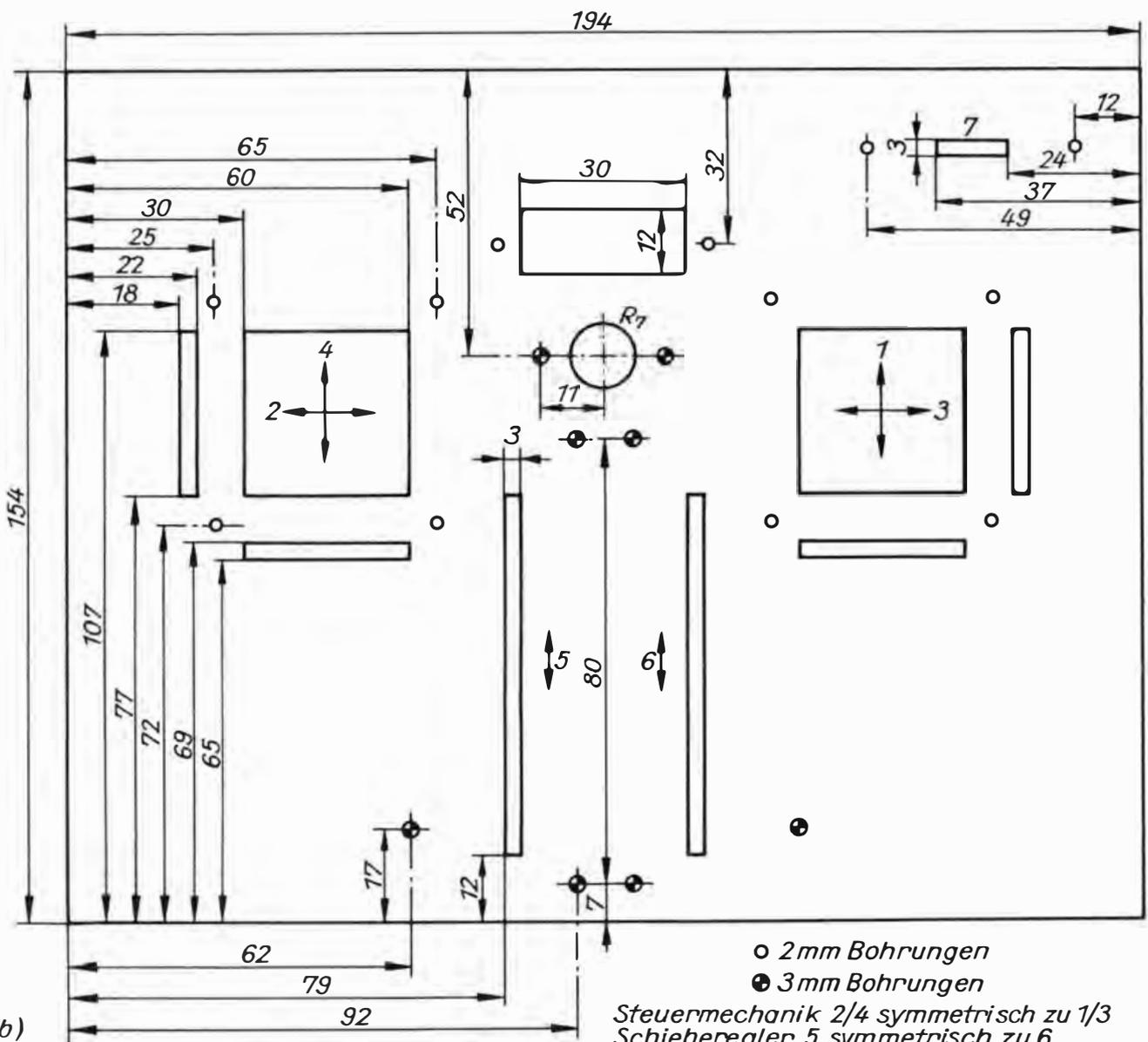
Mit einer scharfen Feile werden nun die Kanten sauber bearbeitet und leicht gerundet. Die Rückwand ist mit vier Senkschrauben am Rahmen befestigt. Dafür werden die entsprechenden Bohrungen (im Rahmen mit Innengewinde) angebracht. Sind wir mit unserem Werk zufrieden, lackieren wir die gesamte Außen- und Innenfläche. Gut eignet sich dazu der im Kfz-Handel erhältliche Reparaturlack in Spraydosen. Eine schöne griffige Oberfläche erhalten wir dagegen, wenn wir das Gehäuse mit Kunstleder überziehen. Dazu können wir das Material verwenden, mit dem der Buchbinder die Bücher einbindet. Es gibt dieses Leder in verschiedenen Farben, und es hat außerdem den Vorteil, daß es kleinere Bearbeitungsfehler verdeckt. Wir können es mit Kontaktkleber aufziehen.

Die *Antennenbefestigung* ist so konstruiert, daß sie mit der Leiterplatte des HF-Teiles direkt



○ 2 mm Bohrungen

a) ● 3 mm Bohrungen



○ 2 mm Bohrungen

● 3 mm Bohrungen

Steuermechanik 2/4 symmetrisch zu 1/3
Schieberegler 5 symmetrisch zu 6

Ausschnitte für Meßgerät u. Schalter je nach Exemplar

b)

Bild 124. Gestaltung des Sendergehäuses: a) Stirnfläche, b) Vorderfläche

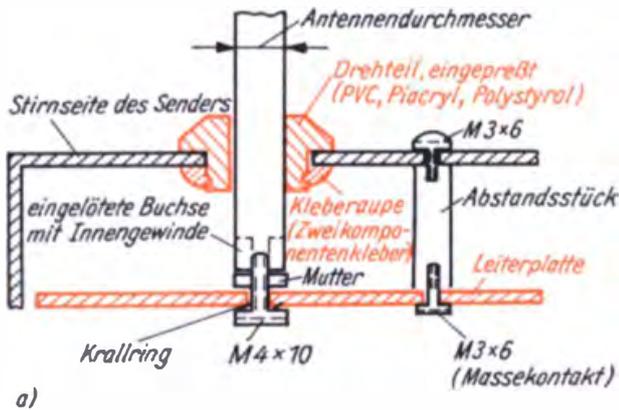


Bild 125. Antennenbefestigung

verschraubt wird (Bild 125). Dadurch erhalten wir kürzeste Leitungen für die Hochfrequenz (geringe Verluste) sowie eine mechanisch feste und zuverlässige, aber auch leicht lösbare Befestigung des Antennenstabes. Zu diesem Zweck wird die Leiterplatte mit vier Abstandshülsen (18 mm lang) unter der Stirnfläche befestigt. Die Masseverbindung vom HF-Teil zum Sendergehäuse stellt dabei die Abstandshülse neben dem Antennenstab her. Die anderen drei Abstandshülsen sind gegen Masse auf der Leiterplatte isoliert. Die Biegekräfte des 1,50 m langen Antennenstabes werden durch ein Drehteil aus Isolierstoff auf das Sendergehäuse übertragen. Das Drehteil kleben wir ein, nachdem die Oberfläche fertig bearbeitet wurde.

Nun können wir auch zum ersten Mal den HF-Teil einbauen und das Einsetzen der Antenne und des Quarzes ausprobieren. Für einen sicheren Fernsteuerbetrieb ist die einwandfreie Passung der Antenne und ihr sicherer Sitz in der Befestigungsschraube wichtig. Mechanische Wackelstellen führen meist zu ernsthaften Störungen der Anlage.

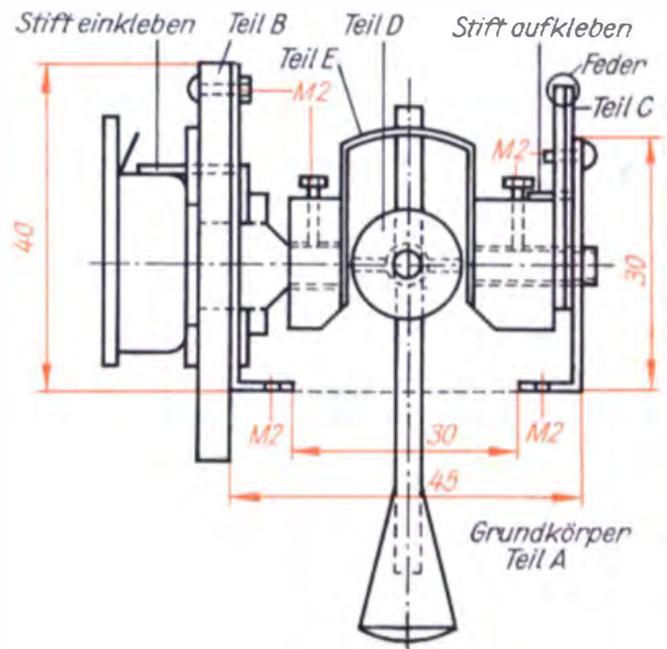
Die Steuermechanik erfordert präzise Arbeit

Nach den bereits erläuterten mechanischen Arbeiten beim Aufbau des Senders folgt eine weitere, die Herstellung der *Steuermechanik*. Mit ihr sind zwei Potentiometer gleichzeitig, aber unabhängig voneinander, zu betätigen – nur so können wir vier Funktionen mit zwei Händen bedienen. Um eine exakte Steuerung der Modelle zu gewährleisten, soll die Steuermechanik

- mechanisch präzise und spielfrei arbeiten,
- den Sender nach oben abdecken, damit kein Staub, Sand oder Regen eindringen kann und
- mit vertretbarem Aufwand nachbaufähig sein.

Diese Forderungen erfüllt die Konstruktion nach Bild 126. Die konstruktiven Einzelheiten entnehmen wir den Bildern 127 und 128. Die gesamte Steuermechanik wird auf einem Grundkörper (Teil A) aus 1 mm Stahl- oder Alu-Blech montiert. Diesen Grundkörper stellen wir aus einem Stück her; die Seitenflächen werden um 90° abgekantet. Erst danach reißen wir die Bohrungen und Durchbrüche an. Die Neutralstellung des Steuerknüppels bewirken jeweils zwei über eine Feder betätigte Hebel (Teil C). Sie sitzen nebeneinander auf der Welle von Teil D oder E gegenüber dem Potentiometer. Ihre Schenkel liegen einmal an der Schraube (M2) in der Seitenfläche des Grundkörpers (A) und zum anderen an dem auf Teil D oder E aufgeklebten Stift (Ø2 mm). Ein Hebel liegt immer an der Schraube fest, der andere wird vom Stift mitgenommen. Der Federdruck führt den Steuerknüppel wieder in die Neutralstellung zurück. Durch geeignete Federn kann man die Steuercharakteristik (Hebeldruck) entsprechend verändern. Die genaue Passung von Hebel, Stift und Schraube bestimmt die Präzision der Neutralstellung. Spiel oder toter Gang sind hierbei

Bild 126. Querschnitt durch die Steuermechanik



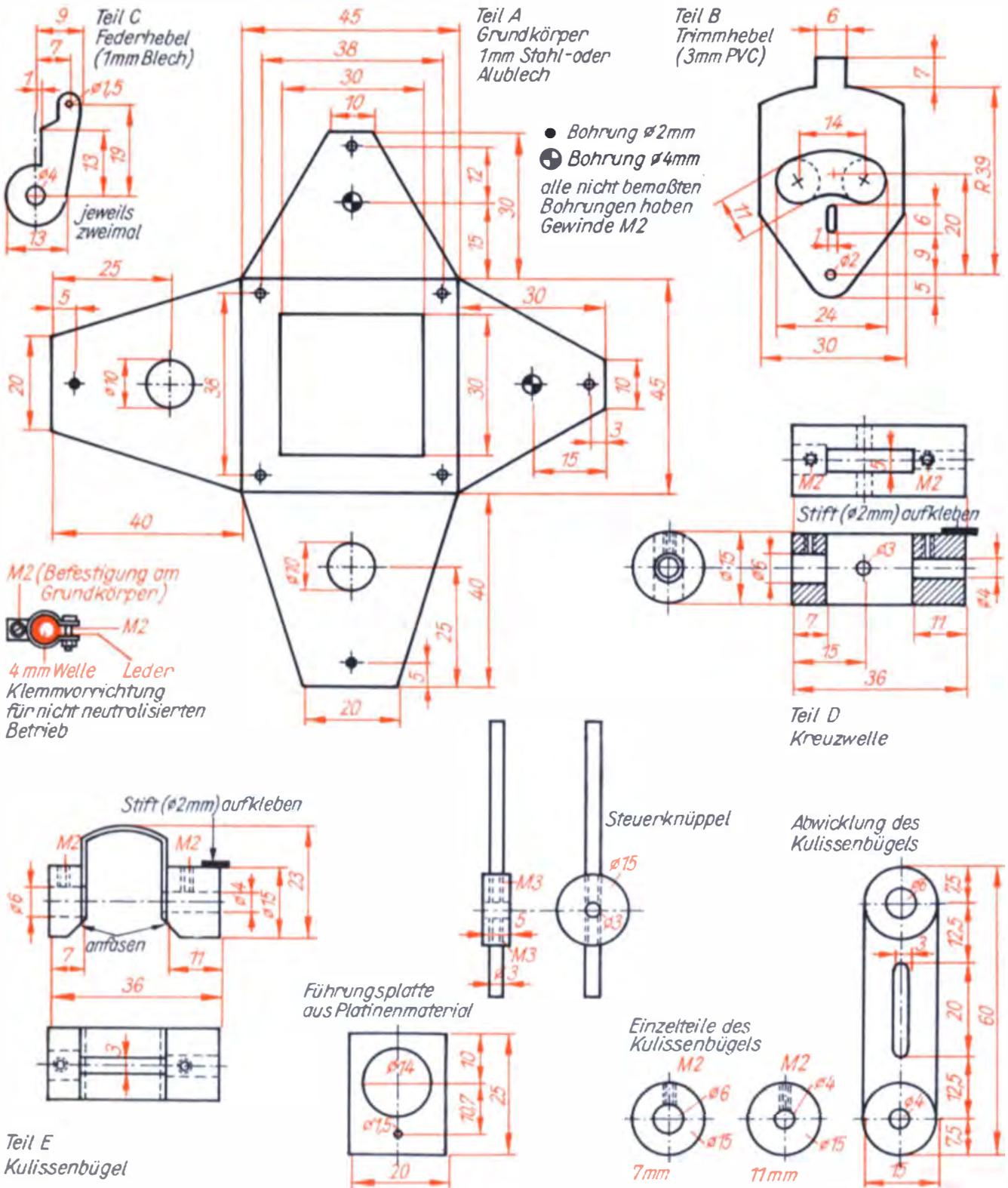
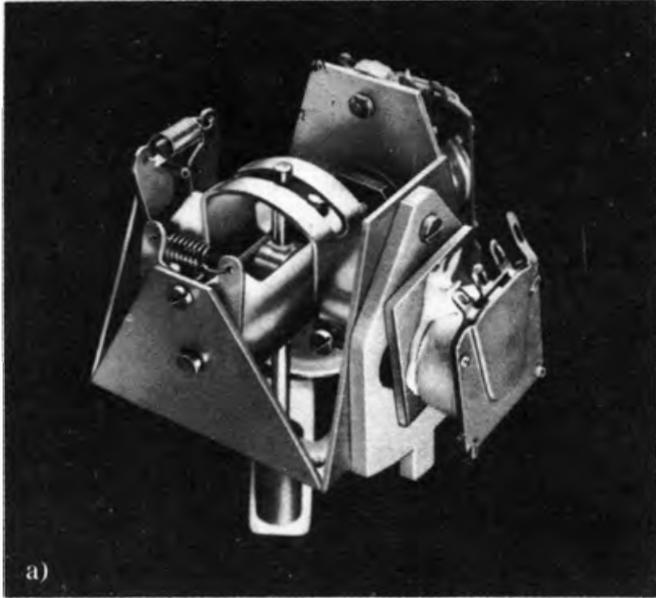


Bild 127. Einzelteile der Steuermechanik

unerwünscht. Wollen wir einen Kanal nicht neutralisiert betätigen (z. B. die Segelwinde), wird einfach die Feder auf einer Seite ausgehängt. Damit sich der Steuerknüppel nicht zu leicht

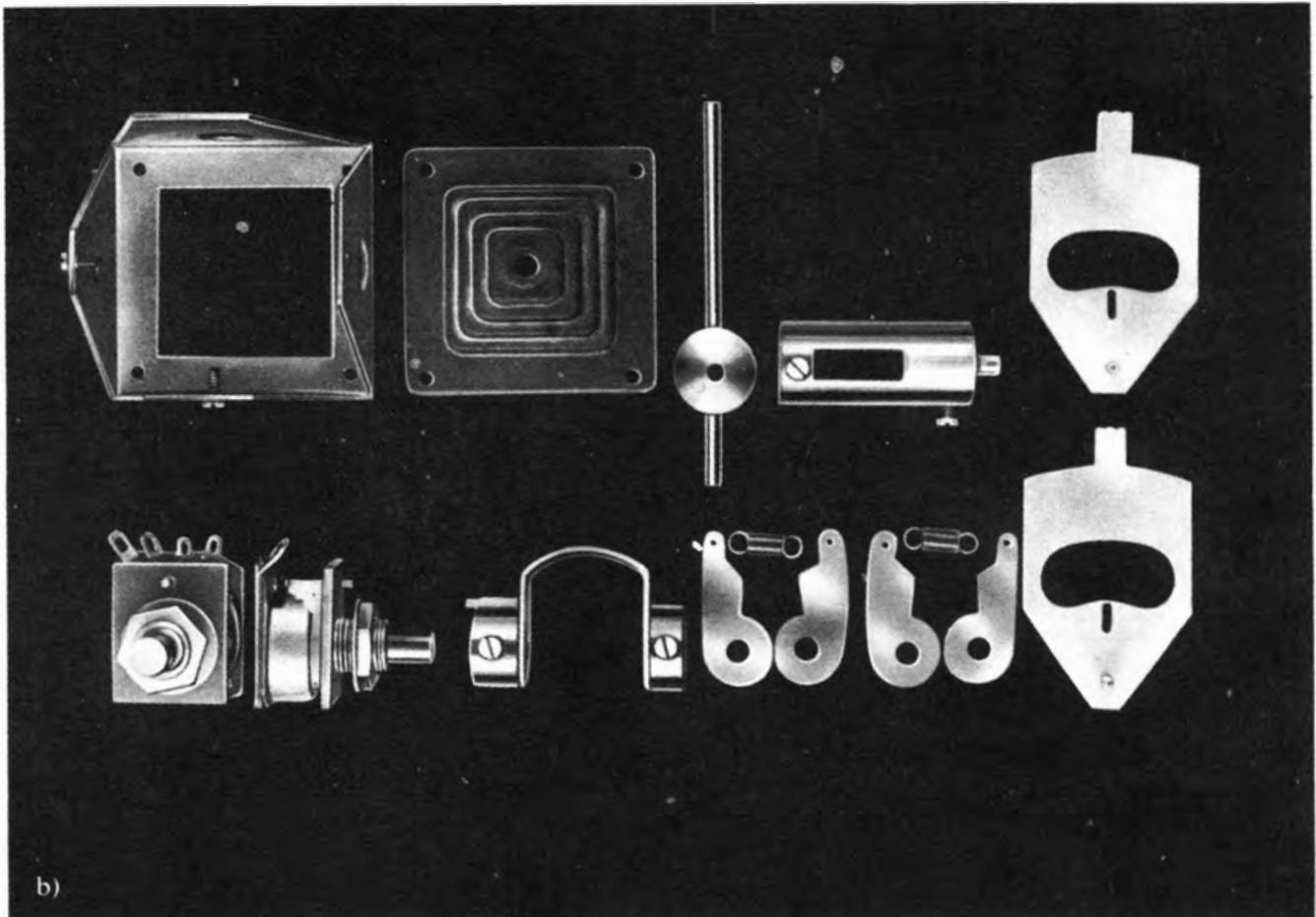
verstellt, führen wir dann die Welle etwas länger aus, so daß sie etwa 6 mm aus dem Grundkörper herausragt. Dazu bauen wir eine einfache Klemmvorrichtung in Form einer einstellbaren Außenbackenbremse (Bild 127). Wie stark wir diese Hemmung einstellen, ermitteln wir mit dem

fertigen Sender. Die Kreuzwelle (Teil D) und den Kulissenbügel (Teil E) stellen wir aus Messing her, es sind aber auch andere Werkstoffe (St, Al) geeignet. Die Einzelteile werden mit Zweikomponentenkleber zusammengeklebt. Einige Überlegungen erfordert der Trimmhebel (Teil B).



Mit der *Trimmung* stellen wir den neutralen Fahr- oder Flugzustand des Modells ein. Dies kann natürlich an ihm selbst durch geeignete Maßnahmen erfolgen. Wenn sich aber während des Modellbetriebes herausstellt, daß die Trimmung eines Ruders verändert werden muß, so kann man sie schwer am Modell einstellen. Also sieht man schon beim Entwurf der Fernsteueranlage eine von der Kanalbetätigung unabhängige Steuertrimmung vor. Bei der Proportionalbetätigung über ein Potentiometer bietet es sich an, den Kanal durch Verdrehen der Potentiometerwelle und die Trimmung durch Verdrehen des Potentiometergehäuses zu betätigen. Dabei müssen wir beachten, daß es auf die Relativbewegung von Potentiometerwelle und -gehäuse ankommt. Das sei an einem Beispiel erklärt. Fährt unser Modell eine leichte Linkskurve und soll auf Geradeauskurs getrimmt werden, so wäre dazu eine Knüppelbewegung am Sender nach rechts erforderlich. Diese Trimmung wird mit Hilfe der

Bild 128. Steuermechanik: a) fertig montiert, b) demontiert



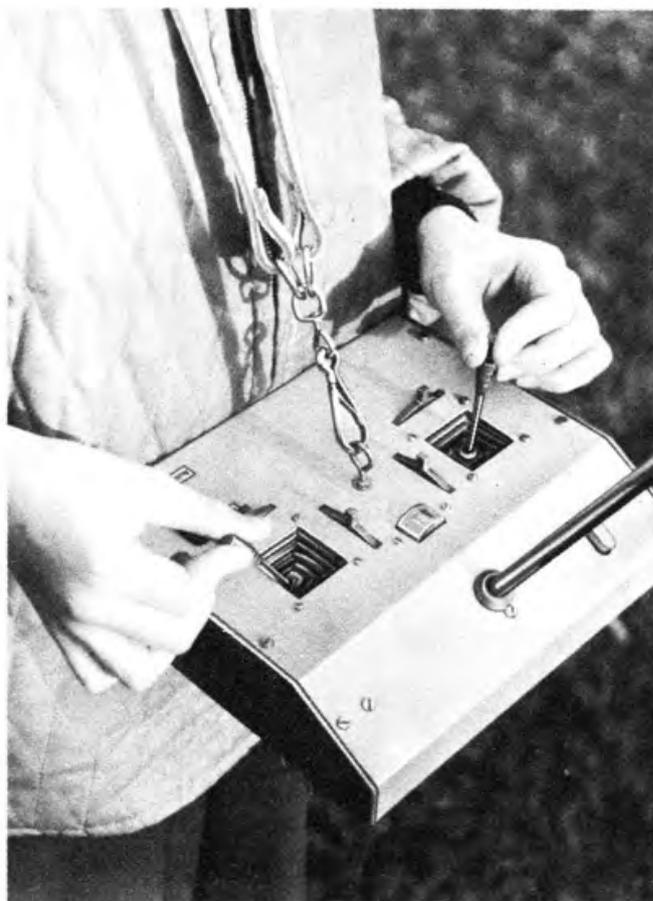
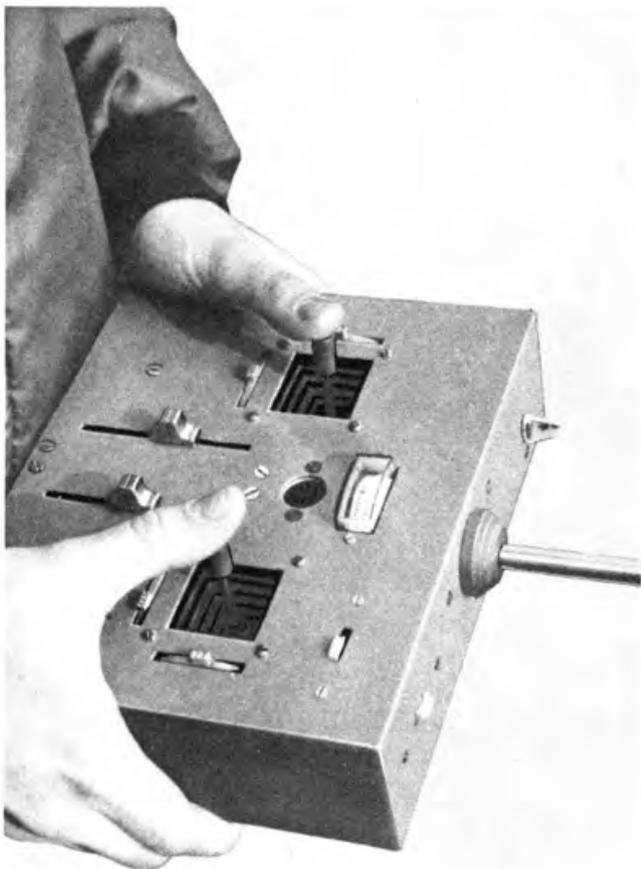


Bild 129. Ansicht des fertigen Senders: a) mit kurzen Steuerknüppeln (Handsender), b) mit langen Steuerknüppeln (Bauchsender)

Trimmvorrichtung vorgenommen. Wollen wir aber mit dem Potentiometergehäuse die gleiche Wirkung erzielen, muß es um den gleichen Winkel wie die Welle gedreht werden, aber in **entgegengesetzter** Richtung. Dieses Verhalten beruht auf der Relativbewegung von Welle und Gehäuse, die gegenläufig ist. Wie können wir also mit einer einfachen Vorrichtung eine angenehme Rechtsdrehung des Trimmhebels in eine Linksdrehung des Potentiometergehäuses umformen?

Bei der angegebenen Möglichkeit funktioniert das folgendermaßen: Der Trimmhebel (Teil B) wird mit einer M2-Schraube am Grundkörper befestigt. Er kann etwa um den Winkel von $\pm 20^\circ$ geschwenkt werden. In dem nierenförmigen Durchbruch bewegt sich der Gewindeansatz des Potentiometergehäuses. Da dieser durch eine Bohrung (10 mm) im Grundkörper drehbar »festgehalten« wird, kann der Trimmhebel zwischen

Potentiometergehäuse und Grundkörper hin und her geschwenkt werden. Auf das Potentiometergehäuse kleben wir einen Stift von 1,5 mm \varnothing (Stück eines Nagels), der in das Langloch des Trimmhebels eingreift. Zur besseren Führung des Zapfens und des Potentiometergehäuses wird an das Gehäuse ein Stück Leiterplattenmaterial angeklebt, in dem die erforderlichen Bohrungen angebracht werden (s. Bild 128). Durch probeweises Zusammenstecken der Einzelteile stellen wir fest, ob alles einwandfrei zusammenpaßt und der Knüppel spielfrei arbeitet. Dabei können wir beobachten, daß sich beim Schwenken des Trimmhebels das Potentiometergehäuse gegenläufig bewegt. Die quadratische Öffnung des Grundkörpers decken wir mit einer Gummimanschette ab, damit das Senderinnere nach außen abgeschlossen ist. Eine solche Manschette können wir aus einem Stück Fahrradschlauch ausschneiden oder aus Teilen pyramidenförmig zusammenkleben. Die Knüppelkonstruktion wird auf der Senderinnenseite mit M2-Schrauben befestigt. Auf die Knüppel stecken wir noch je einen Griff. Wer den Sender als Handsender

betreiben will, wird kurze Knüppelgriffe verwenden, die mit beiden Daumen betätigt werden (Bild 129a). Hängen wir den Sender um (Bauchsender), so erleichtern längere Griffe das Betätigen und ermöglichen ein feinfühliges Steuern (Bild 129b).

Wir steuern proportional

Das Prinzip der proportionalen Steuerung

Nach den umfangreichen und manchmal viel Geduld und Genauigkeit erfordernden mechanischen Arbeiten am Sender folgen nun wieder einige Experimente zur Fernsteuerelektronik. Vorher sind aber einige Überlegungen notwendig. Wenn wir die uns bisher zur Verfügung stehenden Steuermöglichkeiten näher betrachten, so bemerken wir, daß wir mit dem Kanalimpulsgeber, aufgebaut als Servoprüfer, zwar jede Impulsdauer zwischen 1,0 ms und 2,2 ms einstellen können, der Schaltverstärker aber immer nur bei zwei definierten Impulslängen schaltet. Die Schaltepunkte können wir festlegen, aber im Betrieb nicht verändern. Das bedeutet, wir können nur mit den Kommandos »EIN« oder »AUS« steuern. Selbst bei der Fahrmotorsteuerung sind diese beiden Steuerungsmöglichkeiten unzureichend. Ähnlich wäre es beim Betrieb der Lenkung eines Automodells. Das Modell würde entweder geradeaus oder mit festgelegtem Kurvenradius fahren. Ein vorbildgetreues Fahren ist damit nur schlecht möglich.

Das Bestreben ging also dahin, mit der Fernsteuerung auch Werte zwischen Null oder Neutral und Maximum, z. B. des Ruderwinkels, einstellen zu können. Wenn wir am Sender ein Rad oder einen Hebel um einen bestimmten Winkelbetrag drehen oder schwenken, soll sich das Ruder um einen gleichen oder aber proportionalen Winkelbetrag bewegen und in der laut Kommando gegebenen Stellung verharren. Der Ruderwinkel soll sich demzufolge *proportional* zum Stellwinkel des Steuerorgans am Sender ändern. Eine Fernsteueranlage, die diese Steuerungsmöglichkeiten besitzt, wird als *Proportio-*

nalanlage bezeichnet. Zur Modellfernsteuerung werden heute ausschließlich Proportionalanlagen verwendet. Bei Spielzeugfernsteuerungen findet man manchmal billige Anlagen, die aus Preisgründen nur Schaltfunktionen ausführen können. Damit wir auch tatsächlich proportional steuern, nämlich mit zwei Händen bzw. Daumen gleichzeitig vier Fernsteuerungsfunktionen bedienen können, haben wir uns die komplizierten Steuermechaniken gebaut. Eine Steuermechanik ermöglicht die simultane und proportionale Steuerung von zwei Funktionen. Mit zwei Steuermechaniken können wir bereits ein Modell exakt räumlich (dreidimensional) und zusätzlich auch seine Geschwindigkeit steuern. Damit wäre z. B. ein vorbildgetreuer Kunstflug ohne weiteres möglich.

Da wir die Möglichkeiten der modernen Elektronik ausnutzen, bauen wir die Fernsteueranlage für sieben Kanäle aus. Davon sind sechs *Proportionalkanäle* und einer ein *Schaltkanal*. Um die Kanäle zuzuordnen, werden sie fortlaufend numeriert. Da sie aber simultan betätigt werden können, hat das für die Funktion keine Bedeutung. So kann man z. B. Kanal 1 und 7 zur Fernsteuerung des Modells benutzen und die Kanäle 3...6 freilassen oder damit andere Funktionen oder sogar ein anderes Modell steuern. Theoretisch könnten wir noch mehr Steuerfunktionen in unserer Anlage einbauen, nur praktisch hat das kaum einen Wert, von Spezialanwendungen abgesehen. Wir werden später in der Praxis des Modellbetriebs sehen, daß bereits zum sicheren Beherrschen von zwei Funktionen, z. B. am Segelflugmodell, recht viel Übung gehört. Beim Steuern von vier Funktionen haben wir dann im wahrsten Sinne des Wortes alle Hände voll zu tun.

Die Bezeichnung *Steuerknüppel* wurde übrigens von der Segelfliegerei übernommen. Wer schon einmal in das Cockpit eines Segelflugzeuges gesehen oder gar schon drin gesessen hat, weiß, daß man mit dem Steuerknüppel, der dort wirklich ein Knüppel ist – bei unserem Sender sollte man wohl besser von einem Knüppelchen sprechen – ebenfalls zwei Steuerungsfunktionen (Höhenruder und Querruder) betätigt.

Nun aber zurück zur Elektronik. Als nächstes überlegen wir uns, wie wir aus dem längenveränderlichen Kanalimpuls eine proportionale

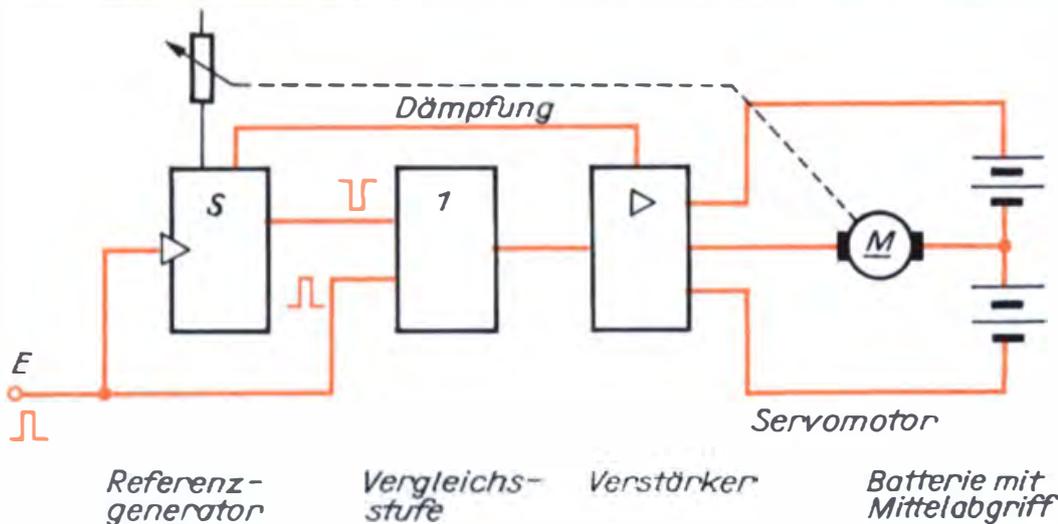


Bild 130. Blockschaltbild der Servoelektronik

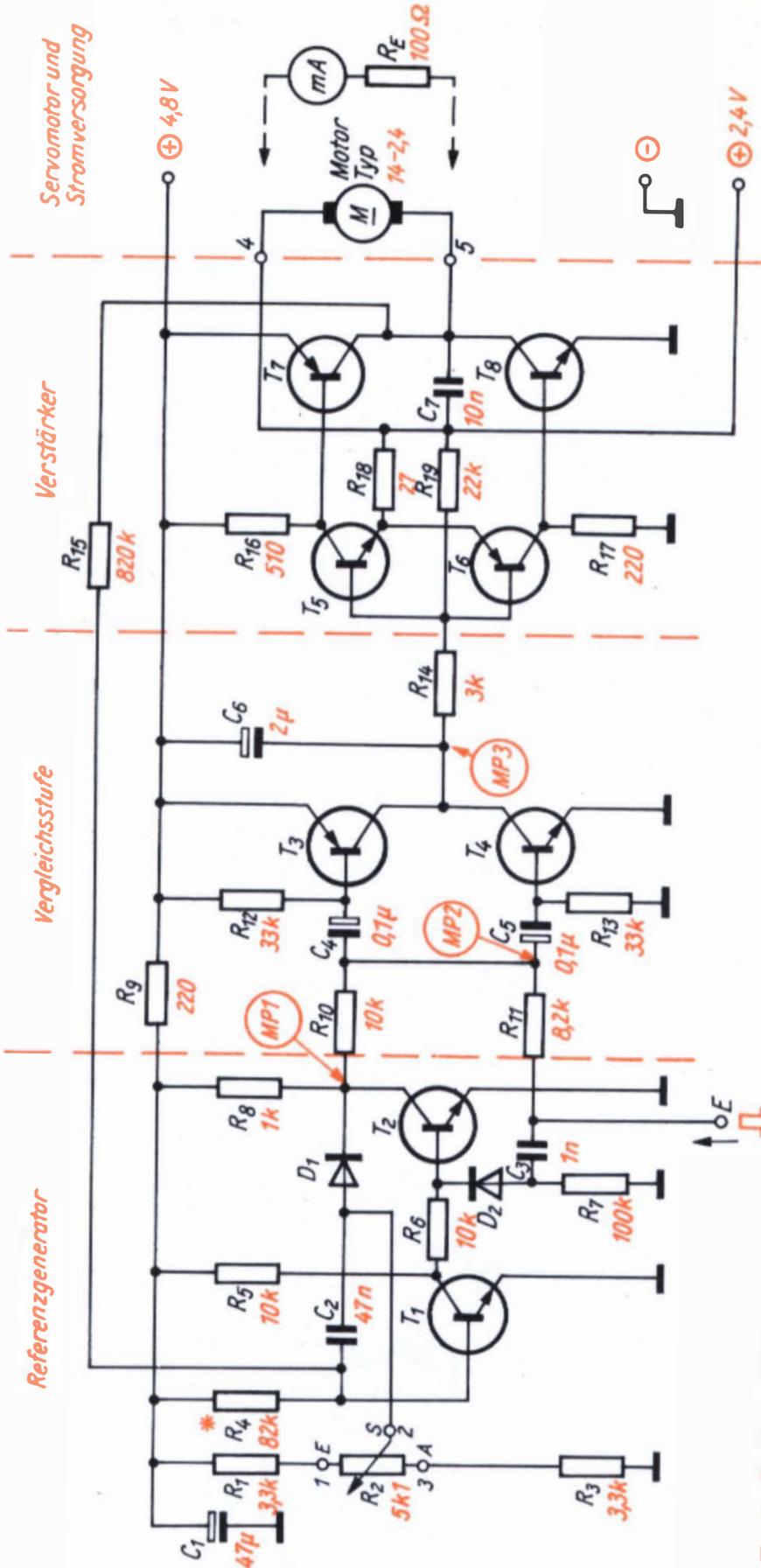
Stellgröße (Winkel bzw. Weg und Kraft) gewinnen können. Die Aufschalteinrichtung, die das Kanalsignal in eine entsprechende Stellgröße umwandelt, wird in der älteren Literatur als *Rudermaschine*, in der neueren kurz als *Servo* bezeichnet. Servo ist ein Begriff aus der Steuerungstechnik und bedeutet soviel wie Hilfsmaschine, z. B. Servomotor = Hilfsmotor. Die *Servoelektronik* besteht aus den Baugruppen Referenzgenerator, Vergleichsstufe, Verstärker und Servomotor (Bild 130). Zwischen Servomotor und Potentiometer ist noch ein Getriebe eingefügt, das aber die elektronische Funktion nicht beeinflusst. Im Prinzip haben wir die elektronischen Funktionsgruppen bereits beim Schaltverstärker kennengelernt. Wollen wir uns nun zunächst anhand des Blockschaltbildes überlegen, was wegen der veränderten Aufgabenstellung anders sein muß:

Der *Referenzgenerator* wird wiederum vom Kanalimpuls getriggert und erzeugt den Referenzimpuls, der mit dem Kanalimpuls in der *Vergleichsstufe* verglichen wird. Der Restimpuls steuert den *Verstärker* an. An diesen aber ist der *Servomotor* angeschlossen, der je nach Kommando einmal rechts herum und das andere mal wieder links herum laufen soll. Läuft der Servomotor z. B. rechts herum, stellt er das Potentiometer im Referenzgenerator über das Getriebe so, daß der Referenzimpuls dem Kanalimpuls nachgeführt wird. Sind beide Impulse gleich lang, verschwindet der Restimpuls, und der Servomotor bleibt in dieser Stellung stehen. Die

gesamte Servoelektronik führt als *Nachlaufverstärker* einen Regelvorgang aus. Damit die Regelvorgänge schnell, aber ohne Schwingungen ablaufen, ist eine elektronisch wirkende *Dämpfung* eingebaut.

Der Kanalimpuls wird in der Servoelektronik proportional ausgewertet

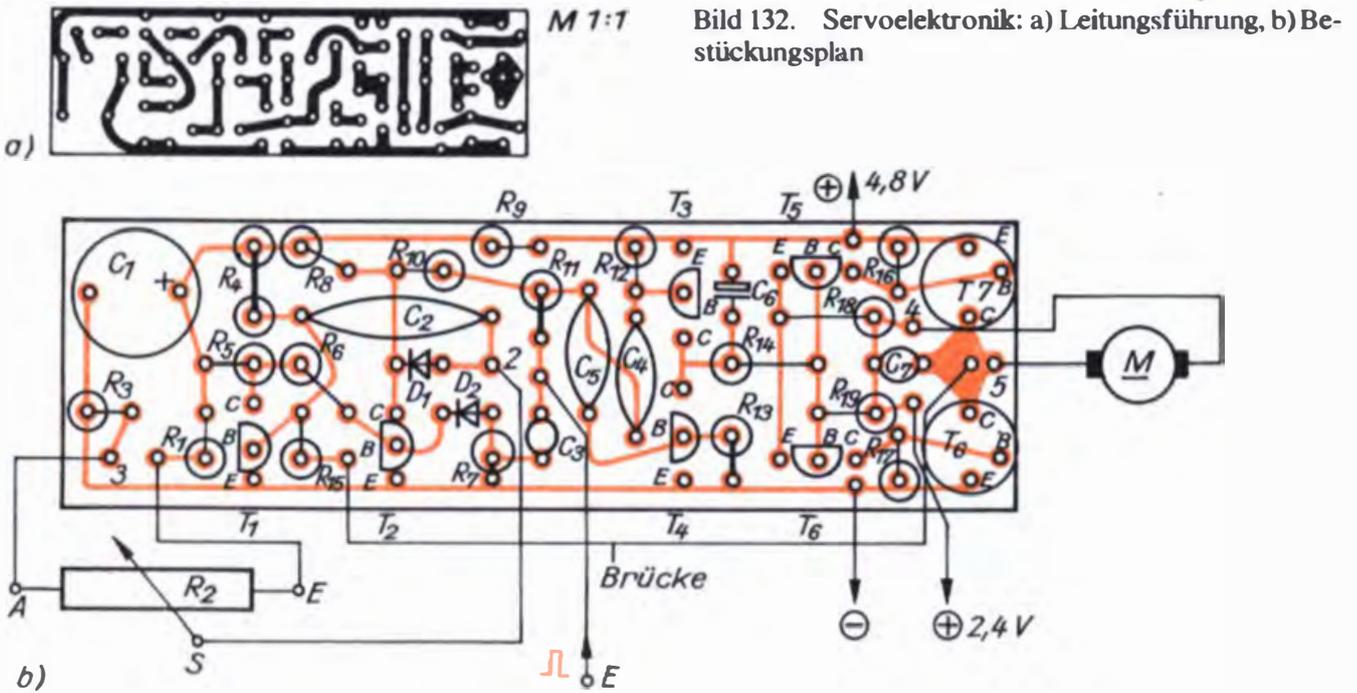
Auf dem Schaltbild der Servoelektronik (Bild 131) erkennen wir bereits bekannte Schaltdetails. Der Referenzgenerator und die Vergleichsstufe sind genauso aufgebaut wie im Schaltverstärker. Die Impulsdehnung am Ausgang der Vergleichsstufe übernimmt C_6 . Der angeschlossene Verstärker besteht aus zwei Zweigen mit T_5/T_7 und T_6/T_8 , die beide zueinander komplementär bestückt sind. Dadurch erreichen wir, daß bei positivem gedehntem Restimpuls an MP3 (s. auch Bilder 81 und 82) nur T_5/T_7 leitend werden und der Motor in eine Richtung dreht sowie bei negativem Impuls an MP3 nur T_5/T_7 leitend werden und der Motor in der anderen Richtung dreht. Zu diesem Zweck wird der Motor an die Mittelanzapfung 2,4 V der Empfängerbatterie angeschlossen. Ist kein Restimpuls an MP2 ($t_{kan} = t_{Ref}$) vorhanden, liegt die Basis von T_3 über R_{12} auf Plus und die Basis von T_4 über R_{13} auf Minus, beide Transistoren sind gesperrt. Am MP3 liegt damit die halbe Betriebsspannung, somit sind T_5 und T_6 leitend sowie T_7 und T_8 gesperrt. Durch den Motor fließt demzufolge kein Strom, er steht. T_7/T_8 und die beiden Batteriezweige bilden eine Brückenschaltung, in



* (R₄) einmessen
 (82...120 kΩ)
 Bei R₂ = 1kI werden
 R₁/R₃ ca. 560Ω

T₁, T₂, T₄, T₅ = TUN
 T₃, T₆ = TUP
 T₇ (Ge-pnp) = GC-511, AC 188 o. ä.
 T₈ (Ge-npn) = GC-521, AC 187 o. ä.

Bild 131. Schaltbild der Servoelektronik

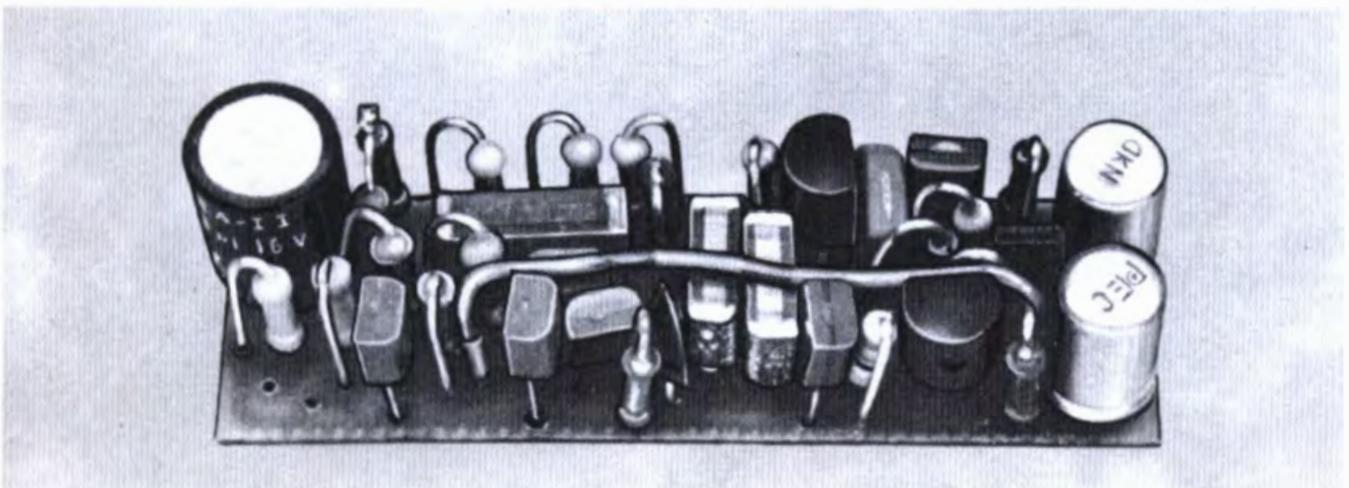


deren Diagonale der Servomotor liegt. Verändert sich am Eingang E die Impulsdauer, so läuft der folgende Regelvorgang ab: Das Steuersignal triggert den monostabilen Multivibrator. Beide Signale werden am MP2 verglichen, übrig bleibt ein entsprechender Impuls. Ist dieser positiv, so steuert er T_4 durch. Damit wird T_5 in den gesperrten und T_6 in den leitenden Zustand geschaltet. Die Folge davon ist, daß T_7 leitet und T_8 sperrt, es kann also ein Strom über T_7 , den Servomotor und einen Batteriezweig fließen. Der Motor läuft an und verstellt das Potentiometer R_2 , bis die Impulsdauer des Referenzgenera-

tors gleich der Dauer des Kanalimpulses ist. Dann heben sich am Punkt MP2 beide Impulse auf; die Brücke befindet sich wieder im abgeglichenen Zustand. Der Motor bleibt stehen. In diesem Fall (Impuls positiv) war der Kanalimpuls länger als der Referenzimpuls. Ist der Kanalimpuls kürzer als der Referenzimpuls, so läuft der gleiche Vorgang im anderen Brückenweig ab.

Es kann vorkommen, daß der Motor zuviel Schwung hat und über seine Sollstellung hinausläuft. Dann würde das Potentiometer R_2 zu weit verstellt und die Länge des Referenzimpulses zu stark geändert. Demzufolge würde der Regelvorgang nun in umgekehrter Richtung ablaufen und das Ruderservo also ständig um seine

Bild 133. Musteraufbau der Servoelektronik



Nullage pendeln. Diese Erscheinung hätte die schnelle Erschöpfung der Batterie und den raschen Verschleiß des Getriebes zur Folge. Als Gegenmaßnahme wird eine *elektronische Dämpfung* vorgesehen. Man erreicht durch Rückführung eines Teils der Brückenspannung über R_{15} auf den Referenzgenerator, daß der Motor langsam in seine Ruhelage hineinläuft, gewissermaßen gebremst (gedämpft) wird. Die Dämpfung wirkt nur beiderseitig des An- und Auslaufbereichs des Servomotors und hat auf die Stellgeschwindigkeit und den Ruderausschlag keinen Einfluß. Die Bilder 132 und 133 zeigen den Aufbau der Servoelektronik.

Wir bauen die Servomechanik

Beim mechanischen Aufbau des Proportional-servos haben wir einige technische Probleme. Da der Motor des Servos bereits bei 2,4 V sicher anlaufen und die volle Stellkraft erreichen soll, ist er das entscheidende Bauteil. Wir verwenden den Typ, der auch in das im Handel erhältliche Servo eingebaut ist. Er genügt den Anforderungen und gewährleistet ein sicheres Arbeiten. Beim Entwurf der Servomechanik nehmen wir uns eine bewährte Konstruktion als Vorbild. Das Servogetriebe soll von Motor zu Potentiometer etwa eine Untersetzung von 300 : 1 bis 400 : 1 haben. Auf die Funktion hat die Übersetzung keinen Einfluß, aber auf die Stellkraft und Stellzeit. Je größer wir die Untersetzung wählen, um so größer wird die Stellkraft, dann aber auch die Stellzeit. Damit besteht die Möglichkeit, das Servo den Einsatzbedingungen in gewissen Grenzen anzupassen. Die Einzelheiten des mechanischen Aufbaus sind Bild 134 zu entnehmen. Das Servo ist mit der Untersetzung 1 : 1000 für größere Stellkraft ausgelegt. Unter Umständen kann eine Getriebestufe (Welle 3) entfallen. Welle 4 und 5 sind dann entsprechend neu zu positionieren. Wir achten besonders darauf, daß das Getriebe möglichst leichtgängig, aber spielfrei arbeitet. Die Zahnräder kaufen wir in Bastelgeschäften (Ersatzteile für Modelleisenbahnen). Macht uns der Aufbau zuviel Mühe, so können

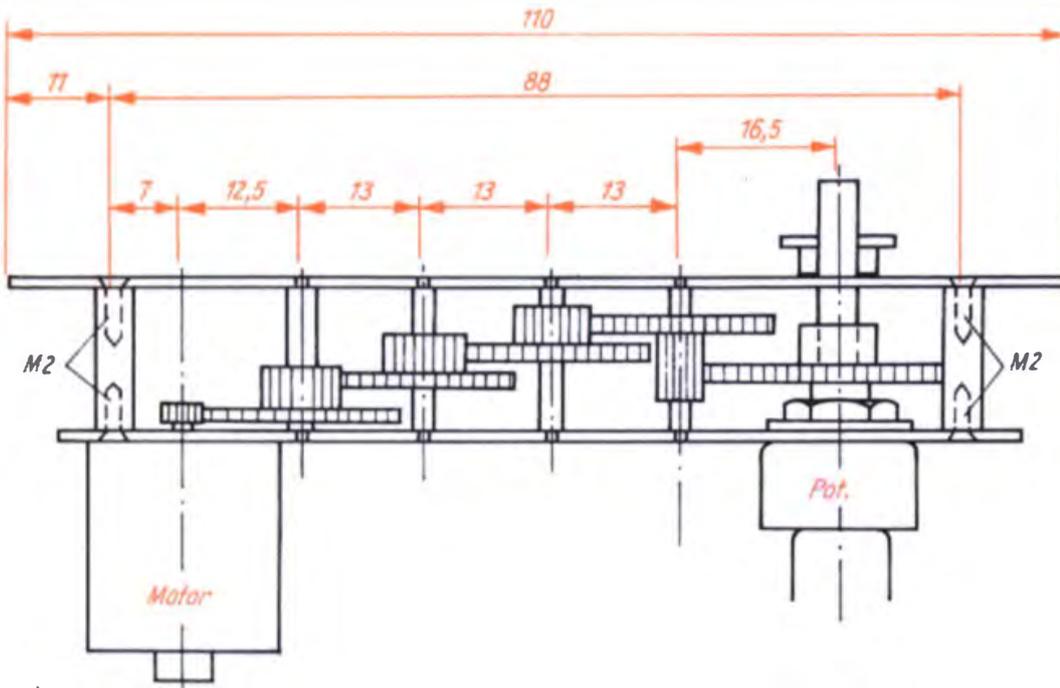
wir das Servo auch als komplettes Bauteil im Fachhandel erwerben (Bild 135).

Das Servo wird abgeglichen

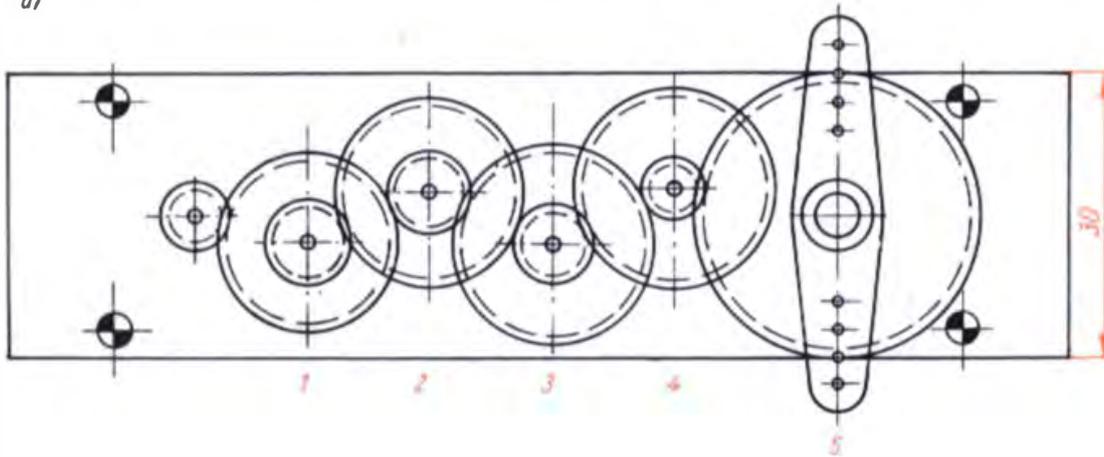
Wir kontrollieren zuerst bei angeschlossenem Servomotor und Kanalimpuls am Eingang die Stromaufnahme. Dabei müssen etwa folgende Werte gemessen werden: $I_{\min} \approx 1,5 \text{ mA}$ bei stehendem, $I_{\max} \approx 150 \text{ mA}$ bei laufendem Motor. Sollten wir einen Oszillographen zur Verfügung haben, kontrollieren wir auch die Impulse an den Meßpunkten. Läuft der Servomotor bei einwandfreier Funktion des Verstärkers immer bis Vollausschlag, so muß entweder die Polung des Motors oder der Anschluß des Potentiometers (Anschlüsse E/A) vertauscht werden. Funktioniert das Servo, können wir die Stellrichtung auf Wunsch umkehren, wenn wir die Anschlüsse vom Motor und Potentiometer gleichzeitig vertauschen. Bei diesen Arbeiten verwenden wir den Servoprüfer.

Einstellung der Servoneutralage

Zu Beginn dieses Arbeitsgangs drehen wir das Potentiometergehäuse von R_2 so, daß sich der Schleifer etwa in Mittelstellung befindet. Um das leichter kontrollieren zu können, bringen wir eine Markierung auf der Potentiometerwelle an. Durch die Dimensionierung der Servoelektronik (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 und C_2) werden die Impulszeiten eingestellt. Das abgegliche Servo dient uns bei weiteren Abgleicharbeiten als Eichservo. Mit ihm stellen wir später jeden Kanal im Sender auf Mittellage und Impulsbreitenvariation ein, so daß wir den vollen Winkelausschlag am Servo erhalten. Bauen wir weitere Servos auf, so müssen sie die gleichen Steuerzeiten wie das Eichservo besitzen, damit sie untereinander austauschbar sind. Nach ihm müssen also alle anderen Servos genau abgeglichen werden. Für den Grobgleich stellen wir wieder den Schleifer R_2 auf Mitte. Ändert sich die Schleiferstellung bei anliegendem Kanalimpuls wesentlich, so ersetzen wir R_4 durch ein 100 k Ω -Potentiometer und verändern seinen Wert so lange, bis das Servo genau auf Mitte steht. Dann messen wir das Potentiometer aus und ersetzen es durch den nächstliegenden Widerstandswert (in der Regel 82 k Ω). Einen Feinabgleich der Mittelstellung



a)



Wellen 1,2,3,4 um 3 mm zur Mitte versetzt

Motorritzel: 11 Zähne

Welle 1: 68 Z / 14 Z

Welle 2: 44 Z / 14 Z

Welle 3: 14 Z / 14 Z

Welle 4: 14 Z / 10 Z

Potentiometerwelle (5): 55 Z

⊕ Bohrung
3 mm ϕ

b)

erreichen wir durch Drehen des Potentiometergehäuses von R_2 . Wollen wir die Größe des Ruderwinkels des Servos elektronisch beeinflussen, so ändern wir die Werte von R_1 und R_3 .

Einstellung der Dämpfung

Pendelt das Ruderservo um die Neutrallage, oder läuft es zu langsam in diese hinein (das entspricht zu schwacher bzw. zu starker Dämpfung), stellt man durch Verändern von R_{15} eine optimale Dämpfung ein. Dazu ersetzen wir R_{15} zunächst

durch eine Reihenschaltung eines Potentiometers $1\text{ M}\Omega$ mit einem Festwiderstand $470\text{ k}\Omega$. Nach dem Abgleich wird die Reihenschaltung ausgemessen und durch einen Festwiderstand ersetzt. Die Dämpfung stellen wir so ein, daß das Servo schnell in die Sollstellung hineinläuft und nicht überpendelt.

Nun legen wir wieder eine Bauphase ein. Beim Abgleich reparierter oder neu aufgebauter Servos ist es recht umständlich, immer den Empfänger aus dem Modell auszubauen und die gesamte Fernsteueranlage in Betrieb zu nehmen.

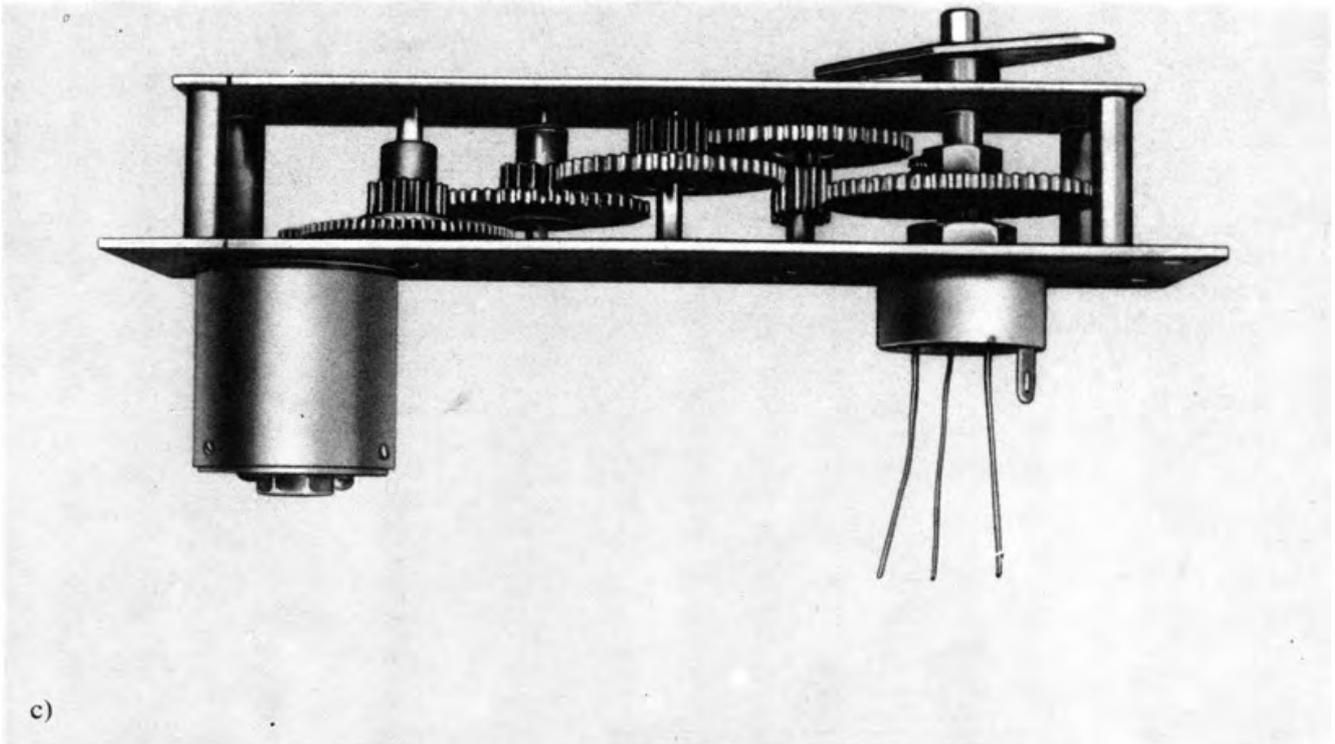
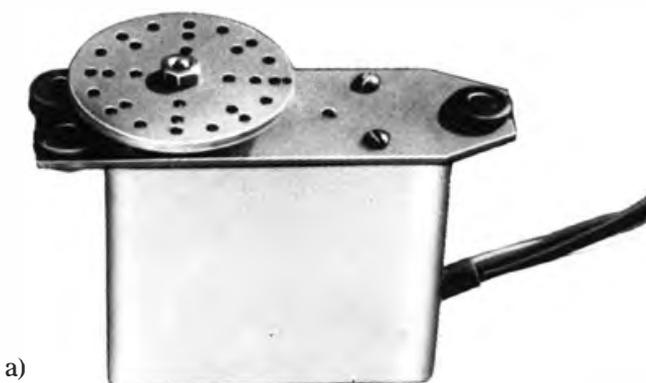


Bild 134. Servomechanik: a) Seitenansicht, b) Draufsicht, c) Musteraufbau

Bild 135. Servomatic 15 Prop: a) Außenansicht, b) geöffnet



Der Servoabgleich wird ganz wesentlich vereinfacht, wenn wir ihn getrennt von der Fernsteueranlage mit dem *Servoprüfer* vornehmen.

Im nächsten Arbeitsgang fertigen wir die Leiterplatte für den *Servoverstärker* an und übertragen wieder die Bauelemente von der Experi-

mentierplatine. Nach der optischen Kontrolle aller Bauelemente und Lötstellen (keine Brücken oder kalte Lötstellen!) erfolgt die Funktionsprobe. Ein Nachgleichen ist in der Regel nicht erforderlich. Anders ist es bei den Servoelektroniken, die wir nicht vorher auf der Experi-

mentierplatine erproben und abgleichen. Beim Abgleich auf der Experimentierplatine können wir auch den Stellwinkel des Servos den Bedingungen im Modell anpassen. Vergrößern wir R_1 und R_3 , wird der Stellwinkel kleiner und umgekehrt. In der Regel soll der Stellwinkel $\pm 45^\circ$ betragen, in Sonderfällen können auch $\pm 90^\circ$ erforderlich sein.

Das Servo ist eine Aufschalteinrichtung zur Erzeugung kleiner proportionaler Stellwege, wie sie z. B. bei der Ruderverstellung auftreten. Nun fehlt uns noch eine Aufschalteinrichtung, mit der wir größere Leistungen oder Kräfte für längere Stellwege (Segelbetätigung) steuern können.

Mit dem Schaltverstärker können wir auch proportional steuern

Für den genannten Zweck können wir den bereits aufgebauten Schaltverstärker (Bilder 87 bis 89) benutzen. In seiner ersten Anwendung diente er zum Schalten der Fahrmotoren in Automodellen. Nun soll er die Segelwinde für unsere Segeljacht elektronisch steuern. Nach den gleichen Überlegungen wie beim Servo wird aus der Schaltfunktion eine Proportionalfunktion, wenn das Potentiometer R_2 über ein Getriebe vom Motor verstellt wird. Dann läuft im Zusammenwirken von Servoelektronik, Schaltverstärker und Motor ein ähnlicher Regelvorgang wie beim Servo ab. Durch das Relais können wesentlich höhere Leistungen geschaltet werden. Das werden wir bei der Segelwinde ausnutzen. Ändern wir durch Stellen des Kanalpotentiometers die Kanalimpulsdauer, so schaltet ein Relais. Der Windenmotor läuft, bis mit R_2 der Referenzimpuls auf die gleiche Dauer wie der Kanalimpuls gebracht wurde und die erzielten Stellwege wieder der Stellung des Steuerknüppels proportional sind. Ein leistungsfähiger Motor und entsprechende Auslegung des Getriebes können die doch erheblichen Kräfte zur Segelverstellung aufbringen. Die Proportionalsteuerung hat dazu noch den Vorzug, daß der Anstellwinkel des Segels immer proportional zur Knüppelstellung im Sender ist. Da mit dem Schaltverstärker größere Ströme geschaltet werden sollen, müssen wir kräftige Relais vorsehen. Im Schiffmodell haben wir ohnehin nicht solche Platzsorgen wie

im Flugmodell. Auch diese Schaltung erproben wir vor dem Aufbau auf der Experimentierplatine. Der Abgleich beschränkt sich lediglich auf die Einstellung von R_2 . Sollten wir mit dem Schaltverstärker eine Segelwinde steuern wollen, so nehmen wir den Abgleich zusammen mit der Segelwinde vor. Bei Betrieb der Segelwinde wird das Potentiometer vom Motor aus über das Getriebe verstellt und nicht mit auf die Leiterplatte montiert.

Den Motor der Segelwinde und das Potentiometer R_2 schließen wir über eine fünfpolige Steckverbindung an den Schaltverstärker an, wenn wir diesen noch für andere Zwecke verwenden wollen. Soll er allerdings für immer mit der Segelwinde kombiniert bleiben, ist es sinnvoll, die Grundplatte der Segelwinde so groß zu wählen, daß das Gehäuse des Schaltverstärkers (Bild 89) fest darauf montiert werden kann. Die Segelwinde wird nach dem Schaltschema von Bild 80 angeschlossen.

Der nächste Entwicklungsschritt ist die vollintegrierte Servoelektronik

Im Laufe der technischen Entwicklung hat sich die Fernsteuerungselektronik zu einem eigenständigen Zweig der Amateurelektronik herausgebildet, wie wir es ähnlich bei der Funktechnik, der Tontechnik oder der Technik der elektronischen Musikinstrumente verfolgen können. Die ursprünglich röhrenbestückten Sender und Empfänger der Amateure wurden bis heute zu volltransistorisierten Fernsteueranlagen mit hohen Qualitätsstandards entwickelt, die zum großen Teil von spezialisierten Elektronikbetrieben hergestellt werden. Die Nutzung der von Amateuren entwickelten Konzeptionen und gesammelten Erfahrungen durch die Industrie hatte zur Folge, daß bei verbesserter Qualität größere Stückzahlen hergestellt werden können. Damit wird die Modellfernsteuerung auch den Interessenten zugänglich, die sich nicht mit dem Selbstbau elektronischer Geräte befassen wollen.

Höhere Stückzahlen bei elektronischen Geräten sind aber die Voraussetzung für die Entwicklung spezieller Bauelemente. Diese Entwicklung können wir bei den Modellfernsteuergeräten ebenfalls verfolgen. Einerseits werden bei Indu-

striergeräten moderne Bauelemente, z. B. Standardtypen der integrierten Schaltkreise, eingesetzt, andererseits wurden aber auch für Fernsteuergeräte spezielle *integrierte Schaltkreise* entwickelt. Für beide Varianten werden wir Beispiele kennenlernen und selbst erproben. Zunächst ein Beispiel für eine Industrieentwicklung, die dann wiederum vom Amateur genutzt werden kann.

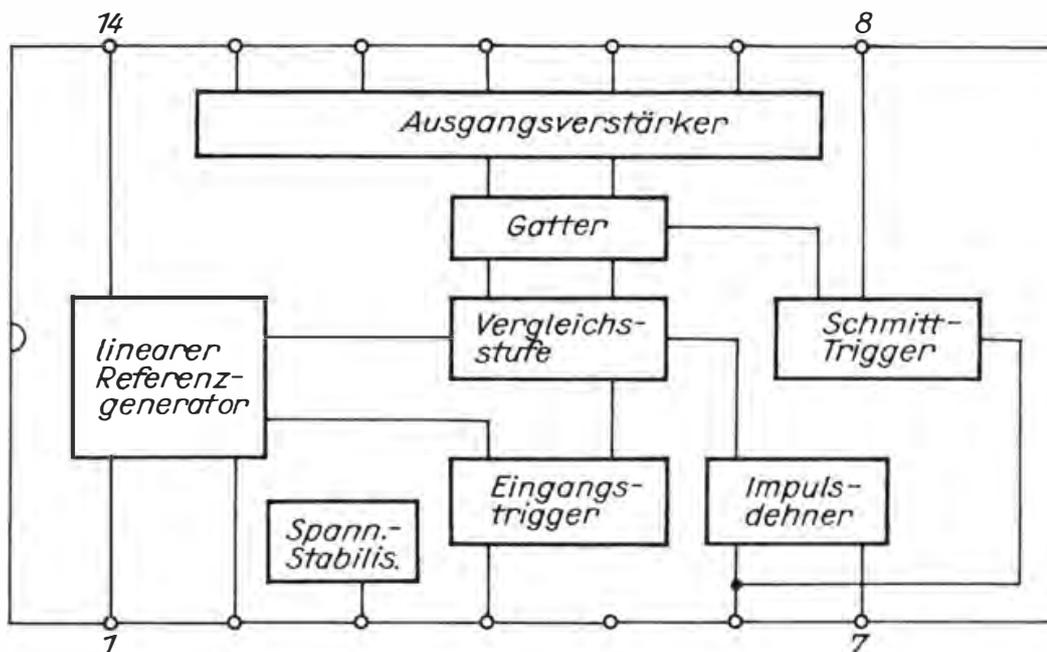
Die Form der Impulsauswertung in der Aufschalteinrichtung (z. B. der Servoelektronik) ist eine Systemlösung, die wir so bei allen digitalen Fernsteueranlagen finden. Für eine solche Lösung bietet es sich wegen der großen Stückzahlen an, alle aktiven Bauelemente in einem integrierten Schaltkreis zusammenzufassen. Im folgenden wird »integrierter Schaltkreis« mit »IS« abgekürzt. Im Schrifttum finden wir auch die Kurzbezeichnung »IC« (von *integrated circuit*, engl. = integrierter Kreis). Dieser IS muß so entworfen sein, daß er durch externe Beschaltung den Anlagenparametern (Impulsdauer, Pausenzeit, Impulsdauervariation, Impulspolarität) angepaßt werden kann. Als Beispiel betrachten wir den IS »NE544« der Firma Siginetics/Valvo. Dieser IS hat hervorragende elektronische Parameter und wird von den meisten Fernsteueranlagenherstellern in Servos und anderen Aufschalteinrichtungen zur Ka-

nalimpulsauswertung eingesetzt. Im sozialistischen Wirtschaftsbereich hat die DDR die Entwicklung einer Digitalfernsteueranlage und auch eines Servo-IS übernommen.

Aus dem Blockschaltbild des IS (Bild 136) erkennen wir die Funktionsgruppen des von uns aufgebauten Servoverstärkers oder Schaltverstärkers. Die prinzipielle Funktion von Referenzgenerator, Vergleichsstufe, Impulsdehner und Ausgangsverstärker ist uns damit bekannt. Allerdings kann man in einem IS zur Realisierung dieser Funktionen wesentlich mehr aktive und passive Bauelemente einsetzen als bei der Transistorschaltung. Um eine höhere Genauigkeit beim Stellen zu erreichen, wurden mehrere Verbesserungen eingebaut. So arbeitet der Referenzgenerator in Abhängigkeit vom Drehwinkel exakt linear. Die interne Spannungsstabilisierung macht den IS unabhängig gegenüber Temperatur- und Spannungsschwankungen. Der Ausgangsverstärker liefert keine Gleichspannung mehr, sondern eine pulsförmige Gleichspannung, so daß der Servomotor selbst bei kleinen Stellwegen mit der vollen Kraft stellt.

Betrachten wir, wie der Servo-IS den Impulszeiten angepaßt wird (Bild 137). Die Anlage arbeitet mit positivem Kanalimpuls ($1,7 \pm 0,55$) ms bei einer Wiederholzeit von 25 ms. Durch externe Beschaltung werden eingestellt: die Mittellage, der Stellweg, die Dämpfung, der Totbereich, die Impulsdehnung und der kleinste Ausgangsimpuls.

Bild 136. Innenschaltung des IS NE 544



IS 1 = NE 544

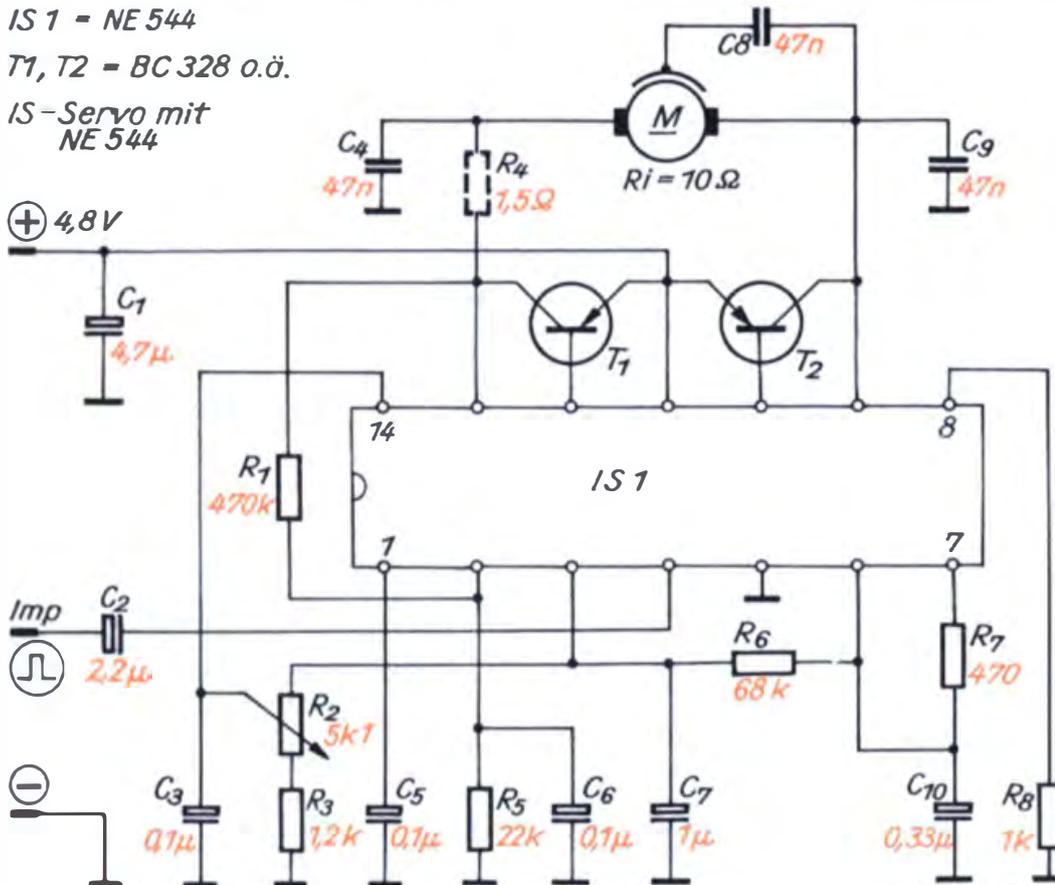
T₁, T₂ = BC 328 o.ä.IS-Servo mit
NE 544

Bild 137. IS-Servoelektronik mit NE 544 (C-Servo der Anlage »Microprop«)

Die Mittellage wird mit C_4 an Pin 1 (Pin, engl. = Stift; Bezeichnung für die fortlaufend nummerierten Anschlüsse der IS) grob eingestellt. Für den Feinabgleich dreht man das Gehäuse bzw. die Widerstandsbahn des Potentiometers R_2 . Den Stellweg beeinflusst der Wert von R_5 . Wird R_5 kleiner, vergrößert sich der Stellweg und umgekehrt. Man könnte den Stellweg auch durch die Reihenschaltung von zwei gleichen Widerständen vor und hinter dem Potentiometer R_2 ähnlich der Lösung bei der Transistorservoelektronik beeinflussen. Für die Dämpfung ist R_1 zwischen Pin 13 und Pin 2 verantwortlich. In anderen Schaltungsvarianten mit dem IS »NE 544« ist der Dämpfungswiderstand zwischen Pin 9 und Pin 1 geschaltet.

Der Totbereich, der ebenso wie die Dämpfung zum Vermeiden von Regelschwingungen erforderlich ist, wird mit R_6 zwischen Pin 6 und Pin 7 eingestellt. Der *Totbereich* ist die Zeit, um die sich die Impulsdauer ändern kann, ohne daß die

Servoelektronik anspricht. Solche kleinen Impulsdaueränderungen ergeben sich auf dem Übertragungsweg. Um mit dem Servo eine hohe Stell- und Wiederkehrgenauigkeit zu erreichen, muß der Totbereich so klein wie möglich sein. Bei modernen Fernsteueranlagen wird eine Stellgenauigkeit von $< 1\%$ erreicht. Das bedeutet z. B. bei einem Stellweg von 15 mm eine Abweichung und damit einen Totbereich von $< 0,15$ mm. Diese Abweichung in der Größenordnung von $1/10 \dots 2/10$ mm ist damit bereits geringer als das Spiel im Getriebe mancher Servos oder im Rudergestänge. Totbereich und Dämpfung müssen genau auf die Stellgeschwindigkeit und Servokonstruktion (Motor, Getriebe) abgestimmt sein.

Die Impulsdehnung stellt man mit der RC-Kombination R_6/C_{10} an Pin 6 ein, den kleinsten Ausgangsimpuls, der den Motor antreibt, mit R_8 an Pin 8. Der Ausgangsverstärker ist als echte Brückenschaltung ausgeführt, in deren Diagonale der Servomotor liegt. Die Brücke wird von zwei npn-Transistoren im IS und den beiden extern zugeschalteten npn-Transistoren T_1 und

T_2 gebildet. Damit entfällt die Batterie-Mittelanzapfung +2,4 V. Außerdem können höherohmige Motoren ($R_i = 10\Omega$) eingesetzt werden, die geringere Verluste und ein besseres Anlaufverhalten als niederohmige Typen aufweisen. Will man ältere Servos für $2 \times 2,4$ V, in die Motoren mit $R_i \leq 8\Omega$ eingebaut sind, ebenfalls mit einem solchen IS nachrüsten, muß man den Widerstand $R_4 = 1,5 \dots 3,3\Omega$ in Reihe zum Motor schalten. Die externe Zuschaltung der pnp-Transistoren wurde gewählt, da sich pnp-Strukturen auf den IS-Chips technologisch nur schwierig herstellen lassen. Außerdem wird bei dieser Schaltungsvariante der IS thermisch weniger belastet, und das kommt einem exakten stabilen Arbeiten bei Spannungsschwankungen und höheren Umgebungstemperaturen entgegen.

Wir steuern mehrere Kanäle proportional

Wie der Koder funktioniert

Die nächste Aufgabe, die wir lösen wollen, ist die Steuerung des Modells über mehrere Proportionalkanäle. Für den Anfang genügen uns zum Verständnis der damit verbundenen technischen Probleme zwei Steuerkanäle. Mit diesen beiden Kanälen bzw. Proportionalfunktionen können wir alle im 3. Kapitel des Buches vorgestellten Modelle vorbildgetreu steuern. Erst wenn wir den Betrieb dieser Modelle beherrschen und andere Modelle mit noch mehr Funktionen ferngesteuert werden sollen, ist es ratsam, Sender und Empfänger voll auf die sieben vorgesehenen Kanäle auszubauen.

Die Grundlagen zur Lösung der Aufgabe haben wir uns bereits erarbeitet. Wie im Bild 75 dargestellt, müssen wir also dem 1. Kanalimpuls die weiteren folgen lassen. Das Blockschaltbild (Bild 138) verdeutlicht die prinzipielle Lösung.

Der Taktgenerator liefert wieder die Zeitbasis von ≈ 25 ms für die Impulswiederholung und triggert die erste Kanalkippstufe. Der von dieser

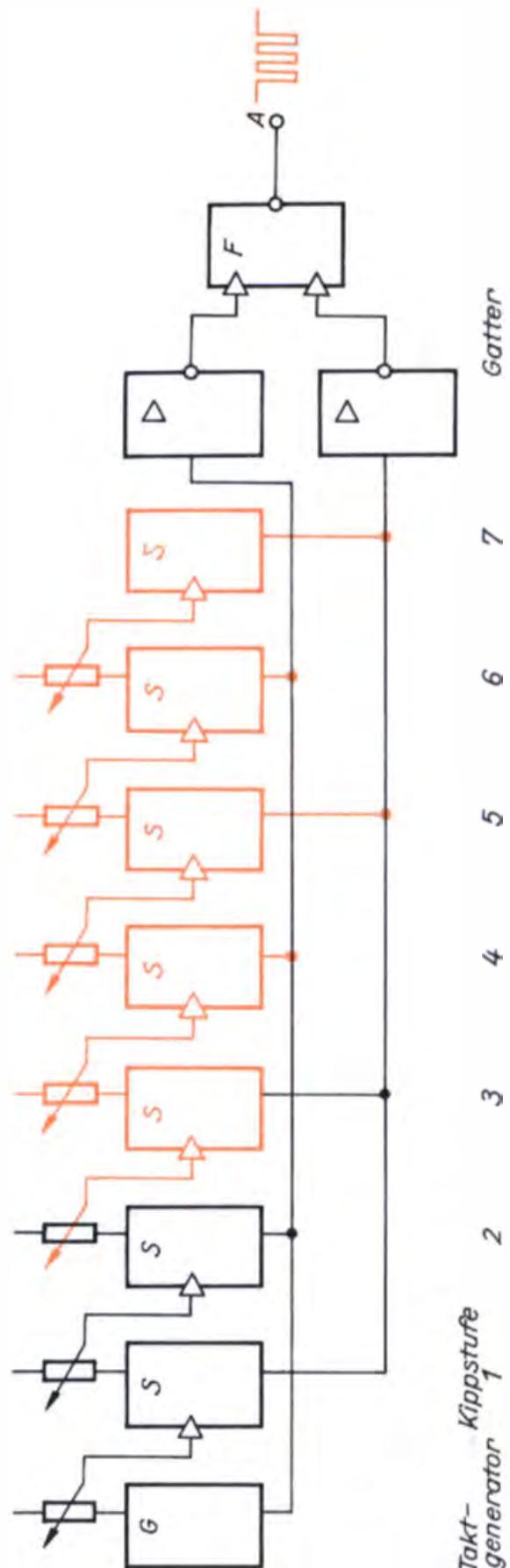
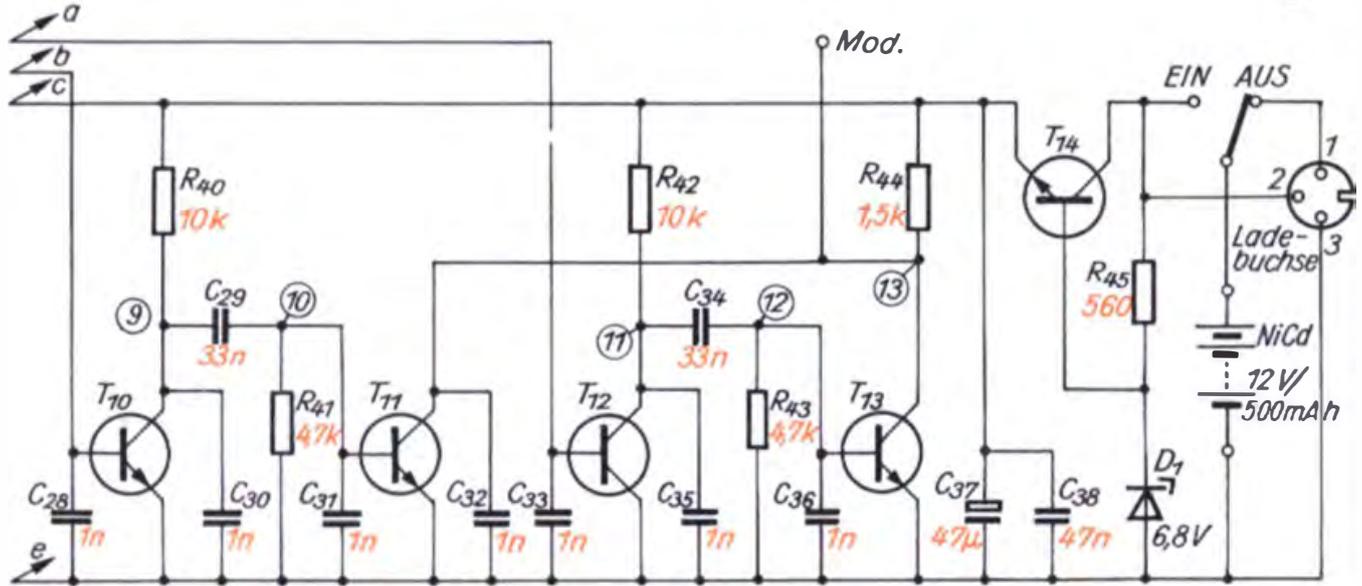
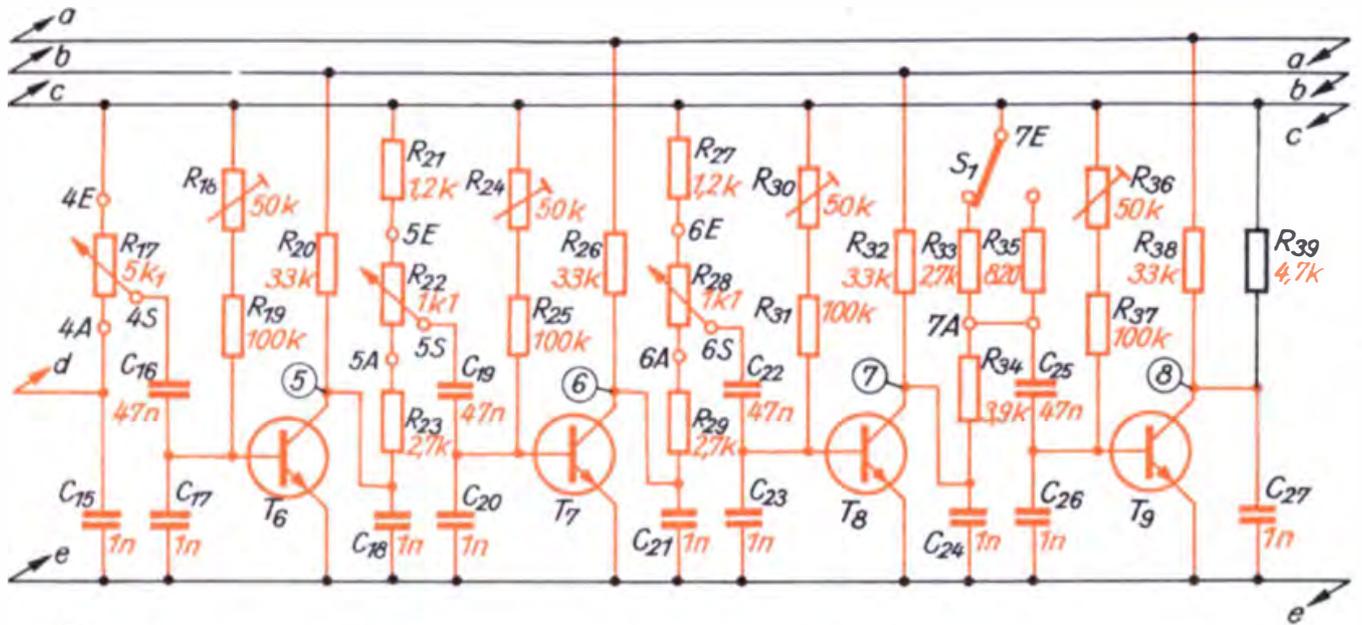
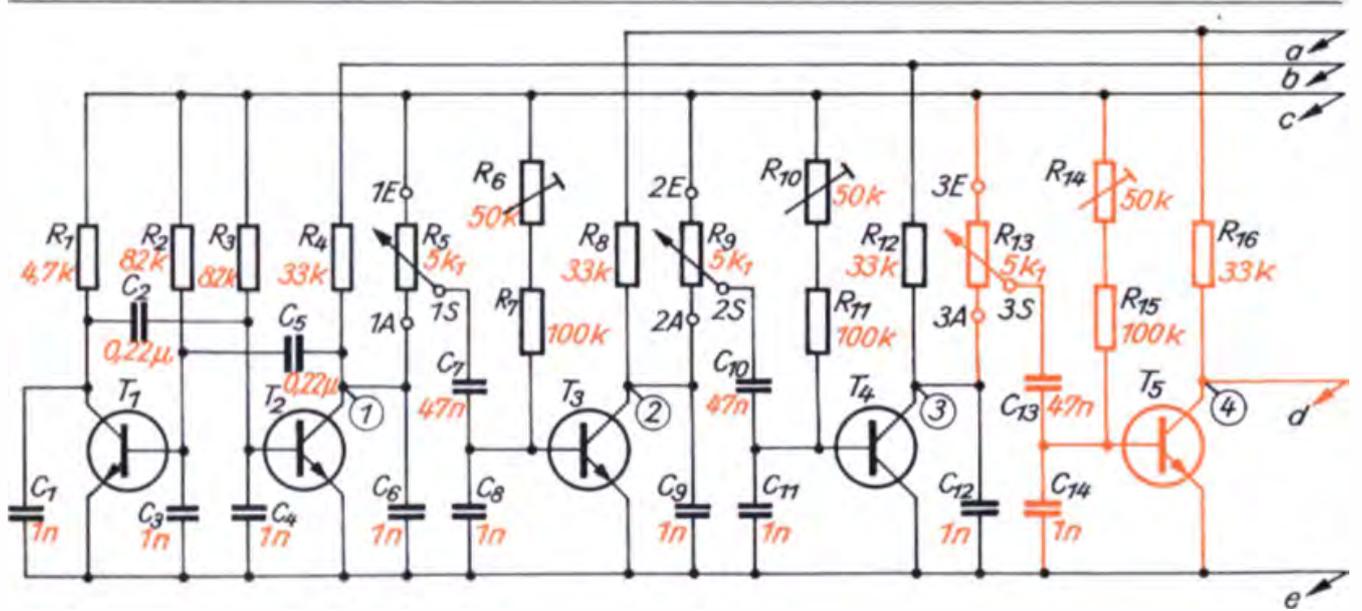


Bild 138. Blockschaltbild des Senderimpulssteils (Koder)



Stufe erzeugte Impuls wird dem *Gatter* zugeführt und triggert mit seiner Ausschaltflanke die zweite Kanalkippstufe. Diese Schaltungsteile genügen für die Zweikanalfernsteuerung. Für die Siebenkanalfernsteuerung werden noch fünf weitere Kanalkippstufen angeschlossen. Durch diesen Impulsteil werden also die jeweiligen Fernsteuerkommandos in einem Impulstelegramm, bestehend aus den in der Dauer veränderlichen Kanalimpulsen 1...7 kodiert. Wir bezeichnen daher den Senderimpulsteil im weiteren kurz als *Koder*. Der Dekoder auf der Empfängerseite zerlegt das Impulstelegramm dann so, daß an jedem Kanalausgang der entsprechende Impuls abgegriffen werden kann.

Der Koder des Senders (Bild 139) macht vielleicht auf den ersten Blick einen verwirrenden Eindruck. Mit Hilfe unserer bisher erworbenen Kenntnisse, des Impulsdiagramms (Bild 140) und der Oszillogramme (Bild 141) werden wir die Zusammenhänge ohne Schwierigkeiten verstehen. Zunächst betrachten wir nur die schwarz gezeichneten Schaltungsteile. T_1 und T_2 sind als astabiler Multivibrator geschaltet, der als *Taktgenerator* die Zeitbasis für das Impulstelegramm liefert. Neu sind die von Kollektor und Basis zur Masse geschalteten keramischen Kondensatoren mit $C = 1 \text{ nF}$. Diese Kondensatoren finden wir in allen folgenden Stufen wieder. Sie sollen verhindern, daß die vom HF-Teil eingestreuete Hoch-

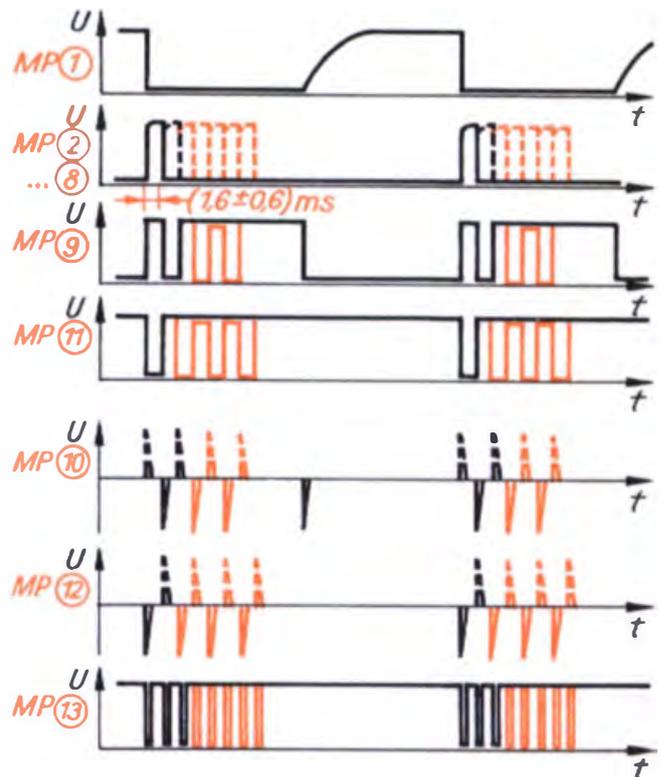


Bild 140. Impulsdiagramm des Senderimpulsteils (Koder)

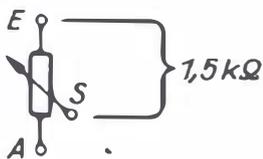
frequenz in den Verstärkerstufen Fehlfunktionen auslöst. Für die Hochfrequenz stellen die Kondensatoren praktisch einen Kurzschluß dar, die Impulsfunktion der Stufen beeinflussen sie dagegen nicht.

$$T_1 \dots T_{14} = TUN$$

$$D_1 = Z\text{-Diode } 6,8 \text{ V}/250 \text{ mW}$$



$R_5/9/13/17$ für Impulszeit $(1,6 \pm 0,6) \text{ ms}$
auf $1,5 \text{ k}\Omega$ zwischen E und S vor Einbau
einstellen



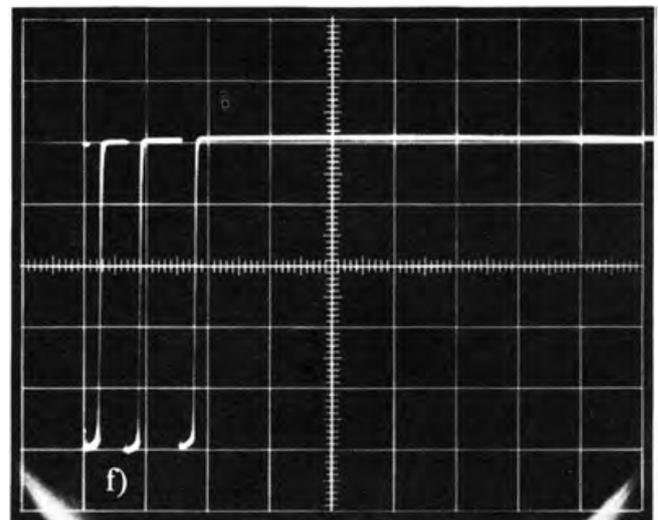
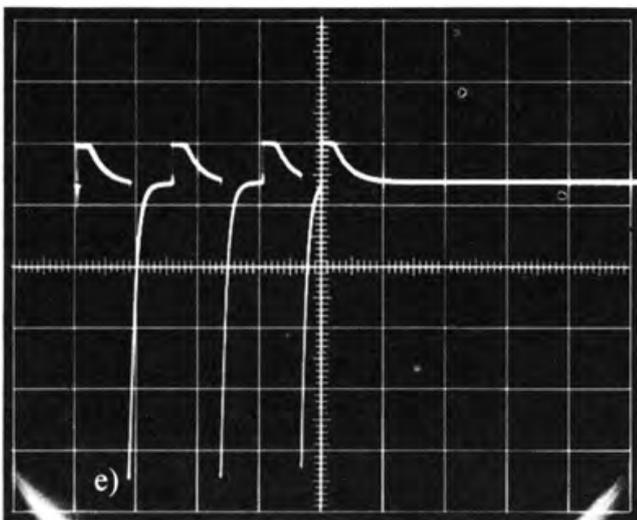
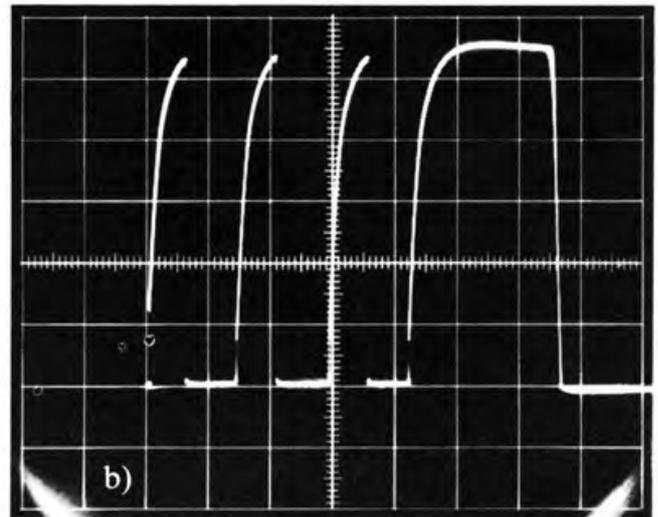
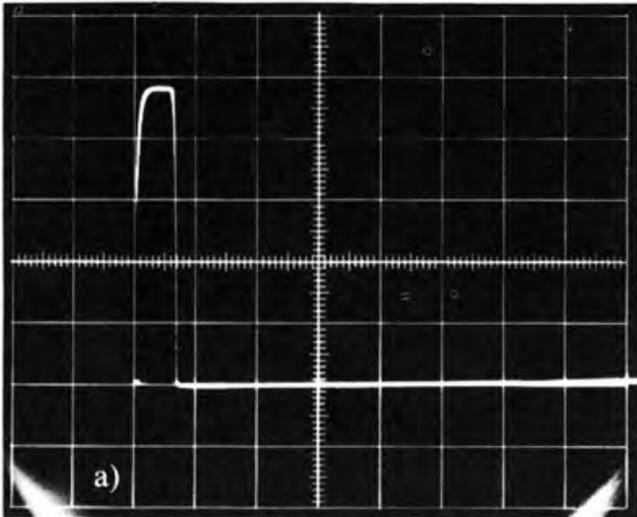
Zweikanalimpulsteil : schwarze Teile (Brücke zwischen MP ③ und MP ⑧)

Siebenkanalimpulsteil : gesamtes Schaltbild

Die Potentiometer R_5 und R_9 beim Zweikanalimpulsteil bzw. $R_5, R_9, R_{13}, R_{17}, R_{22}$ und R_{28}

Beim Siebenkanalimpulsteil sind in den Steuermechaniken oder im Sendergehäuse R_{33} und R_{35} direkt am Schalter S_1 montiert

Bild 139. Schaltbild des Senderimpulsteils (Koder)



Die HL-Flanke des Taktimpulses an MP 1 wird über R_4 auf die Sammelleitung b und damit auf den Gattertransistor T_{10} geführt. Je nach Schleiferstellung am Kanalpotentiometer R_5 (Kanal 1), nach der Größe von C_7 und der Einstellung des Arbeitspunktes mit R_6 entsteht in der uns bereits bekannten Weise in Kippstufe 1 der Kanalimpuls 1. Der Kanalimpuls 1 wird über R_8 und die Sammelleitung a auf den Gattertransistor T_{12} geführt. Am Kollektor von T_{12} (MP11) tritt Kanalimpuls 1 in negativer Form auf. In analoger Form entsteht in der Kippstufe 2 mit T_4 der Kanalimpuls 2, der über R_{12} und die Sammelleitung b dann am Kollektor von T_{10} (MP9) als negierter Kanalimpuls auftritt.

Die beiden negierten Kanalimpulse werden durch die Differenzierglieder C_{29}/R_{41} und C_{34}/R_{43} in Nadelimpulse umgeformt (MP 10 und MP12).

Die HL-Flanken erzeugen jeweils positive Nadelimpulse, die LH-Flanken negative Nadelimpulse. Die angeschalteten Transistoren T_{11} und T_{13} können aber nur die positiven Nadelimpulse verarbeiten, da nur diese die Transistoren in den leitenden Zustand versetzen. Damit wird auch klar, warum die HL-Flanke des Taktimpulses mit auf das Gatter geführt wurde, denn aus ihr wird der 1. positive Nadelimpuls erzeugt.

Die Verknüpfung beider Nadelimpulsfolgen wird erreicht, indem die Transistoren T_{11} und T_{13} auf den gemeinsamen Kollektorwiderstand R_{44} arbeiten. An MP 13 steht uns damit das komplette Impulstelegramm zur Verfügung. Es besteht aus einer Folge von negativen Impulsen, die den Modulatortransistor im HF-Teil austasten (sperrern) und damit die HF modulieren. Die jeweilige Kommando- bzw. Kanalinformation steckt im

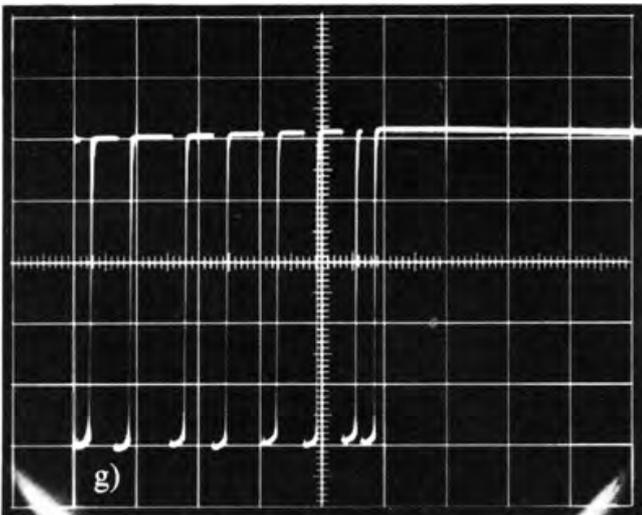
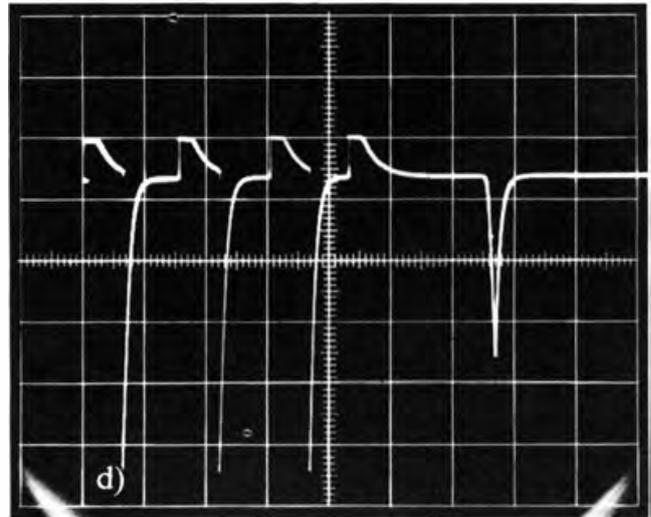
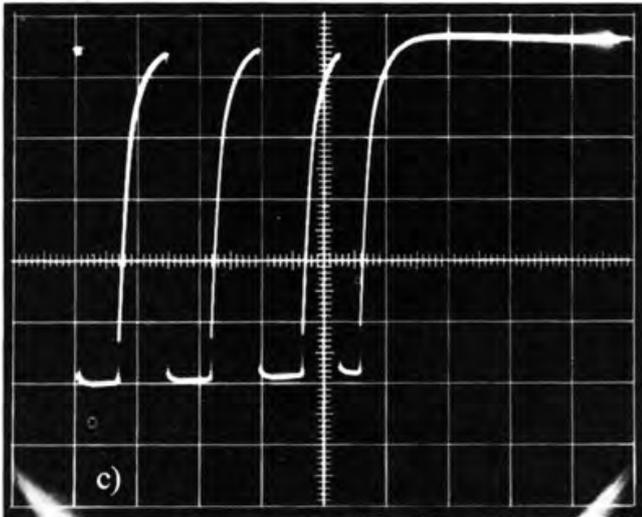


Bild 141. Oszillogramme des Senderimpulsteils (Zeitbasis: 2 ms/cm, Ablenkempfindlichkeit: 1 V/cm): a) Kanalimpuls an MP2, b) Impulsfolge an MP9, c) Impulsfolge an MP11, d) Nadelimpulsfolge an MP10, e) Nadelimpulsfolge an MP12, f) Impulstelegramm für 2 Kanäle an MP13, g) Impulstelegramm für 7 Kanäle an MP13

Abstand der Vorderflanken der Modulationsimpulse.

Da die Impulszeiten über einen Spannungssprung gewonnen werden, muß der gesamte Koder mit einer konstanten Spannung betrieben werden. Sinkende Betriebsspannung hätte zur Folge, daß sich auch die Impulszeiten und damit natürlich die Stabilität der gesamten Steuerung nachteilig änderten. Die verwendeten Nickel-Kadmium-Akkumulatoren zeichnen sich zwar durch eine relativ konstante Spannungslage, z. B. im Vergleich zu Kohle-Zink-Zellen, aus, trotzdem ist eine elektronische *Spannungsstabilisierung* unerlässlich. Die Spannungsstabilisierung übernehmen, wie bereits weiter vorn erläutert, die Z-Diode D_1 und der Längstransistor T_{14} .

Um den Akkumulator laden zu können, ohne den Sender öffnen zu müssen, bauen wir eine *Ladebuchse* (Diodenbuchse) ein. Daß uns diese

Buchse noch andere gute Dienste leisten kann, werden wir später erfahren. Getreu unserem bisherigen Prinzip bauen wir den Koder für zwei Kanäle zunächst auf der Experimentierplatine auf und erproben ihn zusammen mit dem Dekoder. Erst wenn dann alles zufriedenstellend funktioniert, stellen wir die Leiterplatten her und bestücken sie.

Der Dekoder trennt die Impulse wieder

In dem Impulstelegramm von Bild 141f oder g stecken die für die Fernsteuerung unseres Modells benötigten Informationen. Sie sind in der Lage der Impulse und deren Abstand zueinander im Sender kodiert. Als nächstes müssen wir die Impulse auf der Empfängerseite wieder voneinander trennen und sie so dekodieren, daß jeder

Kanalimpuls für sich in der Aufschalteinrichtung ausgewertet werden kann.

Da der Dekoder klein, leicht und betriebssicher arbeiten soll, verwenden wir für die Dekodierung ein modernes Bauelement, den *integrierten Digitalschaltkreis*. Digitalschaltkreise werden für den Einbau in Datenverarbeitungsanlagen produziert. Je nach Anwendungsbereich gibt es sogenannte *Schaltkreisfamilien*, wobei die IS dieser Familien in wichtigen elektrischen Daten übereinstimmen, aber recht unterschiedliche digitale Funktionen ausüben können. Für uns ist wichtig, daß die IS für 5 V Betriebsspannung und die vorgegebenen Impulszeiten geeignet sind. Es wäre zwar interessant zu erfahren, was wir alles mit solchen Digital-IS aufbauen können, hier müssen wir uns aber auf die Anwendung in der Fernsteueranlage beschränken.

Einen IS haben wir bereits bei der Servoelektronik kennengelernt. Das Typische dabei war, daß wir gar nicht mehr wissen müssen, was in solch einem Schaltkreis vorgeht, wie er im Detail funktioniert. Wichtig ist nur noch, wie wir ihn extern zu beschalten haben, damit er die Impulse in der gewünschten Form verarbeitet.

Zur Dekodierung wählen wir die IS der internationalen TTL-Familie mit der Typenbezeichnung 74. TTL bedeutet *Transistor-Transistor-Logik*, d.h., für die digitalen Funktionen sind Transistoren verantwortlich. Die internationale Familie oder Reihe 74 wird von verschiedenen Halbleiterherstellern produziert und je nach Hersteller mit vorangesetzten Buchstaben oder Ziffern gekennzeichnet. Eine Vergleichsliste findet der Leser im Anhang (Tabelle 14). Die der »74« folgenden Zifferngruppen kennzeichnen die digitale Funktion.

Der für die Zweikanaldekodierung verwendete IS hat die Typenbezeichnung »7474« und die Funktionsbezeichnung *Zwei-D-Flip-Flop*. Die Funktion eines einfachen *Flip-Flops* lernten wir bereits in der Schaltung nach Bild 71 kennen. Wichtig für uns ist, daß ein Flip-Flop über Eingänge gestellt/gesetzt werden kann und in dem gesetzten Zustand verharrt, also gewissermaßen ein Gedächtnis hat. Durch Weiterentwicklung dieser einfachen Flip-Flops und Kombination mehrerer Flip-Flops kann man ganz bestimmte Schalteigenschaften erzielen, die Speichereigenschaft haben alle Flip-Flops.

Der D-Flip-Flop im IS »7474« hat vier Eingänge R, S, D und T und die Ausgänge Q und \bar{Q} (Bild 142). Aus Bild 142 ersehen wir, daß der D-Flip-Flop aus drei miteinander verknüpften einfachen Flip-Flops besteht. Durch diese Verknüpfung erreicht man, daß der D-Flip-Flop mit jeder LH-Flanke (ansteigende Flanke) des Taktimpulses am Eingang die zu diesem Zeitpunkt am Eingang D liegende Information in den Ausgang Q übernimmt und sie bis zum nächsten Taktimpuls speichert. Das bedeutet, ein zum Zeitpunkt t_n an D gegebenes bleibendes Signal erscheint am Ausgang Q erst zum Zeitpunkt der nächsten LH-Taktflanke, also bei $t_n + 1$. Dieses Verhalten gab dem Flip-Flop den Namen D-Flip-Flop (D-FF, von delay, engl. = Verzögerung).

Das Verhalten von Digital-IS wird durch *Zustandstabellen* oder *Impulsdiagramme* bestimmt. Für den D-Flip-Flop ist die Zustandstabelle einfach:

Informations- eingang bei t_n	Ausgänge bei t_{n+1}	
D	Q	\bar{Q}
L	L	H
H	H	L

Den gleichen Zusammenhang können wir auch aus dem Impulsdiagramm (Bild 143) ablesen. Daraus erkennen wir ferner, daß am Ausgang Q immer das zum Ausgang \bar{Q} negierte Signal anliegt. Damit hätten wir theoretisch die Möglichkeit, den am Ausgang Q abgegriffenen positiven Kanalimpuls auch am Ausgang \bar{Q} , aber als negativen Kanalimpuls, abzugreifen. Das wäre nur von Bedeutung, wenn wir Aufschalteinrichtungen (Servos, Fahrtregler o. ä.) von Fernsteueranlagen mit negativem Kanalimpuls anschalten wollen.

Die Eingänge R und S sind statische Stelleneingänge, wie wir sie beim Flip-Flop nach Bild 71 kennengelernt hatten. Mit ihnen kann der Flip-Flop in eine definierte Lage gesetzt werden. Da wir den Flip-Flop aber über die Impulse dynamisch schalten, interessieren sie uns im folgenden nicht mehr.

Wir wollen uns überlegen, wie wir das Impulsdiagramm an den Takteingang T und den Informationseingang D führen müssen, um die

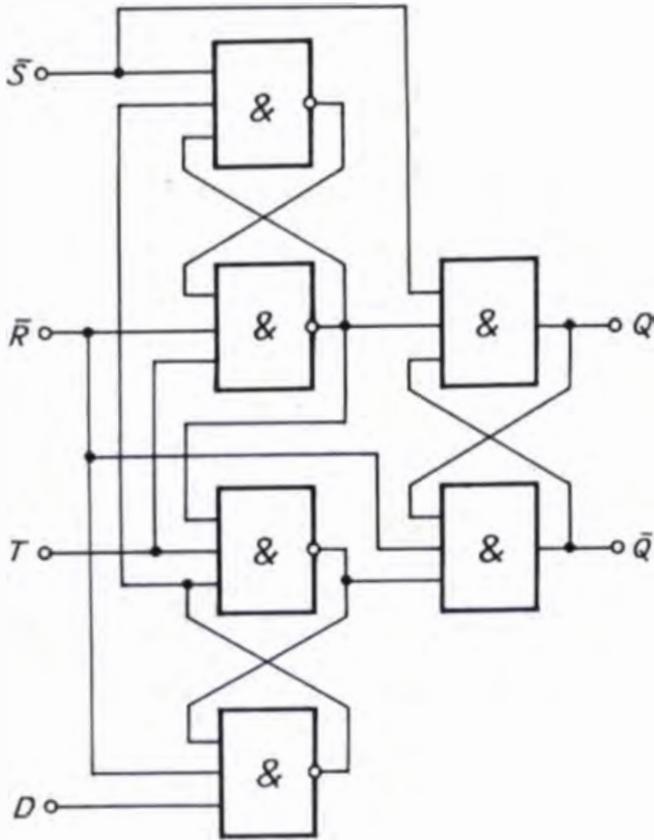


Bild 142. Blockschaltbild des D-Flip-Flops

dekodierten Kanalimpulse zu erhalten. Die erste LH-Flanke des Impulstelegramms soll auch die LH-Flanke des ersten Kanalimpulses sein. Das bedeutet nach Zustandstabelle und Impulsdiagramm, daß bei der ersten LH-Flanke an T auch D auf H sein muß. Damit wir die HL-Flanke (abfallende Flanke) des Kanalimpulses erhalten, muß zum Zeitpunkt der zweiten LH-Flanke der D-Eingang auf L liegen. Wenn wir diese Be-

Bild 143. Impulsdiagramm des D-Flip-Flops

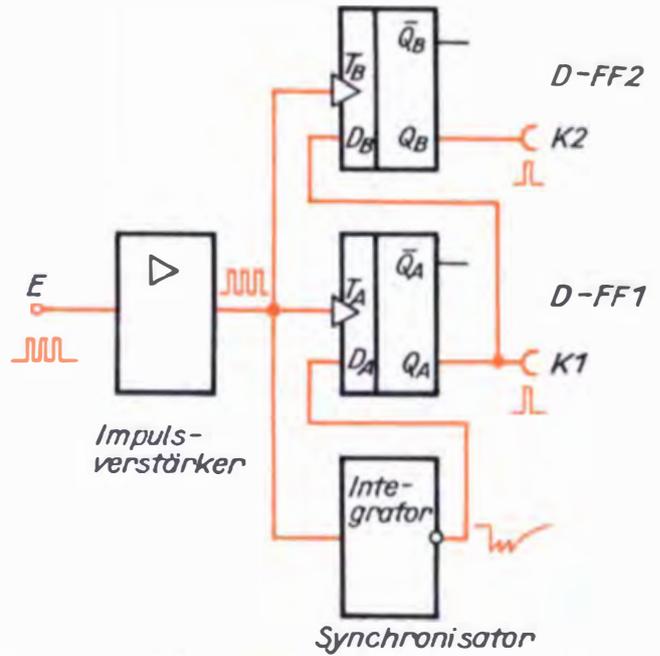
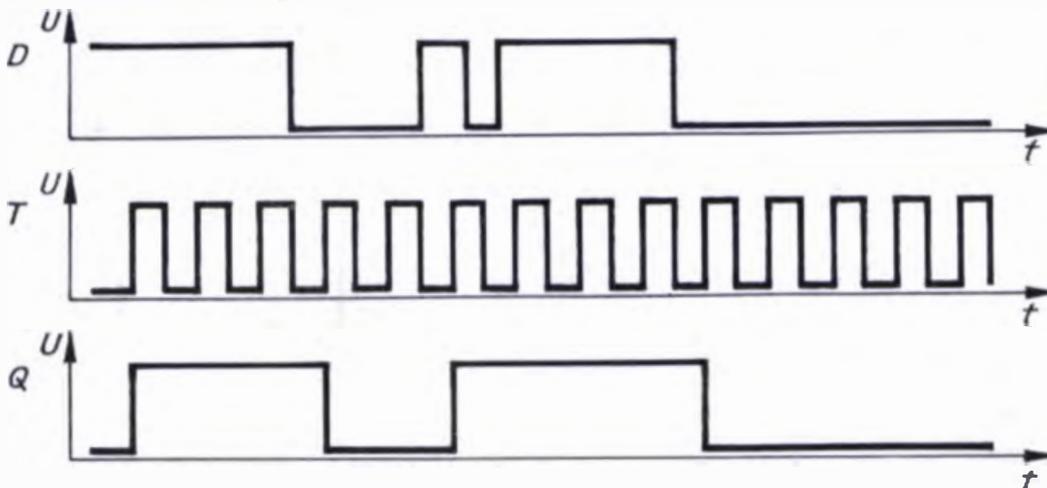


Bild 144. Blockschaltbild des Zweikanaldekoders

dingungen elektronisch realisieren, haben wir mit dem D-FF den 1. Kanalimpuls gewonnen. Den zweiten Kanalimpuls erzeugen wir dann mit D-FF 2 nach dem gleichen Verfahren aus der zweiten und dritten LH-Flanke des Impulstelegramms. Da die zweite LH-Flanke aber gleichzeitig die LH-Flanke des zweiten Kanalimpulses erzeugen soll, müssen wir das H-Signal für den zweiten D-Eingang am Q-Ausgang von FF1 abgreifen.

Der nächste Schritt ist die Entwicklung eines *Blockschaltbildes* (Bild 144) aus diesen Überlegungen. Das vom Empfänger gelieferte Impulstelegramm muß zunächst verstärkt und geformt werden, d. h., die Impulse müssen eine bestimmte Höhe und Steilheit haben, um den Dekoder

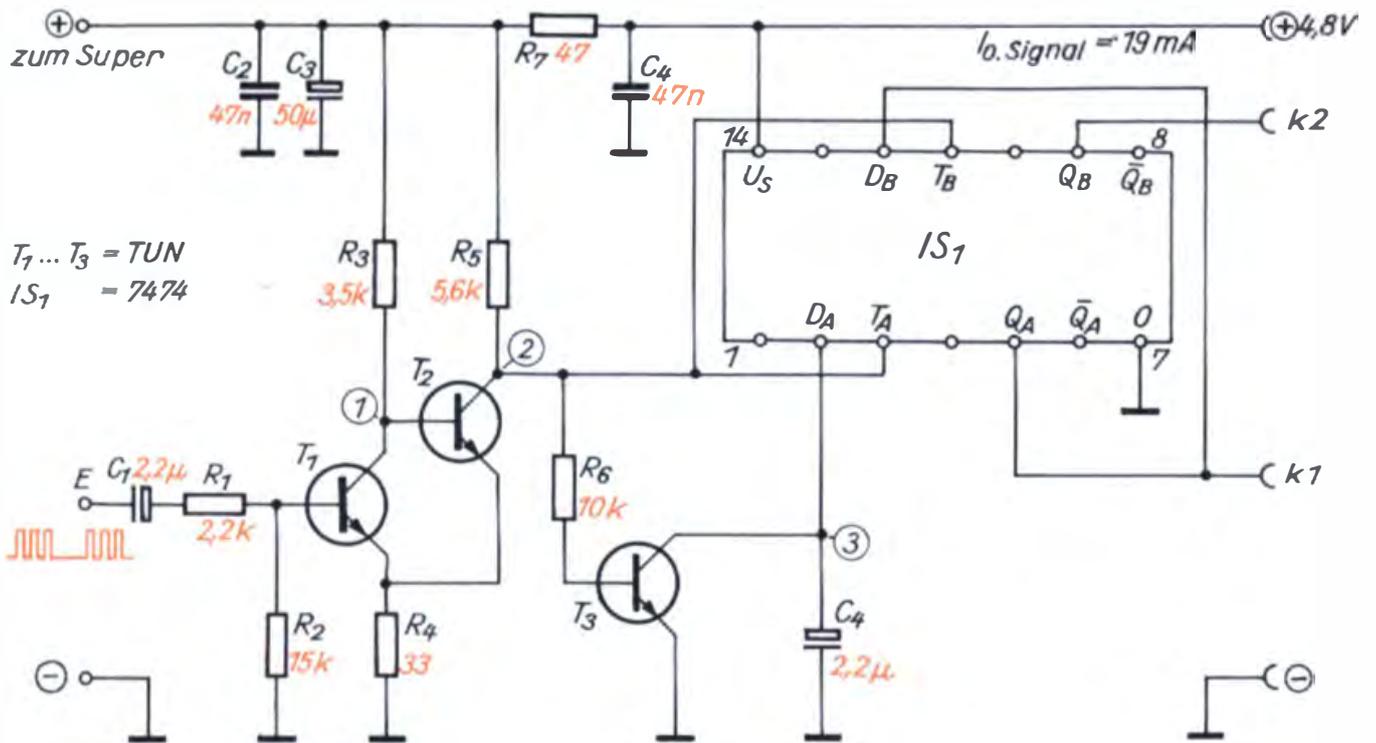


Bild 145. Schaltbild des Zweikanaldekoders

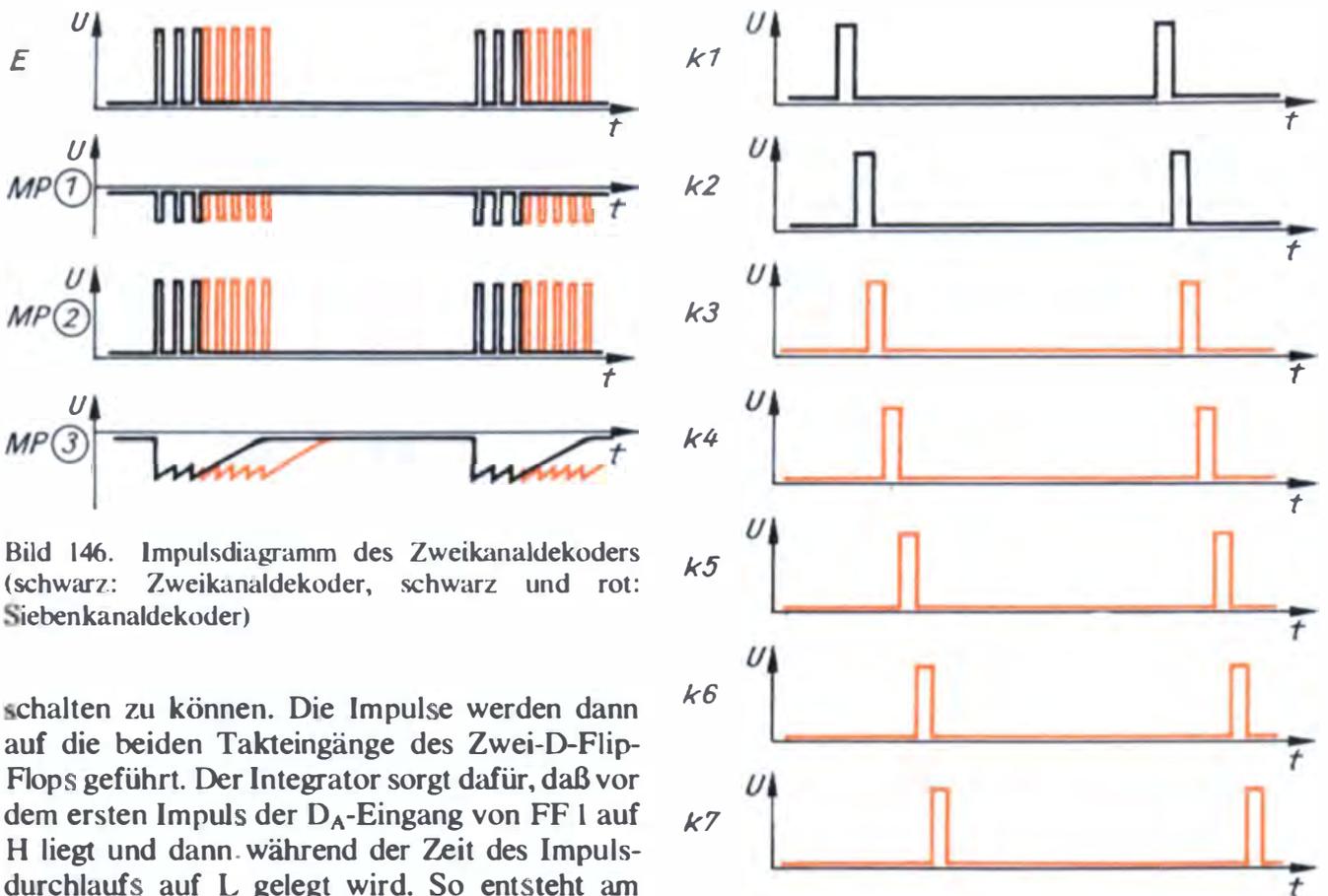


Bild 146. Impulsdiagramm des Zweikanaldekoders (schwarz: Zweikanaldekoder, schwarz und rot: Siebenkanaldekoder)

schalten zu können. Die Impulse werden dann auf die beiden Takteingänge des Zwei-D-Flip-Flops geführt. Der Integrator sorgt dafür, daß vor dem ersten Impuls der D_A -Eingang von FF 1 auf H liegt und dann während der Zeit des Impulsdurchlaufs auf L gelegt wird. So entsteht am

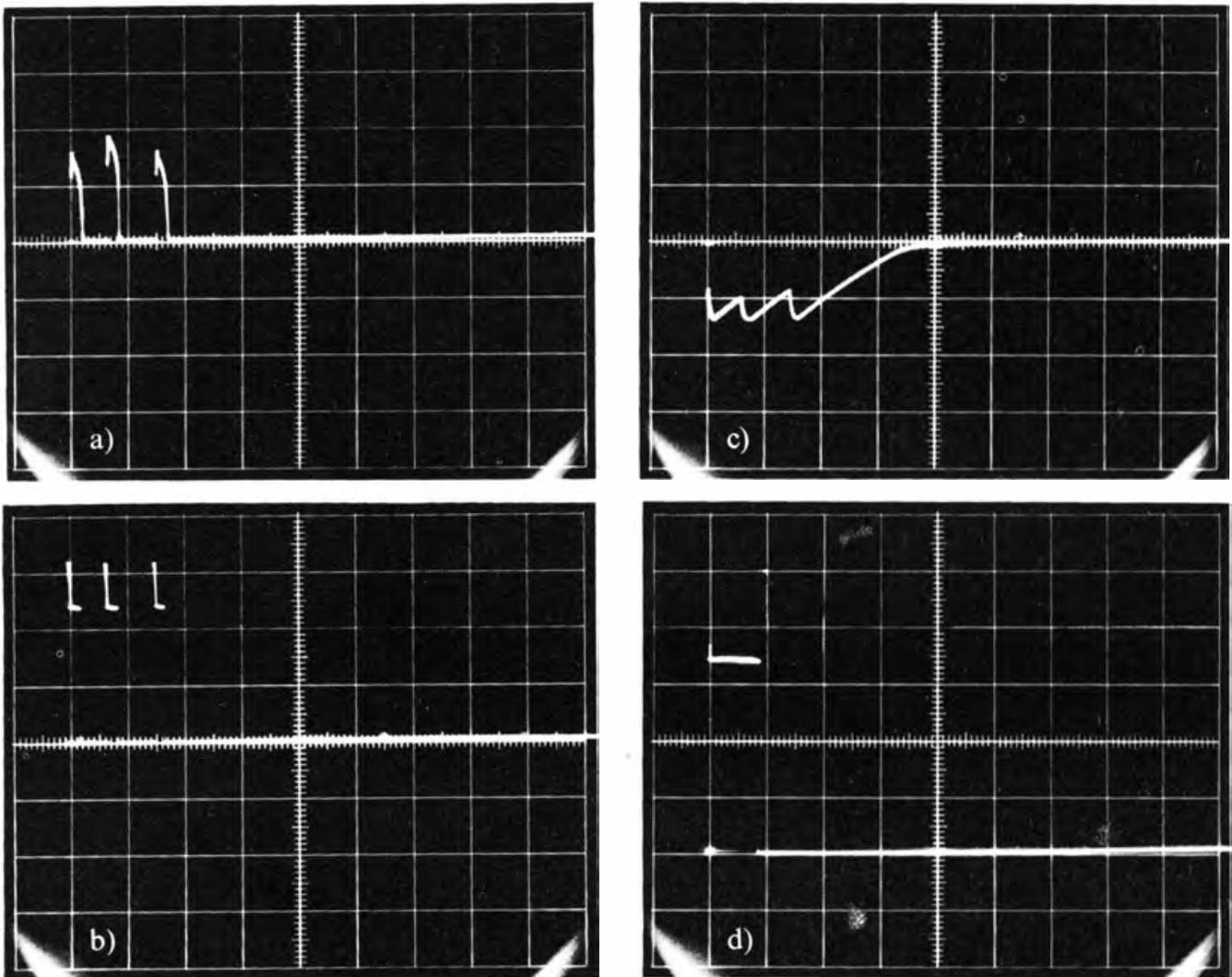


Bild 147. Oszillogramme des Zweikanaldekoders (Zeitbasis: 2 ms/cm, Ablenkempfindlichkeit: 1 V/cm): a) Impulstelegramm an E, b) Taktimpuls an MP2, c) Synchronisationsimpuls an MP3, d) Kanalimpuls an K1

Ausgang Q in der geforderten Weise Kanalimpuls 1. Da der D_B -Eingang von FF 2 nur bei der 2. LH-Flanke auf H-Potential liegen soll, wird dieses H-Potential von Q_A übernommen. Es verschwindet ja mit dem Ablauf des 1. Kanalimpulses, so daß die 3. LH-Flanke des Impulstelegramms dann am Q_B auch die HL-Flanke des 2. Kanalimpulses erzeugt, denn am Eingang D_B liegt zu dem Zeitpunkt L-Potential. Damit wäre das Zweikanal-Impulstelegramm dekodiert.

Wenn wir die Funktion bis hierher verstanden haben, ist es auch nicht schwer, dafür eine elek-

tronische Schaltung (Bild 145) zu entwerfen. Zusammen mit den Impulsbildern (Bild 146 und 147) wird uns deren Wirkungsweise sofort klar. Das Impulstelegramm wird von T_1/T_2 verstärkt und geformt und steht an MP2 als Taktimpulsfolge zur Verfügung. Da in der Impulspause zwischen zwei Impulstelegrammen T_1 gesperrt, T_2 leitend und demzufolge T_3 gesperrt ist, liegt vor der ersten LH-Flanke der D_A -Eingang auf H-Potential. Dieses H-Potential wird vom ersten Taktimpuls nach Q_A durchgeschaltet. Gleichzeitig entlädt der erste Taktimpuls C_4 , so daß an D_A dann L-Potential liegt. Da sich C_4 in den Pausen zwischen den Taktimpulsen nicht wieder bis auf H-Potential aufladen kann, bleibt das L-Potential am D_A -Eingang bis zum Ende des Impulstelegramms erhalten. Damit schaltet die LH-Flanke des 2. Taktimpulses das L-Signal auf den Q_A -Ausgang, und der 1. Kanalimpuls ist

damit erzeugt. Das H-Potential für die Vorderflanke des 2. Kanalimpulses greifen wir an Q_A ab und führen es auf D_B . Im FF2 entsteht dann der 2. Kanalimpuls genau wie im FF1 der 1. Kanalimpuls. Damit stehen uns die dekodierten bzw. getrennten Kanalimpulse an den Ausgängen $Q_A = K1$ und $Q_B = K2$ zur Verfügung.

Durch Hintereinanderschaltung von mehreren IS »7474« könnten wir nun den Dekoder bis auf die gewünschte Kanalzahl ausbauen. Für den Siebenkanaldekoder verwenden wir aber einen anderen IS, so daß die Schaltung damit einfacher wird. Der Impuls am MP3 wird auch als *Synchronimpuls* bezeichnet, weil sich der Kondensator C_4 in der Pause zwischen den Impulstelegrammen wieder voll aufladen kann und damit an D_A wieder H-Potential liegt. Der Dekoder fängt nun in der richtigen Stellung an zu zählen. Durch die lange Impulspause $t_p > 6\text{ms}$ wird also der Dekoder im Empfänger mit dem Koder im Sender synchronisiert, ganz gleich ob auf dem Übertragungsweg ein Impuls verlorengegangen oder ein anderer (z. B. ein Störimpuls, was viel häufiger ist) hinzugekommen ist.

Die Dekoderschaltung bauen wir ebenfalls erst einmal auf der Experimentierplatine auf und erproben sie zusammen mit dem Koder. Dabei müssen wir aber beachten, daß bei den IS die Anschlüsse in den Schaltbildern so gezeichnet sind, wie man *von oben* auf das Bauelement schaut. Sockelschaltbilder von Transistoren werden ja immer *von unten* auf das Gehäuse gesehen dargestellt. Der Koder liefert uns das komplette Impulstelegramm, und der Dekoder zerlegt es dann wieder in die Einzelimpulse. Wenn wir aber die Impulsdiagramme von Koder und Dekoder miteinander vergleichen, stellen wir fest, daß das Kodertelegramm aus negativen Impulsen (*Austastimpulsen*) und das Dekodertelegramm aus positiven Impulsen besteht. Deshalb müssen wir aus den negativen Koderimpulsen positive erzeugen, mit denen wir dann den Dekoder ansteuern können.

Die Impulsumkehrung, auch Invertierung genannt, erreichen wir durch die Zwischenschaltung einer einfachen Verstärkerstufe. Von der Funktionserläuterung des Transistors wissen wir noch, daß die Kollektorspannung um 180° phasenverschoben zur Basisspannung ist. Digital bedeutet das, daß die Basis L-Signal führt, wenn

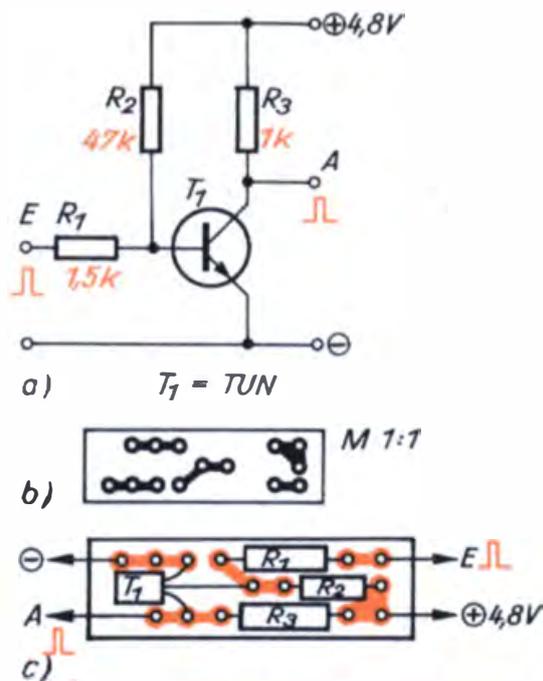


Bild 148. Impulsinverter: a) Schaltbild, b) Leitungs-führung, c) Bestückungsplan

am Kollektor H-Signal liegt und umgekehrt. Der Impulsinverter von Bild 148 ist solch eine Verstärkerstufe. Die Modulationsimpulse des Koders geben wir auf Eingang E, den Ausgang A verbinden wir mit dem Eingang des Dekoders. Schalten wir nun an die Ausgänge des Dekoders den Oszillographen oder Servos, so können wir die Funktion beider Baugruppen experimentell überprüfen. Bei dieser Überprüfung führen wir auch den Vorabgleich des Koders aus. Damit ersparen wir uns diesen Arbeitsschritt dann beim Senderaufbau.

Wir gleichen den Koder ab

Bevor wir die Kanalpotentiometer R_5 und R_9 in die Steuermechanik einbauen, stellen wir mit

Bild 149. Musteraufbau des Impulsinverters



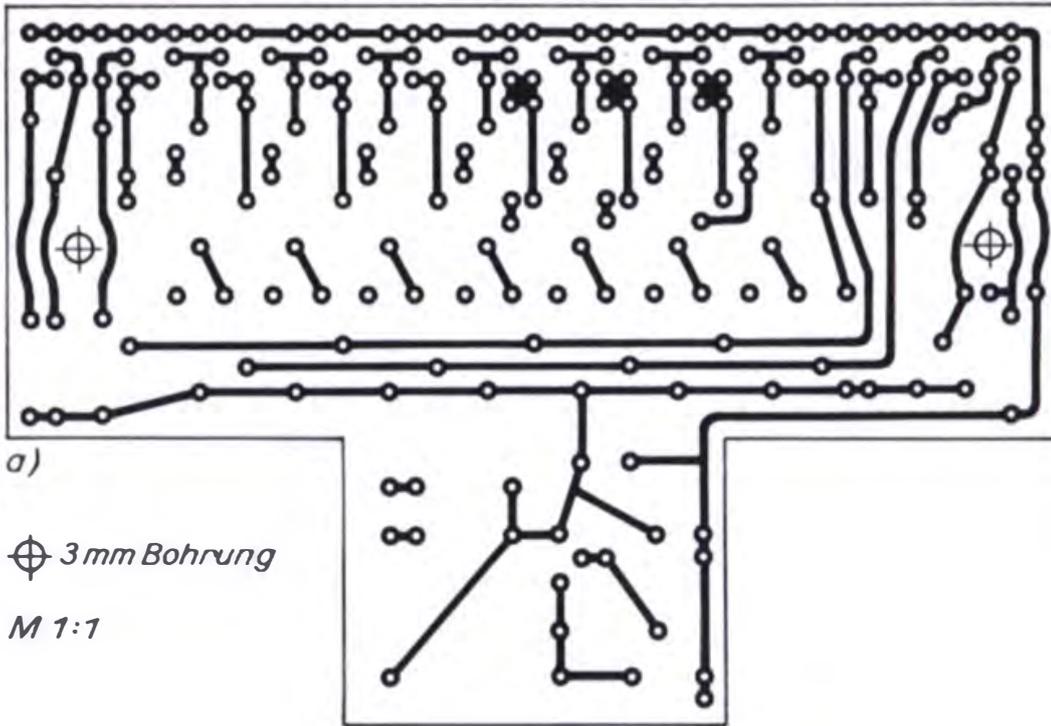
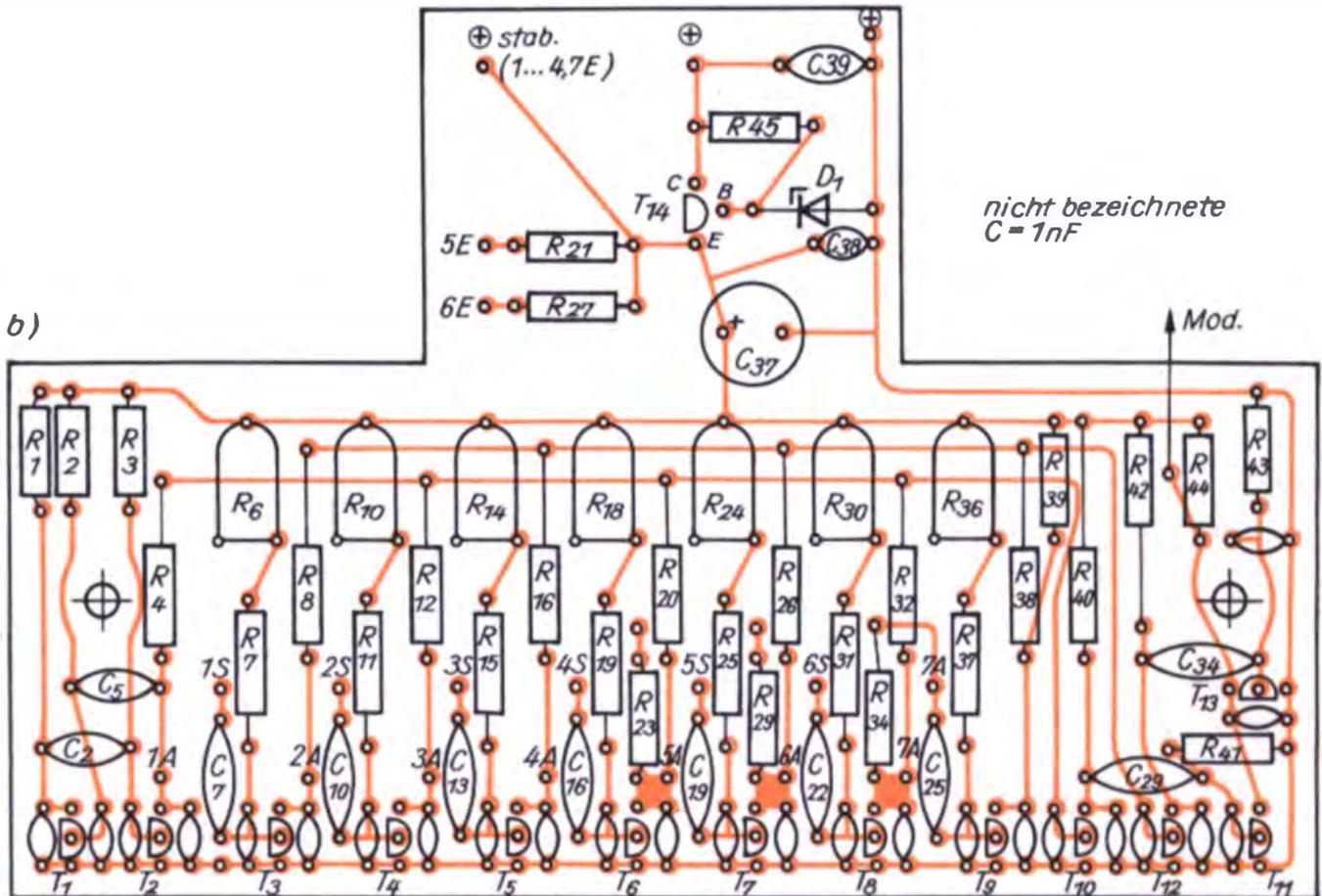
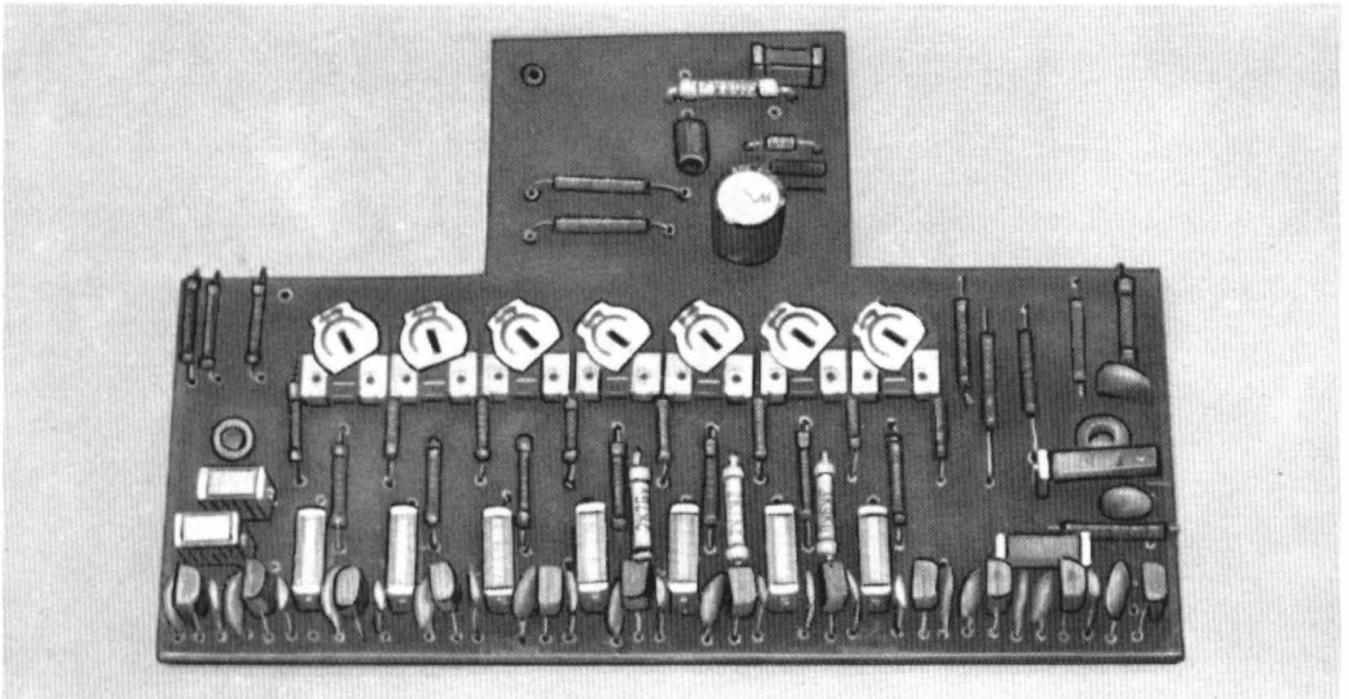


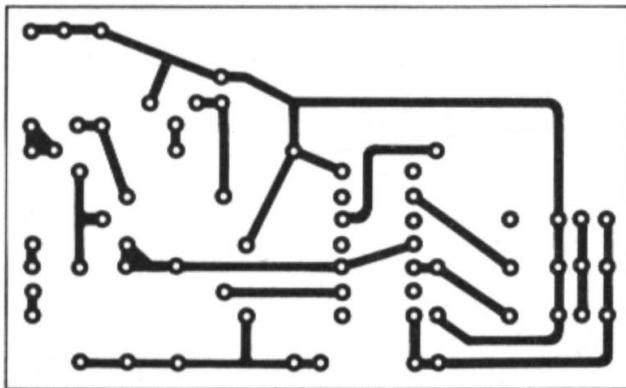
Bild 150. Koder: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan





M 1:1

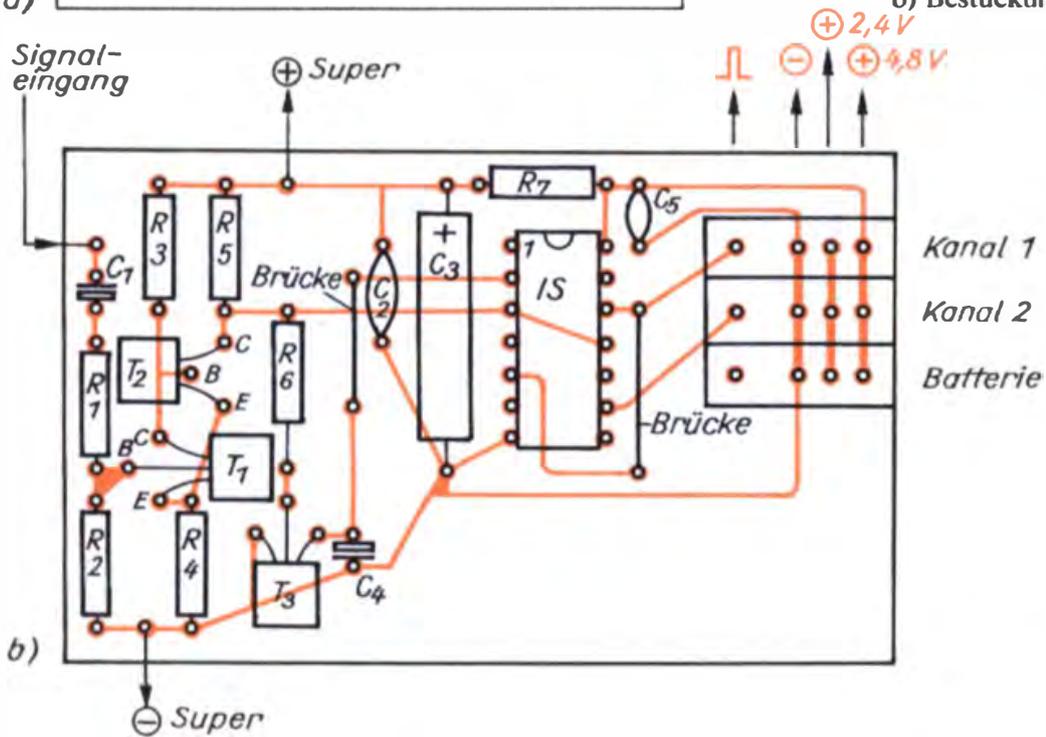
Bild 151. Musteraufbau des Koders



a)

Bild 152. Zweikanaldecoder:

a) Leitungsführung,
b) Bestückungsplan



b)

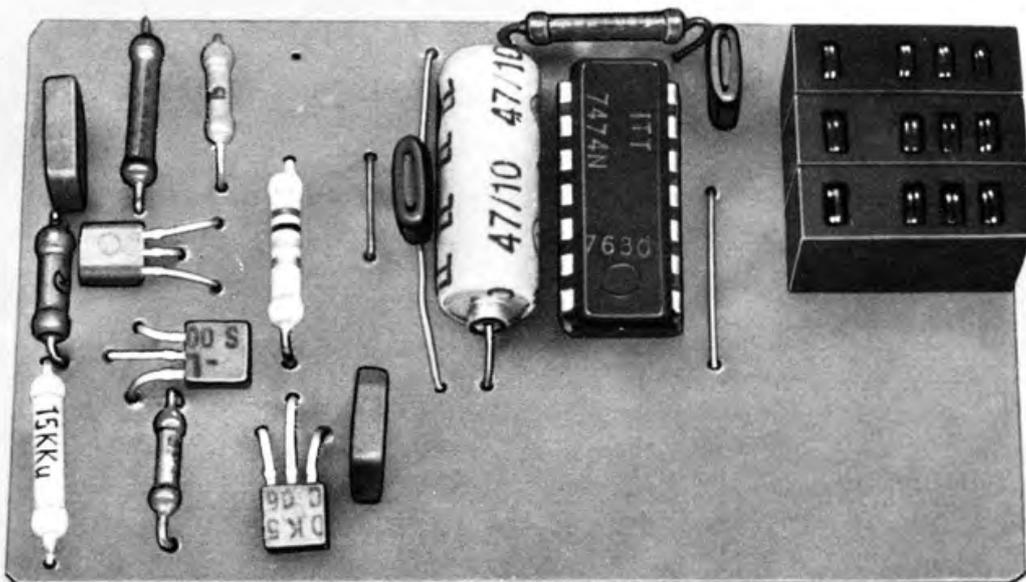
einem Ohmmeter (Widerstandsmeßbereich am Vielfachmeßgerät) zwischen den Anschlüssen S (Schleifer) und E (Widerstandsbahnde) den Wert $R = 1,5 \text{ k}\Omega$ ein. Mit dieser Einstellung werden die Kanalpotentiometer in die Steuermechanik eingebaut; Kulissenbügel, Kreuzwelle und Trimmhebel sollen sich in Neutralstellung befinden. Die Einstellregler in den Basisleitungen der Kanalkippstufen R_6 und R_{10} werden auf $3/4$ Vollausschlag gestellt. Durch diesen *Vorabgleich* des Koders erhalten wir bereits recht genau die Impulszeit von $(1,6 \pm 0,6) \text{ ms}$. Den *Feinabgleich* nehmen wir dann am fertig aufgebauten Sender für jeden Kanal möglichst mit einem geeichten (geborgten) Servo einer Industrieanlage vor, falls wir solche Servos in unserer Anlage betreiben wollen. Für Eigenbauservos genügt meist der Vorabgleich des Koders als „Eichnormal“. Damit dann aber alle Kanäle und Servos die gleiche Impulszeit haben, gleichen wir mit dem 1. Kanal des Koders das „Eichservo“ und alle anderen Servos ab. Mit dem Eichservo gleichen wir dann Kanal 2 und alle folgenden ab. Sollten wir Servos mit anderen Impulszeiten anschließen wollen, müssen wir entweder die Impulszeit der Servos nachgleichen

oder die gesamte Anlage auf die andere Impulszeit einstellen.

Haben wir Servos für Betrieb mit negativem Kanalimpuls, so können wir auch diese anschalten, indem wir den *Impulsinverter* von Bild 148 zwischenfügen. Wir sehen, mit unseren elektronischen Mitteln können wir auch die Aufschaltgeräte anderer Anlagen anpassen. Falls Bedarf für einen solchen Impulsinverter besteht, bauen wir ihn auf einer kleinen Platine auf (Bild 149). Die Betriebsspannung erhält der Inverter vom Empfänger. Er reicht sie mit dem invertierten Impuls an die Ausschalteneinrichtung weiter. Der aufgebaute Impulsinverter ist so klein, daß wir ihn in das Servoanschlußkabel einlöten und mit Klebeband umwickeln können. Das bedeutet weder erhöhten Platzbedarf noch Massezunahme.

Funktionieren Koder und Dekoder einwandfrei, bereiten wir die Leiterplatten (Bilder 150 und 152) vor und übertragen die Bauelemente von der Experimentierplatine auf die Leiterplatten. Nach der Fertigstellung dieser beiden Baugruppen (Bilder 151 und 153) überprüfen wir noch einmal deren Funktion, bevor sie in das Sendergehäuse bzw. Empfängergehäuse eingebaut werden.

Bild 153. Musteraufbau des Zweikanaldekoders



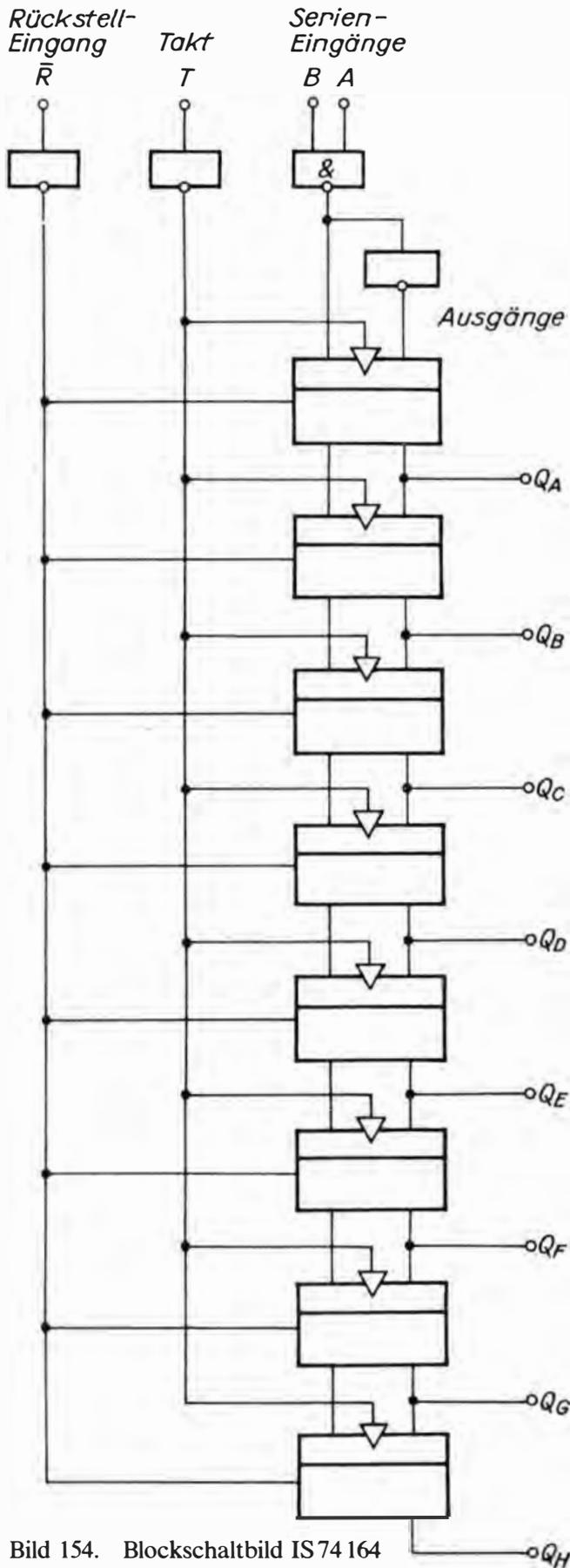


Bild 154. Blockschaltbild IS74164

Wir bauen den Siebenkanaldekoder

Da wir uns mit der Zweikanalversion des Koders und Dekoders vertraut gemacht haben, wollen wir als nächstes noch die *Siebenkanalversion* kennenlernen. Dieses Problem wird aus methodischen Gründen bereits hier besprochen, obwohl für die ersten Fernsteuerversuche die Zweikanalanlage ausreicht. Der Aufbau des Siebenkanalkoders ist für uns unproblematisch, da wir auf der Leiterplatte nach Bild 150a nur die fehlenden Stufen $T_5 \dots T_9$ (rot gekennzeichnet) nachrüsten brauchen. Die Funktion entspricht den bereits erläuterten Kanalkippstufen. Für die Kanäle 5 und 6 sind zwei Schieberegler R_{22} und

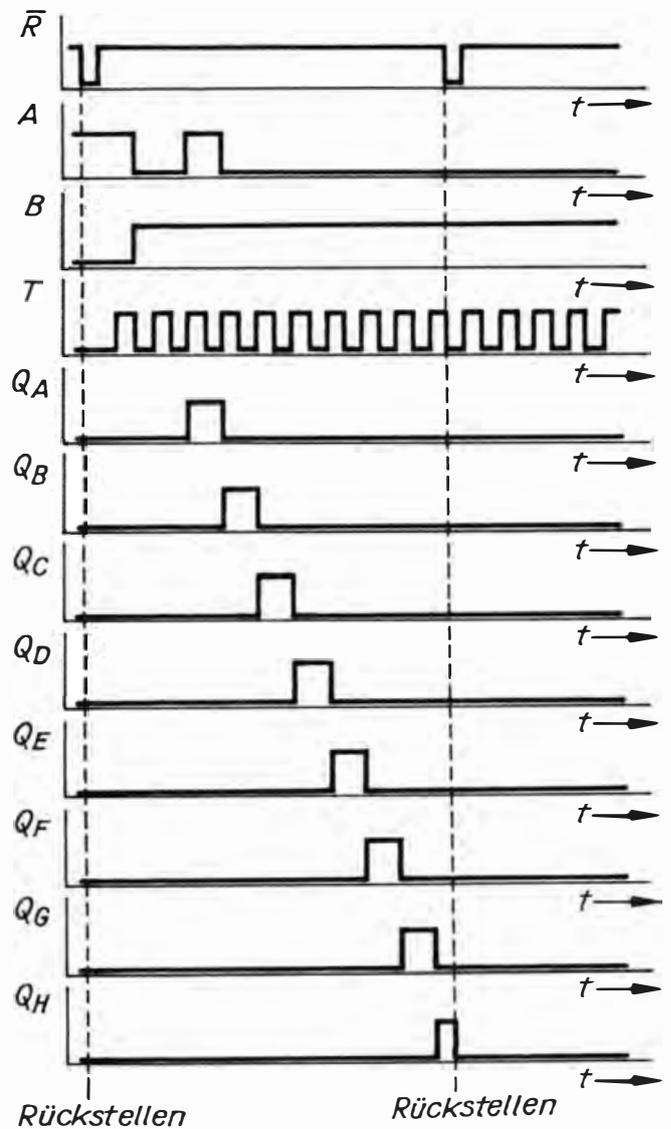


Bild 155. Impulsdiagramm des 8-Bit-Schieberegisters

R_{28} vorgesehen. Kanal 7 ist nur als Schaltkanal ausgeführt. Wer auch Kanal 7 mit einer Proportionalfunktion ausstatten will, kann die Stufe entsprechend bestücken. Auf den Bildern 150b und 151 ist die Siebenkanalausführung dargestellt. Mit dem Siebenkanalkoder können wir dann auch den Zweikanaldekoder ansteuern. Das ist für die spätere Anwendung wichtig, denn so ist der Betrieb des Zweikanalempfängers mit dem Siebenkanalsender möglich. Umgekehrt könnten wir auch Zweikanalsender und Siebenkanalempfänger zusammen betreiben, würden damit aber eben nur 2 Kanäle fernsteuern.

Für den Siebenkanaldekoder verwenden wir ebenfalls einen integrierten Schaltkreis der Reihe 74. Es ist ein 8-Bit-Schieberegister mit Parallelausgabe. Wir könnten ein solches 8-Bit-Schieberegister auch durch Hintereinanderschaltung von 4 IS »7474« aufbauen, geben aber der Variante mit einem IS wegen des damit verbundenen geringen Strom-, Platz- und Bauelementedarfs den Vorzug. Das 8-Bit-Schieberegister besteht ebenfalls aus miteinander verknüpften Flip-Flops (Bild 154). Es hat die beiden Informationseingänge A und B, den Takt-

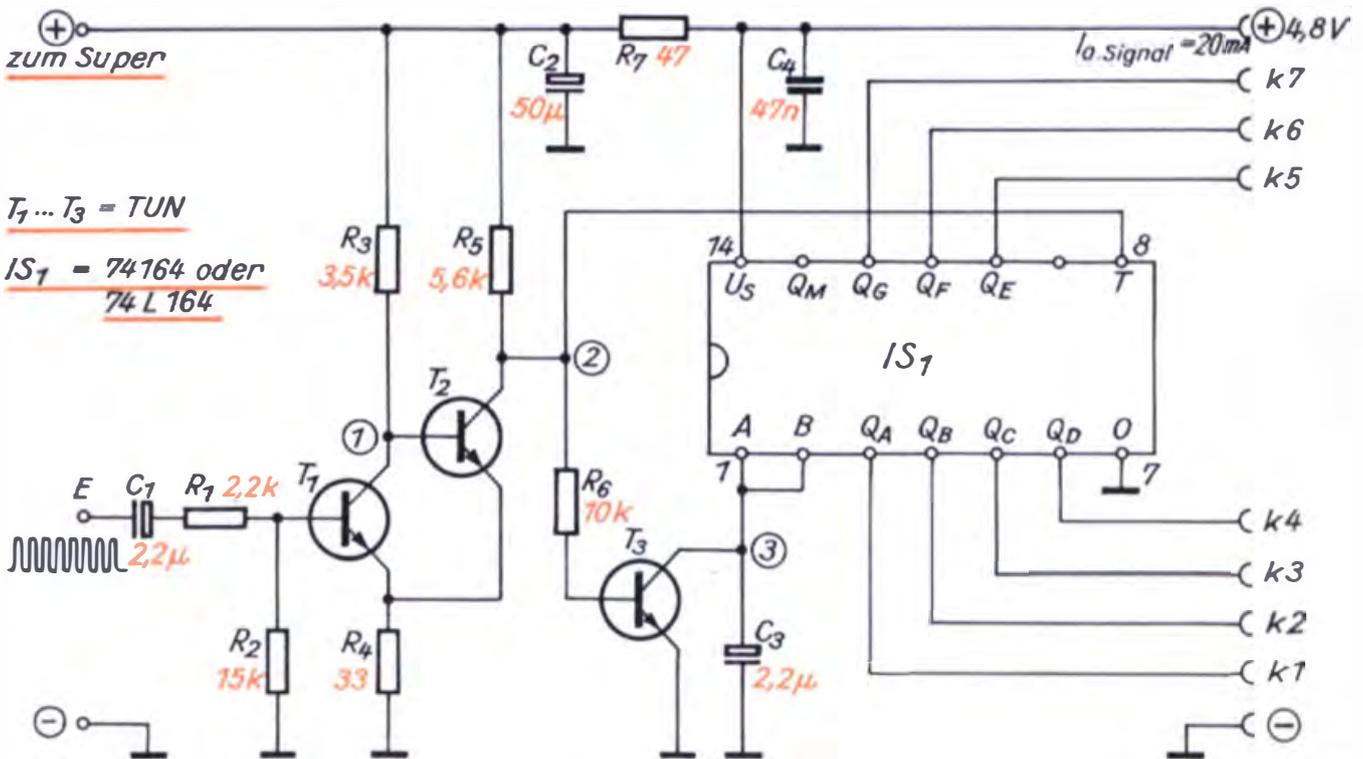
eingang T, den Rückstelleingang R und die Ausgänge $Q_A \dots Q_H$. Die Zustandstabelle läßt erkennen, daß wir den IS »74164« ebenso wie den IS »7474« zur Dekodierung verwenden können:

Informationseingänge bei t_n		Ausgang bei t_{n+1}
A	B	Q_A
H	H	H
L	H	L
H	L	L
L	L	L

Die an den Eingängen A und B liegende Information wird von der LH-Flanke des Taktimpulses durch das Register von Ausgang Q_A bis nach Q_H durchgeschoben. Daher auch die Bezeichnung *Schieberegister*.

Diesen Sachverhalt können wir am Impulsdigramm des 8-Bit-Schieberegisters ablesen (Bild 155). Nur wenn beide Informationseingänge H-Potential führen, erscheint bei der LH-Flanke des Taktimpulses auch H-Potential am Ausgang Q_A . Wir können also die Impulsformer- und Synchronisationsschaltung vom Zweikanaldekoder unverändert übernehmen (Bild 156). Da

Bild 156. Schaltbild des Siebenkanaldekoders

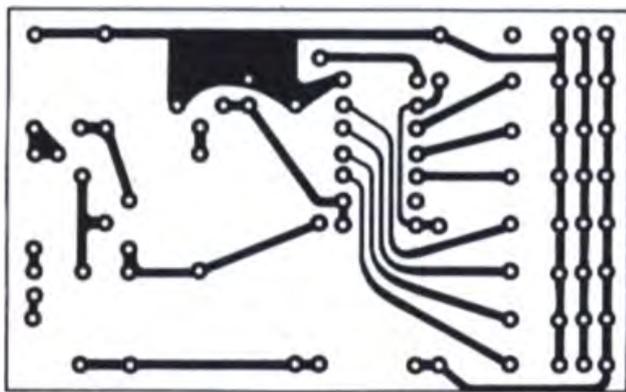


während der Pause zwischen den Impulstelegrammen am MP3 H-Potential liegt, wird dieses Potential von der LH-Flanke des ersten Taktimpulses an den Ausgang Q_A durchgeschaltet (s. auch Bild 146). Der erste Taktimpuls entlädt C_3 , damit liegt an den Eingängen A und B bei den nächsten Taktimpulsen L-Potential, so daß die zweite LH-Flanke am Ausgang Q_A die HL-Flanke des 1. Kanalimpulses und gleichzeitig am Ausgang Q_B die LH-Flanke des 2. Kanalimpulses bewirkt. In der gleichen Weise erscheint das H-Signal mit jedem folgenden Taktimpuls an den nächsten Ausgängen. Nach dem Durchlauf des Impulstelegramms lädt sich C_3 wieder auf, so daß nach der Pause wieder beim Kanal 1 »angeschoben« wird. Damit ist der Dekoder mit dem Koder im Sender synchronisiert.

Da wir die Funktion des Dekoders im Prinzip beim Zweikanaldekoder experimentell untersuchten, können wir den Siebenkanaldekoder gleich auf der Leiterplatte (Bilder 157 und 158) aufbauen. Damit wir die Dekoder im Empfängergehäuse austauschen können, erhält der Siebenkanaldekoder die gleichen Platinenabmessungen wie der Zweikanaldekoder. Das 8-Bit-Schieberegister gibt es in den beiden Ausführungsformen

- TTL mit der Typenbezeichnung »74164« und einer Stromaufnahme $I_{IS} = 40...50 \text{ mA}$ und
- TTL-L mit der Typenbezeichnung »74 L 164« und einer Stromaufnahme $I_{IS} = 4...5 \text{ mA}$.

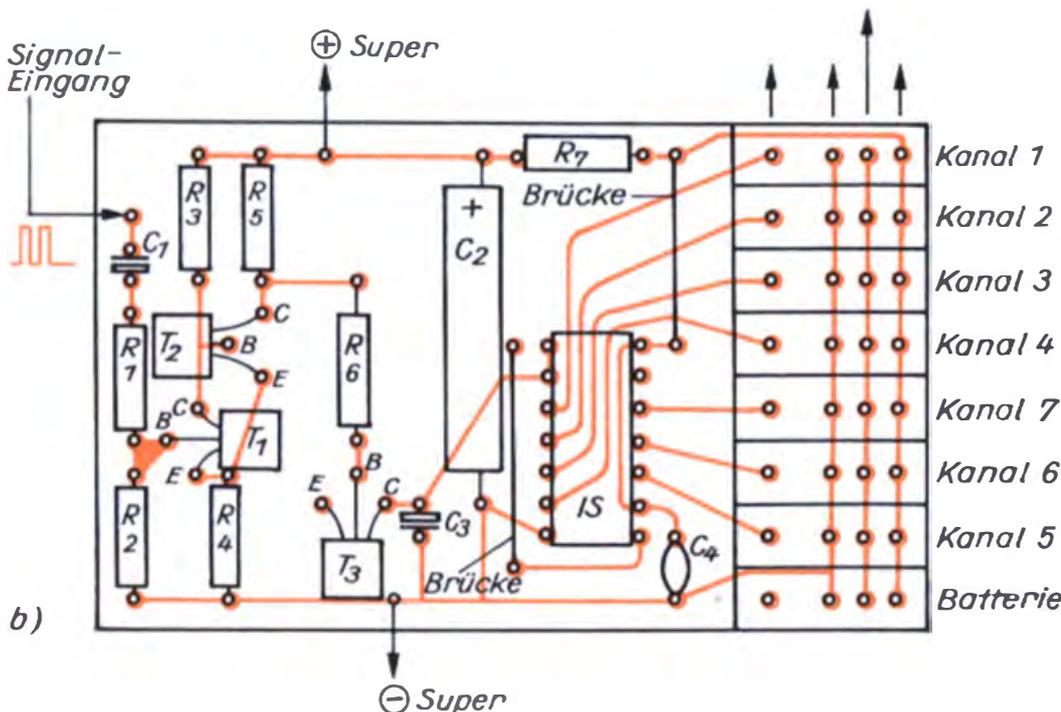
Die Ausführung L hat ihren Namen von low power (engl. = kleine Leistung) und weist eine etwa um eine Zehnerpotenz geringere Leistungsaufnahme auf. Die Ausführung L hat



M 1:1

a)

Bild 157. Siebenkanaldekoder: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan



b)

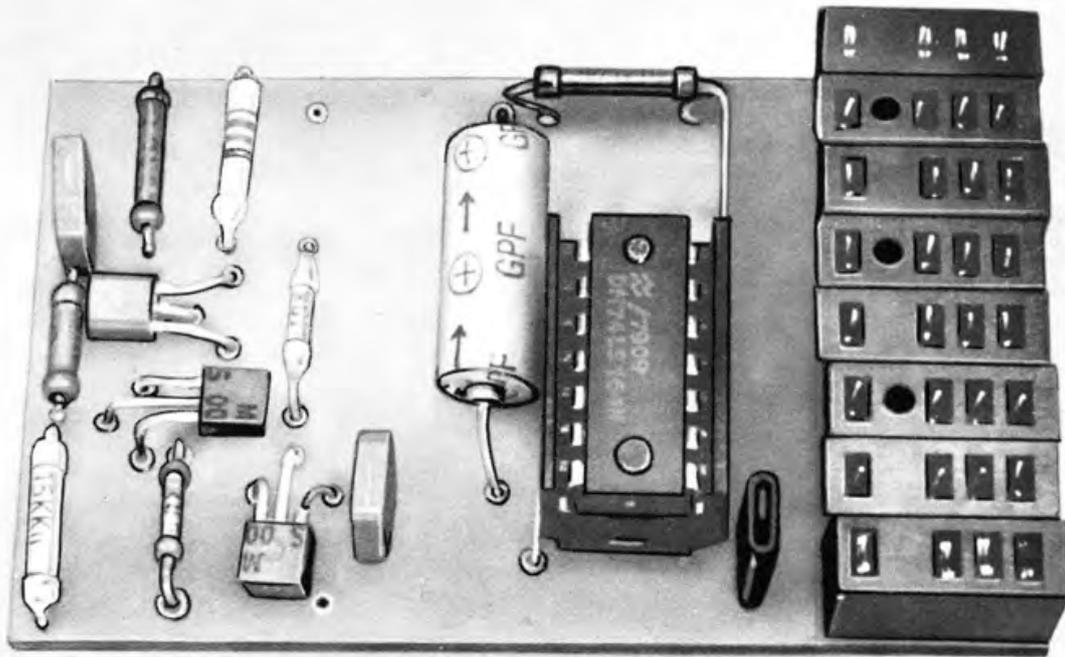


Bild 158. Musteraufbau des Siebenkanaldekoders

eine typische Impulsfrequenz von 3 MHz gegenüber der Standardausführung mit 20 MHz. Da wir in der Impulsfrequenz wesentlich unter 3 MHz bleiben, verwenden wir, falls beschaffbar, möglichst die L-Ausführung, da sich dadurch die Betriebszeit des Empfängers erheblich verlängert. Beide IS-Ausführungen haben die gleiche Anschlußbelegung, man sagt, sie sind *pinkompatibel*.

Wir verdrahten den Sender

Mit dem Koder haben wir die letzte Baugruppe für den Sender fertiggestellt. Wir können ihn nun zusammen mit den Steuermechaniken im Sender einbauen und die Baugruppen verdrahten. HF-Teil und Koder sind bereits so vorabgeglichen, so daß sich die weiteren Arbeiten wesentlich vereinfachen. Als erstes verbinden wir nach dem Bauschaltplan von Bild 159 die Batterien (NiCd 6 V/500 mAh) untereinander mit dem EIN-AUS-Schalter, dem Koder, dem HF-Teil, den Steuermechaniken und den beiden Schieberegler sowie dem Schalter für Kanal 7. Am besten eignet sich dazu verschiedenfarbige Kupferlitze. Die Farbangaben im Bild 159 sind nur Empfeh-

lungen, rot für (+) und schwarz oder blau für (-) sollten aber unbedingt eingehalten werden. Werden für die anderen Leitungen andere Farben gewählt, schreiben wir das gleich an das Schaltbild, das erleichtert dann die spätere Fehlersuche ganz erheblich.

Wir vereinfachen die Verdrahtungsarbeit, indem wir die einzulötenden Leitungen vor dem Einbau abmessen, abschneiden, die Enden abisolieren und verzinnen. Die Leitungen für den Koder müssen wir vor dem Einbau in das Sendergehäuse anlöten, oder wir bringen Lötösen auf der Oberseite der Koderleiterplatte an. An allen anderen Lötstellen können wir bei eingebauten Baugruppen mit dem LötKolben arbeiten. Für das Löten an den Anschlüssen A der beiden Schieberegler lösen wir nur die Verschraubung des Koders. Die Verdrahtung der Signalleitungen des Koders mit den Steuermechaniken, Schieberegler und dem Kanalschalter 7 führen wir nach dem Plan im Bild 160 aus. Bei der endgültigen Leitungsverlegung achten wir darauf, daß die Leitungen möglichst zusammengefaßt (mit Klebeband in Abständen umwickeln) so im Sender verlaufen, daß sich an den Schieberegler und den Trimmhebeln keine Klemm- oder Scheuerstellen bilden (Bild 161). Sind wir mit der Verdrahtung fertig, klemmen wir die beiden Batterien mit Schaumstoffstücken

gegenüber dem Rahmen der Rückwand und dem Koder fest.

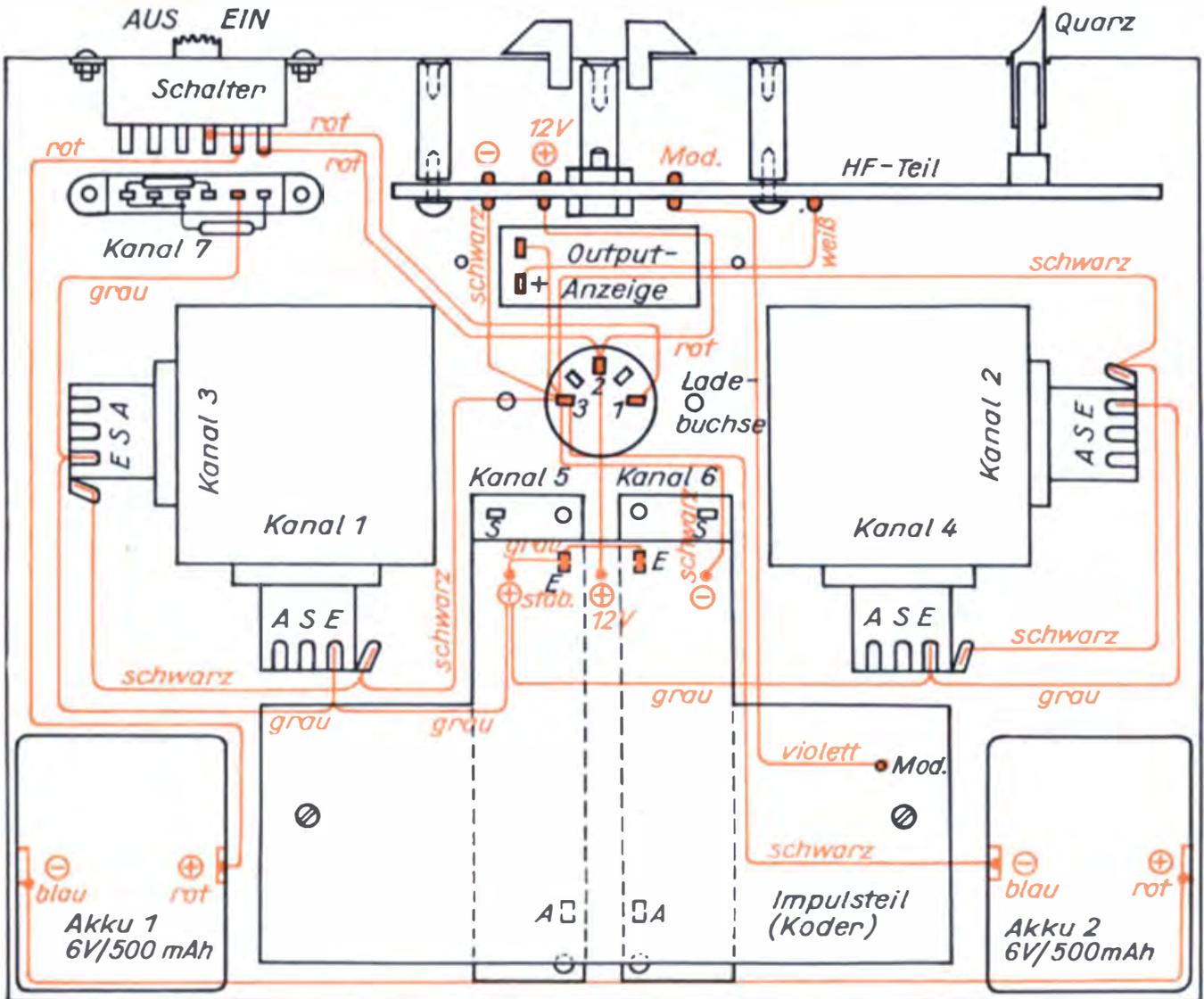
Wir gleichen den Sender ab

Nun können wir den Sender in Betrieb nehmen. Die Einstellregler und Kanalpotentiometer sind vorabgeglichen. Wir schrauben die Antenne ein und ziehen sie auf die volle Länge aus. Wichtig ist, *den Sender betreiben wir nie ohne Antenne!* Die doch recht große HF-Leistung von etwa 500mW soll über die Antenne abgestrahlt werden. Fehlt sie, so wird diese Leistung zusätzlich in der Endstufe in Wärme umgesetzt und kann

zur Zerstörung des Endstufentransistors führen. Bei der ersten Inbetriebnahme des Senders kontrollieren wir die Gesamtstromaufnahme, die nicht über 100mA liegen sollte (Quarz in den Sender einstecken!). Nun führen wir den endgültigen HF-Abgleich des Senders durch. Dafür gelten die allgemein für den Abgleich gegebenen Hinweise.

Im Abstand von 1m zum Sender steht das Feldstärkemeßgerät, das beim Einschalten bereits einen deutlichen Ausschlag anzeigt. Wir halten den Sender fest in der Hand und stellen mit dem Plastschraubenzieher zunächst die Antennenverlängerungsspule L_5 auf Resonanz ein. Dabei befindet sich das Feldstärkemeßgerät immer so weit vom Sender entfernt, daß der Zeiger etwa zur Hälfte ausschlägt! Ist die Antenne abgestimmt, legen wir den Kern von L_5

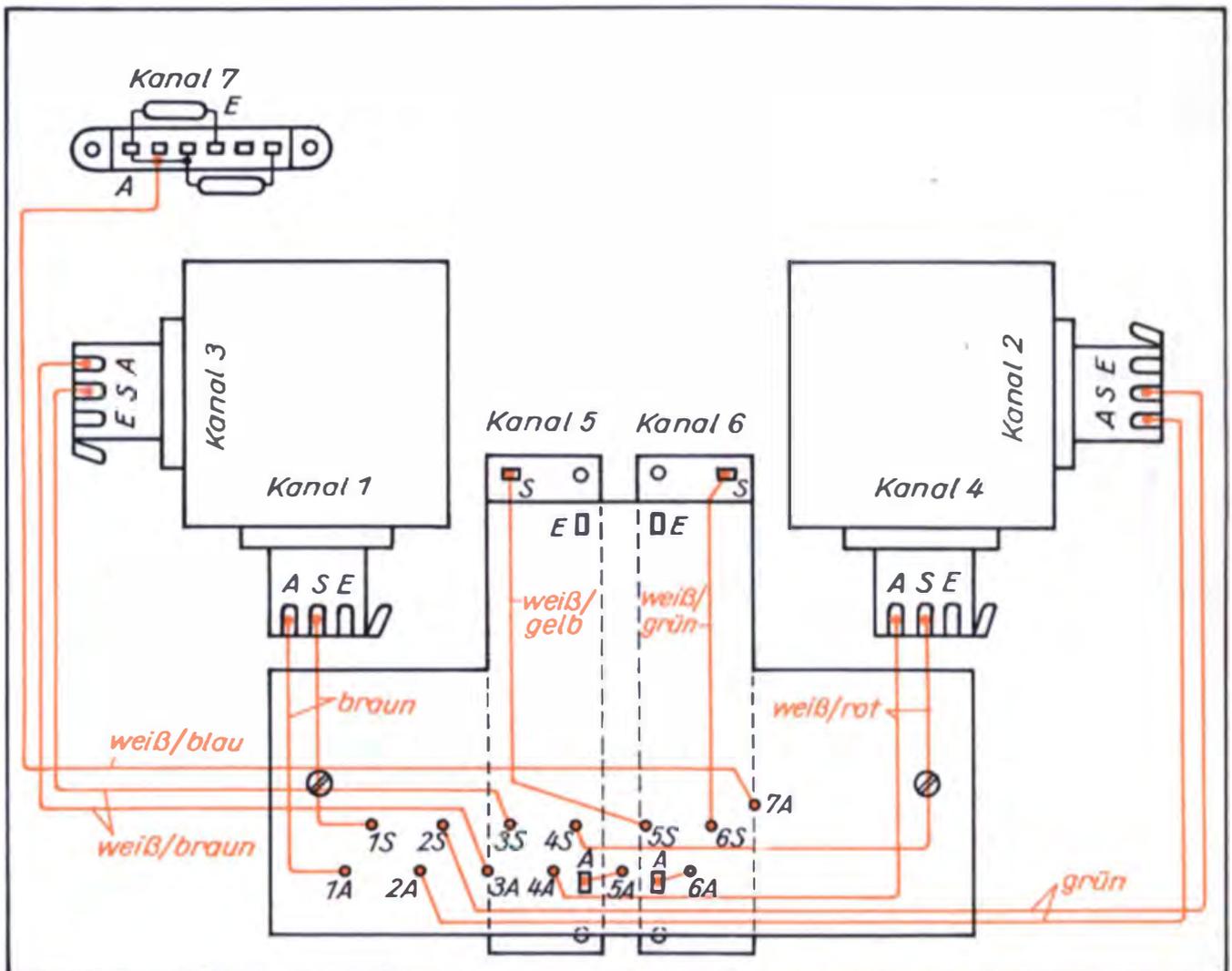
Bild 159. Sender-Bauschaltplan 1 (Verdrahtung der Betriebsspannungsleitungen)



mit einem Tropfen Wachs fest. Nun wiederholen wir den Endstufenabgleich und stellen den Sender mit L_2 und L_3 auf HF-Maximum ein. Wir halten ihn dabei selbstverständlich immer fest in der Hand. Dadurch werden Hand- und Körperkapazitäten berücksichtigt. Wir lassen uns dabei nicht davon täuschen, daß der Sender, wenn wir ihn nicht berühren, unter Umständen eine bessere HF-Abstrahlung bringt. Da wir ihn beim Fernsteuern auch in der Hand halten, müssen wir die tatsächlichen Betriebsbedingungen schon beim Abgleich berücksichtigen. Haben wir das HF-Maximum gefunden, kontrollieren wir noch einmal die Gesamtstromaufnahme, die nicht über 150 mA liegen sollte. Ist sie zu hoch, wird durch Verkleinern von C_4 und C_7 der vorgesehene Wert eingestellt. Nun betreiben wir den

Sender etwa 20 Minuten lang und stimmen dann noch einmal mit L_2 und L_3 auf HF-Maximum ab. Mit R_{11} stellen wir die HF-Anzeige am Outputmeter im Sender so ein, daß sich der Zeiger im letzten Drittel des Anzeigebereichs des Meßgerätes befindet. Wandert er in das zweite Drittel, so zeigt uns das eine verringerte HF-Leistung infolge entladener Batterie an. Wir brechen den Fernsteuerbetrieb ab und laden die Batterie nach. Den endgültigen Impulsabgleich des Koders nehmen wir dann vor, wenn uns der Empfänger zur Verfügung steht.

Bild 160. Sender-Bauschaltplan 2 (Verdrahtung der Signalleitungen)



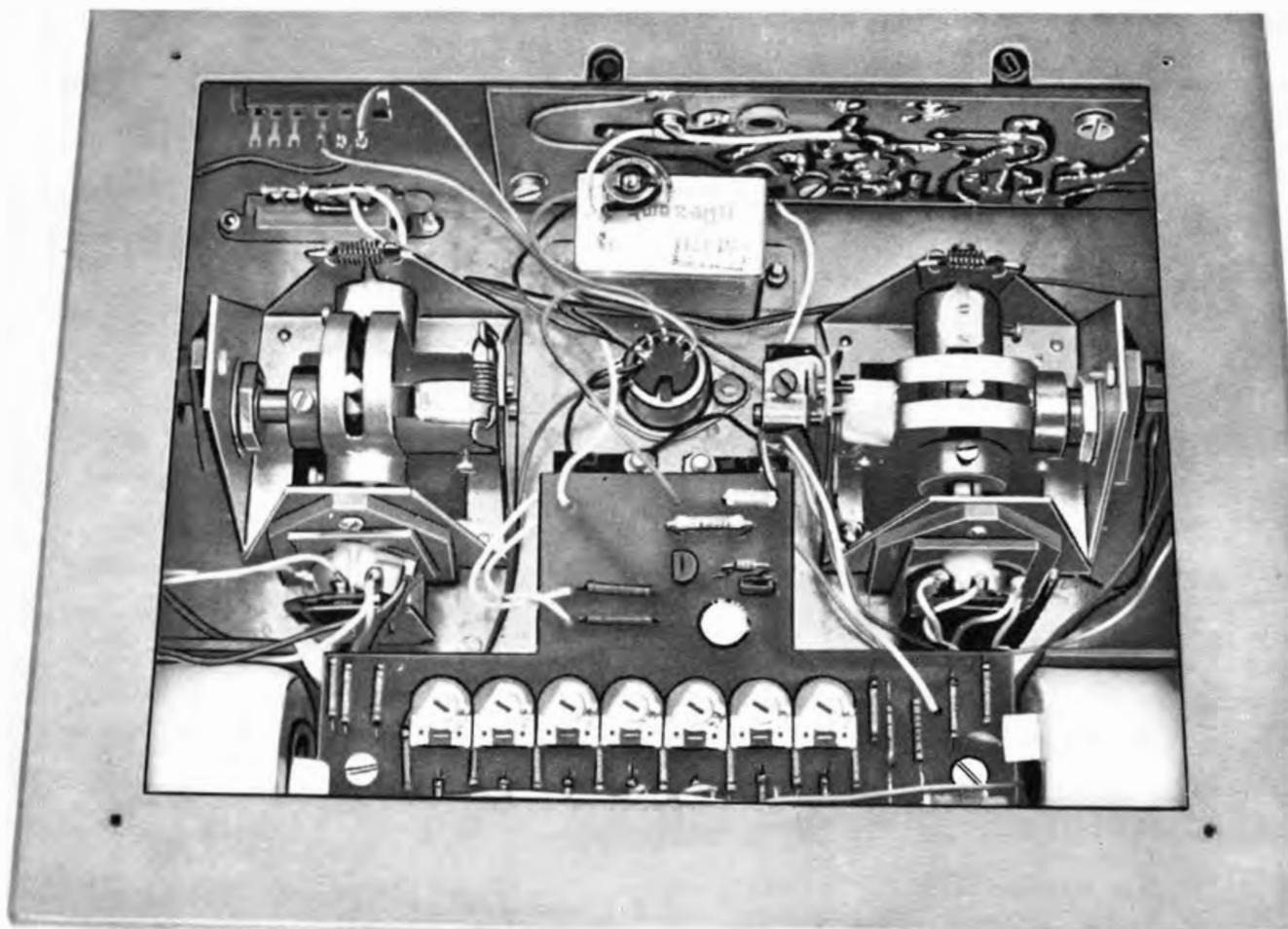


Bild 161. Innenansicht des Senders

Der Empfänger der Proportionalanlage ist ein Super

Wenn wir später unser Modell fernsteuern, werden sich bald neben interessierten Zuschauern noch andere Modellsportler einfinden. So richtig Spaß macht die Fernsteuerung auch erst in der Gemeinschaft. Da geeignete Gelände für den Modellbetrieb rar sind – ganz gleich ob Gewässer für Modellboote oder geeignete Hänge für Segelflugmodelle –, taucht bald das Problem des Parallelbetriebes von Fernsteueranlagen (z. B. auch bei Wettbewerben) auf. Wir sollten also durch entsprechenden Aufbau unserer Anlage den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Modelle ermöglichen.

Beim Pendelempfänger ist ein Parallelbetrieb aus mehreren Gründen nicht möglich, wobei der Hauptgrund die zu große Bandbreite ist. Deshalb werden wir entsprechend der international üblichen Einteilung des 27,12-MHz-Fernsteuerbandes (Tabelle 6 im Anhang) einen Empfänger mit einer HF-Bandbreite von $b = 10 \text{ kHz}$ aufbauen. Wir erkennen, daß bequem zwölf Fernsteuersender parallel betrieben werden können und dabei noch ein genügend großer Abstand zwischen den jeweiligen Seitenbändern vorhanden ist. Bedingt durch die niedrige Grundfrequenz der Impulsfolge im Sender, beträgt die NF-Bandbreite des Senders etwa $3,5 \text{ kHz}$. Wir kommen also mit einer HF-Bandbreite (oberes plus unteres Seitenband) von 7 kHz aus. Mit unseren Mitteln und bei Verwendung der üblichen Schwingquarze können wir keine geringere Empfängerbandbreite als 7 kHz (entspricht mit Sicherheitsabstand $b_{\text{HF}} = 10 \text{ kHz}$) erreichen. In der Praxis werden Sender und Empfänger dann sowieso etwas größere Bandbreiten als hier angegeben haben.

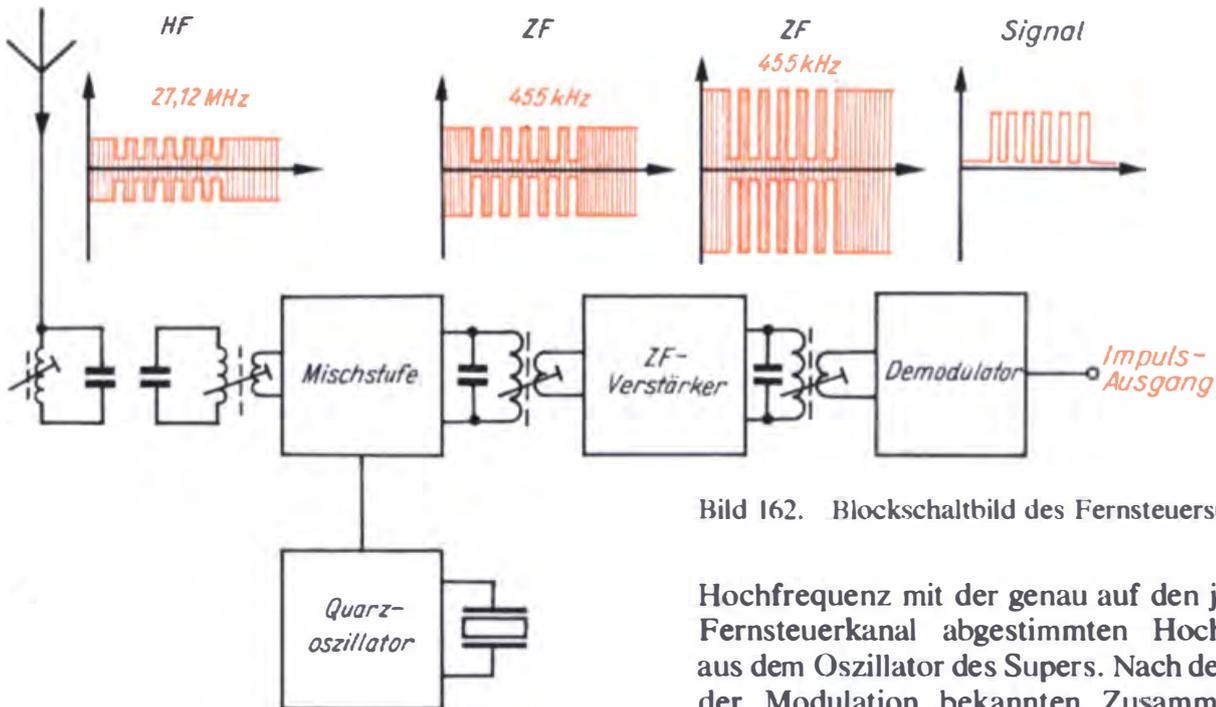


Bild 162. Blockschaltbild des Fernsteuersupers

Daneben hat der Empfänger für die Digitalanlage auch die Forderungen nach ausreichender Empfindlichkeit, Einfachheit und Robustheit zu erfüllen. Um dem zu entsprechen, verwenden wir als Empfänger den *Überlagerungsempfänger*, auch als *Super* bezeichnet.

Wie der Super funktioniert

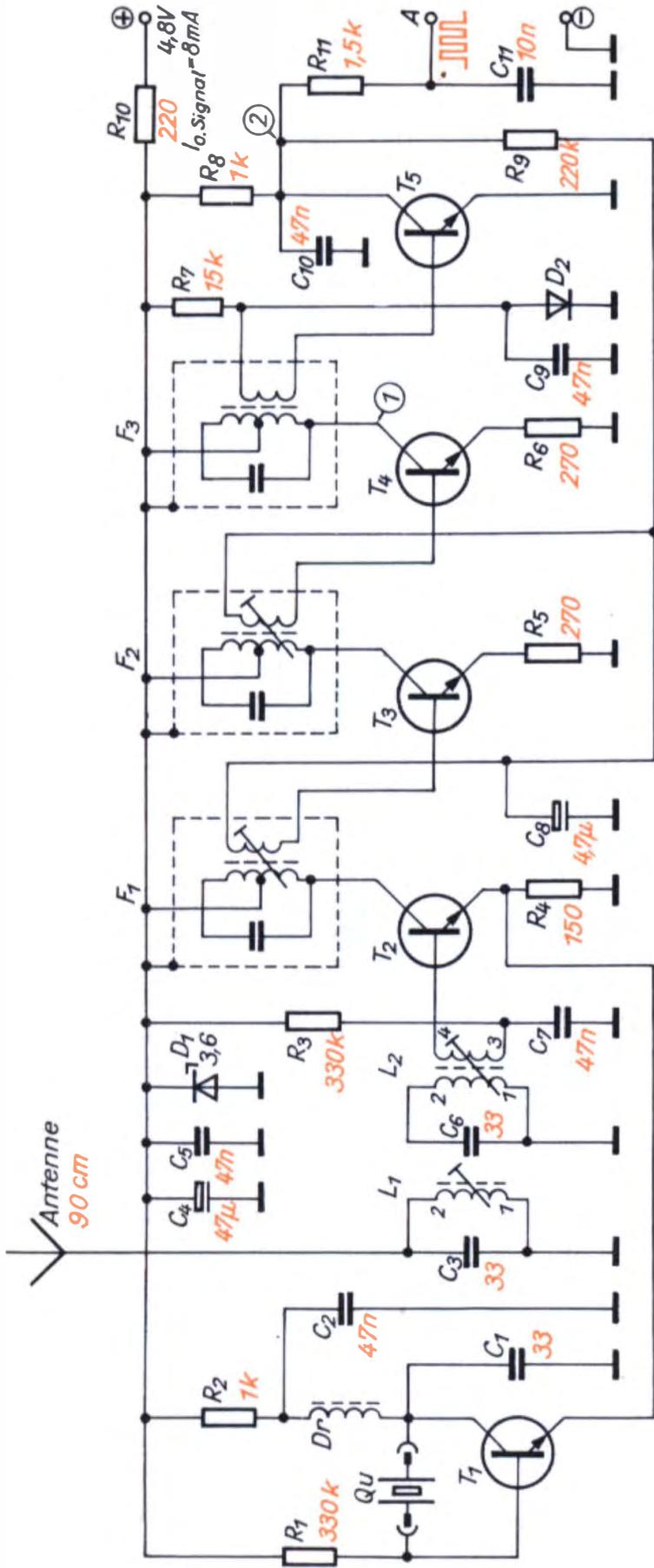
Die prinzipielle Wirkungsweise des Supers verdeutlichen wir uns zunächst am Blockschaltbild (Bild 162). Das HF-Signal gelangt von der Antenne in den auf 27,12 MHz abgestimmten Eingangskreis, der eine erste HF-Selektion durchführt. Da es schwierig ist, die Hochfrequenz (27,12 MHz) in weiteren Verstärkerstufen mit der geforderten Bandbreite von $b < 7$ kHz in ausreichendem Maße zu verstärken, bedienen wir uns des Überlagerungsprinzips, das auch in Rundfunkempfängern angewendet wird. Durch Anwendung des Überlagerungsprinzips erhalten wir aus der Hochfrequenz eine wesentlich niedrigere konstante Frequenz, die als *Zwischenfrequenz* (ZF) bezeichnet wird. Diese können wir mit relativ einfachen, aber hochselektiven Verstärkerstufen unter Einhaltung der Bandbreite genügend verstärken.

Die Zwischenfrequenz erzeugen wir durch Überlagerung (hier als *Mischung* bezeichnet) der

Hochfrequenz mit der genau auf den jeweiligen Fernsteuerkanal abgestimmten Hochfrequenz aus dem Oszillator des Supers. Nach den uns von der Modulation bekannten Zusammenhängen entstehen bei der Mischung die Frequenzen $f_{HF} - f_{Osz} = f_{ZF1}$ und $f_{HF} + f_{Osz} = f_{ZF2}$. Da der ZF-Verstärker mit Schwingkreiskopplung ausgerüstet ist, kann er nur eine der beiden Zwischenfrequenzen optimal verstärken. Er wird auf f_{ZF1} abgestimmt. Da wir die handelsüblichen Bauelemente verwenden, legen wir unseren ZF-Verstärker für $f_{ZF} = 455$ kHz aus. Das bedeutet, für jeden Fernsteuerkanal, auf dem wir senden wollen, ist zum Senderquarz ein entsprechender Empfängerquarz erforderlich, der eine um 455 kHz niedrigere Schwingfrequenz hat (s. auch Tabelle 6). Vom zweistufigen ZF-Verstärker wird das Signal mit geringer Bandbreite ausreichend verstärkt und anschließend demoduliert. Der nachfolgende Impulsverstärker verstärkt die Impulsfolge so weit, daß mit ihr der Dekoder angesteuert werden kann. Betrachten wir nun die Funktion der einzelnen Baustufen des Supers.

Was wir von der Antenne wissen müssen

Nicht zu Unrecht gilt bei den Funkamateuren die Regel: Eine gute Antenne ist der beste HF-Verstärker. Wir können also mit der richtigen Antennenabstimmung und -verlegung die Reichweite und Betriebssicherheit der Fernsteueranlage ganz wesentlich beeinflussen. Allgemein

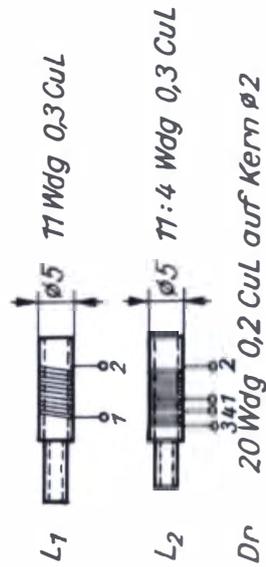


Qu = Quarz im 27,12 MHz -Band
je nach Kanal

T₁...T₅ = SF115, SF225 o.ä.

D₁ = Z-Diode 3,6 V oder
4 x DUS in Reihe / Durchlaß
geschaltet

D₂ = DUS



F₁ = LMC 4100 A
F₂ = LMC 4101 A
F₃ = LMC 4102 A
s.a. Tabelle

Bild 163. Schaltbild des Transistorsupers

üblich sind Antennenlängen von 0,9...1 m. Da das Eingangsfiler auf diese Länge abgestimmt ist, sollten wir sie auf keinen Fall verändern. Für die Empfangsantenne gelten ähnliche Überlegungen wie für die Sendeantenne. Eine senkrecht angebrachte Empfangsantenne wird daher immer die besten Ergebnisse bringen. Praktische Ratschläge zur Antennenkonstruktion werden im Kapitel über den Empfängereinbau in das Modell gegeben.

Wozu zwei Schwingkreise im Eingang des Supers?

Zunächst scheint es unerklärlich, daß zwei, noch dazu räumlich und elektrisch getrennte Schwingkreise im Eingang des Supers vorhanden sind (Bild 163). Die beiden Schwingkreisspulen sind etwa 10mm voneinander entfernt und nur über ihr gemeinsames Magnetfeld lose miteinander gekoppelt. Dadurch erreicht man eine recht gute Selektion der Empfangsfrequenz. Wir wissen, daß die Zwischenfrequenz nach der Gleichung $f_{ZF} = f_{HF1} - f_{Osz}$ entsteht. Nun erhalten wir aber aus $f_{ZF} = f_{Osz} - f_{HF2}$ die gleiche Zwischenfrequenz. Da f_{HF2} auf der Frequenzskala zu f_{HF1} (bezogen auf f_{Osz}) spiegelbildlich liegt, wird f_{HF2} als *Spiegelfrequenz* bezeichnet (Bild 164). Hochfrequenzsignale mit der Spiegelfrequenz würden daher in gleichem Maße wie die Sender-HF vom Super verstärkt und könnten somit zu erheblichen Störungen führen. Durch den hochselektiven Eingangskreis werden aber nur die im Fernsteuerband von 26,957...27,283 MHz liegenden HF-Signale durchgelassen und alle anderen Frequenzen unterdrückt. Der Eingangskreis filtert praktisch die gewünschten Frequenzen heraus. Wir bezeichnen daher Schwingkreise, die diese Eigenschaft haben, als *Eingangsfiler*.

Bild 164. Spiegelfrequenz



Die Frequenzen werden gemischt

Der Transistor T₂ verstärkt das HF-Signal und hat gleichzeitig die Aufgabe, durch Mischung nach $f_{ZF} = f_{HF} - f_{Osz}$ die Zwischenfrequenz zu erzeugen. Dazu benötigen wir aber noch eine zweite Frequenz (f_{Osz}), die wir mit der uns bereits aus dem Sender bekannten Oszillatorschaltung erzeugen. Durch die *Quarzstabilisierung* ist die geforderte Frequenzkonstanz auch unter extremen Bedingungen gesichert. Außerdem können wir bei Verwendung von Steckquarzen leicht den Fernsteuerkanal wechseln. Da der Empfängerquarz jeweils um die Zwischenfrequenz niedriger als der Senderquarz schwingt, dürfen wir beide Quarze nicht verwechseln. Die eigentliche Mischung von f_{HF} und f_{Osz} erfolgt im Emitterkreis des Mischtransistors T₂, der mit T₁ einen gemeinsamen Emitterwiderstand besitzt. Die Mischung kann nur an einer gekrümmten Kennlinie erfolgen. Da die von uns verwendeten Transistoren relativ stark gekrümmte Steuerkennlinien besitzen, müssen wir kurz auf die dadurch entstehenden unerwünschten Nebenerscheinungen eingehen.

Wird die vom Sender abgestrahlte Hochfrequenz von der Modulationsfrequenz eines Störsenders amplitudenmoduliert, so entsteht eine *Kreuzmodulation*. Wir könnten das Entstehen der Kreuzmodulation dadurch beeinflussen, daß wir den Arbeitspunkt von T₂ in einen möglichst wenig gekrümmten Kennlinienteil legen. Er muß aber andererseits so liegen, daß T₂ noch die erforderliche HF-Verstärkung aufbringt und optimales Mischverhalten zeigt. Infolge der exemplarbedingten Streuungen der Transistordaten müssen wir die richtige Lage des Arbeitspunktes durch Variation von R₄ und eventuell auch R₃ experimentell ermitteln. Kreuzmodulationserscheinungen lassen sich im praktischen Betrieb aber nie ganz vermeiden.

Die Zwischenfrequenz wird verstärkt

Aus dem Frequenzgemisch müssen wir nun die gewünschte Frequenz (die Zwischenfrequenz) aussieben und in den nachgeschalteten Verstärkerstufen maximal verstärken. Die erste Siebung der Zwischenfrequenz mit 455 kHz

nehmen wir mit dem Arbeitswiderstand von T_2 vor, der als Schwingkreis (Bandfilter) ausgebildet ist. Das Bandfilter (wir verwenden im Handel erhältliche Filter von Taschensupern) ist so dimensioniert, daß es das gewünschte Frequenzband von $f_{ZF} = (455 \pm 5)$ kHz durchläßt. Wir wissen, daß die Bandbreite des ZF-Verstärkers möglichst zwischen 5 und 10 kHz liegen soll. Sie wird aber im wesentlichen durch die Filter bestimmt. Wir müssen diese daher beim Abgleich auf maximale Verstärkung und auf die gewünschte Bandbreite einstellen. Die Zwischenfrequenz wird von F_1 ein erstes Mal gefiltert und in der nachfolgenden Stufe mit T_3 verstärkt. Um den hohen Resonanzwiderstand des Schwingkreises im Filter an den relativ niedrigen Eingangswiderstand des folgenden Transistors anzupassen, wird die Zwischenfrequenz über eine Koppelwicklung ausgekoppelt. Die auf die Mischstufe folgenden Verstärkerstufen mit T_3 und T_4 haben wiederum als Arbeitswiderstand im Kollektorkreis je ein Bandfilter. Diese dreifache Selektion hat sich als optimale Lösung erwiesen. Die günstigste Lage der Arbeitspunkte von T_3 und T_4 ermitteln wir durch Variation der Emittterwiderstände R_5 und R_6 und gleichen damit den ZF-Verstärker auf maximale Verstärkung ab. Der Transistor T_5 hat zwei Funktionen zu erfüllen. Er soll verstärken und die Zwischenfrequenz gleichrichten bzw. demodulieren. Sein Arbeitspunkt wird durch den Spannungsteiler R_7/D_2 eingestellt. Dabei wirkt die Schleusenspannung der Diode gleichzeitig stabilisierend (ähnlich der Z-Diode) und begrenzt zu große ZF-Signale in unmittelbarer Sendernähe.

Die Regelung des Supers

Der Fernsteuerempfänger soll innerhalb der Reichweite des Senders ein Signal mit konstanter Amplitude abgeben. Das ist problematisch, da die Empfängerantenne in unmittelbarer Sendernähe eine HF-Feldstärke von beispielsweise $0,5$ V/m aufnimmt und an der Reichweitengrenze die Feldstärke bei etwa $5 \mu\text{V/m}$ liegt. Das heißt, bei einer um den Faktor 10^5 schwankenden Eingangsspannung soll die Signalspannung immer die gleiche Größe haben. Einen ersten Ausgleich der großen Spannungsdifferenz erzielen wir

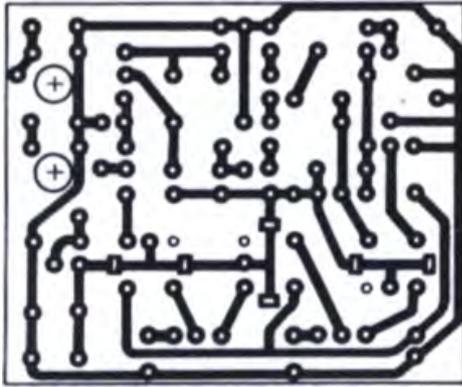
durch die Diode D_2 . Überschreitet das ZF-Signal den Wert der Schleusenspannung von D_2 in der Größenordnung von $1,5$ V, so wird die Signalamplitude begrenzt (abgeschnitten). Diese Begrenzerwirkung reicht bei weitem nicht aus, um eine konstante Signalamplitude am Ausgang zu gewährleisten. Wir müssen also die Verstärkerwirkung der ZF-Transistoren in Abhängigkeit von der Empfangsfeldstärke steuern. In Sendernähe soll die Verstärkung gering sein, bei schwach einfallendem Sender (Modell ist weit entfernt) dagegen maximal. Die Einstellung des Verstärkungsgrades der ZF-Stufen erfolgt automatisch und wird als *Regelung* bezeichnet.

Im Transistor T_5 wird das ZF-Signal an der Basis-Emitter-Strecke gleichgerichtet. Es tritt am Kollektor verstärkt auf und wird vom nachgeschalteten Impulsverstärker weiter verstärkt. Der Kondensator C_{10} leitet noch vorhandene ZF-Reste zur Masse ab. Gleichzeitig wird die am Kollektor T_5 anliegende gleichgerichtete ZF-Spannung (Impulsfolge) durch das RC-Glied R_9/C_8 weiter geglättet und den Transistoren T_3 und T_4 als Basisvorspannung zugeführt. Bei einer hohen Empfangsfeldstärke verstärken die Eingangs- und ZF-Stufen maximal. Das Potential am Kollektor von T_5 wird negativer und verschiebt die Arbeitspunkte von T_3 und T_4 zu negativerem Potential hin, d. h. in Bereiche mit geringerer Verstärkerwirkung, denn es fließt ein kleinerer Basisstrom. Diese automatische Vorspannungsregelung (AVR) hält über weite Entfernungsbereiche die Signalspannung am Ausgang des Empfängers annähernd konstant. Nur in unmittelbarer Sendernähe (< 1 m) kann es noch zu Übersteuerungserscheinungen kommen (unregelmäßiges Arbeiten der Servos).

Die weitere Verstärkung des demodulierten Signals übernimmt der *Impulsverstärker* auf der Dekoderplatine.

Wir bauen den Transistorsuper

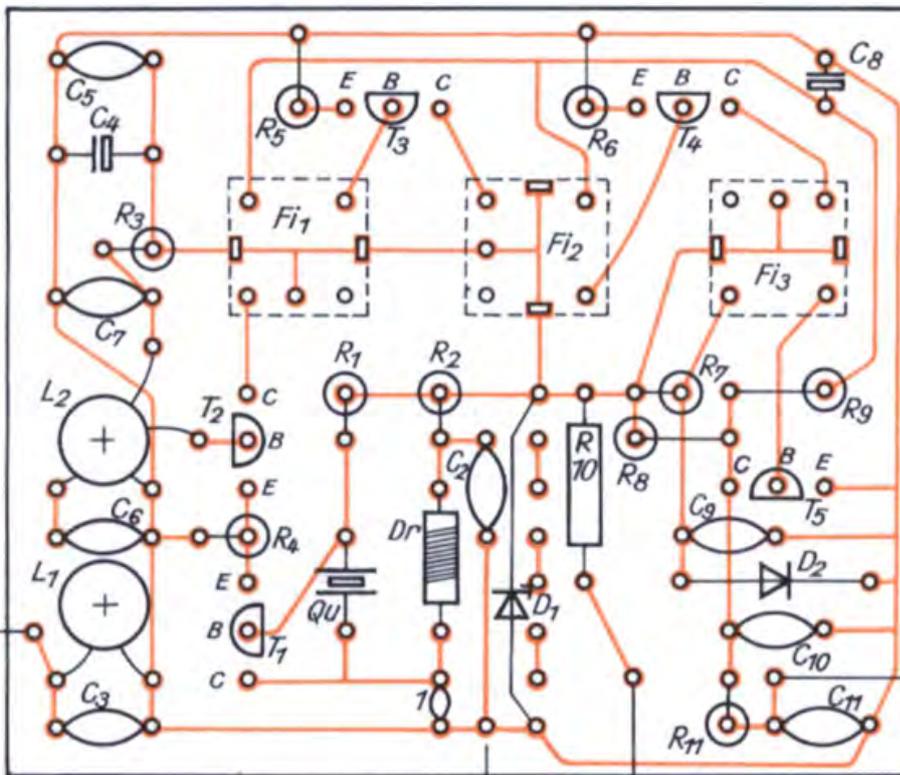
Die Abmessungen der Leiterplatte des Transistorsupers richten sich nach denen der Dekoderleiterplatte, mit der er zusammen in ein



M 1:1

Gehäuse eingebaut wird (Bilder 165 und 166). Außerdem soll der Transistorsuper gegen den IS-Super austauschbar sein. Die Konstruktion des Transistorsupers ist so ausgelegt, daß auch andere Bauelementeformen verwendbar sind. So können im Prinzip auch TUN-Transistoren und andere Filtertypen (von Taschensupern) eingebaut werden. Für die Filter wurde entsprechend Platz vorgesehen. Zur Orientierung sind die Filterdaten in Tabelle 7 im Anhang an-

a)

M 2:1
(40 × 47) mm

Ant.

Signalausgang

⊖

⊕ 4,8V

b)

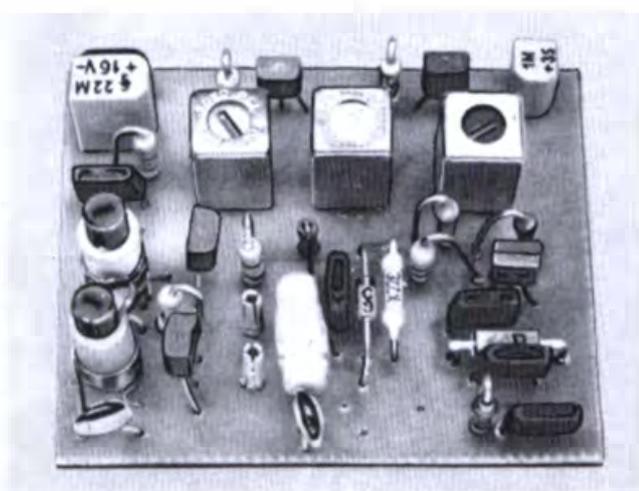


Bild 165. Transistorsuper: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan

Bild 166. Musteraufbau des Transistorsupers

gegeben. Unter Umständen müssen wir bei Verwendung anderer Filter die Leitungsführung auf der Leiterplatte entsprechend ändern. In die Leiterplatte passen wir als erstes die Bandfilter ein (Bohrungen richten sich nach den Filteranschlüssen!). Danach prüfen wir mit Voltmeter und Batterie, ob alle ZF-Spulen Durchgang haben. Nun wickeln wir die Spulen L_1 und L_2 und löten sie ein. Wichtig ist, daß wir alle Bauele-

mente (Widerstände, Kondensatoren und besonders Transistoren) vor dem Einbau prüfen bzw. ausmessen. Die Transistoren sollen eine Stromverstärkung von $B > 100$ haben. Es sind prinzipiell alle Si-HF-Typen mit geringer Kollektor-Basis-Kapazität verwendbar. Nun bauen wir den Oszillator auf. Für Dr_1 wird eine fertige Drossel (20 Wdg., 0,2 mm CuL auf 2 mm Kern gewickelt) verwendet, für den Quarz löten wir zwei Buchsen oder eine Fassung. Danach löten wir die Transistoren T_1, T_3, \dots, T_5 ein. Die bestückte Leiterplatte vergleichen wir nun noch einmal Bauteil für Bauteil mit Bild 181 und kontrollieren alle Lötstellen und Leiterbahnen (kalte Lötstellen und unerlaubte Brücken).

Wir gleichen den Super ab

Von dem sorgfältigen Abgleich des Supers hängt ganz wesentlich die Reichweite der Fernsteueranlage ab. Die nachfolgend beschriebenen Arbeitsschritte führen wir daher mit großer Sorgfalt in der angegebenen Reihenfolge aus. Der Abgleich erfolgt wieder auf einem Holztisch, auf und an dem sich keine Metallgegenstände (LötKolben, Zangen usw.) befinden.

Abgleich der Vorkreise

Es werden die Transistoren $T_1 \dots T_5$ und die 90 cm lange Antenne eingelötet. Wir schalten den Sender (mit Antenne) ein und stellen ihn in 2...3 m Entfernung auf. Der Super muß nun einen Strom von etwa 8 mA aufnehmen. Zwischen MP2 und Masse schalten wir das Vielfachmeßgerät (Bereich 10 V). Durch Eindrehen der Kerne von L_1 und L_2 führen wir den Vorabgleich durch (Ausschlag am Meßgerät auf Minimum). Steht uns ein Oszillograph zur Verfügung, schalten wir ihn an A an und stellen auf maximale Signalamplitude ein (Bild 167).

Abgleich des ZF-Verstärkers

Den Abgleich des ZF-Verstärkers führen wir mit dem Vielfachmesser (Bereich 10 V) am MP2 oder dem Oszillographen an A durch. Die Bandfilter sind bereits vorabgeglichen; zum endgültigen Abgleich sind also meist nur ein oder zwei Umdrehungen des Kerns erforderlich. Durch wechselseitigen Abgleich von $F_1 \dots F_3$ stellen wir

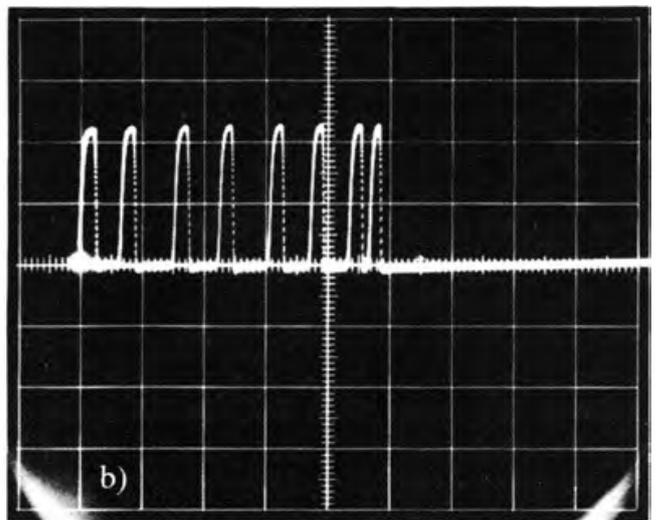
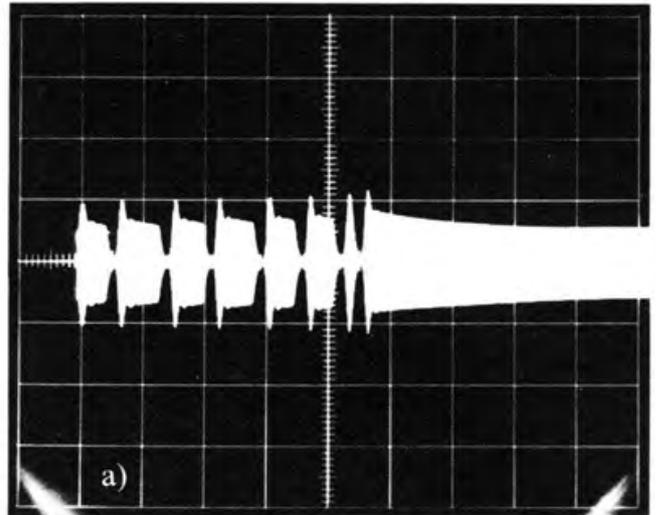


Bild 167. Oszillogramme des Transistorsupers (Zeitbasis: 2 ms/cm, Ablenkempfindlichkeit: 1 V/cm): a) ZF-Spannung an MP1, b) demodulierte ZF-Spannung an A

das Ausgangssignal auf einwandfreie Impulsform und maximale Amplitude (Oszillograph) bzw. am Vielfachmesser auf Minimum ($\approx 0,55$ V) ein.

Endabgleich des Supers

Den endgültigen Abgleich führen wir am besten mit einem Quarzpaar für Kanal 17 oder 14 durch. Der Vielfachmesser bleibt an MP2 angeschlossen. Wir schieben die Senderantenne halbein und vergrößern den Abstand zwischen Sender und Empfänger auf etwa 30 m. Dabei wiederholen wir wechselweise den Abgleich von L_1, L_2, F_1, F_2, F_3 und stellen wieder auf Minimum am Vielfach-

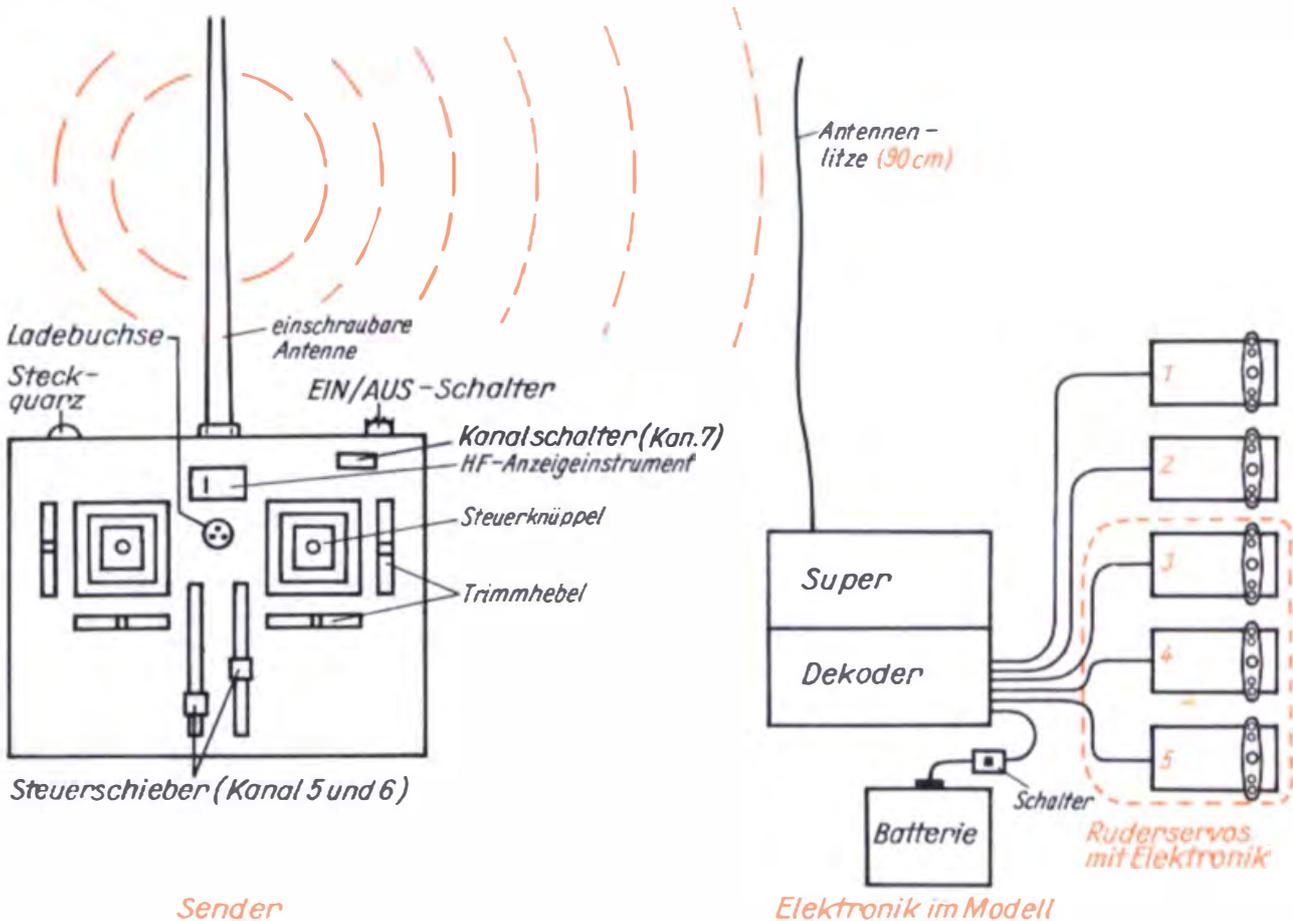
messer ein, bis sich keine Verbesserung mehr erzielen läßt. Danach kontrollieren wir mit den verfügbaren Quarzpärchen, daß jeweils gleiche Ergebnisse erzielt werden (evtl. Abgleich etwas korrigieren), und führen abschließend einen Reichweitetest durch, den wir nach Aufbau der kompletten Anlage mit einem Servo abwechselnd an allen Kanalausgängen wiederholen. Zur Kontrolle der Funktion des Fernsteuersupers und als Hilfe bei der Fehlersuche können die Oszillogramme von Bild 167 verwendet werden.

Der Super ist die letzte Baugruppe, die wir für die Proportionalfernsteueranlage benötigen. Ehe wir mit dem Zusammenbau beginnen, schalten wir die gesamte Empfängerelektronik für Zweikanalbetrieb zusammen und führen eine Funktionskontrolle (Bild 168) durch. Verläuft dieser Test zufriedenstellend, fertigen wir ein Empfängergehäuse aus Polystyrol.

Bild 168. Funktionsgruppen der digitalen Fernsteueranlage

Wir bauen den Fernsteuerempfänger

Wir stellen das Gehäuse »nach Maß« her, so daß Super- und Dekoderteil sich leicht ein- und ausbauen lassen, aber nicht klappern (Bild 169). Ober- und Unterseite des Supers werden mit Schaumstoff gepolstert. Für die Antenne und den Quarz sehen wir entsprechende Öffnungen vor. Auf der Innenseite machen wir in die Antennenlitze einen Knoten, damit die auf Zug beanspruchte Antenne nicht an der Lötstelle ausreißt. Alle anderen Anschlüsse führen wir über die Buchsen. Für die Verbindung von Super und Dekoder reichen kurze Litzen (40...50 mm). Das Gehäuse umwickeln wir zur Sicherung mit zwei Streifen Selbstklebeband (Bild 170). Mit den Gehäusemaßen (69 mm × 32 mm × 44 mm), der Masse 54 g (Gehäuse allein 23 g), seinem Aussehen (falls wir sauber gearbeitet haben) und seiner Leistungsfähigkeit brauchen wir einen Vergleich unseres Empfängers mit Industrieempfängern durchaus nicht scheuen. Mit dem Super haben wir nun die letzte Baugruppe für



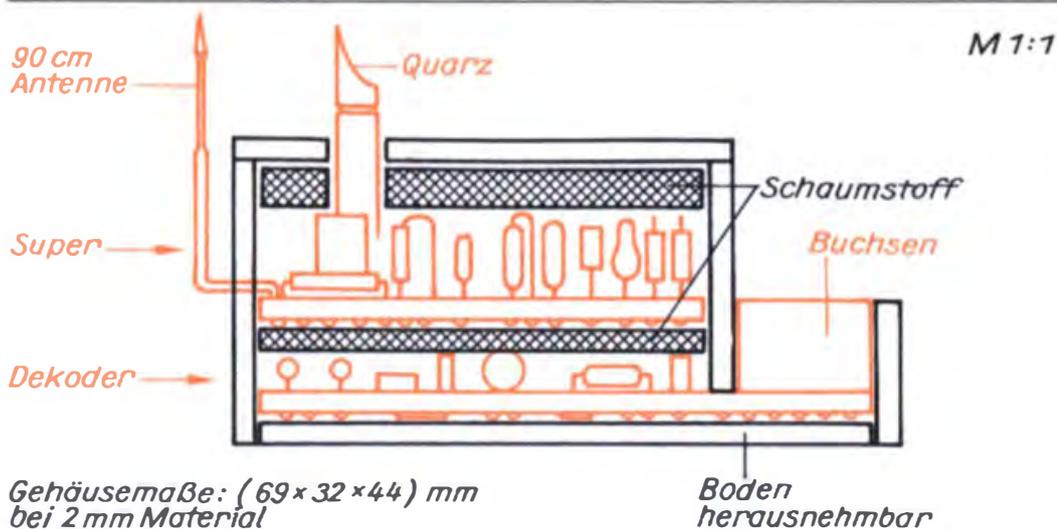
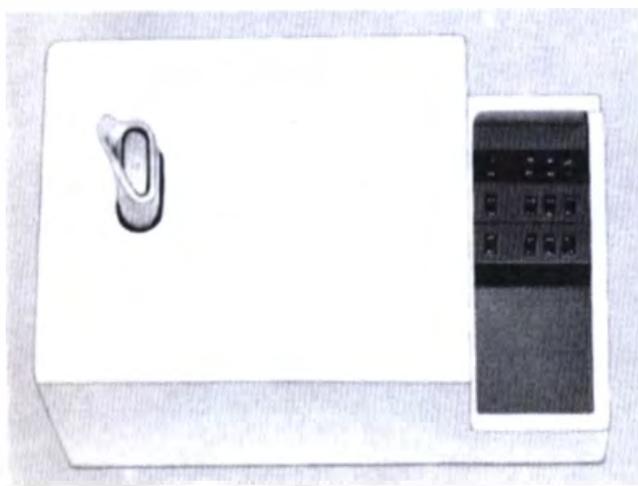


Bild 169. Einbau des Empfängers im Gehäuse

unsere Fernsteueranlage fertiggestellt. Nach dem endgültigen Impulsabgleich des Senders können wir nun unser erstes Modell über Funk fernsteuern. Der endgültige Impulsabgleich erfolgt in den gleichen Arbeitsschritten wie beim Vorabgleich. Steht uns kein geeichtes Industrieservo als Eichnormal zur Verfügung, stellen wir die Kanalstufe im Koder wie beschrieben ein. Mit dieser Kanalstufe gleichen wir ein Servo genau auf Mittelstellung und auf gleichen Stellweg nach beiden Seiten ab. Dieses Servo ist dann unser *Eichservo*. Die genaue Mittelstellung der Steuerknüppel stellen wir durch Drehen der Potentiometerachse ein. Dazu lösen wir die Feststellschrauben am Kulissenbügel und an der Kreuzwelle und können dann mit einer schmalen Zange die Potentiometerachse fassen und dre-

Bild 170. Musteraufbau des Empfängers



hen. Den Stellweg stellen wir an den Einstellreglern in den Basisleitungen der Kanalstufentransistoren ein. Da sich Stellweg und Mittelstellung gegenseitig beeinflussen, kann es sein, daß wir die Abgleichschritte mehrmals wiederholen müssen.

Wir bauen den IS-Super

Wie der IS-Super funktioniert

So wie wir die Vorteile der integrierten Schaltungen bei der Dekodierung nutzten, liegt es nahe, dies auch für den HF-Empfang zu tun. Von der Halbleiterindustrie wurden verschiedene Varianten von Empfänger-IS vor allem für kommerzielle Rundfunkgeräte entwickelt.

Wir wählen für unsere Anwendung einen IS aus, der den gesamten HF-Teil eines AM-Empfängers enthält. Durch *Außenbeschaltung* können wir ihn dann für die an einen Fernsteuerempfänger gestellten Bedingungen anpassen. Es handelt sich um den IS A 244, der gegen den ISTCA 440 austauschbar ist. Der IS enthält die uns bereits bekannten Funktionsstufen (Bild 171). Durch die Integration war es möglich, sogar noch weitere Raffinessen einzubauen, z. B. die geregelte HF-Stufe, die interne Stabilisierung, eine gesonderte Regelstufe und eine 4. ZF-Stufe. Dadurch erzielen wir gegenüber dem Transistorsuper einige wesentliche Verbesserungen:

- gesteigerte Großsignalfestigkeit (besonders in Sendernähe wichtig),
- gute Regeleigenschaften (d. h. großer Regelbereich),
- gute Störfestigkeit,
- interne Spannungsstabilisierung,
- großer Speisespannungsbereich (4,5... 15 V),
- einfache Außenbeschaltung und
- integrierter Oszillator.

Diese Vorzüge werden wir bei der 2. Variante unseres Fernsteuerempfängers nutzen. Die prin-

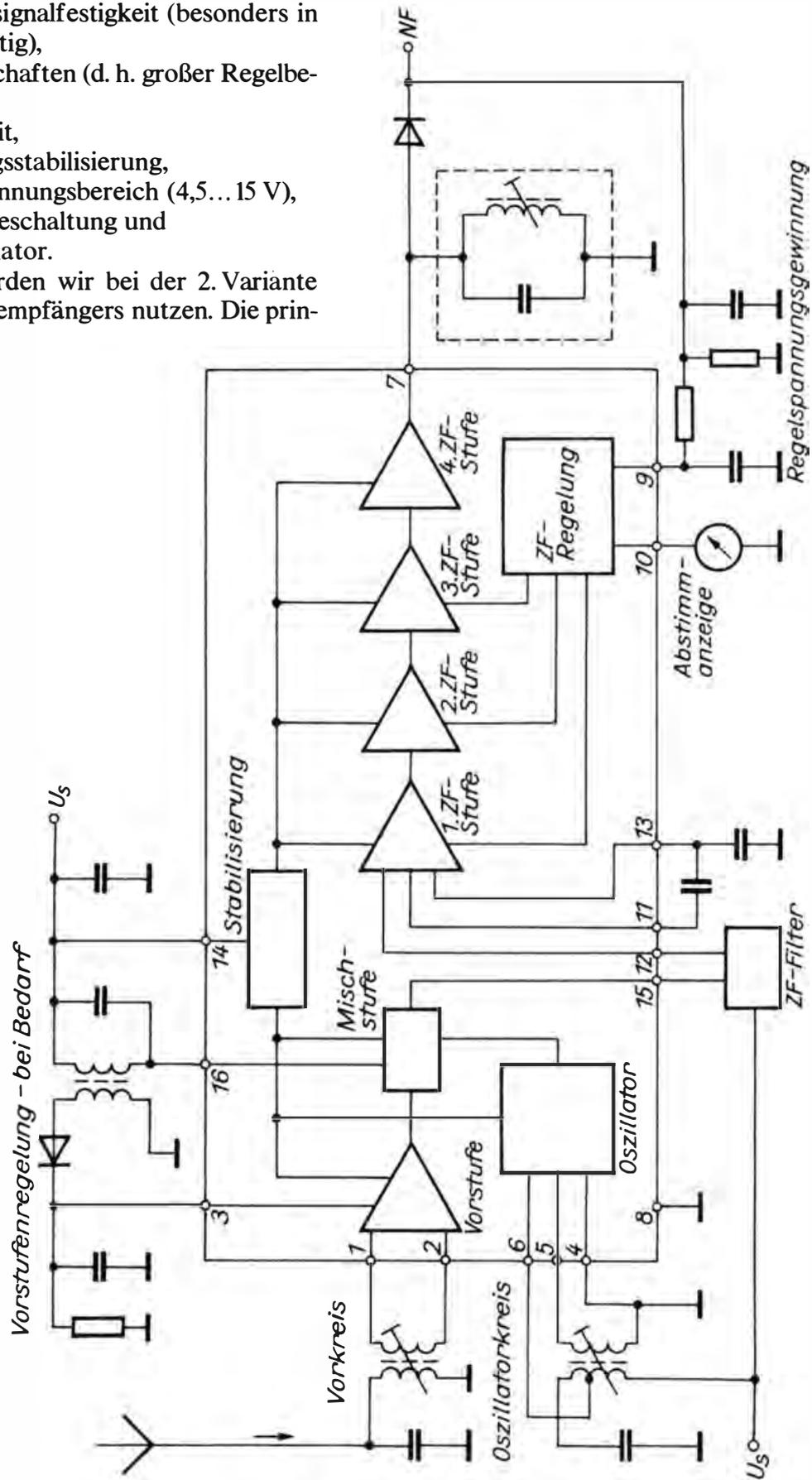


Bild 171. Blockschaltbild der IS A 244/TCA 440

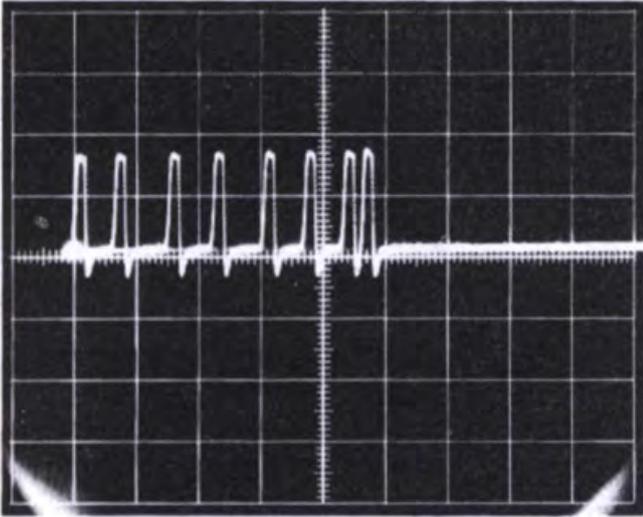
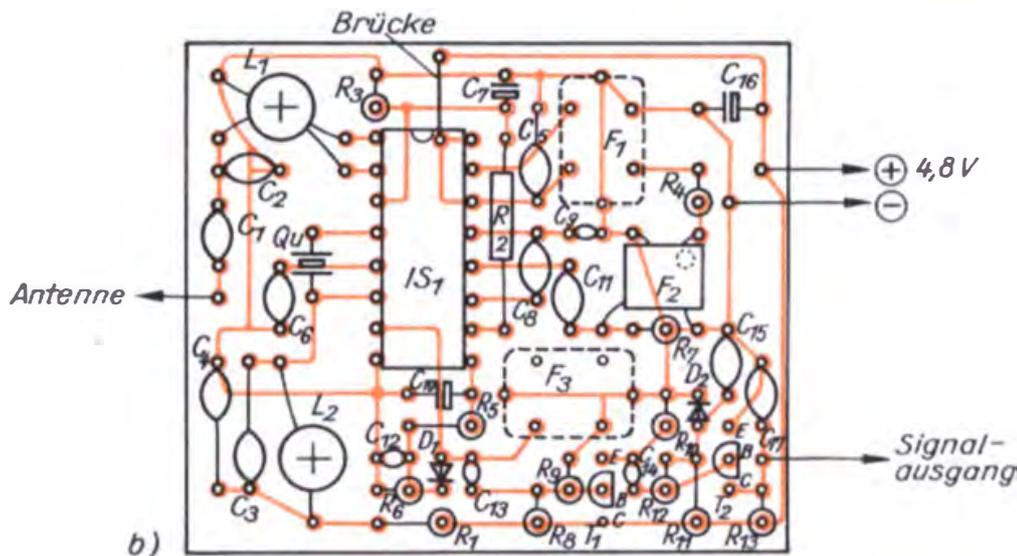
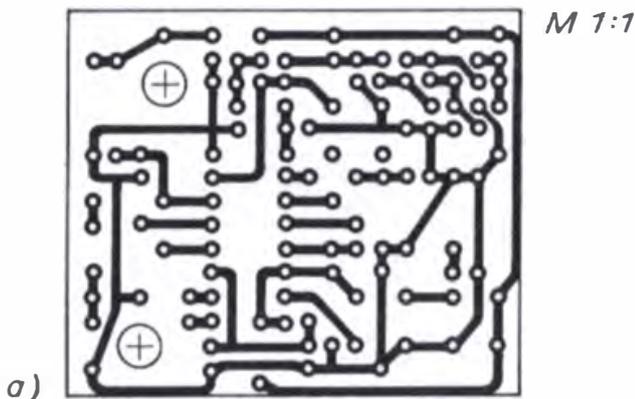


Bild 173. Oszillogramm des IS-Supers an A (1 V/cm, 2 ms/cm)

Bild 174. IS-Super: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan



zipten Funktionsstufen eines Fernsteuersupers haben wir beim Transistorsuper kennengelernt. Es wird daher nicht noch einmal ausführlich darauf eingegangen, sondern nur noch auf Besonderheiten hingewiesen (Bild 172).

Die Antenne (90 cm) koppeln wir über C_1 lose an den Eingangsschwingkreis L_1/C_2 an. Dadurch erzielen wir einerseits eine gute HF-Selektion und andererseits eine nur geringe Kreisbeeinflussung durch wechselnde Antennenlänge bzw. -verlegungen. Der interne Oszillator wird an Pin 4 und 6 durch den Quarz und Schwingkreis L_2/C_3 für das 27,12-MHz-Band beschaltet. Der Oszillator ist außerdem über R_1/C_4 von der übrigen Schaltung entkoppelt. Die ZF-Selektion übernehmen Filter 1 (F_1) und Filter 2 (F_2), F_2 ist ein keramisches Filter, dessen Bandbreite die Empfängerbandbreite bestimmt. Im Schaltbild sind für zwei verschiedene keramische Filtertypen die Schaltbeispiele angegeben. Es können auch andere keramische Filtertypen eingesetzt werden, deren Beschaltung wir dann entsprechenden Datenblättern entnehmen. Wichtig für die gute ZF-Selektion ist ferner die Anpassung von F_2 über F_1 . Hier müssen wir daher möglichst die angegebenen Filtertypen oder aber solche mit gleichen Daten verwenden. Die Qualität des keramischen Filters bestimmt ganz wesentlich die Selektivität und Empfindlichkeit des Empfängers. Bei ungenügender Empfindlichkeit, d. h. geringer Reichweite sollte F_2 ausgewechselt werden. An Pin 7 greifen wir das modulierte ZF-Signal ab, das von D_1 demoduliert

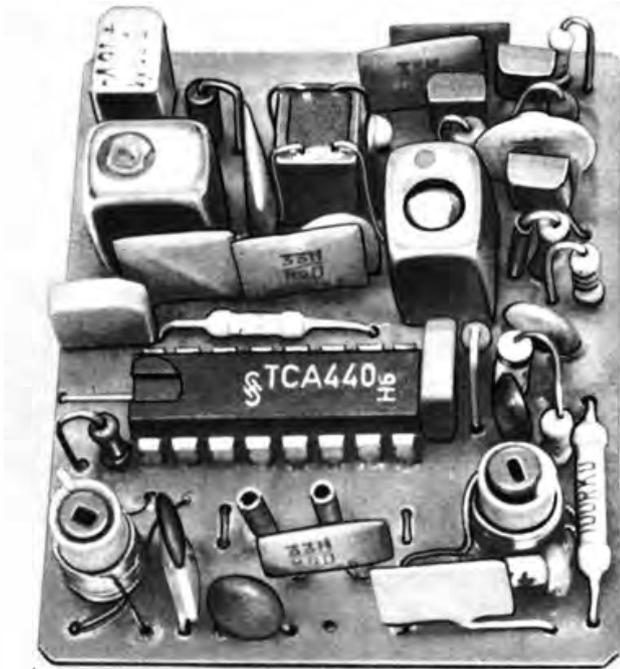


Bild 175. Musteraufbau des IS-Supers in zwei Varianten

wird. Über F_3 fällt die ZF-Spannung ab. Für F_3 kann ein beliebiger Typ für 455 kHz verwendet werden. Die Regelspannung gewinnen wir mit der Demodulordiode D_1 über $R_6/C_{12}/R_5/C_{10}$ und führen sie über Pin 9 den ZF-Stufen und über $R_2/R_3/C_7$ der HF-Vorstufe zu. An dieser Stelle gleich ein Hinweis für den späteren Abgleich: Für Anwendungen des IS A 244 in Rundfunkgeräten wird an Pin 10 die Abstimmanzeige herausgeführt. Beim Abgleich können wir also die Spannung an Pin 10 gegen Masse als Kriterium benutzen.

Da der Ausgang des IS hochohmig ist, schließen wir mit T_1 eine Verstärkerstufe in Kollektorschaltung (s. auch Tabelle 4) als Impedanzwandler an. Über R_{10} steht das Signal niederohmig zur Verfügung und wird von T_2 auf den notwendigen Pegel für den Dekoder verstärkt (Bild 173). Für den Aufbau erhält die Leiterplatte die gleichen Abmessungen wie die des Transistorsupers (Bilder 174 und 175). Bedingt durch die Bauhöhe der Filter können wir für den IS auch eine Fassung vorsehen. Durch die Anschlußbelegung des IS ist der Quarz anders angeordnet als beim Transistorsuper, so daß die Öffnung im Gehäuse ebenfalls an anderer Stelle angebracht werden muß.

Wir gleichen den IS-Super ab

Haben wir den IS-Super aufgebaut, kontrollieren wir noch einmal alle Lötstellen, besonders darauf, daß sich keine Brücken gebildet haben. Ohne Signal nimmt der Super 12...15 mA bei $U_B = 4,8$ V auf. Beim Abgleich gelten die für den Transistorsuper gegebenen Hinweise. Den Sender stellen wir in etwa 5 m Entfernung auf. Das Voltmeter (2,5-V-Bereich) schließen wir an Pin 10 und Masse an. Durch wechselweises Eindrehen der Kerne von L_1 und L_2 suchen wir den Punkt, an dem der Oszillator schwingt, d. h. der Zeigerausschlag nimmt zu (> 15 mV). Den Kern von L_2 drehen wir dann noch um 2 Umdrehungen weiter hinein. L_2 stellen wir mit dem zur Verfügung stehenden Quarzen so ein, daß der Oszillator sicher schwingt (gleicher Zeigerausschlag). Mit L_1 , F_1 und F_3 gleichen wir danach auf maximalen Zeigerausschlag ab. Als Richtwerte können dienen: Spannung an Pin 10 ohne Signal ≈ 15 mV, mit Signal 400 mV. Den Abgleich von L_1 , F_1 und F_3 auf maximalen Ausschlag wiederholen wir, indem wir den Sender mit eingeschobener Antenne 30 m entfernt aufstellen oder in die (trockene!) Waschmaschine stecken. Die dann den Super noch erreichende Hochfrequenz reicht aus, um tatsächlich auf maximale HF-Empfindlichkeit abzugleichen. Dieses Ver-

fahren können wir übrigens auch beim Transistorsuper anwenden. Dabei stellen wir fest, daß der Abgleich von L_1 und F_1 den größten Einfluß auf den Zeigerausschlag hat und das Maximum deutlich ausgeprägt ist.

Wir steuern die Drehzahl des Fahrmotors proportional

Wie der Fahrtregler funktioniert

Haben wir die Fernsteueranlage im Modell erprobt, so merken wir bald, was es noch zu verbessern gilt. Im Flugmodell läßt die proportionale Ruderstellung keine Wünsche offen, anders beim Schiffs- oder Automodell. Hat das Schiffsmodell einen leistungsfähigen Antrieb, können wir mit dem EIN- und AUS-Schalten des Fahrmotors kaum vorbildgetreu fahren. Wir müssen also nach einer Möglichkeit suchen, die Motordrehzahl ebenfalls proportional zu stellen, ähnlich wie wir das beim Ruderwinkel bereits können.

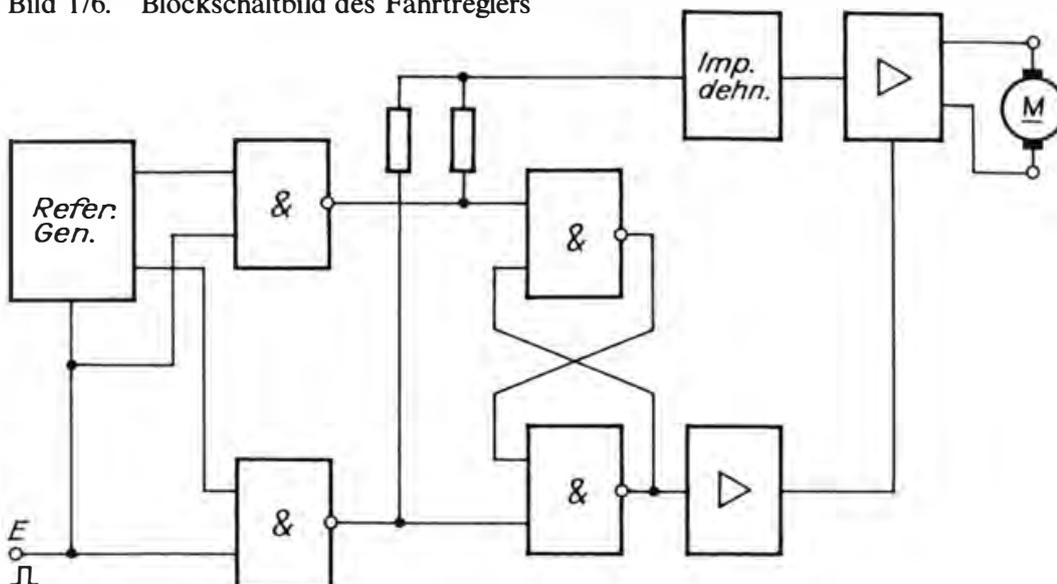
Was liegt daher näher, als eine geeignete elektronische Lösung für diese Aufgabenstellung zu entwickeln. Ausgangspunkt für unsere Über-

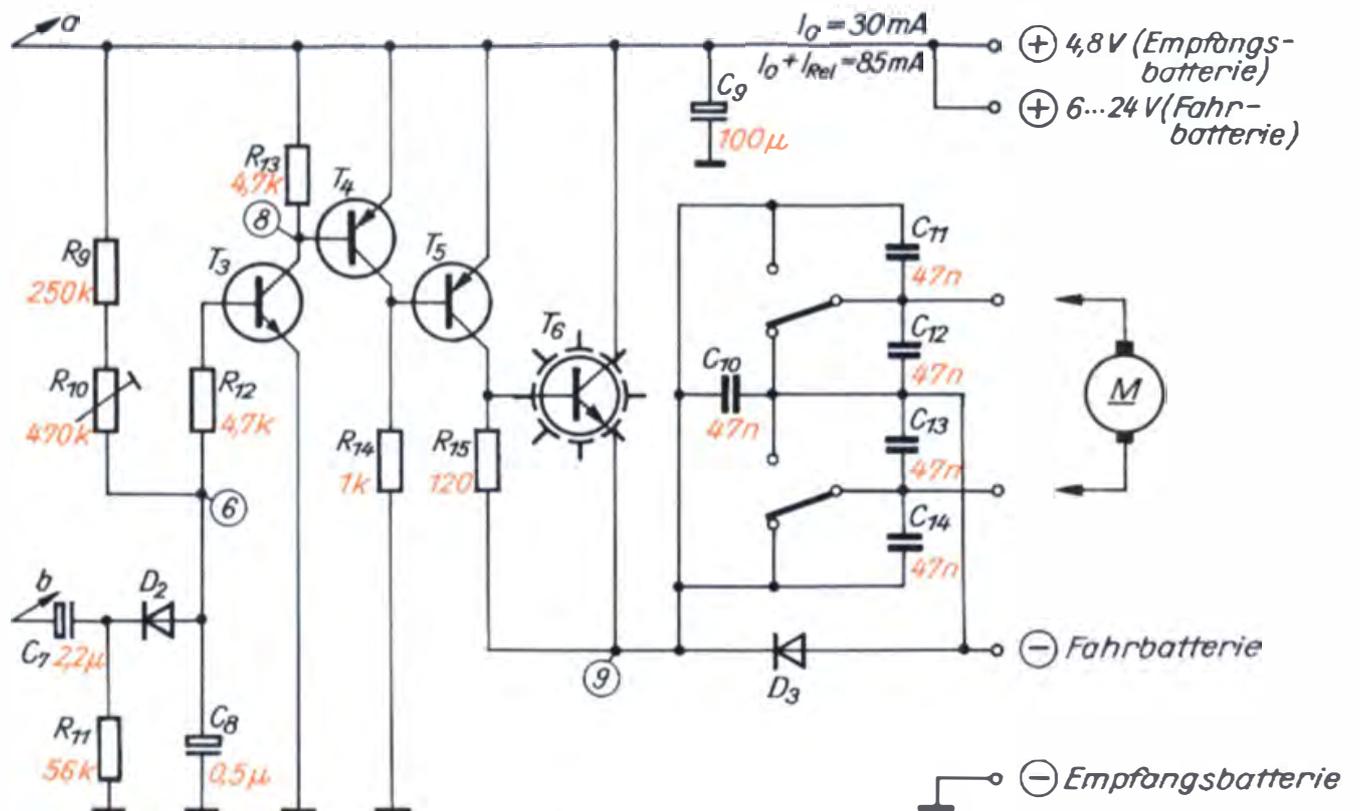
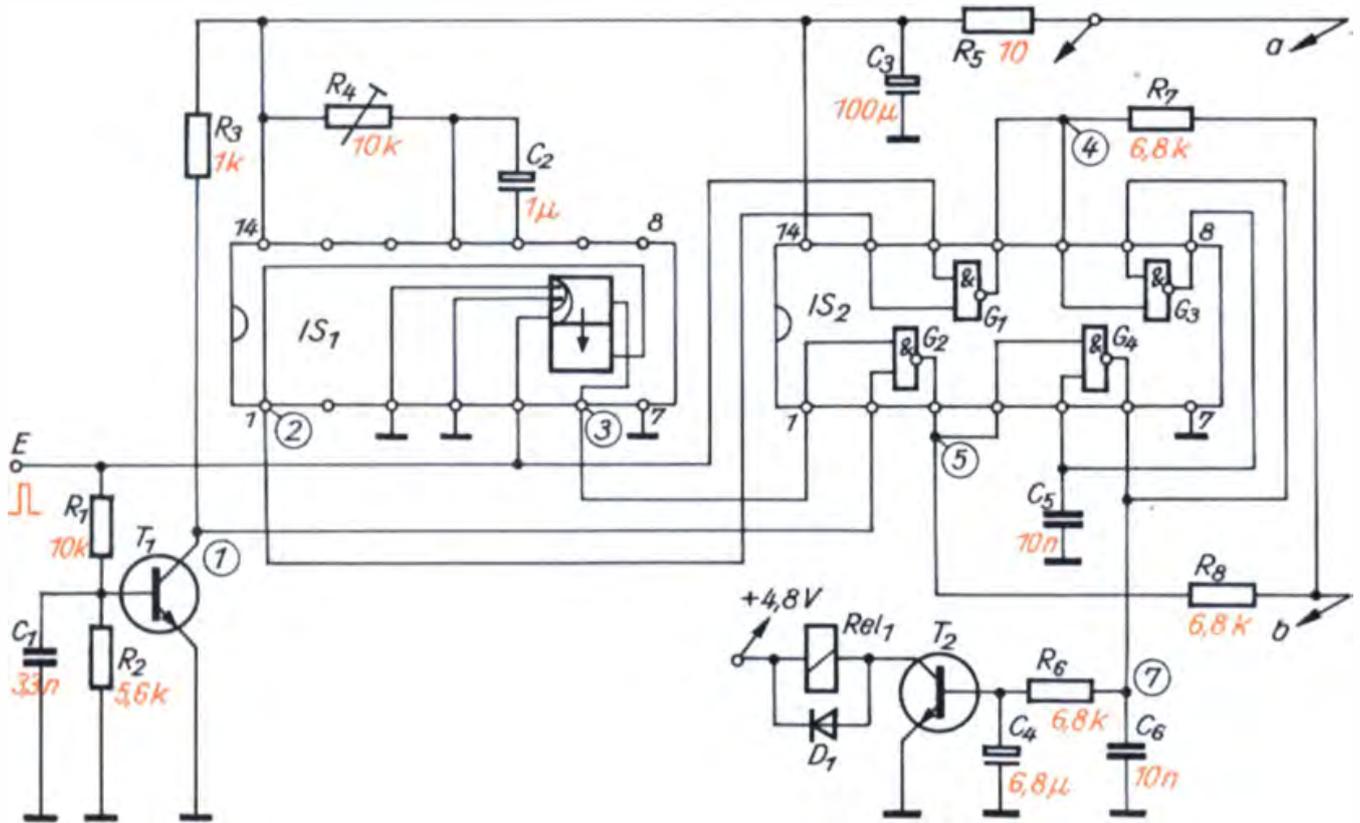
legungen ist wieder der Kanalimpuls. Die in der Impulsvariation von $\pm 0,6$ ms steckende Proportionalinformation müssen wir in eine Drehzahländerung von Null bis Maximum für beide Drehrichtungen umsetzen. Auf einige bewährte Schaltungsdetails zur Impulsauswertung können wir dabei zurückgreifen, wir werden aber auch ganz neue Varianten entwickeln.

Da wir mit dem Gerät die Drehzahl des Motors ferngesteuert stellen, müßte es richtig *Drehzahlsteller* heißen. In der Modellbauliteratur hat sich dafür aber der Name *Fahrtregler* oder auch *Fahrregler*, abgeleitet aus der Anwendung im Modell, eingebürgert, so daß wir diese Bezeichnung ebenfalls verwenden.

Eigentlich ist die Aufgabenstellung gar nicht so neu. Angenommen, wir nähmen unsere Servoelektronik, bauten das Getriebe des Servos aus und stellten den Schleifer des Potentiometers im Referenzgenerator auf Mitte, dann könnten wir die Drehzahl des Servomotors in beiden Drehrichtungen von Null bis Maximum stellen. Mit diesem Motor ließe sich bereits ein kleines Schiffsmodell ($L_{\text{üa}} = 30$ cm) antreiben. Wollen wir diese Lösung für größere Leistungen auslegen, werden die Nachteile sofort deutlich. Wir brauchen eine Fahrbatterie mit Mittelanzapfung und zwei in der Leistung gleiche Transistoren unterschiedlichen Leitfähigkeitstyps. Um diese Mängel zu vermeiden, suchen wir eine andere Lösung. Bedingung ist, daß ein Motor bis 250 W Leistungsaufnahme (10 A/25 V) verlustarm in

Bild 176. Blockschaltbild des Fahrtreglers





- IS₁ = 74 121
- IS₂ = 7400, D100
- T₁, T₂, T₃ = TUN
- T₄ = TUP
- T₅ = BC 327, BD 136 o.ä.
- T₆ = 2N 3055, KU 606 o.ä.
mit großer Kühlfläche
- D₁, D₂ = DUS
- D₃ = 1A Si-Diode
- Rel₁ = 4V ev. auch 6V-Typ
mit hochbelastbaren Kontakten (...10A)

beiden Drehrichtungen mit einer Batterie ohne Anzapfung angetrieben werden soll.

Die Wirkungsweise des Fahrtreglers betrachten wir zunächst am Blockschaltbild (Bild 176). Bekannt sind uns die Funktionsstufen Referenzgenerator, Umpolrelais, Impulsdehner und Verstärker. Neu ist die Variante des Impulsvergleichs.

Für den *Impulsvergleich* verwenden wir eine logische Grundschaltung, als logisches NAND (Abkürzung für NOT-AND, engl. = NICHT-UND) bezeichnet. Das Verhalten des NAND-Gatters erkennen wir am besten wieder aus der Zustandstabelle. Sie sagt aus: Nur wenn an beiden Eingängen E_1 und E_2 H-Signal anliegt, erscheint am Ausgang A L-Signal. Für alle anderen Fälle führt der Ausgang A H-Signal:

E_1	E_2	A
L	L	H
L	H	H
H	L	H
H	H	L

Dieses Verhalten werden wir ausnutzen, um aus Kanal- und Referenzimpuls den Restimpuls zu gewinnen. Dieses etwas aufwendigere Verfahren des Impulsvergleichs bringt uns eine verbesserte Störfestigkeit der Schaltung gegenüber Störimpulsen als die Impulsvergleichsvariante beim Schaltverstärker oder bei der Servoelektronik. Solche Störimpulse erzeugt der Elektromotor bei der Stromwendung weit mehr, als uns lieb ist. Den genannten Vorzug erkaufen wir uns mit einem IS der TTL-Reihe und dem damit etwas höheren Stromverbrauch der Schaltung. Für den Impulsvergleich mit den NAND-Gattern benötigen wir den Kanalimpuls auch in negierter Form, daher ist noch ein Negator in die Schaltung eingefügt. Den Impulsvergleich besorgen Gatter 1 und 2 (G_1 und G_2). Die Gatter G_3 und G_4 sind als bistabiler Multivibrator zur Ansteuerung des Umpolrelais geschaltet.

Wie die einzelnen Funktionsstufen zusammenwirken, klären wir am Schaltbild (Bild 177) mit Hilfe des Impulsdiagramms (Bild 178). Als erstes

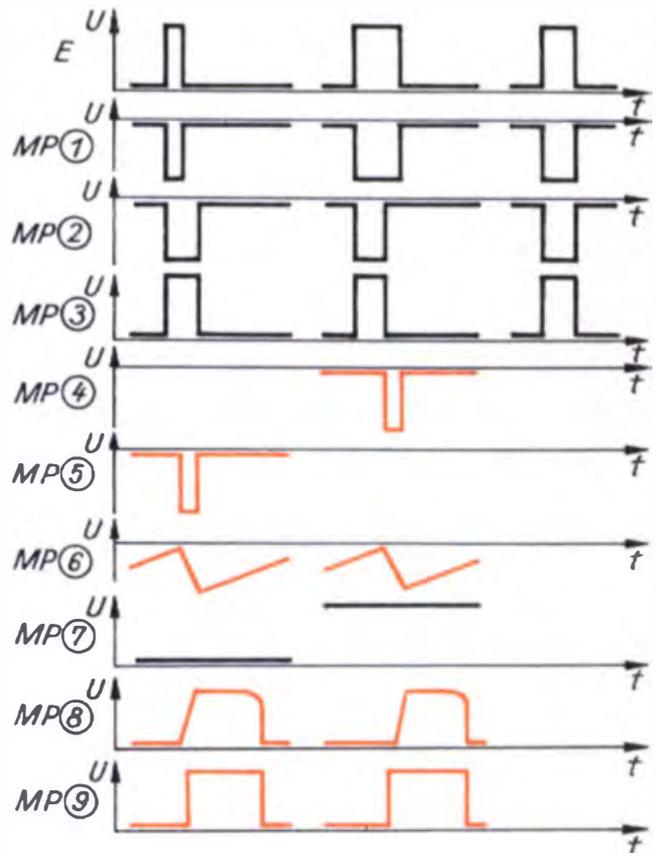
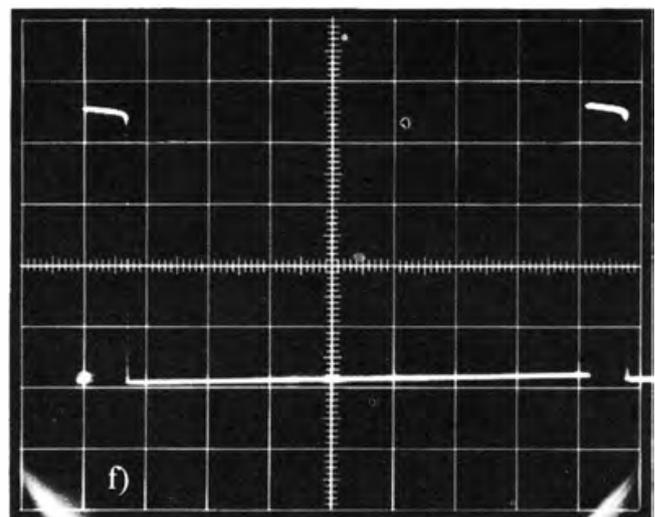
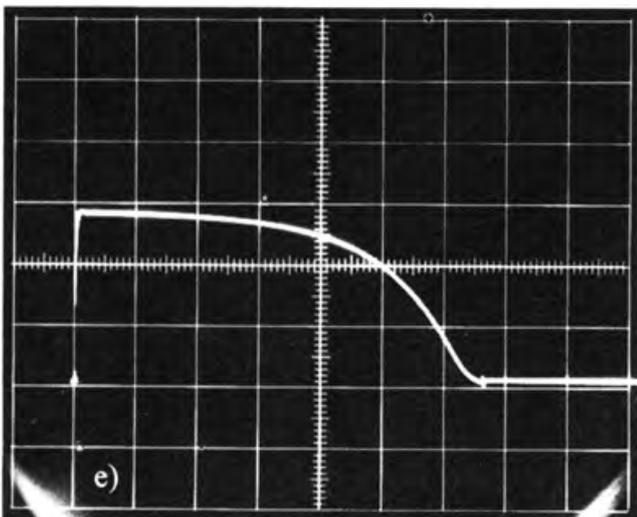
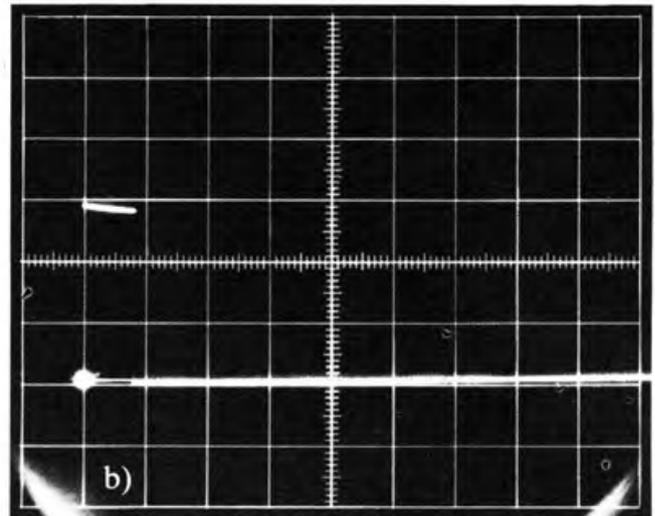
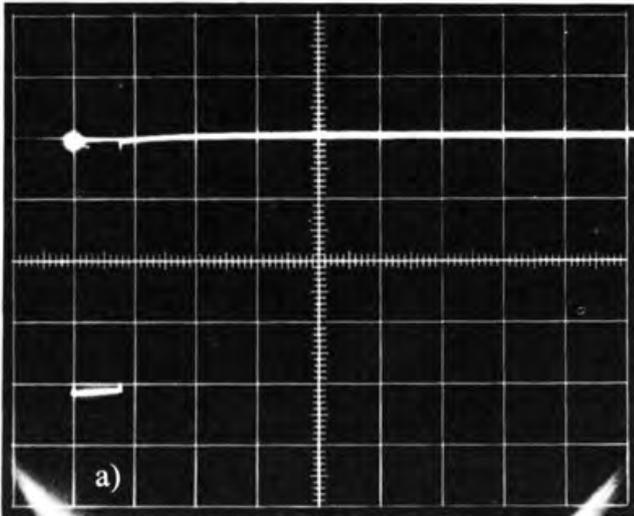


Bild 178. Impulsdiagramm des Fahrtreglers

fällt uns IS 1 auf. Es handelt sich um einen *monostabilen Multivibrator* in TTL-Technik. Durch die Außenbeschaltung mit R_4/C_2 können wir die Kippzeit in weiten Grenzen variieren und unseren Bedingungen anpassen. Mit R_4 wird der Referenzimpuls auf 1,6 ms eingestellt. Da der IS eine interne Stabilisierung enthält, erzeugt er einen von Versorgungsspannung und Temperatur weitgehend unabhängigen Referenzimpuls. Dessen Stabilität ist damit nur noch vom Temperaturverhalten von R_4/C_2 (C_2 daher möglichst Ta-Elko) abhängig. Der monostabile Multivibrator wird am Eingang B (Pin 5) durch die LH-Flanke des Eingangsimpulses getriggert, wenn die Eingänge (Pin 3 und 4) auf L-Potential liegen. Am Ausgang Q kann der Referenzimpuls (positiver Impuls) und am Ausgang \bar{Q} der negierte Referenzimpuls abgegriffen werden. Den für den Impulsvergleich ebenfalls erforderlichen negativen Kanalimpuls erzeugt der als Negator geschaltete Transistor T_1 .

Damit stehen uns nun Kanal- und Referenzimpuls in positiver und negativer Form für den Impulsvergleich zur Verfügung. Für den



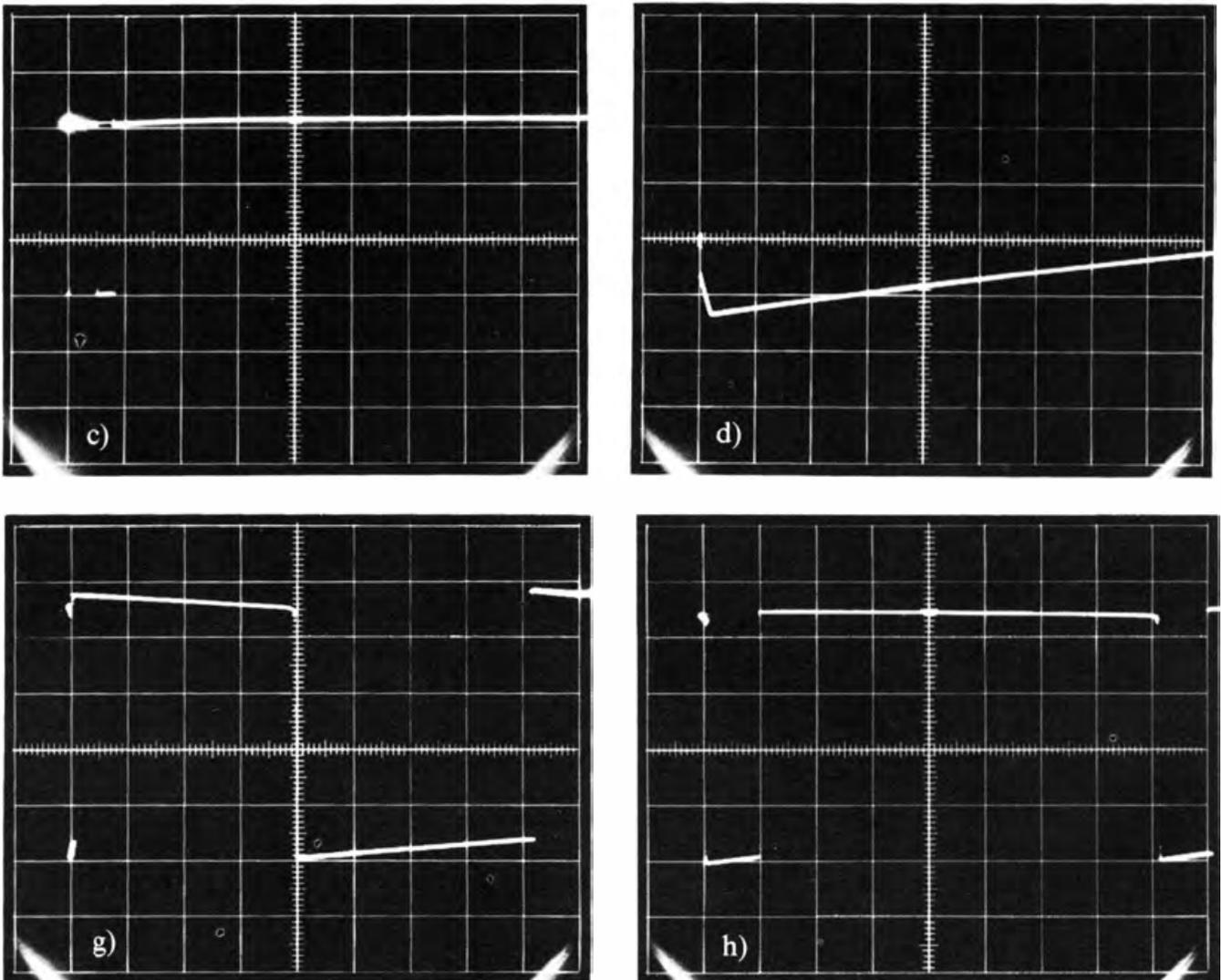
ersten betrachteten Betriebsfall nehmen wir an, der Kanalimpuls sei kürzer als der Referenzimpuls ($t_{kan} < t_{Ref}$). In diesem Falle vergleicht Gatter G_2 den negierten Kanalimpuls mit dem positiven Referenzimpuls. Nach der Zustandstabelle für das NAND-Gatter tritt am Ausgang nur dann L-Signal auf, wenn an beiden Eingängen H-Signal liegt. Das ist aber nur bei $t_{kan} < t_{Ref}$ der Fall, wenn MP 1 bereits wieder H und MP 3 noch H ist. Der entstandene negative Restimpuls wird über R_8 der Impulsdehnerstufe zugeführt.

Für den zweiten Fall nehmen wir an, der Kanalimpuls sei länger als der Referenzimpuls. Dann wird der positive Kanalimpuls von E mit dem negativen Referenzimpuls von MP 2 durch Gatter G_2 verglichen. Am Ausgang von G_2 tritt aber nur L-Signal auf, wenn der Kanalimpuls an E noch H und der Referenzimpuls an MP 2 bereits wieder H ist. Der so entstandene negative

Restimpuls wird über R_7 der Impulsdehnerstufe zugeführt.

Der dritte Betriebsfall wäre $t_{kan} = t_{Ref}$. Dann entsteht weder am Ausgang von G_1 noch von G_2 ein Restimpuls, der die nachfolgenden Stufen ansteuern könnte.

Der Restimpuls von maximal 0,6 ms wird nun mit der Taktzeit alle 25 ms wiederholt. Damit der Fahrtregler bei der Stellung »Maximale Drehzahl« auch die volle Spannung an den Motor schaltet, muß der Restimpuls von 0,6 ms auf 25 ms gedehnt werden. Diese *Impulsdehnung* übernimmt C_8 . Der negative Restimpuls entlädt über C_7/D_2 den Impulsdehnerkondensator C_8 proportional zur Impulslänge. In der Pausenzeit (≈ 23 ms) kann sich C_8 über R_9/R_{10} wieder aufladen. Bei kurzem Restimpuls wird C_8 nur wenig entladen. Das bedeutet, C_8 ist auch schnell wieder aufgeladen, und an MP 6 entsteht ein nur wenig



gedehnter Restimpuls. Der gedehnte Restimpuls wird von $T_3...T_5$ zu einem rechteckigen Impuls geformt und verstärkt, der dann über den Leistungstransistor T_6 den Motorstrom von maximal 10 A schaltet.

Liegt an C_8 ein längerer Restimpuls (z. B. von 0,6 ms Dauer), wird die Zeitkonstante für die Wiederaufladung mit R_{10} so eingestellt, daß er sich in der Taktpause von 21 ms gerade voll auflädt. Damit erhalten wir an C_8 exakt zum Restimpuls proportional längengedehnte Steuerimpulse für den Motorstrom für beide Änderungsrichtungen ($\pm 0,6$ ms).

Nun müssen wir die Elektronik so vervollkommen, daß sich der Motor bei $+0,6$ ms bzw. $t_{kan} < t_{Ref}$ in der einen Richtung und bei $-0,6$ ms bzw. $t_{kan} > t_{Ref}$ in der anderen Richtung dreht. Dann können wir die Geschwindigkeit unseres Modells proportional für Vor- und Rückwärts-

Bild 179. Oszillogramme des Fahrtreglers (Zeitbasis a)...d): 2 ms/cm, e)...h): 3 ms/cm, Ablenkempfindlichkeit a)...c): 1 V/cm, d), e): 0,25 V/cm, f)...h): 1 V/cm): a) negierter Kanalimpuls an MP 1, b) Referenzimpuls an MP 3, c) Restimpuls an MP 4/5, d) gedehnter Restimpuls an MP 6, e) Ansteuerimpuls an MP 8, f) Motorstromimpuls an MP 9 für Anlauf, g) Motorstromimpuls an MP 9 für halbe Drehzahl (50%), h) Motorstromimpuls an MP 9 für fast volle Drehzahl (90%)

fahrt steuern. Wir wissen, daß bei $t_{kan} < t_{Ref}$ der Restimpuls an MP 5 und bei $t_{kan} > t_{Ref}$ an MP 4 auftritt. Also können wir entweder den Restimpuls an MP 4 oder MP 5 zur Ansteuerung eines Umpol Schalters verwenden. Den Umpol schalter bilden ein Transistor und ein Relais mit zwei Kontaktsätzen (2 Wechsler), die für den Motorstrom bis 10 A belastbar sind. Da der Umpol schalter aber schon bei sehr kurzen Rest-

impulsen ansprechen muß (bereits wenn ein kleiner Motorstrom in die andere Richtung zu fließen beginnt), müssen wir noch eine elektronische Baustufe einfügen, die schon bei kürzestem Restimpuls voll durchschaltet.

Eine solche Baugruppe haben wir mit dem *bistabilen Multivibrator* bereits kennengelernt. Ein kurzer Impuls an einem Eingang, z. B. E_1 , genügt, um ihn in eine definierte Lage zu schalten. Wiederholte Impulse an E_1 ändern seinen Schaltzustand nicht. Er schaltet erst um, wenn am anderen Eingang E_2 ein (und sei es nur ein sehr kurzer) Impuls auftrat. Die noch freien Gatter G_3 und G_4 des IS 2 schalten wir daher zu einem bistabilen Multivibrator, als *RS-Flip-Flop* bezeichnet. Das bereits bekannte Schaltverhalten des Flip-Flops schreiben wir als Zustandstabelle. Die Eingänge erhalten die Bezeichnung S (von engl. set = setzen) und R (von engl. reset = rücksetzen), die Ausgänge die Bezeichnungen Q und \bar{Q} . Damit ist schon gesagt, daß die beiden Ausgänge zueinander negierte Signale führen. Aus der Zustandstabelle können wir für die Fälle, daß an beiden Eingängen gleiches Signal anliegt, ablesen, daß die Ausgänge kein eindeutiges Schaltverhalten aufweisen. Diese Zustände sind daher bei der Anwendung zu vermeiden

S	R	Q	\bar{Q}
L	L	H	H
L	H	H	L
H	L	L	H
H	H	keine Änderung	

An der Zustandstabelle lesen wir ferner ab: Liegt an MP 5 L-Signal und damit am S-Eingang des RS-Flip-Flops (freier Eingang von G_4), so führt der Ausgang (Pin 6) an MP 7 H-Signal. Dieses H-Signal führen wir über R_6 auf den Schalttransistor T_2 . Dieser wird leitend, und das Relais zieht an, der Motor wird umgepolt. Die alle 23 ms wiederholten Restimpulse ändern den Schaltzustand des RS-Flip-Flops nicht. Erst wenn an MP 4 ein Restimpuls auftritt, d. h. das L-Signal von S zu R wechselt, schaltet der RS-Flip-Flop um, und das Relais fällt ab.

Da die beiden Gatter im RS-Flip-Flop in der Funktion gleichberechtigt sind, können wir den

S-Eingang auch dem Gatter G_3 zuordnen. Wichtig ist nur, daß S und Q jeweils zu einem Gatter gehören. Daraus ziehen wir gleich eine wichtige Schlußfolgerung für die Anwendung. Durch das Relais fließt im angezogenen Zustand je nach Typ ein Strom von 50...70 mA. Damit wird die Empfängerbatterie erheblich belastet, d. h. deren Betriebszeit merklich verkürzt. Wir werden den Zustand »Relais angezogen« möglichst für den weniger genutzten Fahrzustand (Rückwärtsfahrt) wählen. Wir können den Zustand »Relais angezogen« je nach Wunsch der entsprechenden Knüppelbewegungsrichtung am Sender zuordnen, wenn wir R_6 entweder auf Pin 8 (Ausgang von G_3) oder auf Pin 6 (Ausgang von G_4) von IS 2 schalten.

Mit dem RS-Flip-Flop haben wir den Schaltzustand des Umpolrelais einem bestimmten Schwenkbereich des Steuerknüppels am Sender zugeordnet, wobei wir diese Zuordnung je nach Erfordernis festlegen bzw. ändern können. Die an ausgewählten Meßpunkten auftretenden Impulsformen sind aus den Bildern 179a...h ersichtlich. Damit wird aber auch deutlich, daß wir die Motordrehzahl nicht über eine in der Höhe veränderliche Gleichspannung stellen, sondern über eine konstante, aber *gepulste Gleichspannung*. Die Dauer (Länge) der Gleichstromimpulse für den Motor können wir proportional zur Steuerknüppelstellung im Sender einstellen, und damit stellen wir die Motordrehzahl. Dieses Stellverfahren bietet einige Vorteile, auf die wir hier nicht näher eingehen. Genannt seien nur der verbesserte Motoranlauf und die verringerte Verlustleistung im Stelltransistor.

Wir bauen den Fahrtregler auf

Nach unserem bewährtem Prinzip erproben wir die Baustufen zunächst auf der Experimentierplatine. Falls verfügbar, wählen wir für IS 2 eine L-Ausführung wegen des geringeren Strombedarfs. T_5 sollte ein Transistor sein, der einen Kollektorstrom $I_{Cmax} > 500$ mA zur sicheren Aussteuerung des Leistungstransistors aufbringt. Der Leistungstransistor T_6 muß nur für die entsprechenden Motorströme bemessen sein. Es sind auch andere, als die angegebenen Typen einsetzbar. Im Modell muß man dann beachten,

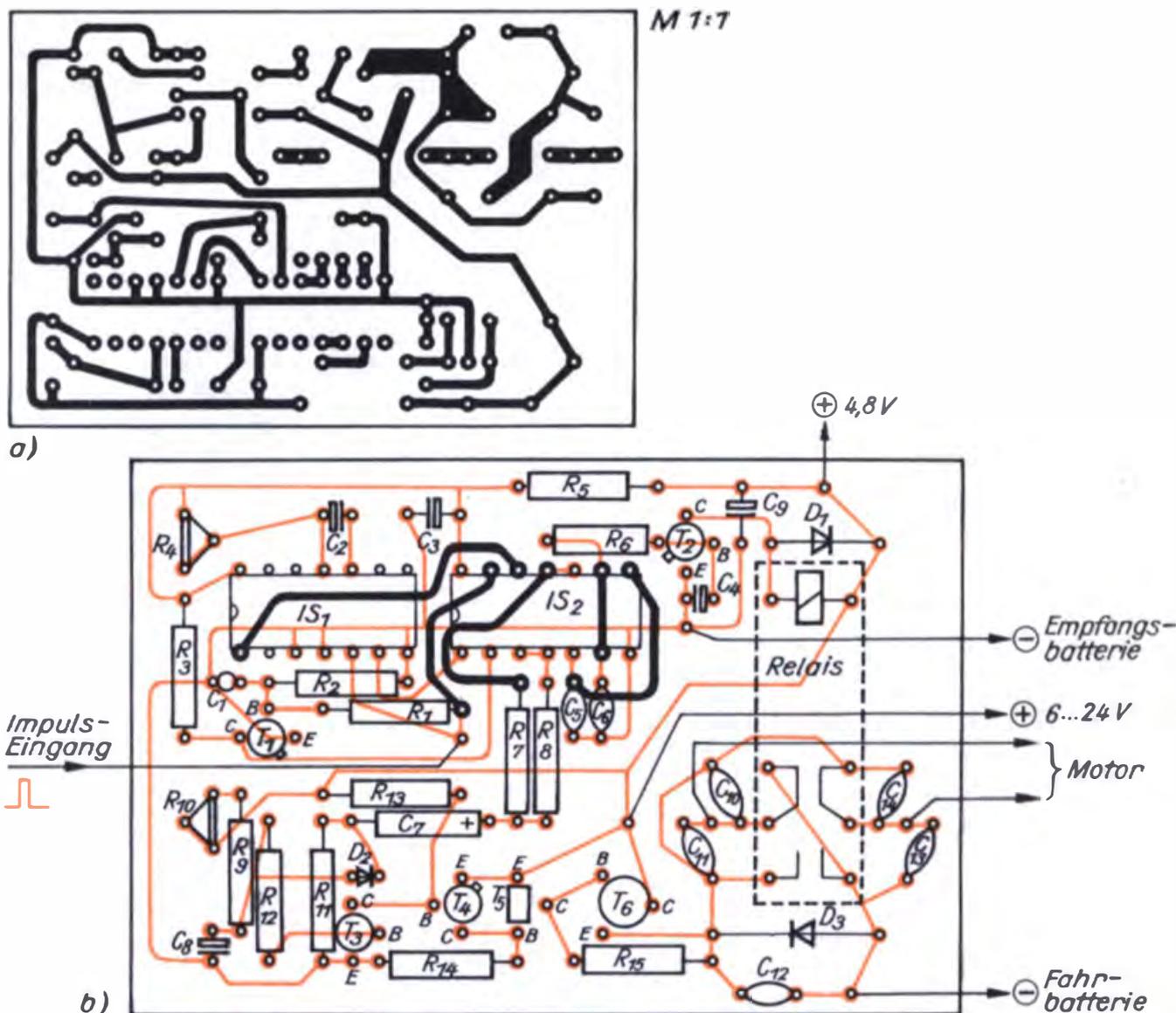
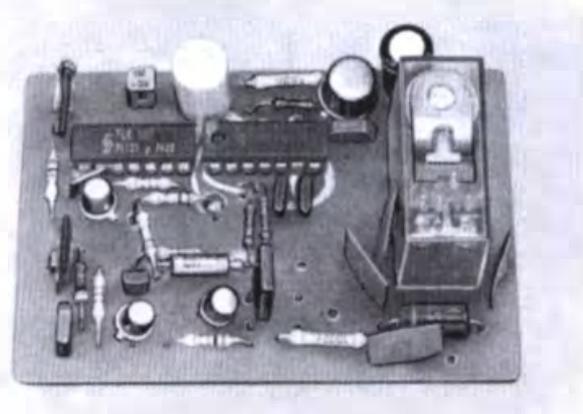


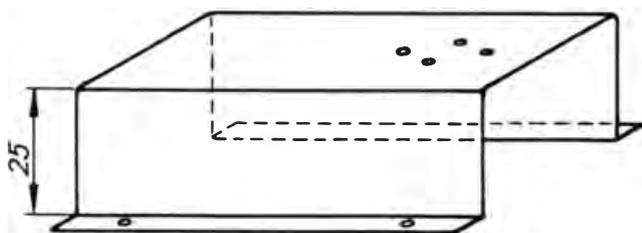
Bild 180. IS-Fahrtregler-Leiterplatte: a) Leitungsführung, b) Bestückungsplan

Bild 181. Musteraufbau der IS-Fahrtregler-Leiterplatte



daß T_6 ggf. ein mehrfaches des Motorstromes verkräften muß, wenn z. B. Pflanzen in die Schiffsschraube geraten sind oder eine Welle blockiert. Ein Si-Transistor ist (ohne Schaden zu erleiden) kurzzeitig (bis 30 s) mit dem doppelten Nennstrom überlastbar. Voraussetzung ist die gute Kühlung von T_6 (große Kühlfläche). Als Schutz bauen wir in die Motorleitung eine 10-A-Sicherung ein. Geeignete Sicherungen mit entsprechendem Halter für den Einbau in die Leitung erhalten wir im Kfz-Handel.

Bei der Erprobung ersetzen wir den Motor durch eine Kfz-Biluxlampe 12V/45W. Funktioniert der Fahrtregler zufriedenstellend, fertigen wir die Leiterplatte an (Bild 180). Diese Leiterplatte ist als Zweiebenenleiterplatte entworfen, um eine einfache Leitungsführung zu



Oberteil (Kühlblech)

Unterteil (Polystyrol)

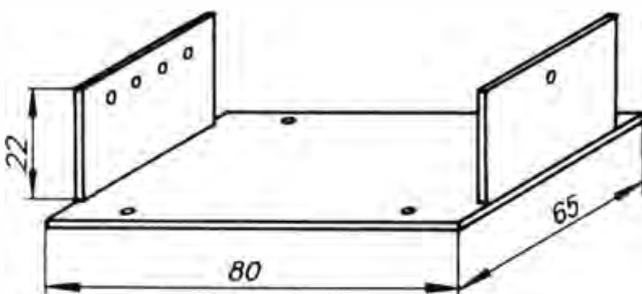
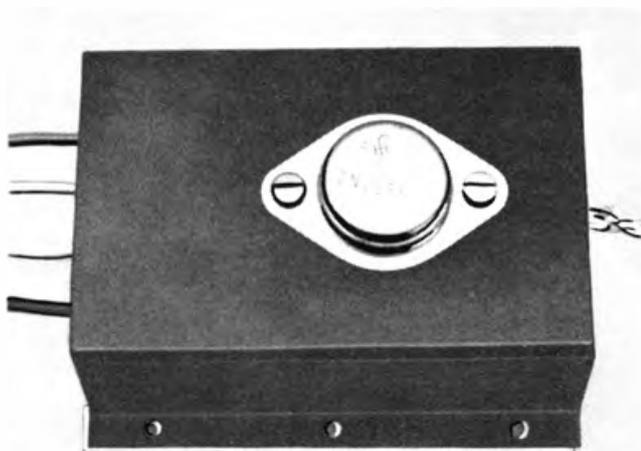


Bild 182. Gehäuseteile des Fahrtreglers

erhalten. Fünf kurze Leitungszüge sind auf der Oberseite entlanggeführt. Wir entnehmen ihre Lage dem Bestückungsplan. Bei diesem Verfahren ist es sinnvoll, zunächst alle Lötunkte auf der sauberen Leiterplatte zu bohren und dann Lötunkte und Leiterbahnen mit Lack abzudecken. Alle anderen Arbeitsschritte führen wir wie bisher aus. Auf der Leiterplatte sind alle Bauelemente des Fahrtreglers bis auf T_6 untergebracht (Bild 181). T_6 wird wegen der erforderlichen Kühlung auf einem Kühlblech befestigt, das gleichzeitig den Deckel des Fahrtreglers bildet (Bild 182). Der Platz auf der Leiterplatte

Bild 183. Musteraufbau des Fahrtreglers



für das Umpolrelais richtet sich nach dem jeweilig einsetzbaren Typ und muß ggf. genau wie die Lage der Anschlüsse geändert werden. Die Relaiskontakte werden über die keramischen Kondensatoren $C_{10} \dots C_{14}$ entstört. Die Freilaufdiode D_3 hat die gleiche Schutzfunktion für den Leistungstransistor T_6 wie die Schutzdioden bei den Relais (s. auch Schaltverstärker). Sie ist erforderlich, da der Motor für T_6 eine induktive Last darstellt. Die Leiterplatte wird straff in das Gehäuse eingepaßt, so daß wir einen kompakten Aufbau erhalten (Bild 183).

Nach der Bestückung kontrollieren wir die Leiterplatte auf einwandfreie Ausführung der Lötstellen und führen anschließend die erste Funktionsprobe durch. Dabei gleichen wir den Fahrtregler ab. An die Motorklemmen schließen wir dazu wieder die Biluxlampe 12 V/45 W in Reihe mit einem Amperemeter (5 A) an. Mit R_4 stellen wir den Umschaltpunkt auf den gewünschten Wert ein. Meist wird er der Steuerknüppelmittelstellung am Sender entsprechen. Mit R_{10} gleichen wir die Impulsdehnung auf die Pausenzeit ab. Im Umschaltpunkt ist der Strom Null. Er soll bei 90% Steuerknüppelausschlag sein Maximum erreicht haben. Falls es möglich ist, kontrollieren wir das auch mit dem Oszillographen. Bei 90% Steuerknüppelausschlag sollte am MP9 die volle nicht mehr pulsierende Batteriespannung abzüglich des Spannungsabfalls über T_6 anliegen. Bei voller Belastung erwärmt sich T_6 recht stark. Für einen Spannungsabfall von 1...1,5 V über T_6 ergibt das bei 10 A eine Verlustleistung $P_V = 10 \dots 15$ W, fast der Wert unseres kleinen LötKolbens. Damit wird auch verständlich, warum T_6 eine große Kühlfläche erhalten muß.

Da im Fahrtregler doch erhebliche Leistungen umgesetzt werden, müssen wir einige Grundregeln für seinen Betrieb unbedingt einhalten, um Schäden am Gerät zu vermeiden. Diese Regeln erarbeiten wir uns im nächsten Kapitel zusammen mit anderen Empfehlungen für die Benutzung der Fernsteueranlage.

Einige praktische Hinweise zum Gebrauch der Fernsteueranlage

Nachdem wir uns bisher durch das eigene Erleben mit dem Aufbau und der Funktion der Fernsteueranlage vertraut gemacht haben, wollen wir noch einige Regeln für die Handhabung der Anlage kennenlernen. Diese Regeln haben sich in der Praxis bewährt, ihre Einhaltung bewahrt uns vor bösen Überraschungen und zusätzlichen Geldausgaben.

Wie wir die Anlage in das Modell einbauen

Haben wir den Reichweitetest mit der Fernsteueranlage durchgeführt, und ist das Modell betriebsbereit, so können wir natürlich den ersten ferngesteuerten Start kaum erwarten. Jetzt gilt aber schon die erste Regel. Bei der Installation der Anlage im Modell (selbst bei ersten Versuchen) führen wir nichts provisorisch aus. Später nehmen wir uns erfahrungsgemäß kaum Zeit, provisorische Aufbauten zu ändern. Sie sind aber stets eine Fehlerquelle. Haben wir mit der gewählten Einbauvariante Erfahrungen gesammelt und sie mit anderen Lösungen verglichen, so werden wir selbstverständlich Verbesserungen vornehmen können. Auch hier bewährt sich der Leitspruch, daß die einfachste Lösung meist die beste ist. Einfach heißt nicht primitiv; die einfache Variante muß in allen Details vollwertig sein.

Ganz gleich, um welches Modell es sich handelt, der Empfänger wird, rundum in viel Schaumstoff (allseitig 10...15 mm) verpackt, hinter einem kräftigen Spant im Modell so untergebracht, daß er den Rumpf an keiner Stelle direkt berührt. Zweckmäßigerweise bauen wir für den Empfänger ein separates Fach. Die NK-Akkus sind zwar recht robust, wir verpacken sie trotzdem ebenfalls in Schaumstoff und bringen sie, in Fahrtrichtung gesehen, immer *vor dem Empfänger* im Modell unter. Dadurch verhindern wir, daß bei einem Absturz der Empfänger durch den nach vorn rutschenden Akku beschädigt

wird. Der Empfänger ist besonders im Flugmodell gefährdet. Verringern wir diese Gefährdung durch sinnvolle Anordnung der Baugruppen auf ein Mindestmaß! Beim Schiffsmodell hat es sich als zweckmäßig erwiesen, den Empfänger möglichst in einer kleinen Plastetüte unterzubringen und ihn so vor Spritzwasser zu schützen.

Die Servos werden durch Zwischenlegen von Gummischeiben oder Gummitüllen elastisch und vibrationsgeschützt befestigt. Ferner achten wir darauf, daß die Verbindungskabel zwischen Batterie, Empfänger und Servos lose verlegt sind. Geringfügige Verschiebungen der Baugruppen zueinander, wie sie beim Landen eines Flugmodells oder Auflaufen eines Schiffsmodells vorkommen, dürfen keine Zugkräfte auf die Kabel ausüben. Diese reißen sonst an den Lötstellen aus, oder die Steckverbindungen werden aufgetrennt.

Besondere Sorgfalt widmen wir dem Einbau der Gestänge und Ruder. Die Servos müssen ohne Anschlag laufen können, Ruder und Gestänge sollen spielfrei und leichtgängig arbeiten. Wird der Ruderausschlag mechanisch begrenzt, so bedeutet das für das Servo Vollast und ist gleichbedeutend mit hoher Stromaufnahme. Schwergängige Lager und Gestänge erhöhen den Stromverbrauch der Servos ebenfalls und verringern dadurch die Betriebszeit der Anlage, außerdem beeinträchtigen sie die Stellgenauigkeit.

Voraussetzung für die einwandfreie Funktion der Anlage ist die Entstörung der Elektromotoren. In die Motorjacht bauen wir Empfänger und Antenne möglichst weit weg vom Antriebsmotor und dessen Zuleitungen ein. Haben wir den Empfänger auf eine bestimmte Antennenlänge abgestimmt, darf diese nicht mehr verändert werden. Jede Verkürzung führt zu einer Verringerung der Reichweite. Grundsätzlich soll die Antenne geradlinig und weit entfernt von Elektromotoren, Rudermaschinen, Metallteilen und stromführenden Leitungen außerhalb des Modells verlegt werden. Beim Segelflugmodell führen wir die Antennenlitze auf dem kürzesten Weg aus dem Rumpf heraus zum Seitenleitwerk und von dort zum Randbogen des Höhenleitwerkes (Bild 184). Die besten Empfangsverhältnisse erzielen wir mit einer senkrechten Stab-

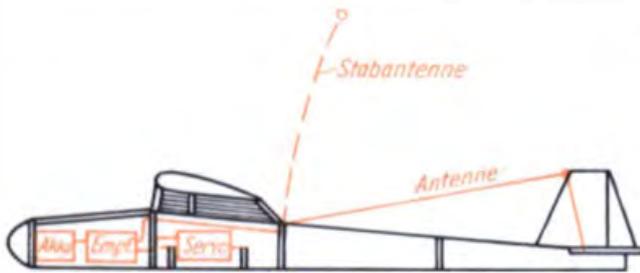


Bild 184. Möglichkeiten des Antenneneinbaus im Flugmodell

antenne, deren Ende wir zu einer Öse (Augenschutz) biegen. Da solche Antennen erfahrungsgemäß zu Wackelkontakten neigen, verwenden wir sie nur im Schiffsmodell. Für das Flugmodell bauen wir uns eine einschraubbare Form.

Was wir beim Betrieb des Senders beachten müssen

Es sollte zur Routine werden, vor jedem Start alle Fernsteuerfunktionen gründlich zu prüfen. So können wir rechtzeitig Fehler erkennen (und sei es die entladene Batterie im Empfänger). Es gilt folgende Regel: *Einschalten der Anlage*: Zuerst Sender EIN, danach Empfänger EIN. *Ausschalten der Anlage*: Zuerst Empfänger AUS, danach Sender AUS. Dadurch verhindern wir, daß Fremdsender oder äußere Störungen den Empfänger zum Ansprechen bringen und Schäden an den Servos verursachen.

Wir wissen, daß die Sendeantenne in Richtung ihrer Achse die geringste HF-Feldstärke entwickelt. Wir zielen beim Fernsteuerbetrieb also nie mit der Antenne auf das Modell, da sich der Empfänger dann im Feldstärkeminimum befindet. Ferner achten wir darauf, daß Sender- und Empfängerantenne möglichst auch nicht senkrecht zueinander gerichtet sind.

Es kann durchaus passieren, daß sich zwei Selbstbauanlagen, die in benachbarten HF-Kanälen (z. B. 12 und 14) betrieben werden, gegenseitig beeinflussen. Abhilfe ist dann nur zu schaffen, indem wir auf andere HF-Kanäle (mit größerem Abstand) ausweichen. Eine Störung kann aber auch durch *Kreuzmodulation* hervorgerufen werden, die eintritt, wenn der Störsender viel stärker als der eigene Sender ist, bzw. wenn sich der Störsender viel näher am Modell

befindet als der eigene Sender. Daher sollten Fernsteuerpiloten, die gleichzeitig steuern wollen, möglichst Sender mit annähernd gleicher HF-Leistung verwenden und in einer Gruppe beisammenstehen (Abstand einige Meter). Es ist empfehlenswert, daß jeder Modellsportler den von ihm belegten Kanal durch ein farbiges Band an der Sendeantenne anzeigt.

Was wir von der Betriebszeit wissen müssen

In der Regel werden die Betriebszeiten von Sender und Empfänger unterschiedlich sein. Die des Senders wird davon abhängen, für welche Stromaufnahme bzw. HF-Leistung er ausgelegt ist. Bei Dauerbetrieb und einer Stromaufnahme von 100 mA erreichen wir mit 500-mAh-Akkus etwa 4,5 h Betriebszeit, dann hat das Neuladen zu erfolgen. Um nicht von entladenen Batterien überrascht zu werden, beobachten wir die Betriebszeit des Senders und laden rechtzeitig (möglichst nach jedem Fernsteuern) nach. War die Anlage längere Zeit außer Betrieb, müssen wir die Akkus ebenfalls nachladen.

Die Betriebszeit der Empfangsanlage ist stark von der Zahl der angeschlossenen Servos und der Steuercharakteristik abhängig. Je mehr Servos wir anschließen und je mehr Steuerbewegungen wir durchführen, um so höher ist der Strombedarf und desto kürzer die Betriebszeit. Da die Servos nur während der Bewegung Strom ziehen, sollten wir bei der Proportionalsteuerung zügig und sparsam, auf keinen Fall aber nach der »Tip-Tip«-Methode, mit dem Steuerknüppel arbeiten. Müssen wir während des Betriebs das Modell dauernd nachtrimmen, da sich die Neutrallage der Ruder verstellt hat, so ist das ein untrügliches Zeichen für sinkende Batteriespannung. Wir brechen den Modellbetrieb ab und laden den Akku nach.

Im Winter geht die Kapazität aller Spannungsquellen stark zurück. Wir müssen also in dieser Jahreszeit kürzere Betriebszeiten einplanen, öfter den Ladezustand kontrollieren und nachladen.

Was wir beim Betrieb des Fahrtreglers beachten müssen

Für den störungsfreien Betrieb des Fahrtreglers wollen wir uns die folgenden Regeln einprägen:

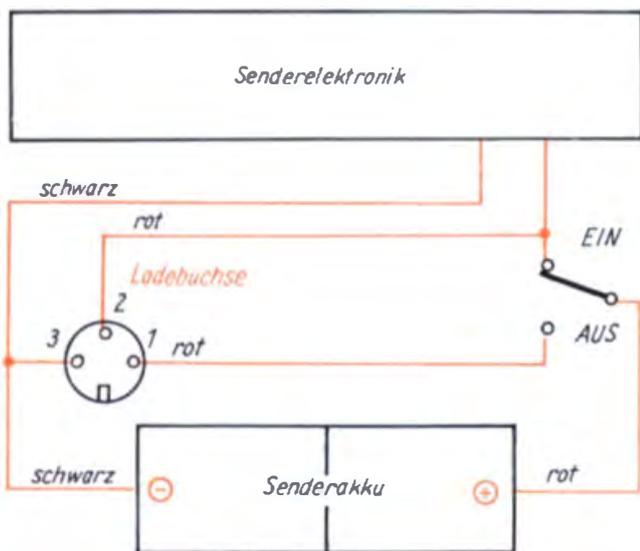
1. Der Fahrtregler wird wie ein Servo am entsprechenden Kanalausgang des Empfängers angeschlossen.
2. Den Fahrtregler richtig gepolt an die Fahrbatterie anschließen.
3. Soll die Laufrichtung des Motors geändert werden, so sind die Anschlüsse des Motors zu tauschen, niemals die des Fahrtreglers!
4. Kurzschlüsse vermeiden!
Auf keinen Fall dürfen sich die Motoranschlüsse berühren bzw. spannungsführende Leitungen oder Metallteile Kontakt mit dem Gehäuse oder Transistor des Fahrtreglers erhalten. In Sonderfällen Gehäuse isoliert befestigen.
5. Blockieren des Motors vermeiden!
Sicherheitshalber in die Motorzuleitung eine entsprechende Sicherung (10 A, mittelträge) einbauen.
6. Für gute Kühlung des Fahrtreglers sorgen!
Möglichst Kühlluftstrom über den Fahrtregler führen. Ein- und Austritt für Kühlluft am Modell schaffen. Zumindest aber den Fahrtregler rundum frei im Modell einbauen und über dem Fahrtregler eine schachtförmige Öffnung schaffen, damit die erwärmte Luft abziehen kann.
7. Fahrmotor(en) gut entstören!
Um die einwandfreie Funktion des Fahrtreglers zu sichern, müssen alle im Modell befindlichen Elektromotoren ausreichend entstört sein. Nur Elektromotoren mit einwandfreier Kommutierung verwenden.
8. Fahrtregler vor Nässe schützen!
Eingedrungenes Wasser führt zu Fehlfunktionen und kann den Verlust des Modells bewirken (unkontrolliertes Vor- und/oder Rückwärtsfahren mit voller Kraft)!
9. Niemals einen Motor mit zwei oder mehr parallelgeschalteten Fahrtreglern betreiben!
Dadurch bedingte Ausgleichsströme können die Elektronik beschädigen. Dagegen ist es möglich, mehrere Motoren (in Parallel- oder Reihenschaltung) mit einem Fahrtregler zu

betreiben, solange die Grenzwerte des Fahrtreglers (10 A/25 V) nicht überschritten werden.

10. Fahrtregler mit Si-Transistoren in der Endstufe sind kurzzeitig bis zum doppelten Wert des Maximalstromes überlastbar. Je nach Grad der Überlastung halten sie das 10...30 s aus.
11. Um die Empfängerbatterie so wenig wie möglich zu belasten, soll das Umpolrelais bei der weniger benutzten Fahrtrichtung (Rückwärtsfahren) anziehen. Das Umpolrelais benötigt je nach Typ 50...100 mA Strom und verkürzt damit die Betriebszeit der Anlage im Modell empfindlich.
12. Nach Betriebsende Fahrbatterien vom Fahrtregler trennen! Es fließt bei ausgeschaltetem Empfänger zwar nur ein Strom von einigen Milliampere, der aber ausreicht, um die Fahrbatterie vollständig zu entladen. Letzteres wirkt besonders bei Bleiakkumulatoren schädigend, da deren Lebensdauer durch Tiefentladung rapide verkürzt wird.

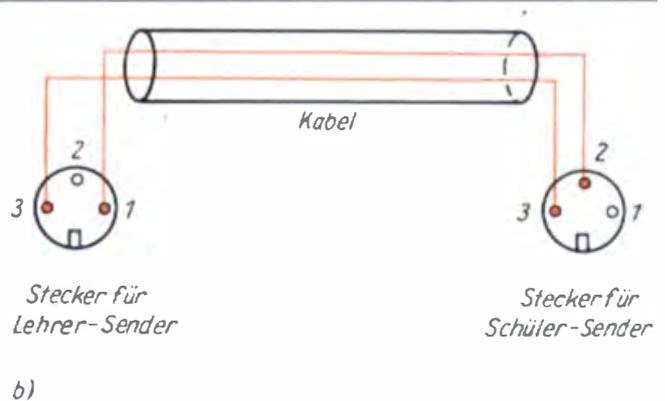
Wie wir mit der Fernsteueranlage Unterricht erteilen können

Manch erfahrener Modellsportler wird bei den ersten Fernsteuerversuchen von Anfängern zugeschaut haben und mußte tatenlos dabeistehen, wenn infolge Ungeübtheit des »Lehrlings« ein Modell zu Bruch ging. Einem »alten Hasen« wäre es durchaus bei Vorhandensein entsprechender Einrichtungen möglich gewesen, das Modell aus der kritischen Situation sicher herauszuführen. Diese Möglichkeit des Eingreifens haben wir bei Digitalanlagen. Wir steuern mit einem sogenannten Lehrsender und einem Schülersender, der auf dem gleichen Kanal arbeitet. Gekoppelt werden beide mit einem Verbindungskabel, das wir an die Ladebuchsen der Sender anschließen. Nach der Schaltung von Bild 185a verbinden wir den Minuspol des Senderakkus mit Klemme 3 der Diodenbuchse. Der Schalter des Senders dient in diesem Fall als Umschalter, denn bei Stellung EIN ist der Senderakku auf Klemme 2 und bei Stellung AUS auf Klemme 1. Verbinden wir Lehrer- und Schülersender mit dem Kabel nach



a)

der Schaltung von Bild 185b, so können wir den Modellunterricht beginnen. Der Schalter des Schülersenders bleibt dabei immer auf Stellung AUS. Wollen wir Fehlbedienungen verhindern, entfernen wir den Akku aus dem Schülersender. Befindet sich der Schalter des Lehrersenders auf AUS, so wird der Schülersender über das Kabel mit Betriebsspannung versorgt. Der Schüler kann das Modell fernsteuern. Schalten wir den Schalter des »Lehrersenders« ein, so wird der Schülersender ausgeschaltet. Der Lehrer steuert nun das Modell. Meist wird der Lehrer das Modell starten und auf eine sichere Höhe bringen. Nun kann er die Steuerung an den Schüler übergeben, indem er seinen Sender auf AUS schaltet. Bei kritischen Fluglagen und vor der Landung greift der Lehrer in den Steuervorgang wieder ein, indem er seinen Sender einschaltet und damit die Steuerung des Modells übernimmt. Durch diese Hilfestellung kann auch der Anfänger rasch Erfahrungen sammeln und schnell die erforderlichen Fertigkeiten erwerben. So können im Lehrer-Schüler-Betrieb auch ganz bewußt gefährliche Situationen herbeigeführt und ihre Beherrschung trainiert werden, bis der Schüler die notwendige Sicherheit für den Alleinflug gewonnen hat.



b)

Bild 185. Lehrer-Schüler-Betrieb: a) Schaltung der Ladebuchse im Sender, b) Kabel für den Lehrer-Schüler-Betrieb

Ein Kapitel Fehlersuche

Treten in der Fernsteueranlage Störungen auf, so nehmen wir eine systematische Fehlersuche vor. Die selbstgebaute Hilfsgeräte sowie die beim Aufbau der Anlage erworbenen Kenntnisse und Erfahrungen werden dabei eine große Hilfe sein. Nutzen wir sie! Die folgenden Ratschläge sollen daher auch nur die Methode der Fehlersuche und kein Rezept vermitteln. Im konkreten Fall werden wir manchmal mit Hilfe von Meßgeräten, Oszillograph und Schaltbild bis ins letzte Detail vordringen müssen, um komplizierte Fehler zu beseitigen.

Um Fehler systematisch einzugrenzen und zu beseitigen, führen wir die Fehlersuche in folgenden Schritten durch:

1. Wir **messen** die Batteriespannung des Senders bei Belastung (Schalter auf EIN, Antenne voll ausgezogen). Ergeben sich Abweichungen von mehr als 20% vom Nennwert, ist die Batterie zu wechseln bzw. der Akku zu laden, ehe die Fehlersuche fortgesetzt wird. Wir messen die Stromaufnahme des Senders, indem wir die Anschlüsse des Schalters mit dem Vielfachmesser überbrücken (Schalter auf AUS, Antenne voll ausgezogen).
2. Nun kontrollieren wir mit dem Feldstärkemesser die Abstrahlung des Senders.
3. Wir schließen einen Kopfhörer an den Meß-

zusatz nach Bild 109 an und überprüfen die Modulation der Hochfrequenz. Jede Modulationsart hat ihr typisches Klangbild.

4. Schwingt der Oszillator nicht, stecken wir einen anderen Schwingquarz in den Sender oder prüfen den Senderquarz mit Hilfe des HF-Prüfoszillators.
5. Eine Spannungsmessung an den Transistoren im Impulsteil ermöglicht uns, Bauelementefehler auszuschalten.
6. Impulsfehler, die wir nur mit dem Oszillographen feststellen können, sind meist die Ursache für fehlerhaftes Arbeiten bestimmter Anlagenteile, aber nicht für den Totalausfall. Der Vergleich der Oszillographenbilder mit den abgebildeten Oszillogrammen gibt uns Aufschluß über Art und Lage der Fehlerquelle.
7. Der Empfänger kann ebenfalls Fehlerquelle sein. Zuerst messen wir Batteriespannung und Stromaufnahme mit angeschlossenem Servo.
8. Eine einfache Kontrollmöglichkeit bietet uns ein zweiter Empfänger. Arbeitet dieser einwandfrei, tauschen wir die Quarze aus und stellen so fest, ob ein defekter Quarz die Ursache für den Empfängerausfall ist. Den Quarz prüfen wir ebenfalls mit dem HF-Prüfoszillator.
9. Haben wir den Fehler noch nicht gefunden, messen wir wieder die Spannungen an den Transistoren. Zur Kontrolle des Impulsverhaltens benötigen wir den Oszillographen.
10. Arbeitet ein Servo nicht normal, so stellen wir durch Vertauschen mit einem anderen fest, ob der Fehler im Servo oder im Dekoder liegt.
11. Liegt der Fehler im Dekoder, so führen wir eine Spannungsmessung an den Transistoren bzw. eine Impulskontrolle durch.
12. Bei fehlerhaft arbeitenden Servos kontrollieren wir ebenfalls zuerst Batteriespannung sowie Stromaufnahme und stellen fest, ob gebrochene Leitungen die Ursache für die Störung sind.
13. Im nächsten Arbeitsgang prüfen wir die Spannungen an den Transistoren der Servoelektronik und gegebenenfalls die Impulsbilder.
14. Besonders unangenehm sind kurzzeitige Störungen während des Modellbetriebes. Auch hier hilft nur systematische Fehlersuche und Beseitigung:
 - a) stark verringerte Sendeleistung: Sendeleistung messen,
 - b) mangelnde Empfindlichkeit des Empfängers: Reichweitetest am Boden durchführen,
 - c) falsche Richtung der Sendeantenne: Polarisation beachten; nicht mit der Sendeantenne auf das Modell zielen, da es sich dann genau im Feldstärkeminimum befindet; Sendeantenne in die gleiche Richtung wie die Empfängerantenne halten,
 - d) zu kurze Empfängerantenne: Empfängerantenne möglichst frei und gestreckt außerhalb des Modells anbringen (s. auch Bild 200),
 - e) ungünstige Ausbreitungsverhältnisse (meist durch schlechte Bodenleitfähigkeit oder Reflexionen bedingt): Standortwechsel,
 - f) Fremdstörungen: Ausweichen auf einen anderen Kanal (Quarzwechsel); zuvor kontrollieren, da Fremdstörung äußerst selten,
 - g) Wackelkontakt: Abklopfen der Baugruppen, vorsichtiges Ziehen an den Bauelementen und Verbindungskabeln (gebrochene Widerstände, defekte Litze, kalte Lötstellen usw.) und somit Fehlerlokalisierung.
15. Sind fremde Sender im Fernsteuerbereich die Ursache der Störung, können wir diese mit dem Empfänger leicht feststellen. Solche Störungen treten vor allem auf, wenn fremde Sender in geringerem Abstand als 2m betrieben werden. Die Störung muß verschwunden sein, wenn der Abstand auf mehr als 10m vergrößert wird.

Bei der Fehlersuche gehen wir stets davon aus, daß jeder Fehler eine Ursache haben muß. Da wir die Fernsteueranlage selbst gebaut haben und mit ihrer Funktion und Handhabung bestens vertraut sind, können wir mit Sicherheit Fehler finden und beseitigen. Müssen Bauelemente ausgewechselt werden, so sollte man dazu möglichst die in den Schaltbildern angegebenen Typen bzw. Größen verwenden. Alle hier beschriebenen Schaltungen

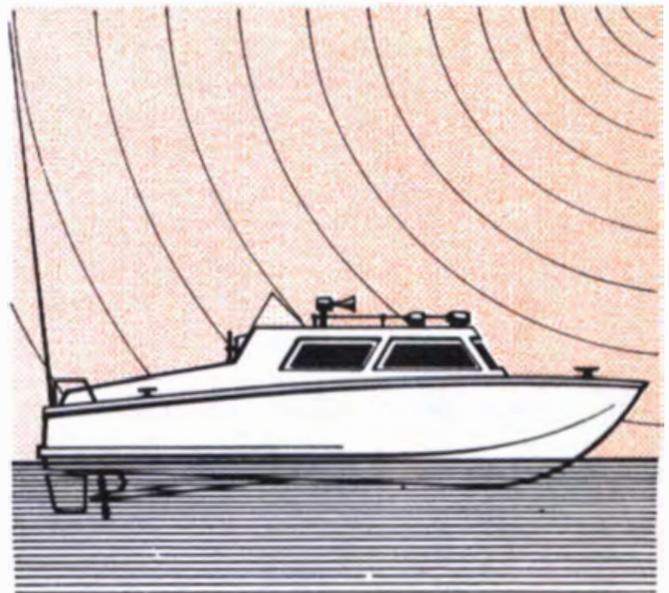
sind nicht besonders kritisch. Stehen uns bei den Transistoren nicht die gleichen Typen zur Verfügung, so können wir auch Austauschtypen mit ähnlichen Daten verwenden. Von Fall zu Fall sind dabei die Grenzdaten von I_{Cmax} , f_T und I_{Crest} zu beachten. Es ist selbstverständlich, daß wir einen Siliziumtransistor nicht durch einen Germaniumtransistor ersetzen können, umgekehrt ist es meist möglich.

Haben wir unsere Funkfernsteuerung Schritt für Schritt selbst aufgebaut und ausprobiert, so konnten wir dabei viel theoretisches Wissen und

praktische Erfahrungen erwerben. Sicher klapp-ten die meisten Experimente auf Anhieb, bestimmt blieb uns aber auch die Fehlersuche nicht erspart. Fehler gehen meist auf unsere Arbeitsweise zurück und werden durch Oberflächlichkeit, Voreiligkeit, mangelnde Sorgfalt, Auslassen von Prüfungen und Zwischenkontrollen u.ä. verursacht. Wir arbeiten deshalb sauber und genau und beraten uns vor allem mit anderen Modellsportlern, deren Wissen und Erfahrungen uns vor mancher Enttäuschung bewahren können.

3. Kapitel

Fern- gesteuerte Schiffs- und Flug- modelle



Vorbereitungen zu Modellbau und Modellbetrieb

Nachdem wir uns in den vorangegangenen Kapiteln mit den Problemen der Fernsteuerelektronik vertraut gemacht haben, wenden wir uns nun dem Modellbau und der Technik des Fernsteuerns zu. Wir wählen zunächst einfache Modelle, deren Aufbau uns keine Schwierigkeiten bereitet. Später können wir anhand von Bauplänen oder mit Hilfe von Modellbaukästen anspruchsvollere Modelle bauen und damit an Modellsportwettkämpfen teilnehmen. Wir wollen aber unserem Prinzip treu bleiben und mit dem Einfachen beginnen. Sicher wird mancher Leser sagen, daß für ihn nur ein Flugmodell in Frage kommt. Ehe wir uns aber an ein solches Modell heranwagen, sollten wir erst einige Erfahrungen mit ferngesteuerten Schiffsmodellen sammeln. Viele Anfangsschwierigkeiten werden wir schneller überwinden, wenn wir in einer Modellbaugruppe mitarbeiten. Dort stehen uns erfahrene Modellsportler beim Bauen, Fernsteuern und auch bei Reparaturen bereitwillig mit Rat und Tat zur Seite. Zum anderen spornt eine solche Gemeinschaft an, neue Modelle zu entwickeln, zu bauen und an Wettkämpfen teilzunehmen.

Aus den Skizzen und Bauplanunterlagen können wir alle Einzelheiten für den Bau der Modelle entnehmen. Zur Erleichterung sind die einzelnen Arbeitsschritte in ihrer Reihenfolge erläutert. In den Zeichnungen wurde bewußt auf konstruktive Einzelheiten zum Einbau der Fernsteuerung verzichtet. Da wir die Modelle mit recht unterschiedlichen Fernsteueranlagen ausrüsten können, möge der Leser die an den entsprechenden Stellen gegebenen Hinweise beachten und den Einbau selbst entwerfen. Regeln für die Handhabung der Fernsteueranlage haben wir bereits kennengelernt. Sie werden jetzt noch durch Regeln für den Betrieb und die sichere Beherrschung der Modelle ergänzt.

Welche Werkzeuge benötigen wir noch?

Wir müssen jetzt unseren Werkzeugbestand noch ein wenig ergänzen (Bild 186). Das Wichtigste ist ein mindestens 1,50 m langes und 25 bis 30 cm breites, stabiles und völlig ebenes *Hellingbrett*, das wir uns vom Tischler anfertigen lassen. Es besteht aus mehreren miteinander zu einem Brett verleimten Leisten, die abgehobelt und auf Ober- und Unterseite mit einer Lage Furnier versperrt werden (Bild 186a). So ist gewährleistet, daß sich die Helling im Laufe der Zeit nicht verzieht. Außerdem brauchen wir ein scharfes Messer; geeignet ist das Balsamesser oder auch das Zurichtmesser, wie es der Schuhmacher verwendet. Sehr nützlich sind ferner ein kleiner Hobel, eine Raspel, Glaskopfstecknadeln, Rasierklingen, Gummiringe, Holzwäscheklammern, mehrere Sorten Schleifpapier – grob (60, 80), fein (100, 120), sehr fein (320, 400), ein Schleifklotz und zwei weiche Pinsel (schmal und breit). Die häufig benötigten Federspangen aus Stahldraht stellen wir uns selbst her. Dazu schneiden wir Federstahldraht von 1,5...2 mm Durchmesser, z. B. Fahrradspitzen, Drahteinlagen in Fahrradmänteln o. ä., auf verschiedene Längen zwischen 10 und 40 cm, feilen die Enden spitz an und biegen sie kreisförmig zusammen (Bild 186h). Mit diesen Federspangen sowie Gummiringen und Federklammern halten wir die Leisten bzw. die Beplankung des Modells fest, bis die Leimstellen getrocknet sind.

Nun fehlen uns noch einige Werkstoffe. Angaben über Werkstoffe, die für den Bau des jeweiligen Modells benötigt werden, entnehmen wir den Stücklisten. Da der Bedarf im wesentlichen vom Modell bestimmt wird, legen wir uns davon nur einen kleinen Vorrat an. Allerdings behalten wir die Angewohnheit bei, selbst kleine Materialreste (Leisten-, Sperrholz- oder Besspannpapierstücke) aufzubewahren. Bei Kleb- und Anstrichstoffen kommt uns dann ein gewisser Vorrat zugute. Neben dem bereits vorhandenen *Zweikomponentenkleber* (für Metall), *Zellulosekleber* (für Papier und Holz) und *Kontaktkleber* (für großflächige Klebestellen) besorgen wir uns noch *Weißleim* (für langsam trocknende Holzverleimungen) und *Tapetenleim* (zum Aufkleben von Papierbespannungen). Für Holz verwenden wir, sofern nicht anders angegeben,

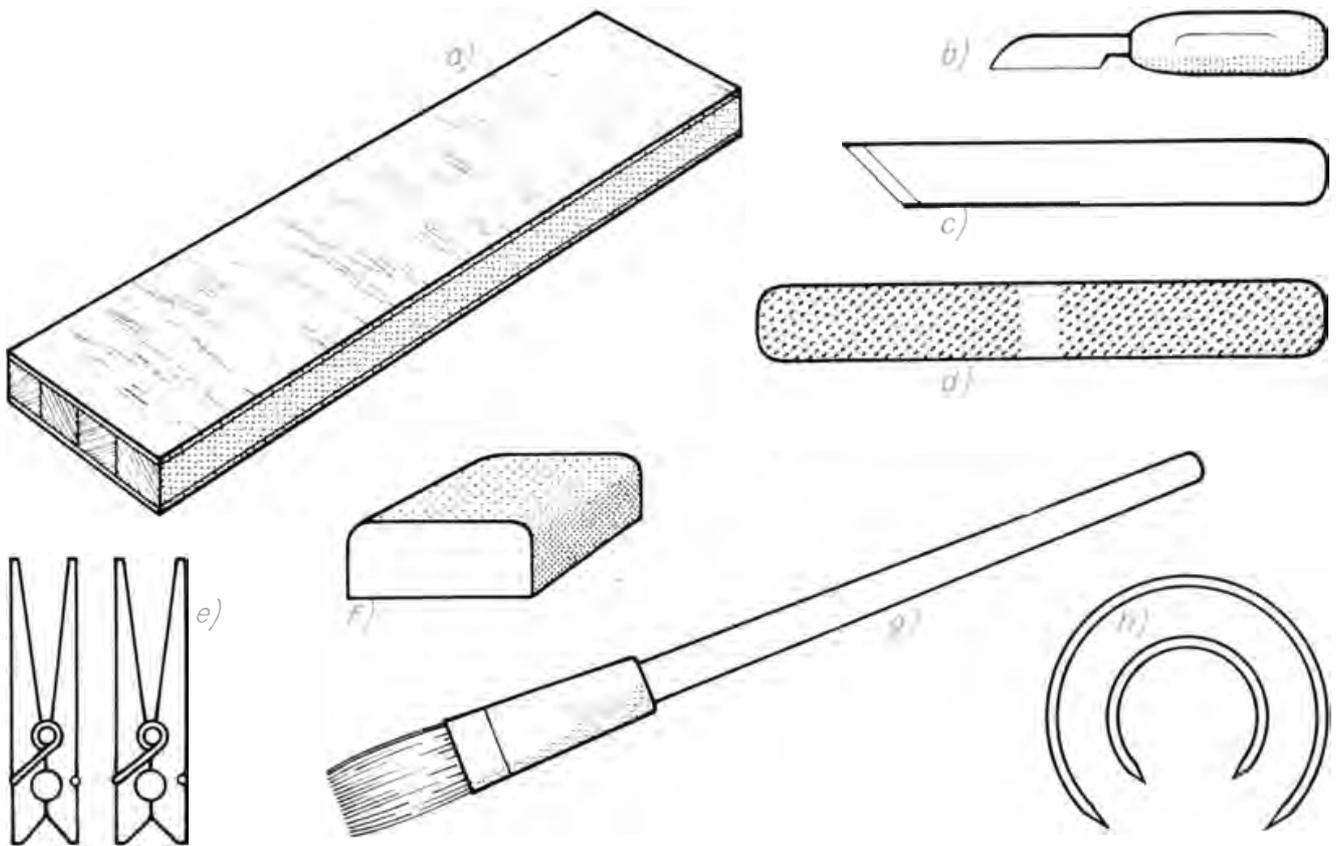


Bild 186. Unentbehrliche Werkzeuge für den Modellbau: a) Helling (Tischlerplatte), b) Balsamesser, c) Zurichtmesser, d) Raspel, e) Federwäscheklammern (Holz), f) Schleifklotz (Holz, Kork) mit Schleifpapier, g) Pinsel, h) Federspangen

Weißleim. Er ergibt wasserfeste, elastische und sehr dauerhafte Klebestellen. Der relativ langsame Trocknungsprozeß ermöglicht es uns, bei der gleichzeitigen Ausführung vieler Klebestellen in einem Arbeitsgang (z. B. beim Beplanken) Korrekturen an der Lage der Teile vorzunehmen. Die Festigkeit wird nicht nachteilig beeinflusst. Wir haben dadurch genügend Zeit, um ruhig und sorgfältig arbeiten zu können. Als Anstrichstoffe verwenden wir *Nitro-* und *Kunstharzlacke*, für papierbespannte Flächen *Spannlack*. Für jede Lacksorte benötigen wir eine entsprechende Menge *Verdünnung* zum Anrühren streichfähiger Lacke und zum Auswaschen der Pinsel.

Wie wir richtig lackieren

Unsere Modelle werden wir mit einem geeigneten Farbanstrich versehen. Daher wollen wir uns

einige Grundsätze, die bei allen Anstricharbeiten gelten, schon jetzt merken. Sehr wichtig ist, daß wir die Arbeit gründlich ausführen und uns genügend Zeit dazu nehmen. Erst durch richtiges Lackieren gewinnt unser Modell sein endgültiges Aussehen. Bei jeder *farbigen Lackierung* muß vorher ausreichend grundiert werden. In vielen Fällen ist es sinnvoll, die ersten beiden Anstriche mit verdünntem farblosem Lack auszuführen. Vor jedem Auftragen der nächsten Lackschicht lassen wir die Oberfläche gut austrocknen. Wollen wir ein Modell farblos lackieren, erhöhen wir die Anzahl der Anstriche mit farblosem Lack, bis die Oberfläche völlig dicht ist und leicht glänzt. Wir erzielen auf jeden Fall mit mehreren dünn aufgetragenen Lackanstrichen ein besseres Ergebnis als mit wenigen, aber dick aufgetragenen Schichten.

Nach dem Trocknen eines jeden Anstrichs schleifen wir die lackierte Fläche mit feinstem Schleifpapier (Nr. 300 bis 400) naß, bis sie vollkommen matt ist und keine Glanzstellen mehr aufweist. Dieser Vorgang wird wiederholt, um eine absolut dichte und glatte Oberfläche zu erhalten. Weiße Lacke haben wegen des hohen Pigmentanteils eine hohe Masse. Für Flug-

modelle empfiehlt sich daher ein farbloser oder roter Lackanstrich.

Nun noch einige praktische Ratschläge. Zum Lackieren verwenden wir saubere Pinsel, die nach Gebrauch in Verdünnung ausgewaschen werden. Flüssigkeits- und Lackreste entfernen wir durch Ausschleudern und Trockenstreichen auf Papier. Lack wird durch gründliches Umrühren und Verdünnen gut streichfähig. Wir lackieren das Modell in einem trockenen, staub- und zugfreien Raum bei 20...25°C und lassen es dort bis zum nächsten Anstrich trocknen.

Unser Service-Werkzeug

Im Laufe der Zeit haben wir unsere Werkzeug- und Zubehörausrüstung immer mehr vervollständigt. Beim Fernsteuern werden wir bald merken, daß im Gelände auf bestimmte Werkzeuge und Zubehörteile nicht verzichtet werden kann. Aus dieser Erfahrung heraus stellen wir eine Ausrüstung für den Modellbetrieb zusammen. Was sie im einzelnen enthält, ist von unseren Ansprüchen und den praktischen Anforderungen abhängig. Die folgenden Vorschläge mögen als Anregung dienen.

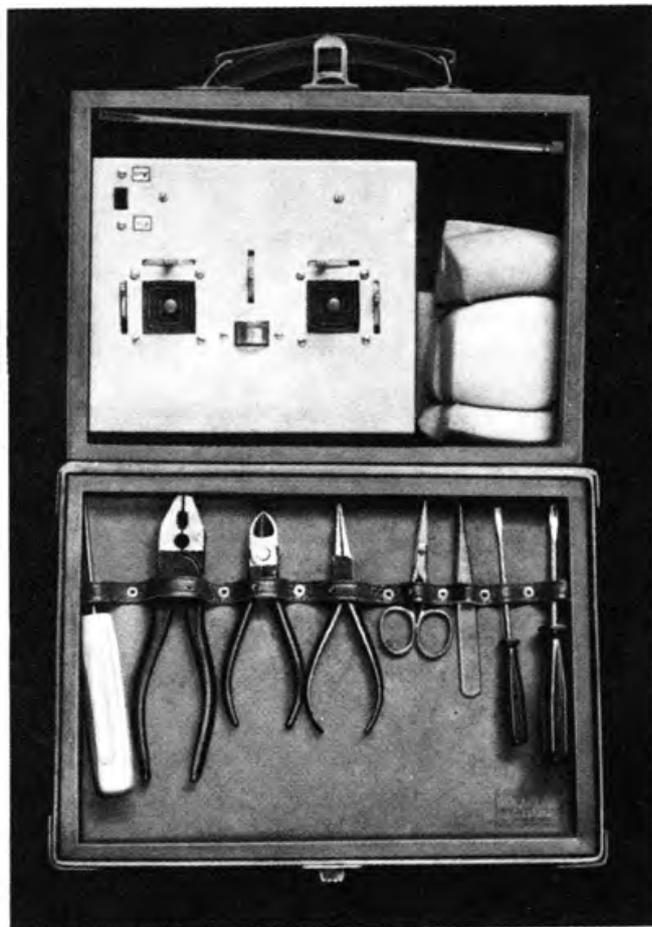
Zuerst überlegen wir, in welcher Form Zubehör und Werkzeuge untergebracht werden. Sehr vorteilhaft ist eine Spezialkiste, die im Gelände als Stapelschlitten für Schiffs- oder Flugmodelle dient und so Reparatur- und Pflegearbeiten erleichtert. Die Fächer der Kiste können wir entsprechend unseren Vorstellungen entwerfen. Bewährt haben sich auch im Handel erhältliche Werkzeugkisten verschiedener Größen, die eine gut sortierte Unterbringung von Kleinteilen gestatten (Bild 187). Wollen wir gleichzeitig noch den Sender und eventuell ein Meßgerät unterbringen, so ist es zweckmäßig, einen kleinen Handkoffer mit entsprechenden Fächern zu versehen (Bild 188). Wer allerdings mit einer bescheidenen Ausrüstung auskommt, dem genügt eine Kollegmappe, die Sender und Werkzeugtasche aufnimmt.

Die Ausrüstung sollte mindestens enthalten: Gummiringe, Messingdraht, Spannschlösser, Skalenseil, Ersatzbatterie, Kupferlitze, Flachzange, Seitenschneider, Kombizange, Balsamesser, Schere, Pinzette, mehrere Schrauben-



Bild 187. Aus einer handelsüblichen Werkzeugkiste wird eine Reparaturkiste

Bild 188. In einem kleinen Koffer können wir neben Werkzeug und Zubehör auch den Fernsteuersender unterbringen



zieher, Zellulosekleber sowie eine Rolle Selbstklebeband. Für den Betrieb eines Modells mit Verbrennungsmotor kommen dann noch hinzu: Kraftstoff, Injektionspritze (für Kraftstoff), Glühkerzenschlüssel, Kreuzschlitzschraubenzieher, Ersatzglühkerze, Anlaßbatterie, Unterlegscheiben, Putzlappen. Ergänzt werden kann die Ausrüstung mit einem Ersatzakku für den Empfänger, Ausweichquarzen, Vielfach- bzw. Drehzahlmeßgerät, LötKolben (12 V), Lötzinn und Desinfektionslösung und Schnellverband (Gothplast) für gelegentliche Erste Hilfe. Mit dieser Ausrüstung können wir fast jede anfallende Reparatur ausführen. Allerdings sollten wir umfangreiche Arbeiten am Modell wegen der erforderlichen Genauigkeit und der Trockenzeit des Klebers besser zu Hause vornehmen.



Bild 189. Die ferngesteuerte Motorjacht

Die ferngesteuerte Motorjacht

Das Vorbild für unser erstes Schiffmodell (Bild 189) ist ein Knickspant-Kajütboot, wie wir es in ähnlicher Form auf Binnen- und Küstengewässern sehen können. Es bietet uns den Reiz eines naturgetreuen Nachbaus sowie gleichzeitig die Vorteile, daß der Bauaufwand in Grenzen bleibt und im Schiffsinnen genügend Raum für die Unterbringung der Fernsteuerung und der Antriebsanlage ist. Damit das Modell vorbildgetreu fährt, dürfen wir es nicht zu sehr beladen und müssen es mit einem kräftigen Antrieb versehen. Es soll aber nicht nur schnell, sondern auch wendig bei wechselnden Wind- und Strömungsverhältnissen und mechanisch widerstandsfähig sein. Das sind zum Teil einander widersprechende Forderungen, besonders aber im Hinblick auf unsere Möglichkeiten zur Realisierung. Wir werden einen praktisch brauchbaren Kompromiß finden müssen. Überlegen wir uns daher, ehe wir den Bau des Modells beginnen, wie wir diese Forderungen erfüllen können.

Einiges über physikalische Gesetze des Wassers

Schon in der Schule haben wir das *Archimedische Prinzip* kennengelernt. Wir erinnern uns daran, daß ein Körper schwimmt, wenn sein Gewicht geringer ist als das der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge. Dabei ragt ein Teil des Körpers aus der Flüssigkeit heraus. Ein Körper dagegen, dessen Gewicht größer als das der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge ist, kann nicht schwimmen, er geht unter. Das ist uns noch geläufig. Schwieriger wird es schon, für das folgende Experiment die richtige Erklärung zu geben. Wir nehmen ein Holzschiff und geben ihm die Form eines Ziegelsteins, dessen drei Hauptkanten ungleich lang sind. Legen wir diesen Körper auf das Wasser, so wird er immer so schwimmen, daß die größte Fläche nach unten oder oben zeigt (Bild 190a). Nageln wir dagegen auf eine Schmalseite einen Bleistreifen, so nimmt der Körper immer eine solche Lage ein, daß die Seite mit dem zusätzlichen Gewicht eintaucht (Bild 190b). Ganz gleich, wie wir ihn im Wasser drehen oder untertauchen, er wird immer diese Schwimmlage einnehmen. Ein solches Verhalten bezeichnet man als *Schwimmstabilität* (im weiteren kurz Stabilität genannt).

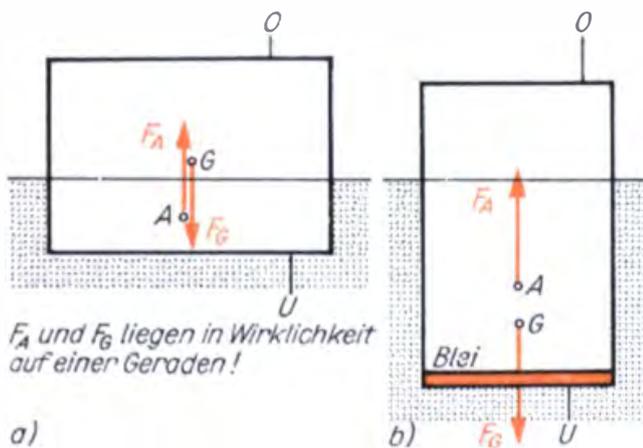


Bild 190. Schwimmlagen eines Körpers: a) normale Schwimmelage (Formstabilität), b) Schwimmelage mit Zusatzgewicht (Gewichtsstabilität)

Wollen wir überlegen, wie die beiden Stabilitätsarten zustandekommen. An einem schwimmenden Körper greifen zwei Kräfte an, die wir durch Pfeile darstellen. Es sind sein Gewicht, das senkrecht nach unten wirkt, und der Auftrieb, der durch das Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge hervorgerufen wird und nach oben wirkt. Dabei greift das Gewicht im *Gewichtsschwerpunkt* G (geometrischer Mittelpunkt des Probekörpers) und der Auftrieb im *Auftriebsschwerpunkt* A, auch als *Formschwerpunkt* bezeichnet (geometrischer Mittelpunkt der verdrängten Flüssigkeitsmenge), an. Der Probekörper hat noch eine dritte, weniger stabile Schwimmelage (wenn wir ihn mit der mittelgroßen Fläche nach unten ohne Ballast schwimmen lassen), die aber für uns ohne Bedeutung ist. Wir ziehen die Schlußfolgerung, daß der Körper die stabilste Schwimmelage einnimmt, wenn der Schwerpunkt G die tiefste Lage zur Schwimmwasserlinie erreicht hat. Im beschriebenen Fall ist die Stabilität von der Form des Körpers abhängig, man bezeichnet sie daher auch als *Formstabilität*. Ein Körper, der relativ breit ist und flach auf dem Wasser liegt, hat also eine hohe Formstabilität. Im zweiten Fall liegt der Gewichtsschwerpunkt unterhalb des Auftriebsschwerpunktes. Neigen wir diesen Körper aus seiner Ruhelage, so entsteht ein Drehmoment, das den Körper aufrichtet. Da diese Art der Stabilität durch die Lage des Schwerpunktes bedingt ist, bezeichnet man sie als *Gewichtsstabilität*. Hier ist die Schwimmelage eindeutig, es zeigt immer die gleiche Kör-

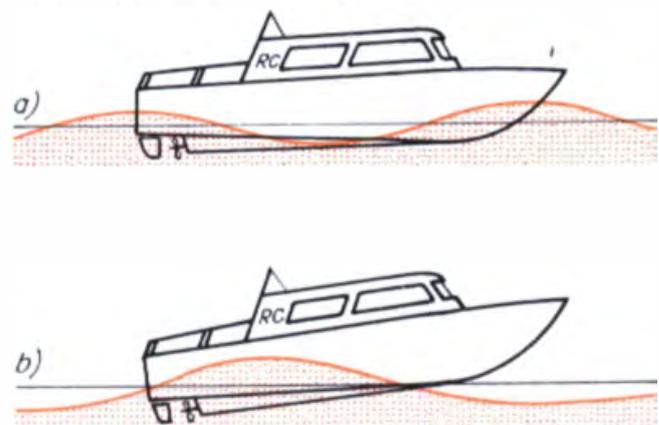
perseite nach oben. Weil das Schiffsmodell immer kielunten schwimmen soll, müssen wir möglichst eine große Gewichtsstabilität (Motor, Akku und Fernsteuerung tief einbauen, leichte Aufbauten) anstreben und noch durch die Formstabilität unterstützen. Die Motorjacht muß demnach relativ breit und flach sein. Das kommt in gewissem Maße der Forderung nach einer guten Manövrierfähigkeit entgegen. Ein kurzes, breites Boot ist besser in der Lage, auf engem Raum Kursänderungen durchzuführen, als ein langes und schmales Boot.

Wie schnell kann und soll die Motorjacht sein?

Bei einem Boot unterscheiden wir die Fahrzustände *Gleiten* und *Verdrängen*. Da unser Modell stark beladen ist und folglich relativ weit eintaucht, ist es ein Verdrängungsmodell. Der Fahrwiderstand hängt von den Abmessungen des Schiffsbodens, dem Zustand der Oberfläche und dem Quadrat der Geschwindigkeit ab. Diesen Zusammenhang bezeichnet man als *Froudesches Gesetz*. Daraus kann man ableiten, daß ein langer Schiffsboden einen geringeren Fahrwiderstand bietet als ein kurzer. Hinzu kommt, daß ein Verdrängungsmodell bei Geschwindigkeiten von mehr als 4 km/h Wellen erzeugt, die als Fahrwiderstand wirksam werden. Es bilden sich eine Bug- und eine Heckwelle, wobei die Wellenlänge etwa der Wasserlinienlänge des Modells entspricht (Bild 191). Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wasserwellen gilt:

$$v = 4,5 \cdot l,$$

Bild 191. Wellenbildung durch das Modell: a) im Verdrängungszustand, b) im Gleitzustand



wobei l die Wasserlinienlänge in m und v die Geschwindigkeit in km/h ist. Für unsere Modelljacht erhalten wir damit eine maximale Geschwindigkeit von 4,5 km/h. Würden wir die Antriebsleistung weiter erhöhen, so stiegen nur die Amplituden der Wellen an, nicht aber die Modellgeschwindigkeit. Diese können wir nur erhöhen, wenn wir ein längeres oder ein leichteres Boot bauen. Ist es leicht genug, kann es bei entsprechender Bodenkonstruktion und starkem Antrieb auf die eigene Bugwelle hinauflaufen. Dort gleitet es und ist somit in der Lage, sehr hohe Geschwindigkeiten zu erreichen.

Wir sehen, bei Installation eines Elektroantriebes (und dafür ist die Motorjacht gedacht) können wir nur eine gewisse Geschwindigkeit erreichen. Das Vorbild unseres Modells, der Kajütkreuzer, erreicht, ausgerüstet mit einem starken Antrieb, ohne Schwierigkeiten den Gleitzustand. Soll das unser Modell auch, müssen wir statt eines Elektromotors einen Verbrennungsmotor einbauen. *Modellverbrennungsmotoren* werden in den Hubraumklassen 0,5 bis 10 cm³ als Selbstzünd- oder Glühkerzenmotoren (meist kurz als Modell- oder Kleindiesel bezeichnet) hergestellt.

Nun wollen wir uns überlegen, was unter vorbildgetreuer Modellgeschwindigkeit zu verstehen ist. Ein Kajütkreuzer entwickelt als Gleitboot Geschwindigkeiten zwischen 40 und 50 km/h. Die vorbildgetreue Modellgeschwindigkeit berechnet man nach der Gleichung:

$$v_m = \frac{v_0}{\sqrt{M}}$$

M ist das Verhältnis der Länge des Vorbilds zur Länge des Modells. Damit erhalten wir für unsere Motorjacht die Geschwindigkeit

$$v_m = \frac{45 \text{ km/h}}{\sqrt{7,5}} = 16,4 \text{ km/h.}$$

Betreiben wir das Modell als Gleitboot, so werden wir durch entsprechende Auslegung des Antriebs versuchen, diese Geschwindigkeit zu erreichen.

Da Wellen vom Modell geschnitten werden, geben wir dem Bug einen scharfen V-förmigen Querschnitt, der zum Heck hin immer flacher wird. Durch diese Bodenkonstruktion erreichen wir dreierlei:

- das Modell ist »seetüchtig«, die Wellen vermindern die Fahrt nicht zu stark,
- das Modell ist relativ richtungsstabil und
- bei entsprechender Auslegung des Antriebs gelangt das Modell ohne Schwierigkeiten in den Gleitzustand.

Diese Gesetzmäßigkeiten bilden später die Grundlage für Eigenkonstruktionen.

Wenn wir ein Modell aufgebaut haben und die Antriebs- und Fernsteueranlage installieren, achten wir darauf, daß es nur bis zu der im Bauplan angegebenen Wasserlinie (KWL: Konstruktionswasserlinie, konstruktiv geplante Schwimmlinie) eintaucht. Besonders durch die Anordnung des Akkus können wir die richtige Wasserlage des Modells herstellen. Ein richtig getrimmtes Modell taucht an keiner Stelle tiefer als bis zur Wasserlinie ein. Diese Trimmung muß auch bei voller Fahrt stimmen. Besonders bei Gleitbooten ist die richtige Schwerpunktlage entscheidend, damit sich das Modell einerseits nicht zu stark aufrichtet (Schwerpunkt zu weit am Heck) und andererseits die Wasserwellen nicht unterschneidet (Schwerpunkt zu weit am Bug).

Wichtig ist der richtige Antrieb

Beim Antrieb der Motorjacht spielen die unterschiedlichsten Faktoren eine Rolle. Betrachten wir sie, um dann auf Grund von Experimenten den Antrieb nach unseren Wünschen auszulegen. Gehen wir davon aus, daß unsere erste Motorjacht mit einem Elektromotor angetrieben werden soll. Wir wissen bereits, daß dieser einen Nachteil hat; er ist bei Verwendung herkömmlicher Bauteile zu schwer, um eine vorbildgetreue Modellgeschwindigkeit erreichen zu können. Andererseits bietet uns der Elektroantrieb aber auch Vorteile, denn er ist sauber und geräuscharm. Außerdem können wir bei ihm mit der Fernsteueranlage die Fahrt zwischen »Volle Fahrt voraus«, »Stop« und »Volle Fahrt zurück« stufenlos steuern. Bei unseren Experimenten gehen wir am besten folgendermaßen vor. Wir rüsten das Modell mit einem 6-V-Kleinmotor, einem Akku (6 V/6 Ah) und einer zweiflügligen Schraube (45 bis 50 mm Ø) aus. Zuerst messen wir die Stromaufnahme des Motors bei voller

Fahrt. Dazu laufen wir mit dem über Kabel angeschlossenen Meßgerät neben dem fahrenden Boot her. Da dies ein recht umständliches Verfahren ist, können wir den Antrieb der Motorjacht auch durch Standschubmessung in der Badewanne testen. Wir befestigen am Heck einen Federzugkraftmesser und lesen direkt den mit jeder vorgenommenen Änderung am Antrieb erzielten Standschub ab. Meist liefert diese Anordnung ausreichend genaue Aussagen. Wir müssen aber wissen, daß besonders in Grenzbereichen die gemessenen Standschubwerte den erzielbaren Geschwindigkeiten nicht proportional sind. Die Modellgeschwindigkeit ist nämlich noch von anderen Faktoren abhängig, zumal die Motordrehzahl bei voller Fahrt höher ist als bei der Standschubmessung. Weitere Experimente zur optimalen Abstimmung der Antriebselemente führen wir deshalb auf einer Meßstrecke mit der Stoppuhr durch.

Haben wir verschiedene Schrauben zur Auswahl, überprüfen wir die mit jeder Schraube erreichte Geschwindigkeit und die Stromaufnahme. Unser Ziel ist, durch genaue Abstimmung von Schrauben- und Motorcharakteristik den günstigsten Wirkungsgrad beider Aggregate zu erreichen. Das wird dann der Fall sein, wenn bei weiter steigender Stromaufnahme die Geschwindigkeit nicht mehr zunimmt. Durch diese Versuche ermitteln wir die Schraube, mit der wir bei annehmbarer elektrischer Leistung den besten Vortrieb erzielen. Nun können wir die Masse der Akkus so weit verringern, daß wir etwa zwei Stunden Betriebszeit erreichen. Wir werden dabei feststellen, daß das zu einem weiteren Geschwindigkeitsanstieg des Modells führt. Ähnliche Experimente (z. B. zur Ermittlung der Schraube mit dem besten Wirkungsgrad) können wir auch beim Einbau eines Modelldiesels durchführen und damit die Leistungsfähigkeit ganz wesentlich steigern.

Wir bauen die Motorjacht

Die Motorjacht stellen wir in *Knicksantbauweise* her. Das Boot besteht aus dem Rumpf und der abnehmbaren Kajüte, dadurch sind Antriebs- und Fernsteueranlage bequem zugänglich. Bevor wir mit dem Bau beginnen, studieren wir gründ-

lich die Bilder sowie die Baubeschreibung und beschaffen uns dann das Material nach der Stückliste (Tabelle 8).

Als erstes übertragen wir die *Spanten* (rippenähnliche Teile zur Versteifung der Beplankung) und den *Vordersteven* (vorderer Abschlußbalken des Schiffskörpers), die Teile 1...8 von Bild 192, auf 4 mm Sperrholz. Dann sägen wir sie mit der Laubsäge sauber aus und verschleifen die Kanten. Die Aussparungen für *Balkweger* und *Kimmstringer* (Verstärkungsleisten im Winkel zwischen Deck und Seitenplanke bzw. zwischen Seiten- und Bodenplanke) müssen so groß sein (5 mm × 9 mm), daß die Leisten etwa 1 mm überstehen. Die Beplankung kleben wir dann nur auf *Balkweger*, *Kimmstringer* und *Kielleiste* (Leiste in der Mitte des Unterwasserteils des Schiffes). Sie soll an keiner Stelle an den Spanten anliegen oder mit ihnen verleimt werden. Dadurch wird die Oberfläche glatt und verläuft ohne Ausbuchtungen. Alle Spanten sind als in sich geschlossene Holzringe auszusägen und auch so auf der Helling aufzustellen. Damit wir den *Decksprung* (Wölbung des Decks in Längsrichtung) erhalten, lassen wir an den Spanten Stützen (S) stehen, mit denen sie auf dem Hellingbrett aufgestellt werden. Die rot gedruckten Stützen und Teile der Spanten 1 und 3 schneiden wir aus, bevor das Deck aufgeleimt wird. So erreichen wir bei der Herstellung des Bootskörpers ein Höchstmaß an Formbeständigkeit.

Auf das Hellingbrett heften wir mehrere aneinandergeliebte Blatt Zeichenkarton und zeichnen darauf die Schiffsmittellinie sowie die Spantabstände laut Bauplan. Mit Hilfe von Leistenresten stellen wir die Spanten 1...6 und den *Spiegel* (von der Wasseroberfläche bis zum Deck reichende Fläche, die den Schiffskörper am Heck abschließt) kieloben auf dem Hellingbrett auf (Bild 193) und richten sie aus. Zuerst verleimen wir den *Vordersteven* (8) mit den Spanten 4, 5 und 6. Sind die Leimstellen getrocknet, passen wir die *Kielleisten* (9) ein und verleimen sie ebenfalls. Dabei fixieren wir sie durch übergespannte Gummiringe bzw. Federspannen in ihrer Lage. Die Gummiringe werden von Nägeln gehalten, die wir seitlich in das Hellingbrett einschlagen. Nun werden *Balkweger* (10) und *Kimmstringer* (11) angebracht. Diese Leisten sollen gleichmäßig geschwungen und ohne Beulen oder Einsenkun-

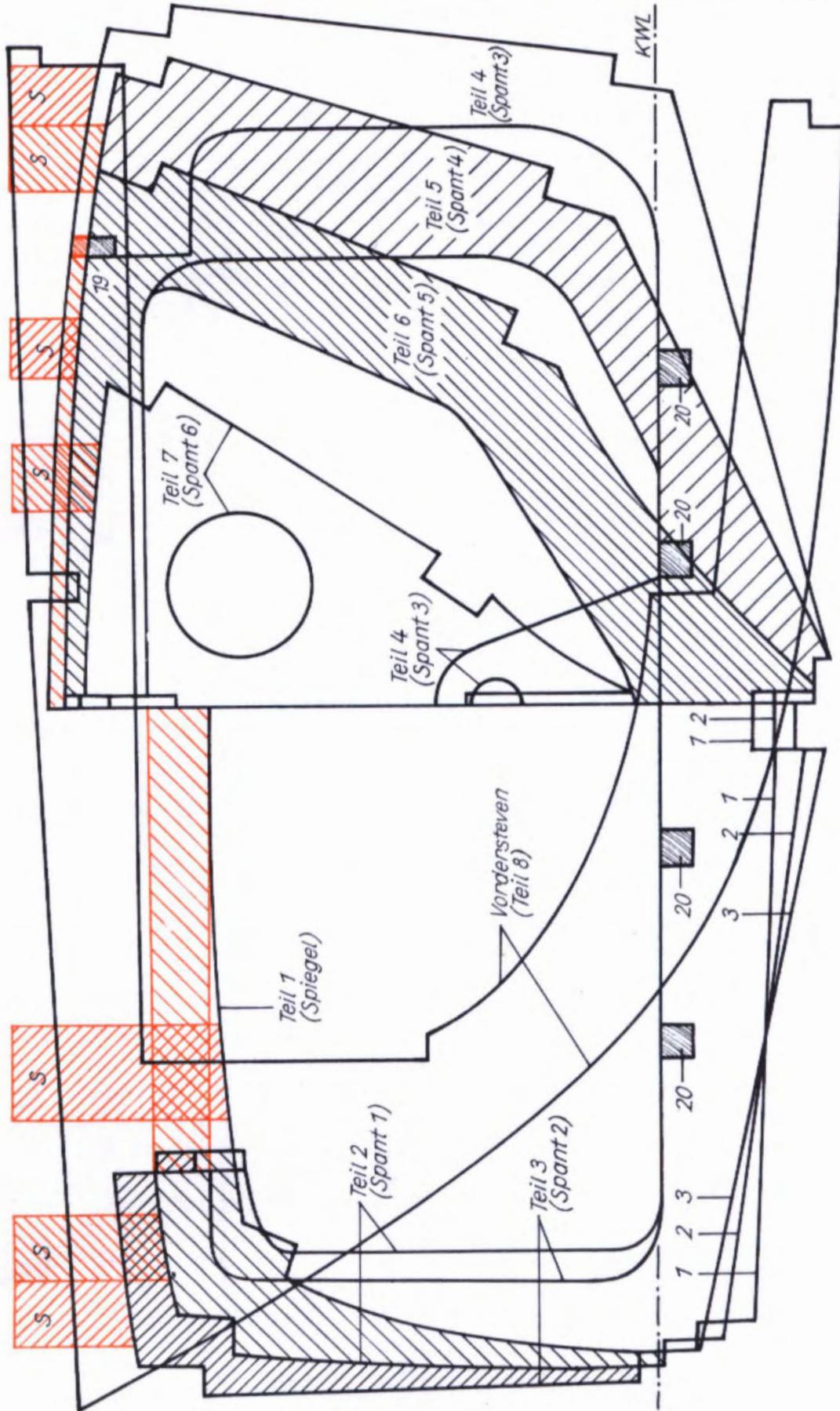


Bild 192. Spiegel (Teil 1), Spanten (Teile 2...7) und Vordersteven (Teil 8)

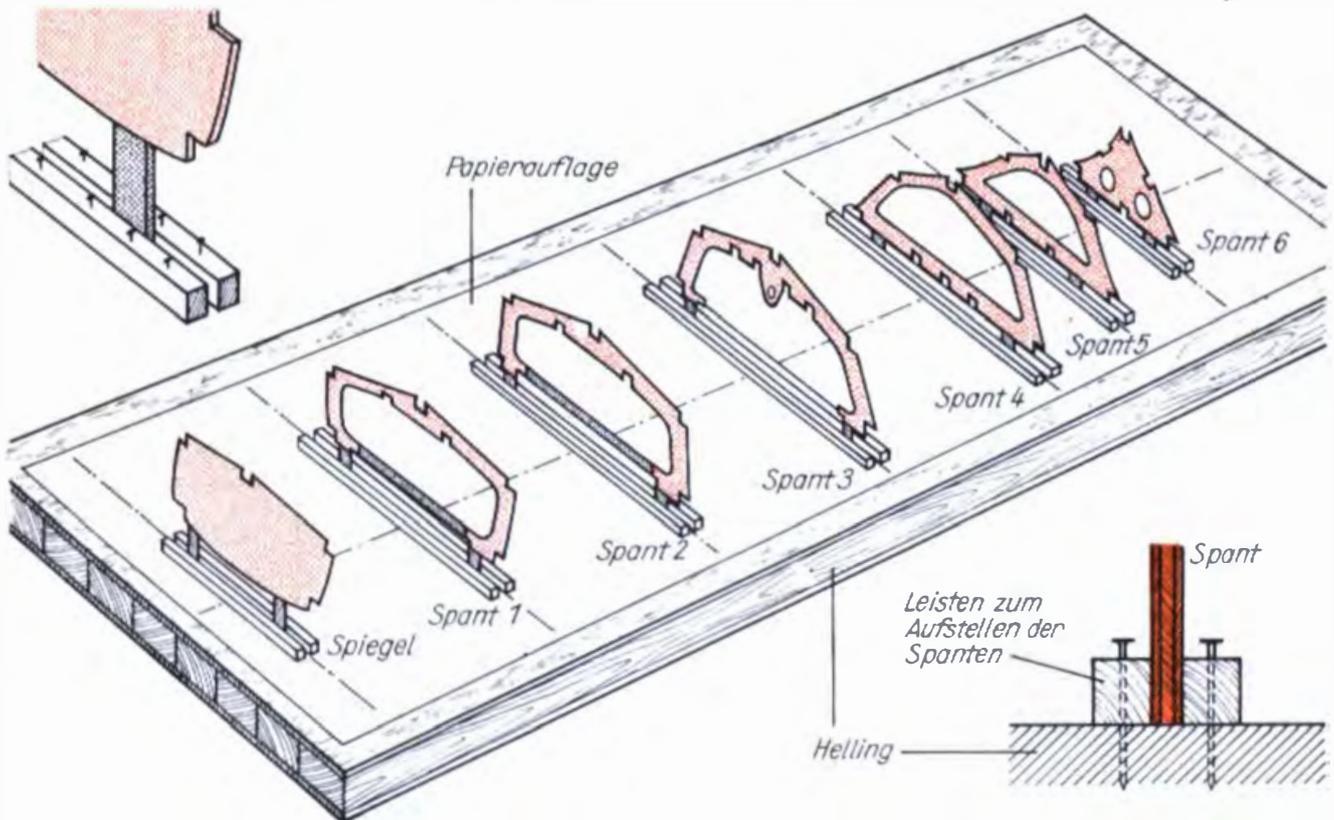


Bild 193. Aufstellen der Spanten auf dem Hellingbrett

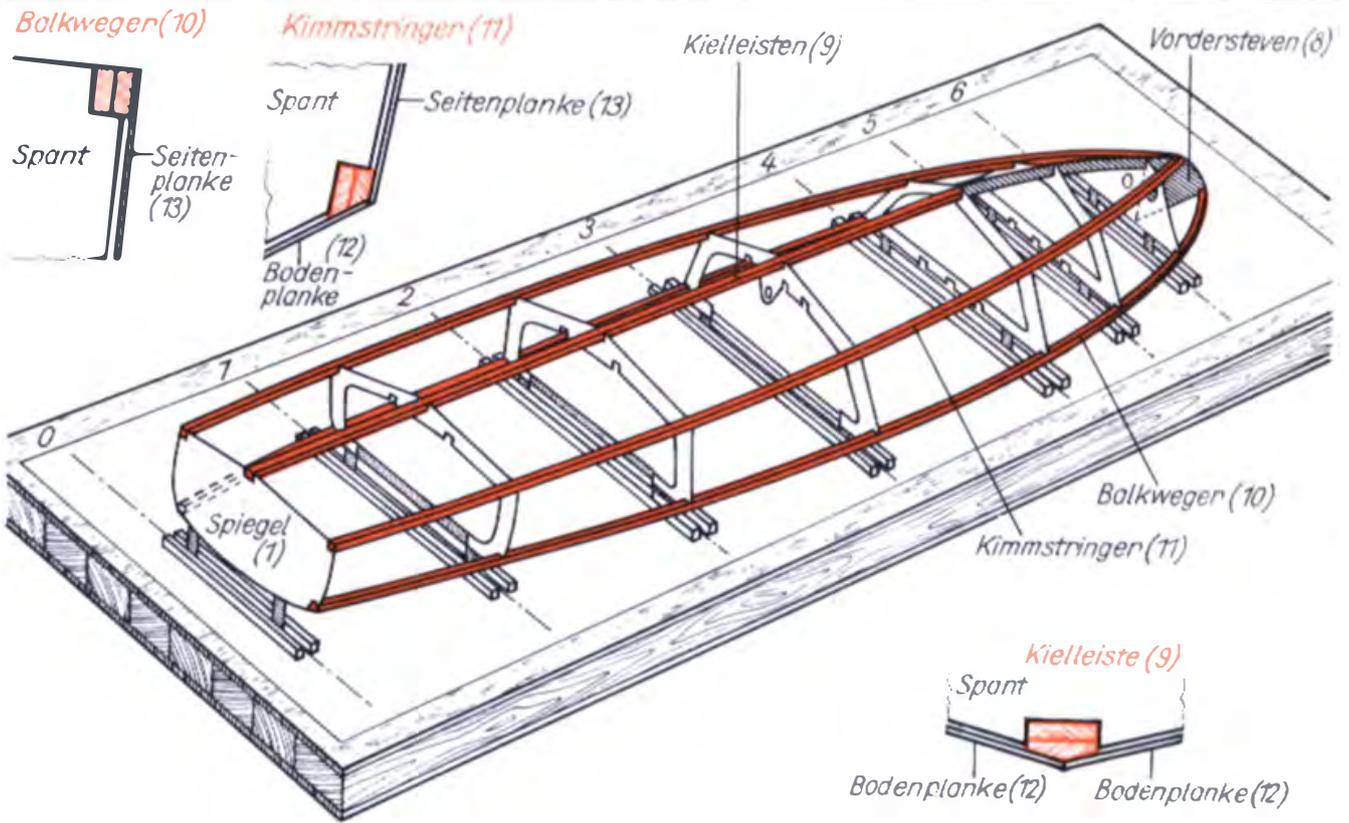
gen harmonisch verlaufen. Dazu kann es erforderlich sein, bei manchen Spanten an der Auflage noch etwas abzutragen oder auch Späne bzw. Sperrholzstücke unterschiedlicher Dicke unterzulegen. Wir führen diese Arbeit mit Geduld und Sorgfalt durch, da sich Unebenheiten später nur schwer beseitigen lassen (Bild 194). Damit sich Balkweger und Kimmstringer besser anschmiegen, werden sie aus zwei Leisten (3 mm × 10 mm) hergestellt.

Sind alle Leimstellen gut gehärtet, bearbeiten wir mit Raspel und Schleifklotz an Kimmstringer und Kielleiste die Auflageflächen für die *Beplankung*. Wir achten darauf, daß die Leisten die Spanten immer um 1 mm überragen. Nun nehmen wir einen Bogen starkes Packpapier, legen es auf den Bootsboden und übertragen die Bodenflächen darauf. Wir geben an allen Seiten 5 mm zu und schneiden diese Schablonen für die Bodenplanken aus. Damit können wir materialsparend das Sperrholz (1,5 mm) für die Beplankung aufteilen und ausschneiden. Wir kleben zunächst eine Bodenplanke (12) auf und entfernen das überstehende Material. Nachdem wir die Auf-

lagefläche für die andere Bodenplanke an der Kielleiste (9) bearbeitet haben, können wir auch sie aufkleben. Während des Trocknens werden die Planken wieder mit Gummiringen und Federspannen in ihrer Lage gehalten (Bild 195).

Nach diesem Arbeitsgang tragen wir alle überstehenden Beplankungsteile ab und schaffen damit die Auflage für die Seitenplanken (13). Dazu lösen wir das Spantgerippe vom Hellingbrett und verschleifen die Auflageflächen. Für die Beplankung stellen wir wieder eine Schablone aus Packpapier her. Die Seitenplanken kleben wir nur auf Balkweger und Kimmstringer (Festhalten mit Federspannen und Federwäscheklammern). Anschließend verputzen wir den Bootskörper mit Raspel und Schleifklotz. Nun werden die Durchbrüche für den *Ruderkoker* (zylindrischer Teil zur Umkleidung des Ruderschaftes an seinem Eintritt ins Schiffsinne; Teil 16) und das Wellenrohr (17) angebracht. Unter Beilegen von Tothölzern (14 und 15) passen wir beide ein und kleben sie mit Zweikomponentenkleber fest. Gleichzeitig können wir die *Deckunterzüge* (längsschiffs angeordnete Leisten zur Abstützung des Decks; Teile 19) und die Bodenleisten (20) einleimen.

Danach sägen wir die Stützen und die gekenn-



gezeichneten Teile der Spanten 1 und 3 ab und konservieren den Innenraum gründlich mit farblosem Nitrolack oder Zellulosekleber gegen Feuchtigkeit. Von der Deckfläche fertigen wir in bekannter Weise eine Schablone an und schneiden nach ihr mit Zugabe die *Deckbeplankung* (18) aus (1,5 mm Sperrholz). Ist diese angeleimt, kleben wir in den Winkel zwischen Deck- und Seitenplanke die *Scheuerleiste* (21), die rund um das Boot verläuft. Danach verschleifen wir

Bild 194. Balkweger und Kimmstringer sind angeleimt

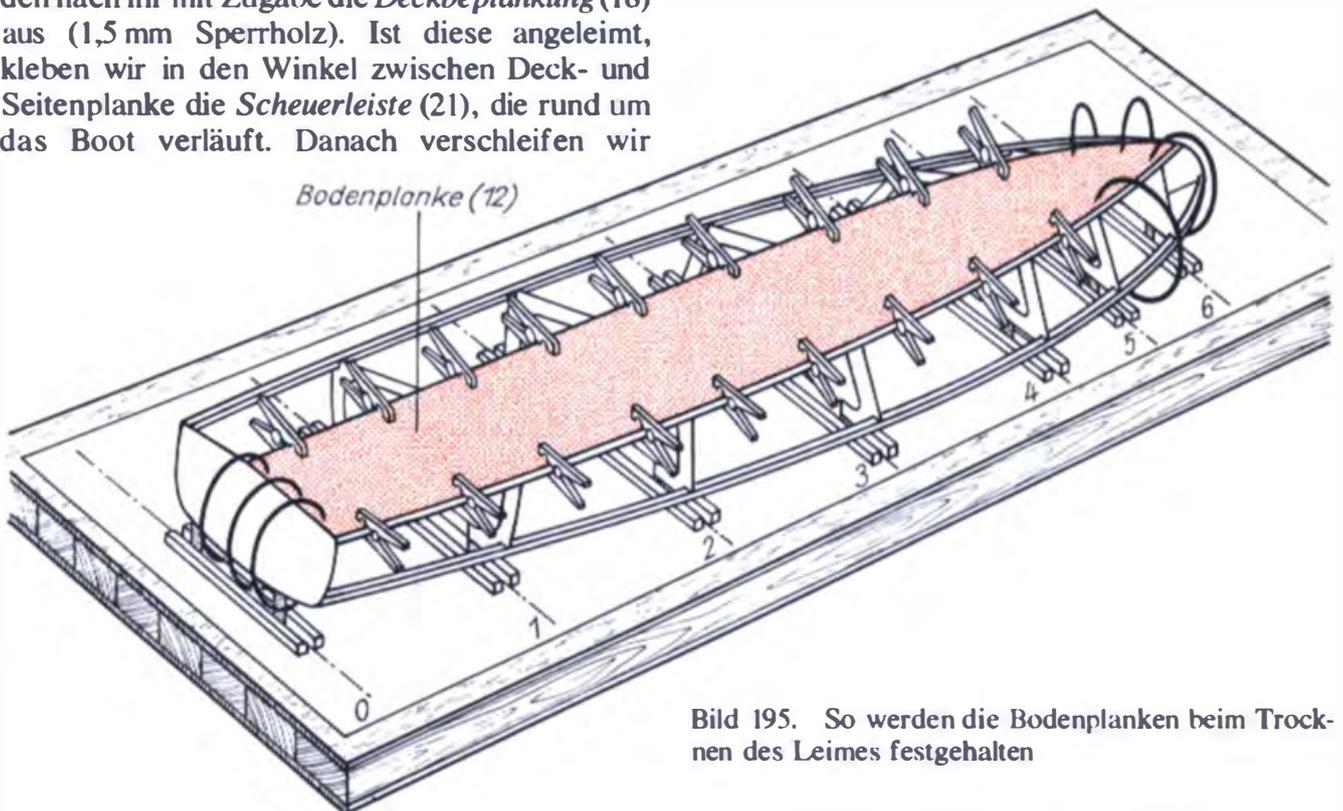


Bild 195. So werden die Bodenplanken beim Trocknen des Leimes festgehalten

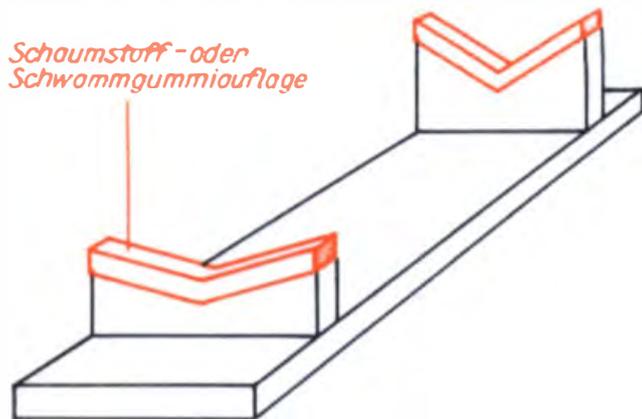
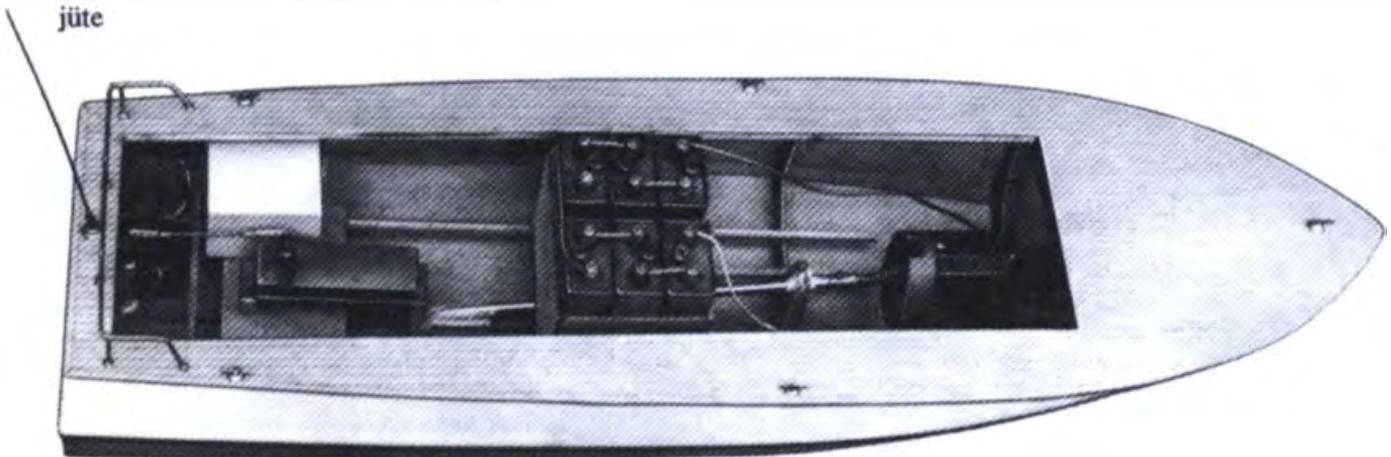


Bild 196. Der Stapelschlitten für die Motorjacht

sauber die gesamte Beplankung und markieren mit einem harten, spitzen Bleistift ein *Leistendeck*. Nun kleben wir noch den *Abweiser* (22) an und streichen den Bootskörper außen einmal mit farblosem Nitrolack.

Bei den weiteren Arbeiten am Boot wird uns ein Stapelschlitten (Bild 196) gute Dienste leisten. Mit ihm können wir das Boot bequem aufstellen und vor Beschädigungen schützen. Nun zeichnen wir die Teile der *Kajüte* (Wohn- und Aufenthaltsraum) nach den Angaben des Generalplanes auf der vorderen Buchdeckelinnenseite maßstäblich auf Sperrholz (1,5 mm) und schneiden die Teile aus. Die Kajütseitenwände (24), die Stirnwand (29) und die Rückwand (30) des *Cockpits* (mit Sitzbänken versehene Vertiefung im Heck von Jachten) sowie die Dachspanten (27) **passen** wir in den Freiraum des Decks ein und verleimen sie miteinander. Danach folgen die Kajütstirnwand (25), das Kajütdach (26), der Cockpitfußboden (28) und rund um die Kajüte die Scheuerleiste

Bild 197. Die Motorjacht bei abgenommener Kajüte



(32). Tür (33) und Schiebeluke (34) können wir durch Aufkleben imitieren.

Die nun folgenden Arbeiten erfordern keine strenge Reihenfolge. Wir müssen die Fenster einkleben, die *Reling* (Geländer an der Bordwand; Teil 35) befestigen, die *Handläufe* (Rohre oder Seile auf freien Decks zum Festhalten; Teile 36 am Kajütenaufbau), die Positionslampen (40), die *Klampen* (Vorrichtungen zum Festmachen von Tauen und Seilen; Teile 37), den Ruderstand (31), den Wimpel (38) und den Sitz (39) für den Steuermann anbringen. Einige dieser Teile befestigen wir erst nach dem vollständigen Lackieren endgültig. Die Handläufe, die Reling, den Sitz und die Wimpelstange fertigen wir aus Messingrohr an (alte Druckkugelschreiberminen). Die Einzelteile löten wir zusammen, polieren und lackieren sie farblos. Die Positionslampen und das Signalhorn sind entweder aus Aluminium oder aus Holz.

Farbgebung

Unterwasserschiff:	rot oder grün,
Freibord:	weiß,
Deck, Cockpit:	farblos (Leisten imitiert),
Kajütseitenwand:	farblos oder weiß; rot bzw. grün abgesetzt,
Kajütdach:	weiß,
Reling, Handlauf:	Messing, farblos lackiert,
Klampen:	schwarz,
Positionslampen:	weiß oder silberfarbig.

Bild 197 zeigt das fertige Modell der Motorjacht mit abgenommener Kajüte. Wir erkennen gut die Lage des Motors, der Akkumulatoren, der Rudermaschine und des Empfängers.

Die ferngesteuerte Segeljacht

Für das Modell der Segeljacht wählen wir wieder die Knickspantform in Holzbauweise (Bild 198). So erhalten wir ähnlich wie bei der Motorjacht mit relativ geringem Bauaufwand ein einfaches, aber leistungsfähiges Modell. Es handelt sich um ein Boot der Klasse F5-M, bei dem die Gesamtlänge von 1,27 m und die Gesamtsegelfläche von maximal 5 160 cm² vorgeschrieben sind.

Experimente mit Postkarten

Bevor wir mit dem Bau des Modells beginnen, wollen wir die wichtigsten theoretischen Zusammenhänge kennenlernen. Die Kenntnis und Beachtung der wirkenden physikalischen Gesetze werden uns in die Lage versetzen, mit dem Modell gute Leistungen zu erreichen. Wir wollen durch beste Ausnutzung des Windes eine maximale Vortriebskraft an der Jacht bei Einhaltung eines bestimmten Kurses erzielen. Wie entsteht diese Vortriebskraft überhaupt?

Die physikalische Größe, die uns am häufigsten begegnen wird, wenn wir es mit strömenden Medien (Wasser oder Luft) zu tun haben, ist der *Druck* (= Kraft je Fläche). In einem Luftballon wirkt ein *statischer Druck* p_{stat} auf die Wandung, der ein Maß für die potentielle Energie der eingeschlossenen Luft ist. Lassen wir diese aus dem Ballon ausströmen, so wird die potentielle Energie in kinetische Energie der Luftströmung umgewandelt. Die kinetische Energie tritt in Form des *dynamischen Druckes* p_{dyn} (Staudruck) auf, der immer senkrecht zur Strömungsrichtung wirkt. Wir können ihn nachweisen, indem wir eine Postkarte mit dem Luftstrom »anblasen« (Bild 199).

Zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen statischem und dynamischem Druck geben wir zwei Postkarten eine gewölbte Form und hängen sie in etwa 3 cm Abstand parallel zueinander auf zwei Stricknadeln (Bild 200). Nun blasen wir kräftig zwischen den Postkarten hindurch. Dabei sollten wir erwarten, daß der Luftstrom sie auseinanderdrückt. Entgegen dieser

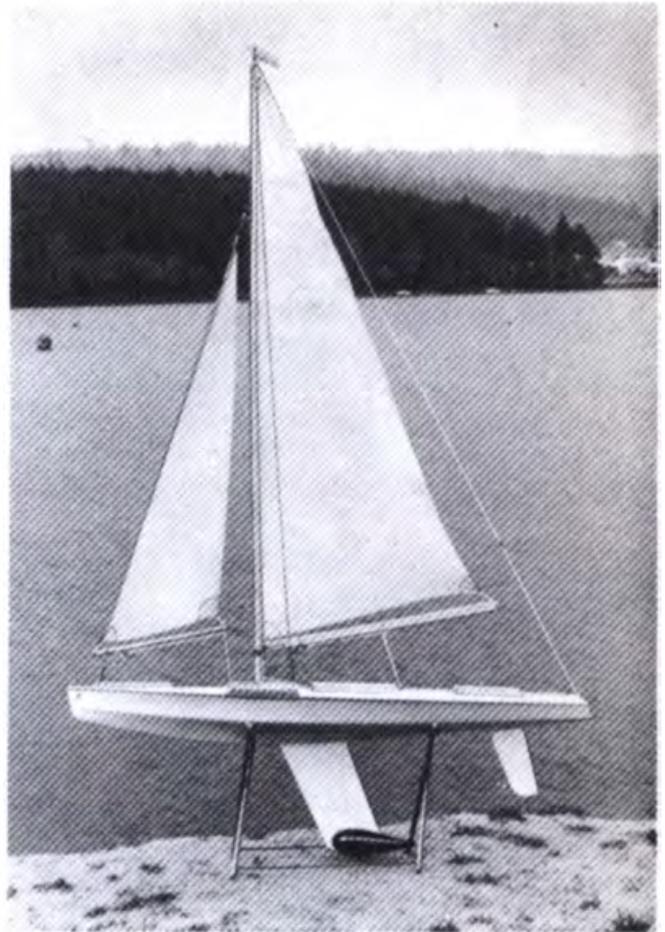
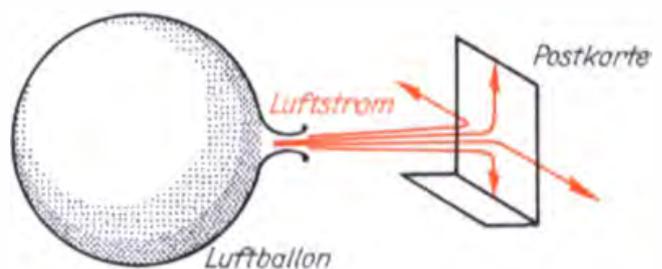


Bild 198. Unsere ferngesteuerte Segeljacht
Erwartung entstehen jedoch Kräfte, die die Postkarten zusammendrücken. Wir erklären uns diese Erscheinung folgendermaßen. Die Luftströmung wird durch *Stromlinien* dargestellt. In einer solchen Strömung gilt auf Grund des *Energieerhaltungssatzes*:

$$p_{\text{stat}} + p_{\text{dyn}} = \text{konstant.}$$

Müssen Luftteilchen durch einen sich verengenden Querschnitt strömen, so erhöht sich ihre Geschwindigkeit. Das bedeutet aber Anwachsen des dynamischen Druckes und damit nach obiger

Bild 199. Wirkung des Staudruckes



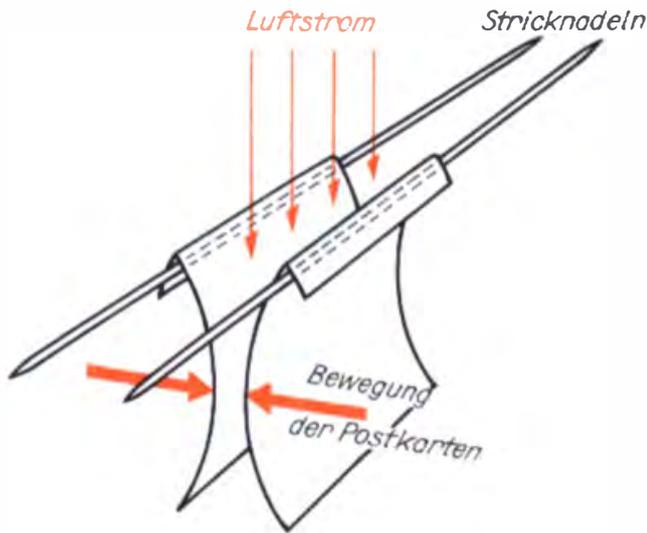
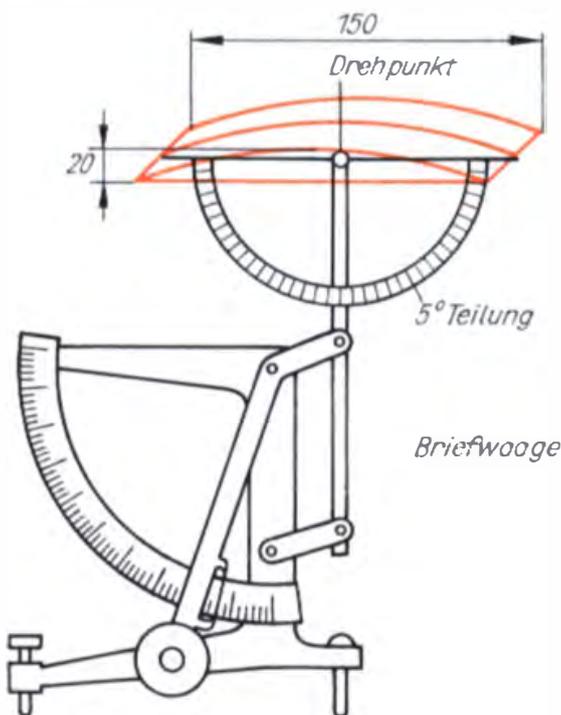


Bild 200. Wirkung von statischem und dynamischem Druck

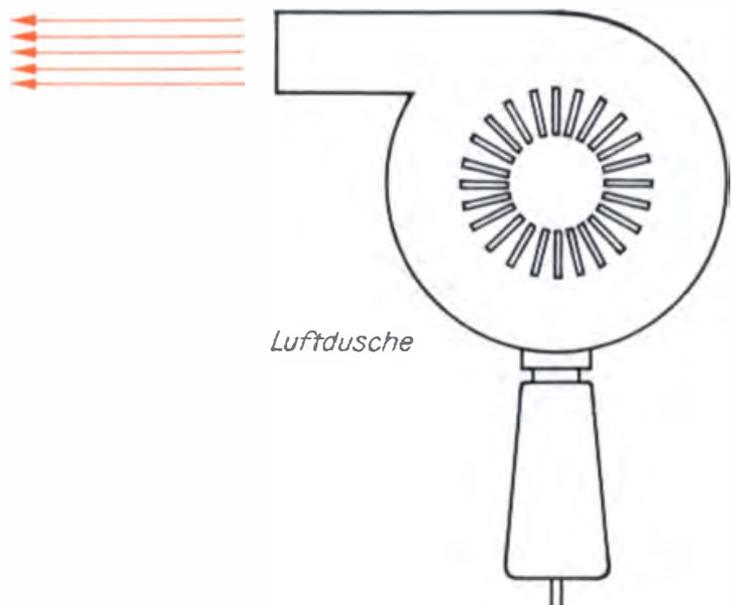
Gleichung Sinken des statischen Druckes. Es entsteht ein *Sog* quer zur Strömung, wenn die Stromlinien zusammengedrückt werden. In unserem Experiment äußert sich das darin, daß die Postkarten zusammenklappen, wenn wir hindurchpusten. Die durch den dynamischen Druck auf eine gewölbte Platte (eine solche ist auch das Segel der Segeljacht) ausgeübten Kräfte werden wir zum Antrieb ausnutzen.

Bild 201. Experiment zum Nachweis der Windquerkraft



Kräfte am Segel

Unsere Jacht soll auf verschiedenen Kursen fahren, dabei wird ihr Segel unter den unterschiedlichsten Winkeln vom Wind angeblasen. Die Zusammenhänge sind nun etwas komplizierter. Wir wollen zunächst wieder ein Experiment durchführen. Zwei übereinandergeliebten Postkarten (oder Karteikarten Format A6) geben wir durch Einkleben von drei Rippen aus 1,5 mm Sperrholz die Form einer gewölbten Platte (Bild 201) und montieren diese schwenkbar auf einer Briefwaage. Der Anstellwinkel α ist an einem Winkelmesser ablesbar. Die gewölbte Platte blasen wir mit einer Luftdusche an, wobei Abstand und Blasrichtung bei allen Versuchen gleich sein sollen. Die Anzeige der Briefwaage stellen wir auf die Mitte der Skale. In einer Versuchsreihe ändern wir den Anstellwinkel von $0...50^\circ$ in Schritten von 5° . Der Ausschlag der Briefwaage ist uns ein Maß für die quer zur Strömungsrichtung wirkende Kraft, die durch den dynamischen Druck unter- und oberhalb der gewölbten Platte entsteht. Diese Kraft bezeichnen wir als *Querkraft* F_q , sie greift am Druckpunkt, den wir beim Segel als *Segelschwerpunkt* bezeichnen, an. An der Plattenoberseite werden die Stromlinien zusammengedrückt, es entsteht ein *Sog*; an der Unterseite werden sie auseinandergezogen, der dynamische Druck erhöht sich



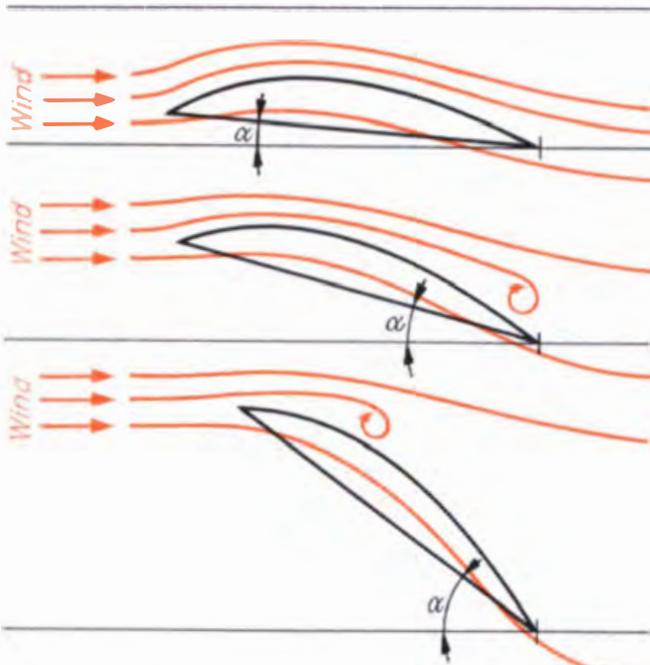


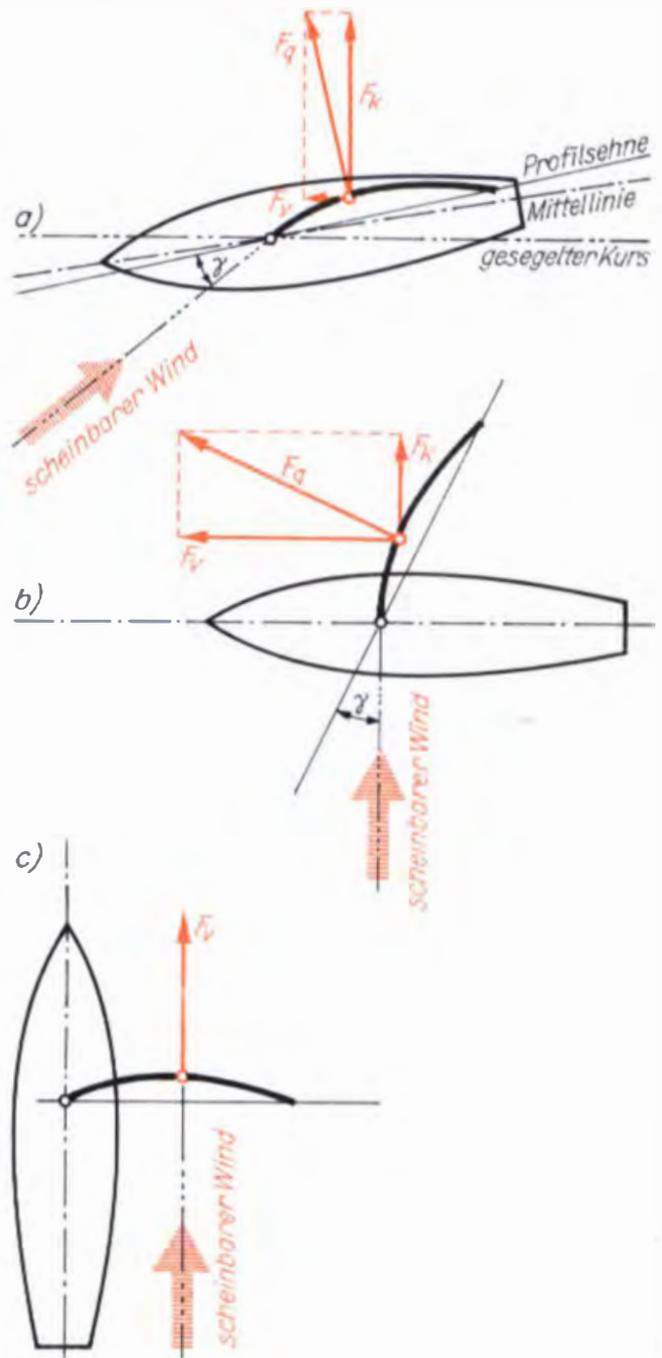
Bild 202. Strömung an der gewölbten Platte bei verschiedenen Anstellwinkeln

dadurch, es entsteht ein *Überdruck*. Beide Drücke rufen entsprechende Kräfte hervor, deren Summe die *Windquerkraft* ergibt (Bild 202). Im Bereich $20...25^\circ$ messen wir die größte Windquerkraft. Das ist darauf zurückzuführen, daß durch die Vergrößerung des Anstellwinkels die Stromlinien auf der Oberseite noch mehr zusammengedrückt und auf der Unterseite weiter auseinandergezogen werden (Maximum der Windquerkraft). Vergrößern wir den Anstellwinkel weiter, so wird die Windquerkraft wieder kleiner. Die Stromlinien können nicht mehr der Oberfläche folgen. Die Strömung löst sich ab und bildet unerwünschte *Wirbel*. Wollen wir eine möglichst große Windquerkraft erzielen, muß das Segel immer den optimalen Anstellwinkel von 20° bis 25° zum Wind haben. Betrachten wir Bild 203, so erkennen wir sofort, welche Bedeutung die Windquerkraft für den Antrieb der Jacht hat. Die Windquerkraft F_q kann in die Komponenten *Krängungskraft* (F_K) und *Vortriebskraft* F_V zerlegt werden. Bei kleinem Kurswinkel γ , also bei Kurs »hoch am Wind«, ist die Komponente F_V noch klein. Bei dem Kurswinkel $\gamma = 90^\circ$ (Kurs »halber Wind«) erreicht die Vortriebskraft F_V ihr Maximum. Beim Kurs »vor dem Wind« verschlechtern sich die Strömungsverhältnisse am Segel, so daß F_V dann wieder kleiner wird.

Wahrer und scheinbarer Wind

Bisher nahmen wir an, das Modell bewege sich nicht. In Wirklichkeit überlagern sich aber Modell- und Windbewegung einander. Ein einfaches Beispiel soll uns das verdeutlichen. Angenommen, wir fahren auf einem Motorboot bei Windstille mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h .

Bild 203. Entstehung der Vortriebskraft am Segel: a) bei Kurs »am Wind«, b) bei Kurs »halber Wind«, c) bei Kurs »vor dem Wind«



Dann haben wir den Eindruck, daß aus der Fahrtrichtung ein scheinbarer Wind mit 20 km/h weht. Fahren wir mit einem Segelboot, so überlagert sich der »Fahrtwind« mit dem »wahren Wind«, und wir nehmen den »scheinbaren Wind« wahr (Bild 204). Den tatsächlichen Wind, den ein ruhender Beobachter wahrnimmt, bezeichnet man als wahren Wind. Bei der fahrenden Segeljacht entstehen die Kräfte alle durch den scheinbaren Wind. Zeichnen wir die Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Kurse, so erkennen wir, wie unterschiedlich der scheinbare Wind bei gleichem wahren Wind sein kann. Nach der Gleichung

$$P_{\text{dyn}} = \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot v^2$$

werden der am Segel auftretende dynamische Druck und demzufolge die entstehende Querkraft bei den verschiedenen Kursen erheblichen Schwankungen unterliegen. Beim Kurs »am Wind« ist zwar F_v klein (Bild 203a), da aber der scheinbare Wind groß ist (Bild 204), wird F_v nach

$$P_{\text{dyn}} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

doch erhebliche Werte annehmen. Die Jacht macht Fahrt bis »hoch am Wind«. Bis zum Kurs

»halber Wind« verringert sich zwar die Geschwindigkeit des scheinbaren Windes (Bild 203b), dafür nimmt aber F_v zu (schnelle Fahrt). Die Geschwindigkeit des scheinbaren Windes verringert sich beim Kurs »raumer Wind« immer mehr, bis sie beim Kurs »vor dem Wind« nur noch die Hälfte des wahren Windes ausmacht. Der scheinbare Wind ändert sich je nach Fahrgeschwindigkeit im angenommenen Beispiel in dem Bereich von $v_s = 1,5 \cdot v_w \dots 0,5 \cdot v_w$. Einstellwinkel des Segels und scheinbarer Wind sind damit für die Vortriebskraft der Jacht ausschlaggebend.

Bei Einhaltung eines vorgegebenen Kurses muß das Segel also zum scheinbaren Wind einen bestimmten Winkel bilden, um den maximalen Vortrieb zu erzeugen. Da wir am Ufer nur den wahren Wind einschätzen können, brauchen wir am Modell eine Anzeigevorrichtung für den scheinbaren Wind, eine Windfahne an der Mastspitze (*Verklicker*). Die einfachste Form ist eine große Hühner- oder Gänsefeder. Wir stellen uns den Verklicker nach Bild 205 her. Er wird durch ein Zusatzgewicht genau ausbalanciert, damit auch bei geneigtem Boot eine richtige Anzeige erfolgt.

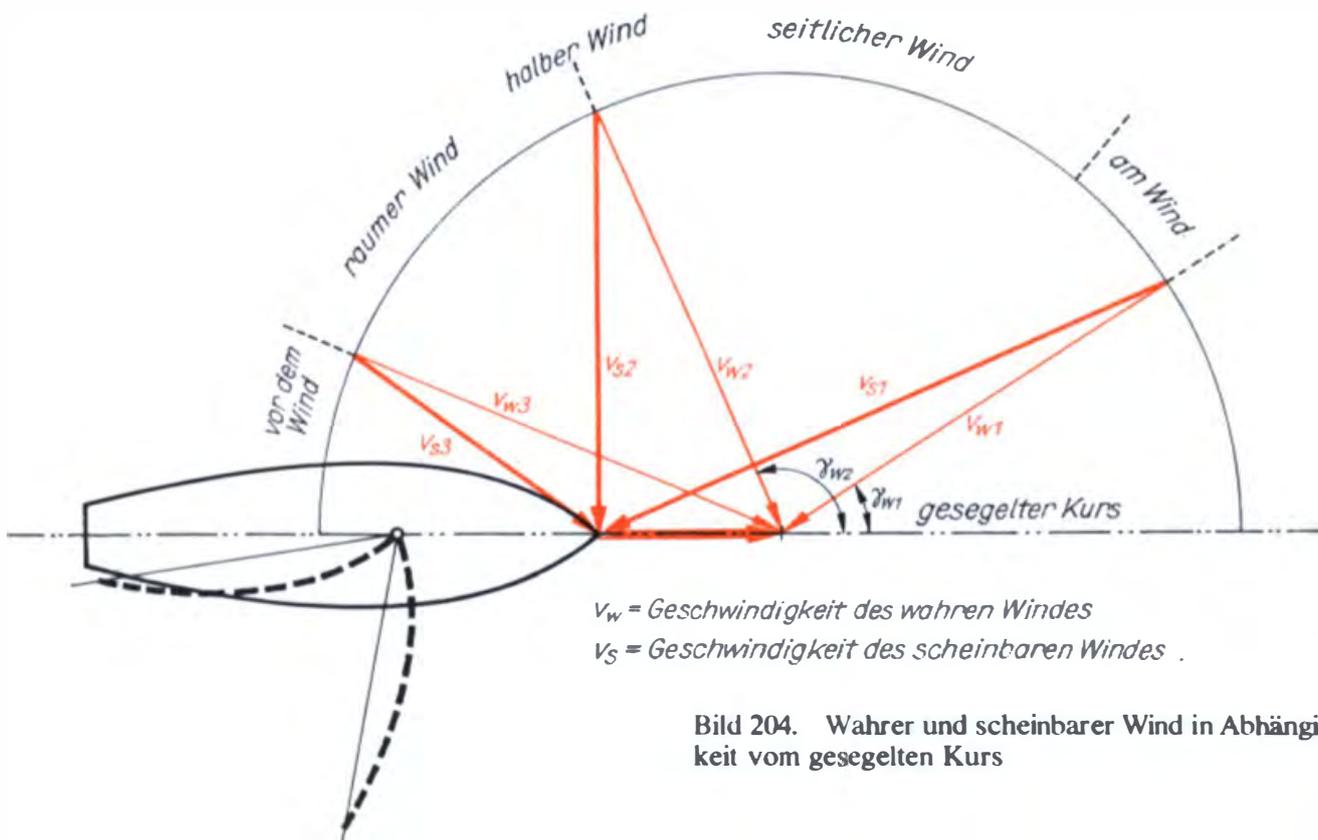


Bild 204. Wahrer und scheinbarer Wind in Abhängigkeit vom gesegelten Kurs

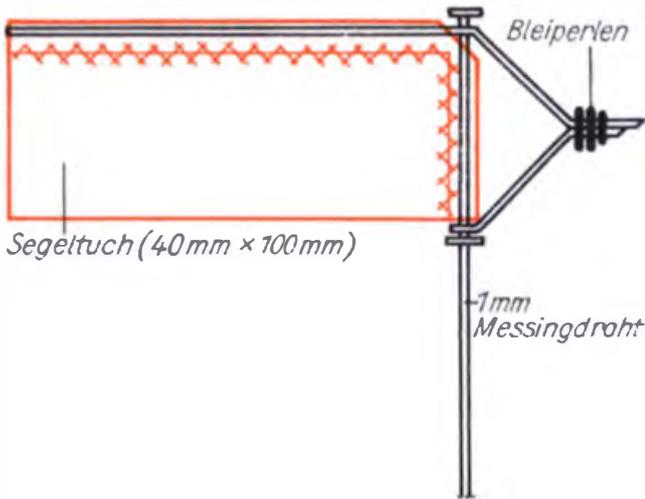


Bild 205. Der Verklicker zeigt die Richtung des scheinbaren Windes an

Etwas Theorie zur Konstruktion der Segeljacht

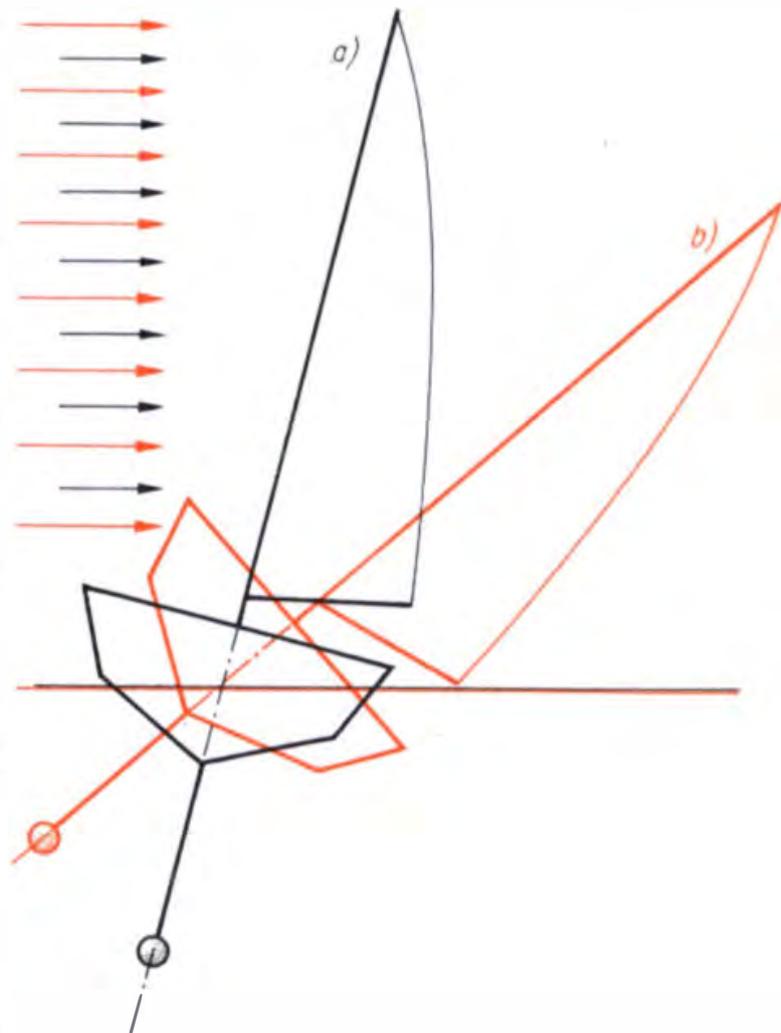
Wir wissen jetzt, welche Kräfte am Segel angreifen. Nun wollen wir überlegen, wie wir diese Kräfte zum Antrieb des Modells nutzen können. Betrachten wir dazu die Segeljacht bei seitlich einfallendem Wind, so stellen wir fest, daß sie sich unter dem Winddruck mehr oder weniger stark zur Seite neigt. Man sagt, das Boot *krängt*. Dieses Krängen ist unerwünscht. Es birgt die Gefahr in sich, daß das Boot kentert und Wasser einbricht. Zum anderen wird bei starker Schlagseite die wirksame Segelfläche wesentlich verringert. Vergleichen wir dazu die Bilder 206a und b. Außerdem wird bei starker Schlagseite die wirksame Fläche des Ruders so weit verkleinert, daß unter Umständen ein einwandfreies Steuern nicht mehr möglich ist. Wir legen also den Gewichtsschwerpunkt des Modells so tief wie möglich (leichter Mast, leichtes Segel, leichter Bootskörper, Fernsteueranlage tief eingebaut) und bringen zusätzlich an der Flosse ein *Ballastgewicht* an. Bei starkem Wind bewirkt es, daß das Boot wenig krängt. Der Ballast hat jedoch ein tieferes Eintauchen des Bootes und damit erhöhten Fahrtwiderstand zur Folge. Wir werden ihn also nur so groß wie nötig machen und uns für Segelfahrten bei schwachem Wind einen zweiten, leichteren anfertigen.

Die Flosse hat die Abdrift als Wirkung von F_K zu mindern. Aus Bild 203 erkennen wir, daß der Krängungskraft F_K eine möglichst gleich große

Kraft entgegenwirken muß. Würde die Abdrift voll wirksam, so könnte das Boot immer nur vor dem Wind segeln. Abhilfe schaffen wir durch eine große *Lateralfläche* des Modells. Die Lateralfläche entspricht der Seitenprojektion des unter Wasser liegenden Teils des Schiffmodells. Sie erzeugt einen großen Widerstand, der der Abdrift entgegenwirkt. Die Flosse werden wir auf Grund der vorangegangenen Überlegungen lang und schmal auslegen, damit der Ballast tief genug angebracht werden kann. So erzielen wir selbst mit kleinem Ballast eine hohe Gewichtsstabilität. Eine schmale Flosse begünstigt außerdem die Wendigkeit des Modells.

Wir kennen nun zwei Schwerpunkte an der Segeljacht, den *Gesamtsegelschwerpunkt* (ergibt sich aus den beiden Schwerpunkten von Vor- und

Bild 206. Der Wind läßt die Segeljacht krängen und verkleinert damit die wirksame Segelfläche: a) bei leichtem Wind, b) bei schwerem Wind



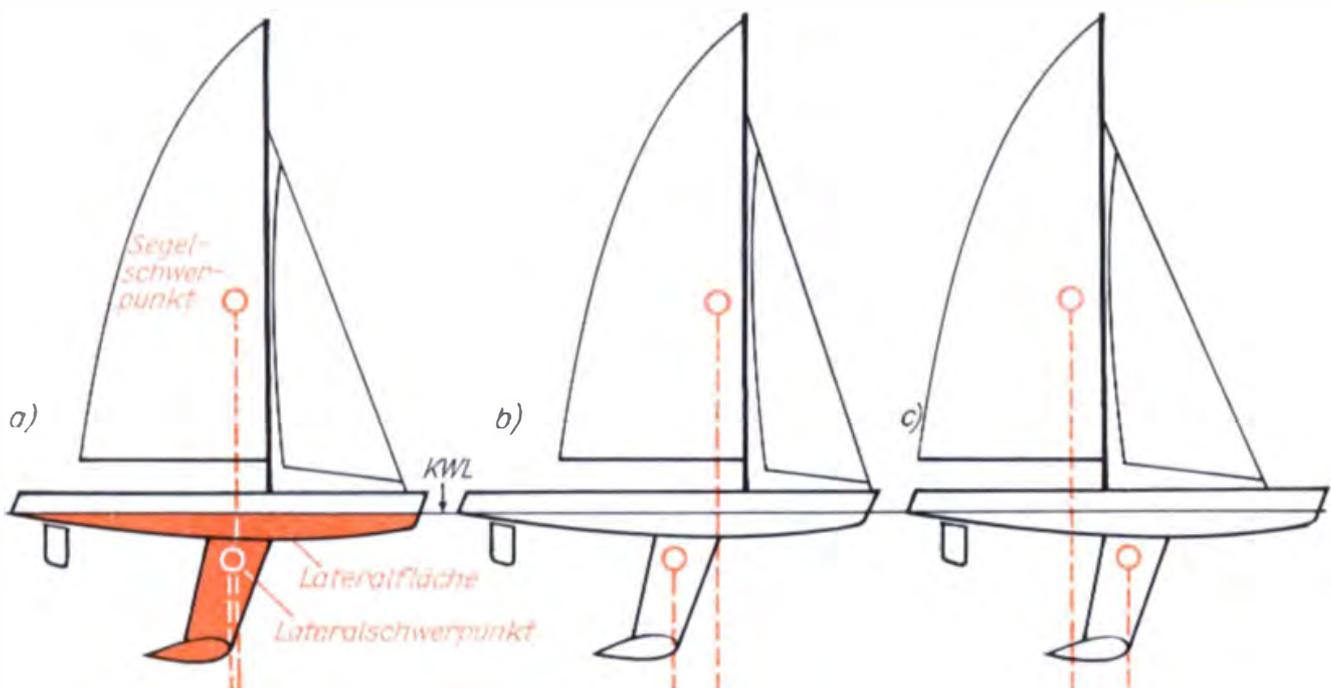
Hauptsegel, an ihm greifen die Windkräfte F_R und F_K an) und den *Lateralschwerpunkt*, an dem die Gegenkräfte angreifen. Wir können schlußfolgern, daß beide Schwerpunkte auf einem Lot liegen sollten (Bild 207). In Abhängigkeit vom gesegelten Kurs ändert der Segelschwerpunkt seine Lage. Ähnliches gilt für den Lateralschwerpunkt. Die Lage beider zueinander ist aber ausschlaggebend für die Kursstabilität des Modells. Es segelt kursstabil, wenn der Segelschwerpunkt 0,05...0,1% der Länge der KWL vor dem Lateralschwerpunkt liegt. Liegt er zu weit davor, so ist das Modell *leegierig*, es ist bestrebt, allein aus dem Wind herauszudrehen. Wir verhindern das, indem wir die Segel zum Heck hin versetzen. Liegt der Segelschwerpunkt hinter dem Lateralschwerpunkt, so ist das Modell *luggierig*, es ist bestrebt, allein in den Wind hineinzudrehen. Diese Erscheinung beheben wir durch Versetzen der Segel zum Bug hin. Die Lageveränderung der beiden Schwerpunkte hängt von vielen Faktoren ab. Die richtige Lage ermitteln wir dann experimentell. Das Modell ist dafür ausgelegt. Bei neutraler Ruderstellung muß das Modell kursstabiles Verhalten zeigen. Geringe Luv- oder Leegierigkeit können wir zwar durch ent-

sprechende Ruderausschläge kompensieren, sollten dies aber vermeiden, da dadurch erhöhter Fahrtwiderstand erzeugt und die Geschwindigkeit verringert wird. Da hilft nur, die Kursstabilität mit der nötigen Geduld und Sorgfalt durch Segelversetzen genau einzutrimmen.

Bei allen bisherigen Betrachtungen ließen wir die Höhe des Segels außer acht. Da durch die Klasseneinteilung der Boote nur die Gesamtsegelfläche vorgegeben ist, können wir die Segelhöhe und -breite von *Focksegel* (hinterstes Vorsegel) und *Hauptsegel* in weiten Grenzen variieren. Ein hohes, schmales Segel entwickelt bei gleichem Wind größere Kräfte als ein Segel mit kleinerem Seitenverhältnis. Das bedeutet, daß wir für die Jacht möglichst zwei *Stell* Segel anfertigen, ein *Stell* (eine Garnitur) davon mit einem Seitenverhältnis von 6:1 für schwachen Wind. Für stärkeren Wind sind kleinere Seitenverhältnisse zu empfehlen. Die Maße des Segels für unsere Modelljacht stellen eine Kompromißlösung dar. Hochleistungsjachten haben eine Segelhöhe von 1,70m bei einer Masthöhe von 2,00 m.

So wie die *Streckung* (Verhältnis von Höhe zu Breite) des Segels Einfluß auf die entstehenden Kräfte hat, wirkt sich auch seine *Wölbung* aus. Ein schwach gewölbtes Segel ruft bei starkem Wind größere Kräfte hervor als ein stärker gewölbtes, dagegen zeigt das stark gewölbte Segel

Bild 207. Die Lage der Schwerpunkte im Modell: a) Normalfall, das Modell segelt kursstabil, b) das Modell ist leegierig, c) das Modell ist luggierig



mit Bauch bei schwächeren Winden eine bessere Wirkung. Die Wölbung des Segels können wir durch die Spannung des *Fußlieks* (Liek: in den Rand des Segels zur Verstärkung eingenähtes Tau) von Fock- und Hauptsegel einstellen. Da sich die Wölbung des Hauptsegels bei Wind durch Aufsteigen des *Großbaumes* (Rund- oder Vierkantholz am Fußliek des Großsegels) und Auswehen des Segels besonders im oberen Drittel stark ändern würde, bringen wir am Großbaum einen *Niederholer* (Vorrichtung zum Verhindern des Steigens des Baumes und Spannen des Achterlieks) an. Dieser *Niederholer* hält auch bei *gefiertem* (fieren: Leine nachlassen) Segel das Achterliek (achtern: hinten) ständig unter Spannung und verhindert damit das Auswehen des Segels. So können wir das Segel für jeden Wind auf die gewünschte Wölbung einstellen, die dann bei allen Kursen annähernd erhalten bleibt. Von Vorteil ist es, wenn wir für den Vorwindkurs eine etwas größere Wölbung wählen, denn diese bewirkt einen geringeren Luftwiderstand. Da das aber aufwendige mechanische Konstruktionen erfordert, wollen wir am Anfang darauf verzichten.

Betrachten wir zum Schluß noch die Strömung an Rumpf und Segel. Der Rumpf der Modelljacht bewegt sich in einer Wasserströmung, die wieder durch Stromlinien dargestellt wird (Bild 208). Solange diese entlang der Oberfläche des umströmten Körpers verlaufen, bezeichnet man die Strömung als *laminar*. Bewegt sich der Körper zu schnell im Wasser oder hat er eine ungünstige Form, so kann die Strömung nicht mehr der Oberfläche folgen, sie löst sich ab und bildet Wirbel. Eine solche Strömung bezeichnet man als *turbulent*. Ein Körper hat bei turbulenter Strömung einen wesentlich größeren Strömungswiderstand als bei laminarer Strömung, da ein großer Teil der Bewegungsenergie in die kinetische Energie der Wasserwirbel umgesetzt wird. Wir müssen also allen umströmten Körpern (in Luft und Wasser) möglichst eine Laminarform geben. Beim Rumpf wurde dies bereits berücksichtigt, er hat eine weitgehend laminare Form. Aber auch Flosse und Ruderblatt müssen ein strömungsgünstiges Profil erhalten, denn eine ebene Platte neigt viel eher zur Bildung einer turbulenten Strömung als ein laminar profilierter Körper mit größerem Querschnitt. Aber nicht nur

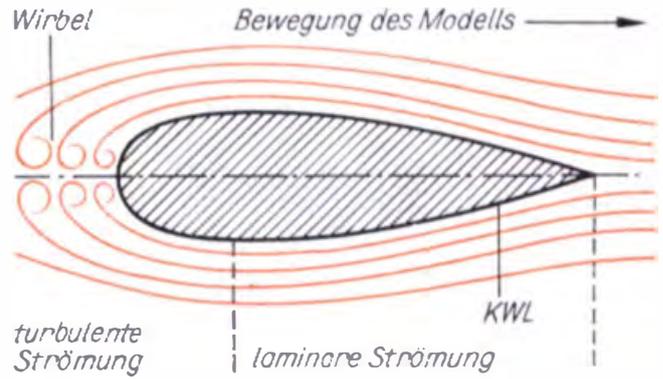


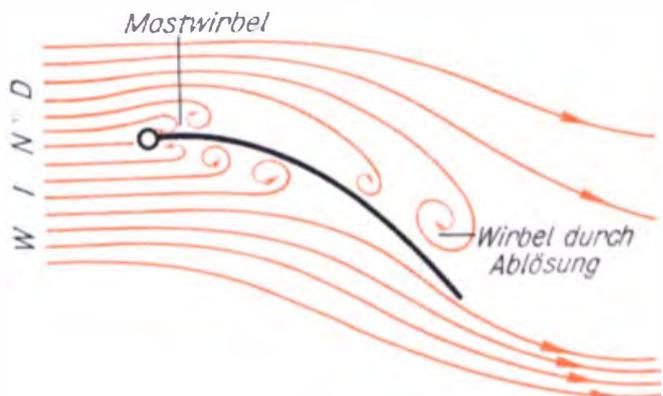
Bild 208. Laminare und turbulente Strömung am Rumpf

die Form der Oberfläche führt zur Turbulenz, sondern auch ihre Beschaffenheit. Durch sauberen Bau des Modells und gute Oberflächenbehandlung ist Turbulenz vermeidbar. Wir sehen ein, daß die einwandfreie Lackfläche auch physikalisch zweckmäßig ist, da sie die Geschwindigkeit des Modells positiv beeinflusst. Ähnliche Überlegungen gelten für das Segel (Bild 209). Die Turbulenz, die der Mast erzeugt, wird sich nie ganz vermeiden lassen. Wir machen ihn daher so dünn, wie es die Festigkeit erlaubt, und profilieren ihn. Außerdem achten wir darauf, daß das Segel gleichmäßig gewölbt ist und keine Knitter oder Falten aufweist.

Wir bauen die Segeljacht

Da die Segeljacht ebenfalls ein Knickspantboot ist, bauen wir sie wie die Motorjacht auf. Die früher gesammelten Erfahrungen werden uns dabei helfen. Zunächst beziehen wir wieder die

Bild 209. Strömung am Segel



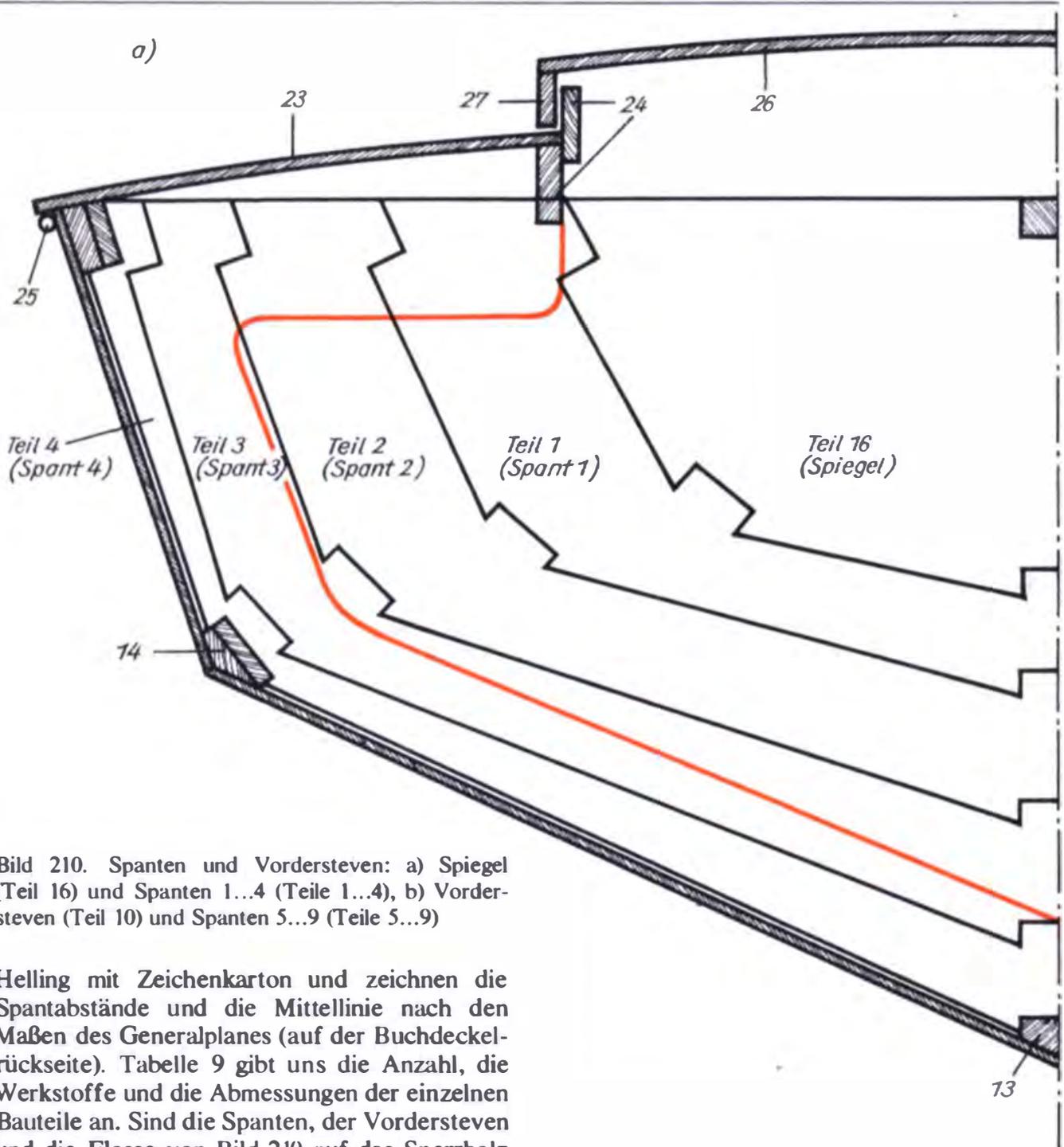
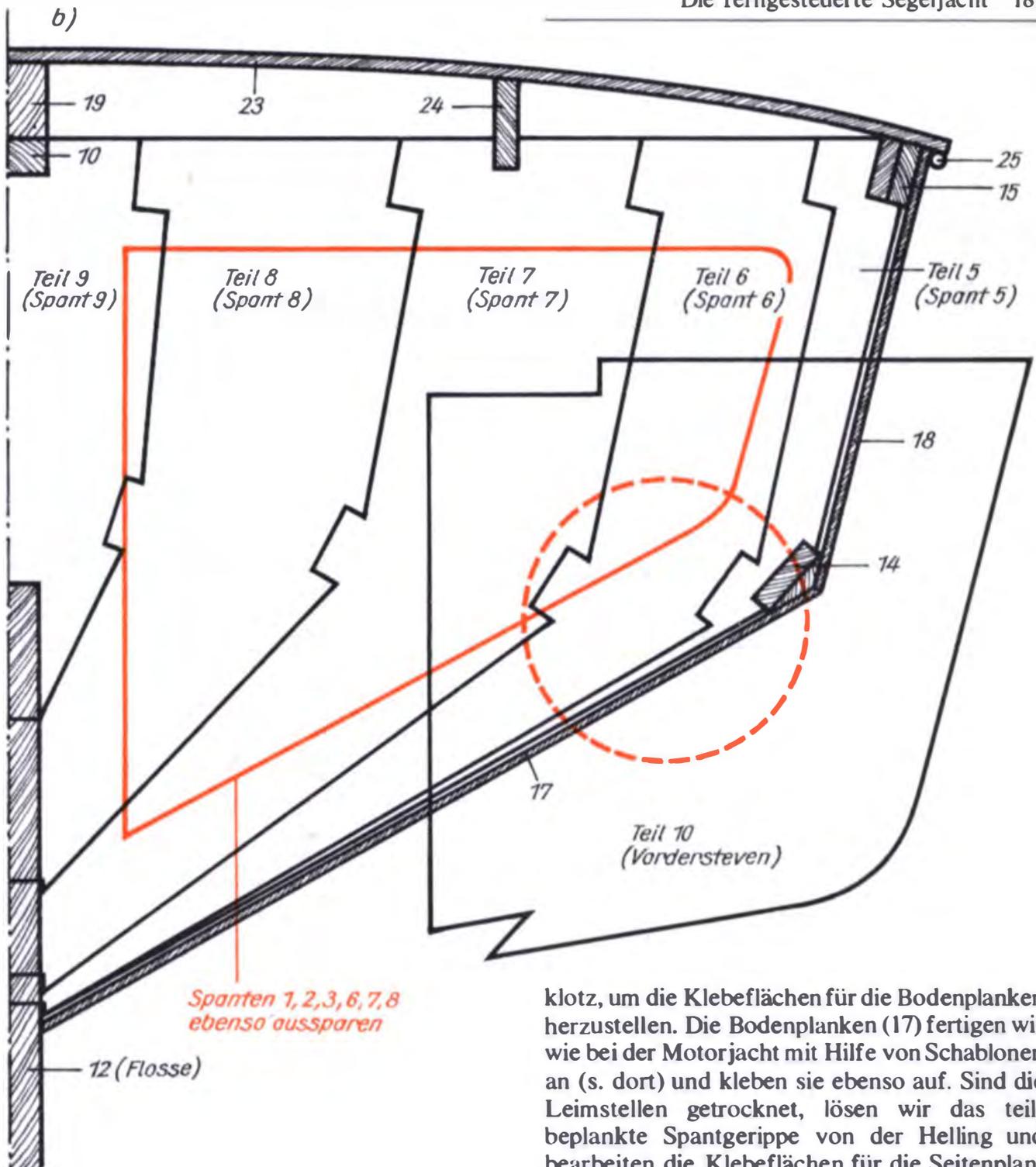


Bild 210. Spanten und Vordersteven: a) Spiegel (Teil 16) und Spanten 1...4 (Teile 1...4), b) Vordersteven (Teil 10) und Spanten 5...9 (Teile 5...9)

Helling mit Zeichenkarton und zeichnen die Spantabstände und die Mittellinie nach den Maßen des Generalplanes (auf der Buchdeckelrückseite). Tabelle 9 gibt uns die Anzahl, die Werkstoffe und die Abmessungen der einzelnen Bauteile an. Sind die Spanten, der Vordersteven und die Flosse von Bild 210 auf das Sperrholz übertragen, sägen wir die Teile mit der Laubsäge aus und verputzen sie mit Schmirgelpapier. Der Bootsbau erfolgt wieder kieloben. Wir stellen die Spanten mit Hilfe von Leisten auf der Helling und dem Deckunterzug (10) auf und richten sie aus. Nun können wir den Vordersteven (11) mit dem Spant 9 und die Flosse (12) mit den Spanten 5 und 6 genau winklig verleimen. Vom genauen Einbau der Flosse hängt weitgehend die Kursstabilität der Segeljacht ab. Wird die Flosse nicht

genau winklig und mit der Mittellinie fluchtend eingebaut, so müssen wir die daraus resultierenden Kursabweichungen mit dem Ruder korrigieren, und das bedeutet Geschwindigkeitsverlust.

Nachdem die Leimstellen ausgehärtet sind, wird die Kielleiste (13) eingepaßt und mit den Spanten verleimt. Damit sie sich besser anschmiegt, stellen wir sie aus zwei Leisten (4 mm × 10 mm) her. Danach passen wir die



Kimmstringer (14) an, die wir wieder aus je zwei Leisten zusammensetzen (s. auch Kapitel »Wir bauen die Motorjacht«). Die Kimmstringer verleimen wir gleichzeitig mit den Spanten und dem Vordersteven. In der gleichen Weise passen wir die Balkweger (15) an, fügen den Spiegel ein und verleimen sie. Wenn alle Leimstellen vollständig ausgehärtet sind, bearbeiten wir die Kielleiste und den Kimmstringer mit Raspel und Schleif-

klotz, um die Klebeflächen für die Bodenplanken herzustellen. Die Bodenplanken (17) fertigen wir wie bei der Motorjacht mit Hilfe von Schablonen an (s. dort) und kleben sie ebenso auf. Sind die Leimstellen getrocknet, lösen wir das teilbeplankte Spantgerippe von der Helling und bearbeiten die Klebeflächen für die Seitenplanken (18). Diese werden wieder mit Hilfe der Papierschablone hergestellt und nacheinander aufgeklebt. Parallel dazu kleben wir die Deckunterzüge (19), die die Luken zwischen den Spanten 1 und 2 sowie 3 und 5 abstützen, ein. Auf den mittleren Deckunterzug (10) leimen wir eine Leiste (20), die am Spant 4 eine Höhe von 10 mm hat und sich zum Bug und Heck hin keilförmig verjüngt. Hiermit schaffen wir die Vorausset-

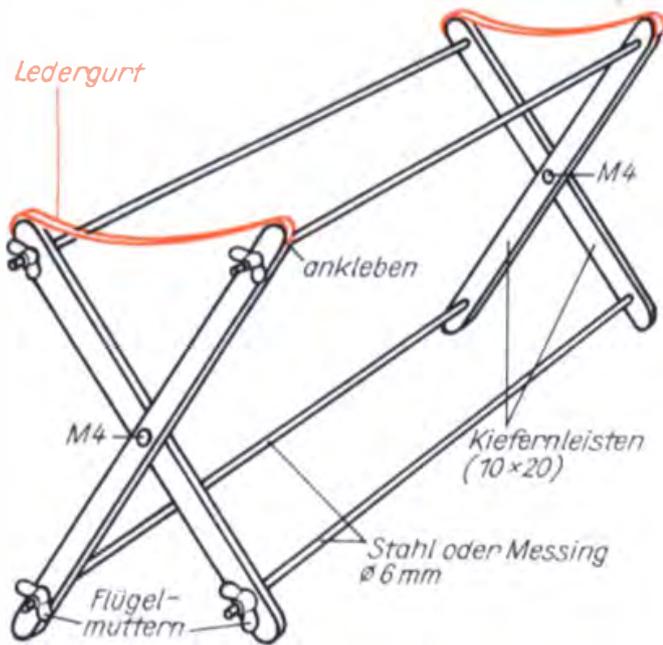
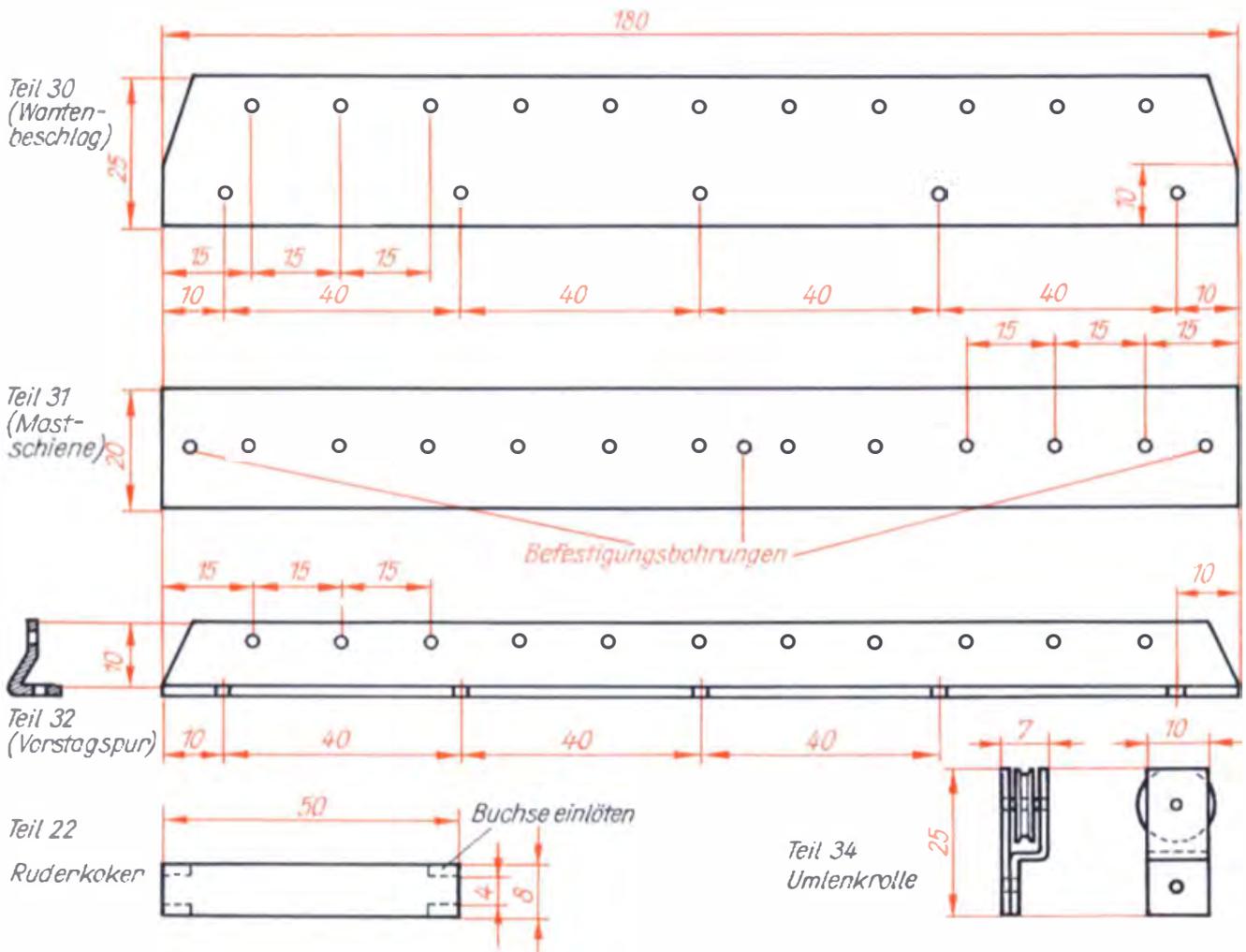


Bild 211. Der Stapelschlitten für die Segeljacht

zung, daß das Deck die vorgesehene Wölbung und den Decksprung erhält. Nachdem wir die Bohrung für den Ruderkoher (22) angebracht haben, passen wir Ruderkoher und Totholz (21) ein und verleimen beide mit Spant 1 und der Kielleiste. Nun schneiden wir den mittleren Deckunterzug zwischen den Spanten 1 und 2 sowie 3 und 5 aus und erhalten so die volle Lukenöffnung. Den gesamten Bootskörper streichen wir innen zweimal mit farblosem Nitrolack oder einmal mit Zellulosekleber. Danach schneiden wir das Deck (23) ebenfalls mit Hilfe einer Schablone aus, bestreichen es einseitig ganz mit Zellulosekleber und legen es so feucht auf den Bootskörper mit den vorbereiteten Klebestellen. Die Deckplanke liegt dabei nur an den Balkwegern, dem Spiegel und den Deckunterzügen an und wird mit ihnen verleimt. Bei diesen Arbeiten leistet uns ein Stapelschlitten erneut gute Dienste. Wir bauen ihn diesmal wegen der langen Kielflosse als scherenförmiges Gestell und lagern den Bootskörper auf zwei Ledergur-

Bild 212. Beschläge, Ruderkoher und Umlenkrolle



ten (Bild 211). Ist das Deck aufgezogen, schneiden wir die Lukenöffnungen aus und kleben die *Sülleisten* (Teil 24; Süll: senkrechte Platte zur Umkleidung der Luken, die das Deck um eine bestimmte Höhe überragt) ein. Sie sollen rundum etwa 6 mm überstehen. Gleichzeitig wird in den Winkel zwischen überstehendem Deck und den Seitenplanken die *Scheuerleiste* (25) eingeklebt.

Die weiteren Arbeiten können in beliebiger Reihenfolge ablaufen. Die Lukendeckel (26) werden auf dem Modell angefertigt. Über die Sülleisten legen wir Polyäthylenfolie (Plastebeutel), bestreichen die angepaßten Randleisten (27) und den Lukendeckel an den Klebestellen mit Weißleim und halten die Teile mit Federspangen fest. Nach dem Trocknen können wir die Lukendeckel abheben. Wir haben so die Gewähr, daß sie gut passen, festsitzen und den Innenraum gegen Spritzwasser abdichten. Das Ruder (28) stellen wir aus 8 mm Sperrholz her. Wir profilieren es wie die Flosse. Den Ruderschaft (29) kleben wir mit Zweikomponentenkleber ein. Nun schleifen und spachteln wir das Boot, bis die Oberfläche einwandfrei glatt ist. Danach grundieren wir zweimal und lackieren einmal den ganzen Bootskörper in der Farbe bzw. der Farbkombination, die uns gefällt. Die Farbgebung sollte jedoch zum Segel passen. Die *Wantenbeschläge* (Teile 30; Want: Drahtseil zur seitlichen Verspannung des Mastes), die *Mast-schiene* (31) und die *Vorstagspur* (32; Beschlag auf Deck zum Befestigen des Vorstags; Vorstag: vorderes Seil zur Verspannung des Mastes in Längsrichtung) stellen wir aus Aluminium- oder

Messingblech her (Bild 212). Die Beschläge werden nach dem Lackieren mit Hilfe von nichtrostenden Blech- oder Holzschrauben (33) am Bootskörper befestigt. Zur *Schotführung* (Schot: Seil zum Bedienen eines Segels) auf Deck kleben wir drei Umlenkrollen (34) mit Zweikomponentenkleber auf dem Deck fest. In den Schotzugpunkten drehen wir je eine Schrauböse (35) durch das Deck in den Unterzug (10). Sie müssen jeweils den gleichen Abstand vom Drehpunkt des Segels haben, damit wir gleiche Schotzugwege für Fock und Großsegel erhalten.

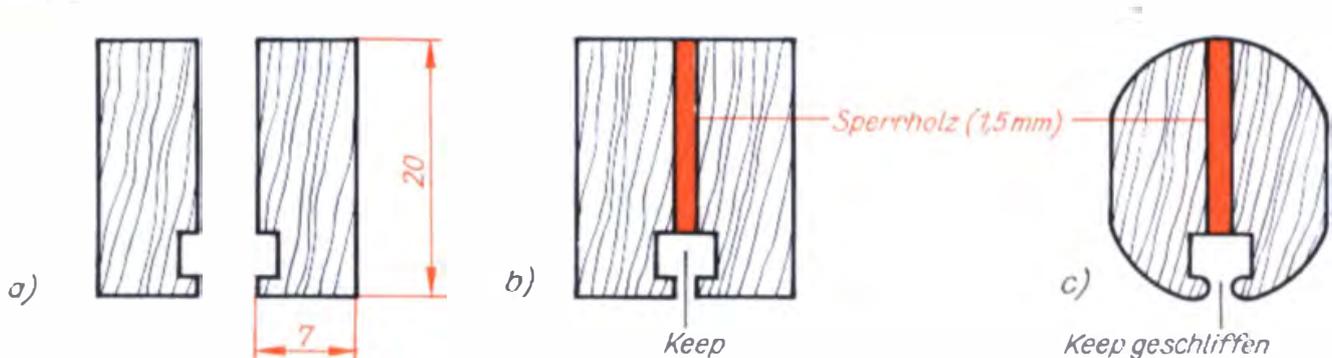
Wir stellen Mast und Takelage her

Mast und Takelage bilden das *Rigg*. Den Mast (36) fertigen wir aus zwei feinfaserigen astfreien Kiefernleisten wie folgt an: Mit Hilfe einer Kreissäge wird in beiden Leisten je eine Nut von 2 mm × 3 mm angebracht (Bild 213a). Unter *Zwischenlegen* einer Schicht Sperrholz (1,5 mm) verleimen wir beide Leisten auf der ganzen Länge und erhalten so die *Keep* (Nut zur Seilführung im Mast), in die wir das Großsegel mit dem Vorliek einfädeln können (Bild 213b). Zum Trocknen des Leimes legen wir die Leisten zwischen zwei völlig ebene Bretter und pressen sie zusammen. Damit der herausgedrückte Leim die *Keep* nicht verstopft, ziehen wir nach dem Zusammenpressen einen Bindfaden mit Knoten durch sie hindurch.

Nun bearbeiten wir den Mast mit Hobel und Schleifklotz, bis er das sich zur Mastspitze verjüngende Profil von Bild 213c hat. Der Mast darf an keiner Stelle einen größeren Durchmesser als 19 mm haben.

Für die Anfertigung des Großbaumes (37)

Bild 213. Wir stellen den Mast her: a) die Leisten werden genutet, b) eine Zwischenlage (1,5 mm Sperrholz) läßt die *Keep* entstehen, c) der Mast wird profiliert



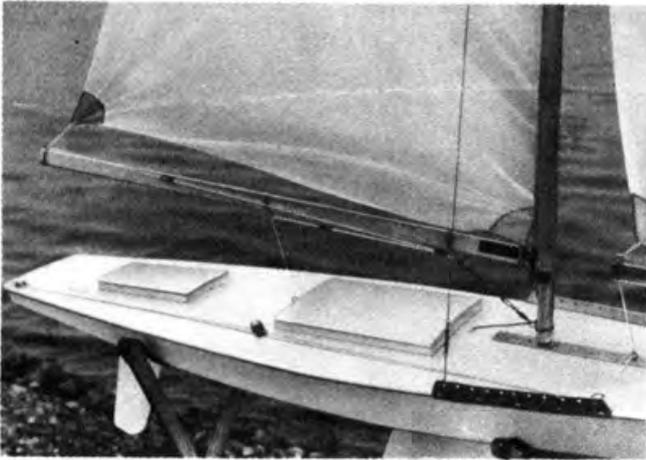


Bild 214. Heckteil der Segeljacht mit Großbaum

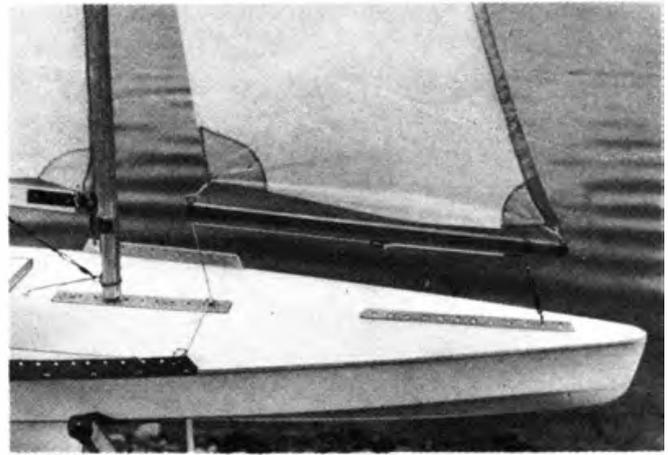


Bild 215. Bugteil der Segeljacht mit Fockbaum

(Bild 214) und des Fockbaumes (38) (Bild 215) verwenden wir ebenfalls feinfaserige astfreie Kiefernleisten, deren Kanten etwas abgeschliffen werden. Den *Mastbeschlag* (Beschlag: Metallteil zur Befestigung) (39) und den *Großbaumbeschlag* (40) stellen wir aus Messingblech her (Bild 215) und befestigen sie mit durchgehenden Kupferbolzen (2 mm Durchmesser), die wir an beiden Seiten zu Nietköpfen schlagen. Alle Bohrungen für die Segel- und Schotbefestigung im Groß- und Fockbaum sichern wir durch Garnwickel, die mit Zellulosekleber bestrichen werden. Der *Fockbaumbeschlag* (41) ist denkbar einfach gehalten (Bild 216a). Er besteht aus einem *Wirbel* (42) mit Drahthaken (46). Der Wirbel sichert die freie Drehbarkeit des Fockbaumes. Wir können ihn in Geschäften für Anglerbedarf erwerben, ebenso die Dederonschnur für die Wanten (44), den Achter- und den Vorstag (43). Die obere Wanschlaufe hängen wir in die Schrauböse (35) am Mast ein, während die untere durch eine Spindelöse zum Spannschloß (45) geführt wird (Bild 216c). Die andere Spindel des Spannschlusses wird mit Hilfe eines Drahthakens am Wantenbeschlag (30) eingehängt. Aus der Schrauböse zum Befestigen des Vorstags am Mast feilen wir ein 2 mm breites Stück heraus, damit wir die obere Schlaufe des Vorstags bequem ein- und aushängen können. Die untere Schlaufe wird an einem am Fockbaum befestigten Springring angeschlagen.

Für das Segel fertigen wir uns nach den Angaben im Bild 217 zunächst aus Packpapier je eine Schablone an. Bei den Maßen finden wir

immer zwei Angaben, solche ohne Klammer für das normale oder auch Schönwettersegel und solche in Klammern für das Schwerwettersegel. Für die ersten Segelversuche fertigen wir das Schönwettersegel an. Das Segeltuch soll leicht, reißfest, wasserabweisend und luftdicht sein. Am besten eignen sich leichte Chemiefasersegeltuche (z. B. Polyant oder Dacron) mit einer Masse von 70...175 g je Quadratmeter. Diese Segeltuche erhalten wir nur von Segelmachereien. Es eignen sich aber auch leichte Seiden-, Baumwoll- oder Leinentuche, die wir selbst wasserabweisend imprägnieren können. Leinen- und Baumwolltuche haben den Vorteil, daß wir sie vor dem Zuschnitt glatt und verzugsfrei bügeln können und sie außerdem recht preiswert im Handel erhalten. Dederon- und Polyesterstertuch lassen sich sehr einfach mit einem scharf gefeilten heißen LötKolben »schneiden«. Die Schnittkanten verschmelzen, und wir sparen uns damit das Säumen. Beim Zuschnitt der Segel müssen wir genau auf den Fadenlauf des Tuches achten. Er ist im Generalplan angegeben. Bild 217 zeigt, wie das Segeltuch aufgeteilt wird. Dabei ist wichtig, daß die Kante des Segels, die unter dem stärksten Zug steht, mit der Webkante des Segeltuches parallel verläuft. Bei der Fock ist es das Vorliek, beim Großsegel das Achterliek. So sichern wir, daß das Segel beim Auftakeln faltenlos steht. Beim Zuschnitt müssen wir soviel Material zugeben, wie dann beim Säumen wieder verlorengeht. Zum Nähen nehmen wir jeweils das Garn, aus dem auch das Tuch besteht, dann verzieht sich das Segel nicht, wenn das Garn feucht geworden ist

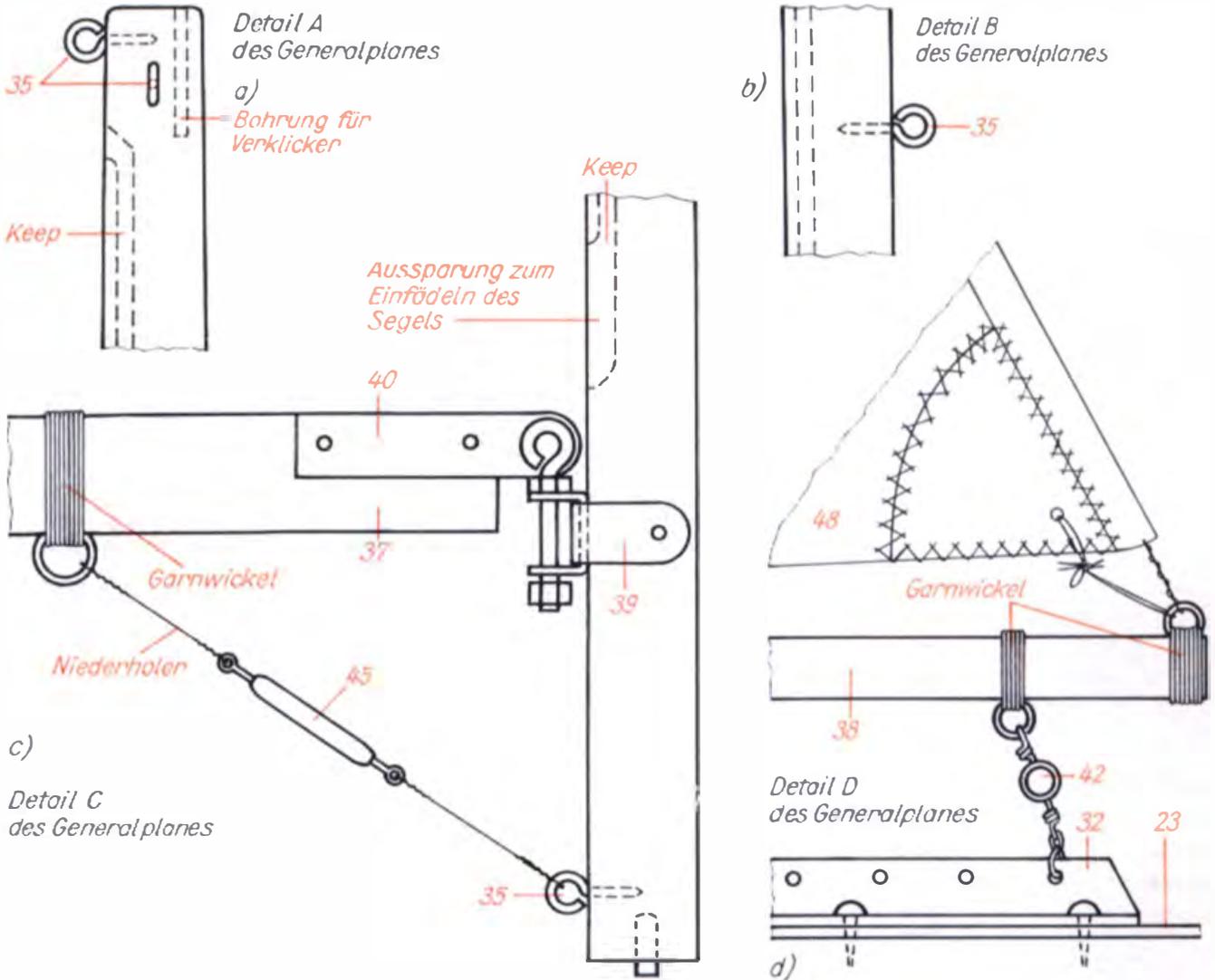
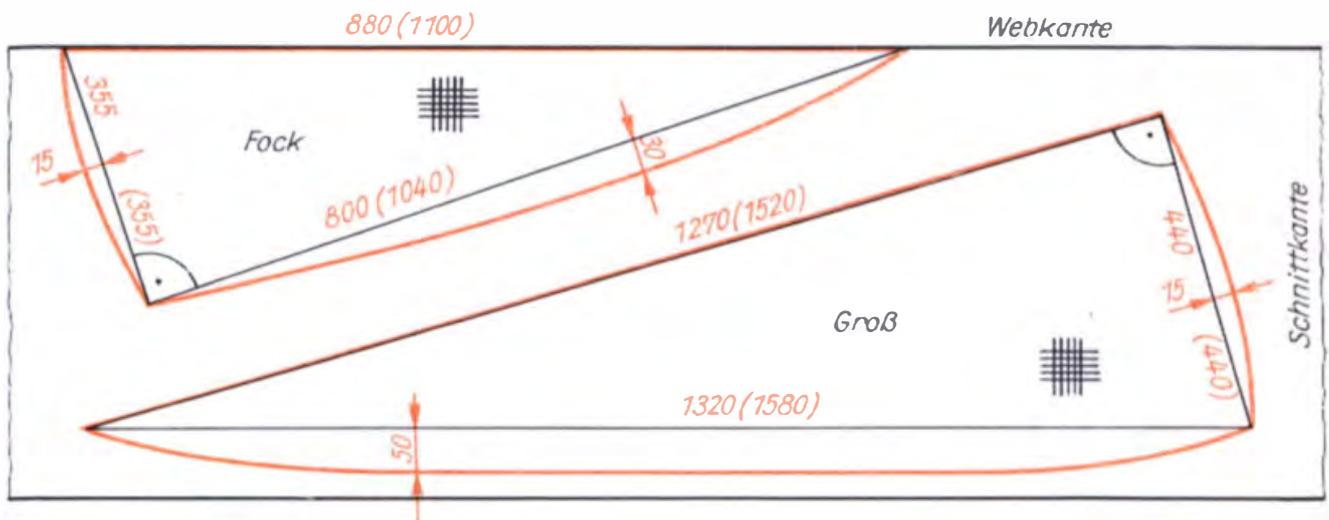


Bild 216. Mast- und Baumbeschläge: a) Mastkopf, b) Vorstagöse, c) Großbaumbeschlag, d) Fockbaumbeschlag

Bild 217. Wie wir das Segel aus dem Segeltuch schneiden



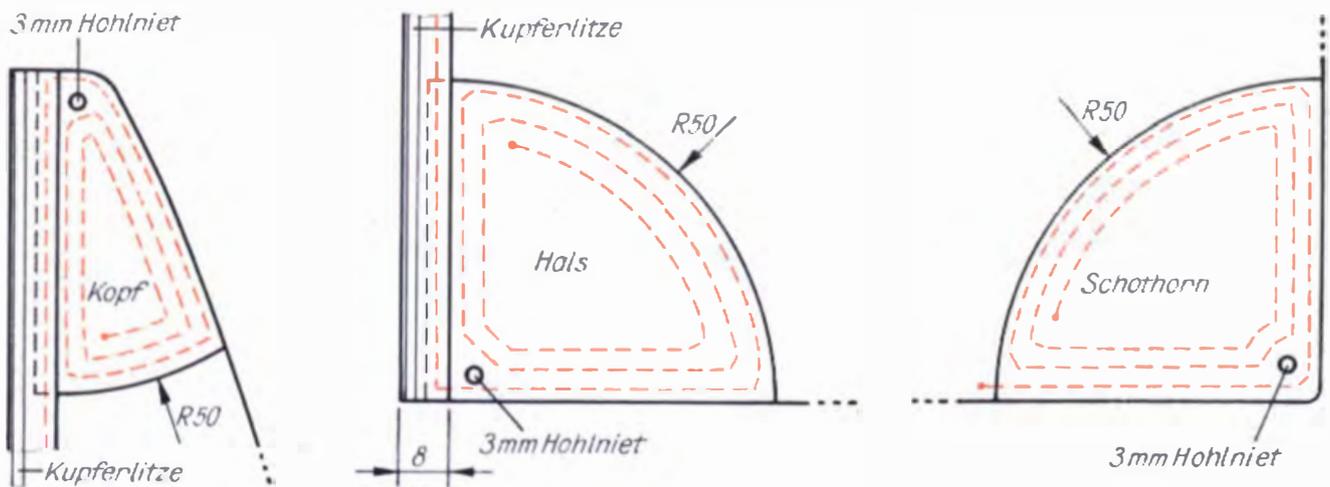


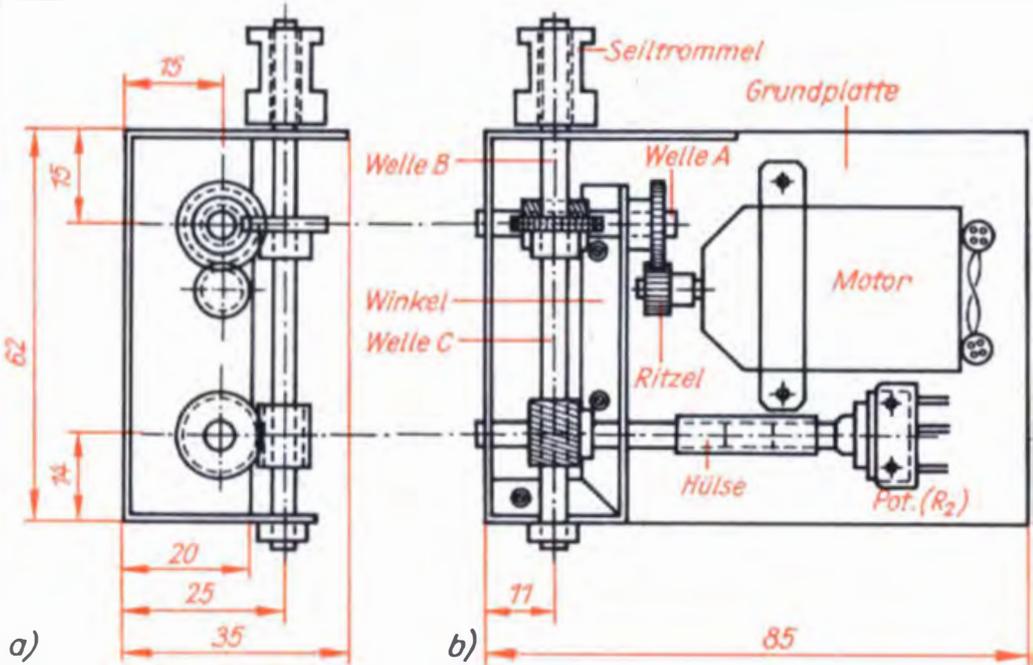
Bild 218. Nähte an Kopf, Hals und Schothorn des Segels

und schrumpft. Durch den Saum des Großsegelvorlieks (47) ziehen wir PVC-isolierte Kupferlitze, mit der das Segel in die Keep eingefädelt wird. Die Kupferlitze verbleibt in der Keep und hält es auf der ganzen Mastlänge fest. Durch den Saum des Focksegelvorlieks (48) fädeln wir den Vorstag (43). Die Säume am Vorliek von Großsegel und Fock machen wir deshalb so breit, damit die entsprechenden Drähte durchgefädelt werden können. Gleichzeitig nähen wir beim Säumen der Segel am Kopf, am Schothorn (Ecke des Segels, an der die Schot angeschlagen wird)

und am Hals (vordere untere Ecke des Segels) Verstärkungen aus Tuchresten ein (Bild 218). Da schneiden wir dann die Löcher für die Kauschen hinein, die durch Hohniete oder mit Knopflochstich eingefast werden.

Die Spannung des Fußlieks paßt den Bauch des Segels den Windverhältnissen an. Damit das geschwungene Achterliek von Groß- und Focksegel bei Wind nicht umkippt, versehen wir es mit Segellatten (am Achterliek). Am Großsegel dürfen wir maximal vier Segellatten (49) mit den Höchstmaßen (10mm x 100mm), am Focksegel maximal drei Segellatten (50) mit den Höchstmaßen (10mm x 50mm) anbringen. Die Segellatten werden in Taschen befestigt, die auf die Segel aufgenäht sind. Voraussetzung für die gute Wirk-

Bild 219. Segelwinde: a) Seitenansicht, b) Draufsicht



samkeit unserer Segel ist ein faltenloses und knitterfreies Stehen. Damit sich bei der Aufbewahrung keine Knitter und Falten bilden, rollen wir die Segel im trockenen Zustand sorgfältig auf Fock- und Großbaum und stecken sie in eine Plastetüte.

Wir bauen eine Segelwinde

Mit der Segelwinde wollen wir die Segel der Segeljacht proportional zur Knüppelstellung im Sender verstellen. Dabei müssen etwa 150 mm Schotleine aufgewickelt werden. Da das Segel auch gegen den Winddruck verstellt werden muß, soll die Winde entsprechend kräftig sein und die Leine in 6...10s auf- bzw. abwickeln. Diesen Forderungen entspricht die hier vorgestellte Segelwinde (Bild 219 bis 222). Der Motor treibt über Vorgelege und Schneckenrad die Hauptwelle mit der Seiltrommel, von der über eine weitere Schnecke und ein Zahnrad das Potentiometer angetrieben wird. Das gesamte Getriebe

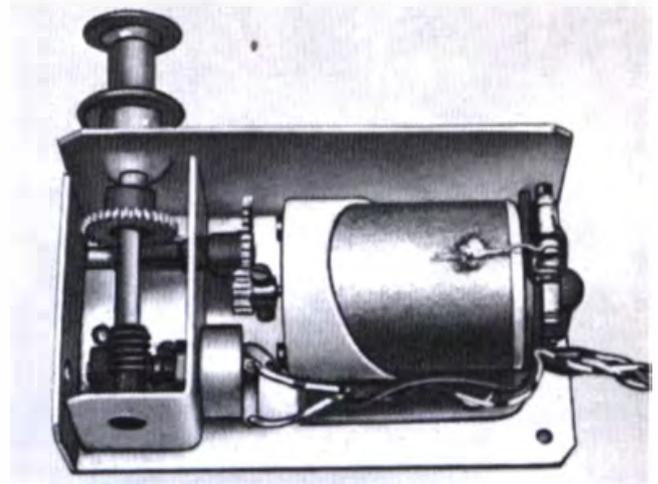
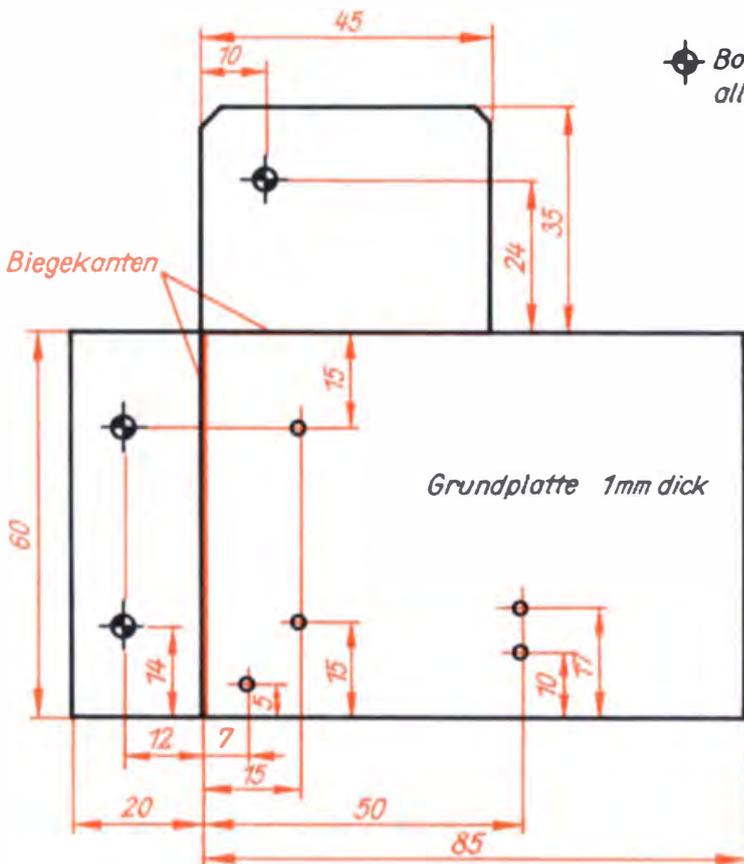


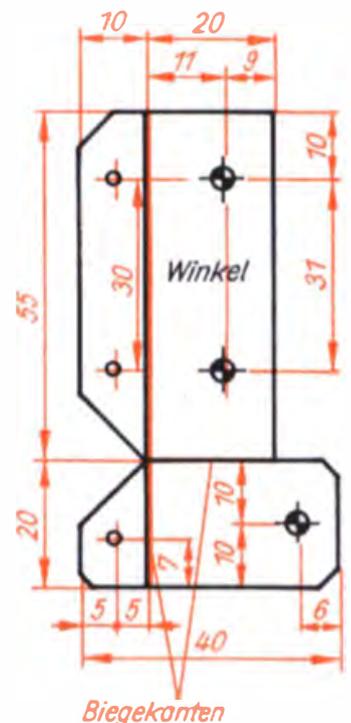
Bild 220. Gesamtansicht der Segelwinde

mit Motor und Potentiometer ist in einem Aluminiumblechgehäuse untergebracht (Bild 220). Die Seiltrommel wird außerhalb des Gehäuses auf die Hauptwelle gesetzt, damit sie leicht auswechselbar ist. So können wir die Segelwinde auf unterschiedliche Schotzugwege einstellen, indem wir einfach Seiltrommeln mit unterschiedlichem Durchmesser verwenden. Die Einzelheiten des

Bild 221. Grundplatte und Winkel der Segelwinde



⊕ Bohrungen $\varnothing 3,5\text{mm}$
alle anderen Bohrungen $\varnothing 2\text{mm}$



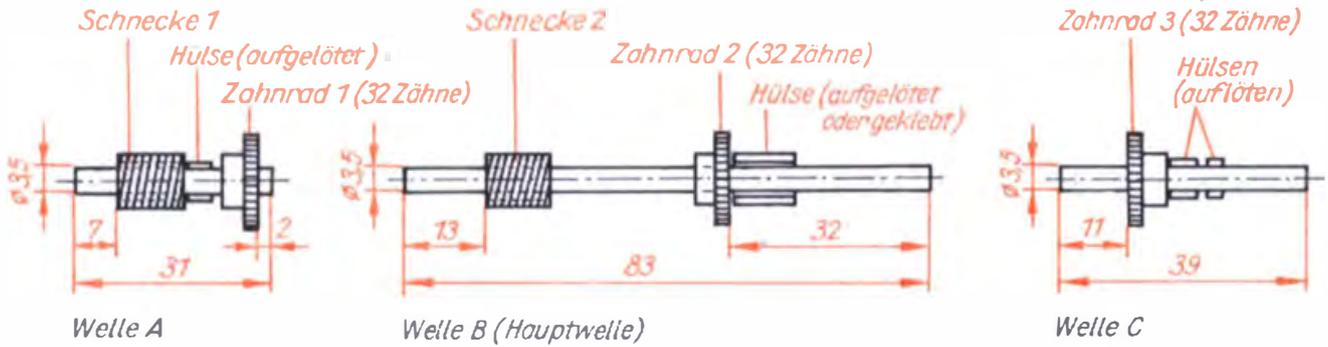


Bild 222. Wellen der Segelwinde

Aufbaus gehen aus den Bildern hervor. Verwendet werden handelsübliche Zahnräder und Schnecken. Bei der Montage der Teile achten wir darauf, daß das gesamte Getriebe leichtgängig, aber spielfrei arbeitet.

Durch Änderung der Übersetzungsverhältnisse lassen sich folgende Wirkungen erzielen:

- Bei gleicher Wickelzeit und gleicher Kraft an der Hauptwelle können wir den Wickelweg durch entsprechende Wahl des Durchmessers der Wickeltrommel beeinflussen.
- Wählen wir die Untersetzung des Vorgeleges (Ritzel auf Motorwelle: Zahnrad 1) größer, wird die Wickelzeit größer, aber auch die Kraft an der Hauptwelle bei gleichem Wickelweg.

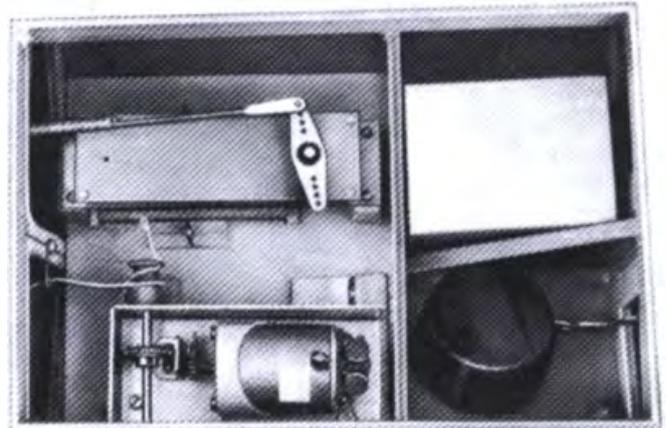
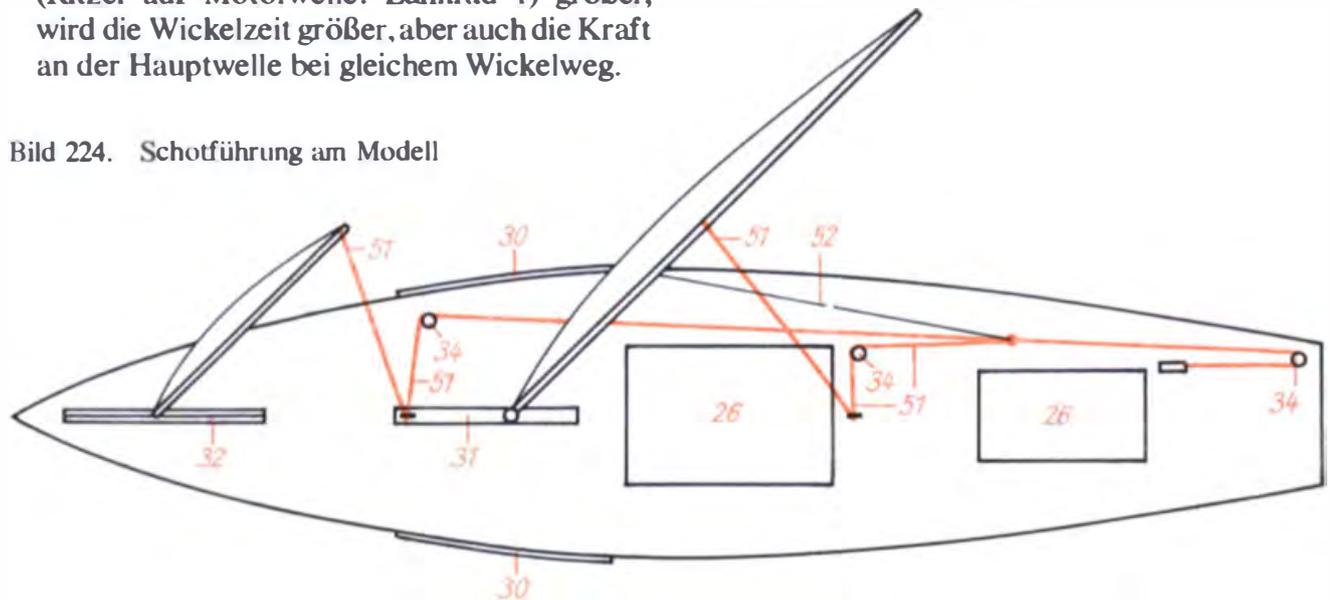


Bild 223. Einbau der Rudermaschine und der Schotzueinrichtung (Segelwinde)

Bild 224. Schotführung am Modell



- Wählen wir die Untersetzung von Hauptwelle zu Potentiometer (Schnecke 2: Zahnrad 3) größer, so werden der Wickelweg und auch die Wickelzeit bei gleicher Kraft an der Hauptwelle größer.
- In gewissem Maße können wir auch Wickelzeit und Kraft an der Hauptwelle durch die Betriebsspannung des Motors beeinflussen.

– Reicht die mit diesem Aufbau erzielte Wikkelfkraft nicht aus, ist ein stärkerer Motor zu verwenden.

Durch Ausnutzen der genannten konstruktiven Möglichkeiten können wir die Segelwinde den im Modellbetrieb vorkommenden Bedingungen gut anpassen. Um eine einwandfreie Funktion im Modell zu gewährleisten, muß der Motor der Winde sehr sorgfältig entstört werden. Das Grundblech der Segelwinde ist so ausgelegt, daß der Schaltverstärker mit ihr eine Baueinheit bildet.

Nun können wir die Segeljacht auftakeln und ausprobieren, ob alles richtig zusammenspielt. Wir erproben neben der Elektronik auch die Funktion der Schotzugeinrichtung (Bild 223). Damit sich die Schotleine (51) unter Deck nicht verwirrt, halten wir sie mit einem dünnen Gummifaden (52) ständig unter Spannung. Den Gummifaden führen wir vom Knoten, an dem die Schotleinen von Groß- und Focksegel zusammengeführt werden, zum backbordseitigen Wantenbeschlag (28). Als Schotleine eignet sich besonders geflochtene Angelschnur oder das in Rundfunkfachgeschäften erhältliche Skalenseil. Es besteht aus Dederon, ist sehr schmiegsam, abriebfest und nimmt kein Wasser an. Auf Bild 224 ist die Führung der Schotleine zu erkennen.

Der Ballast wird gegossen

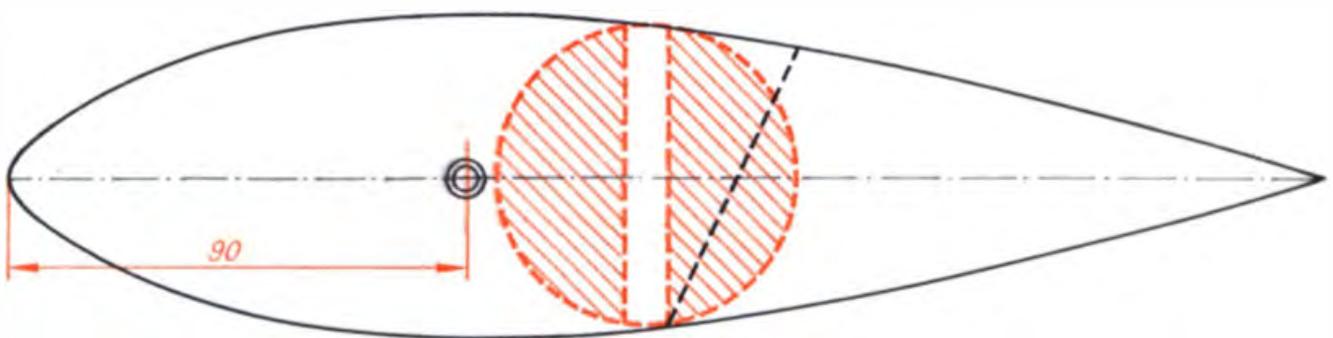
Wir wissen bereits, daß aus verschiedenen Gründen für die Segeljacht ein relativ großes Ballastgewicht benötigt wird. Wir werden uns einen *Ballast* (53) aus Blei gießen und ihn so

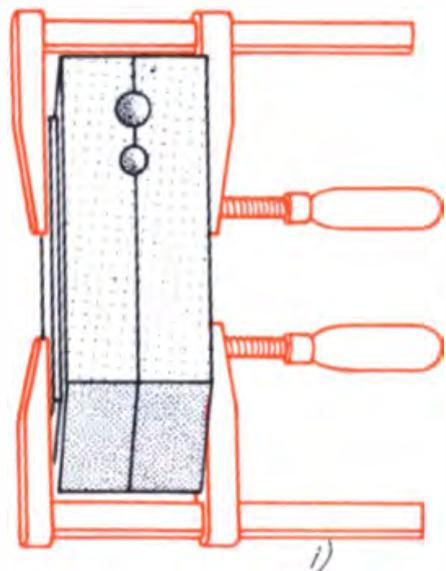
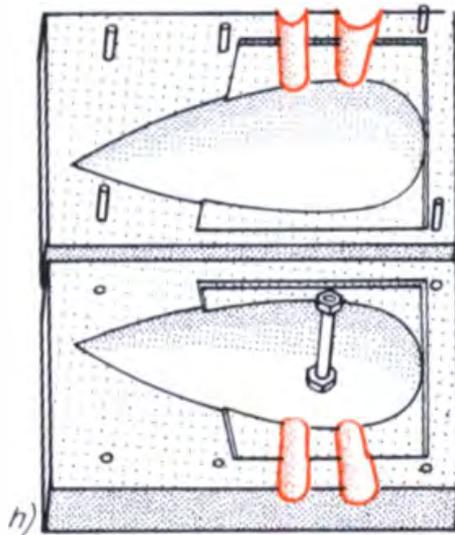
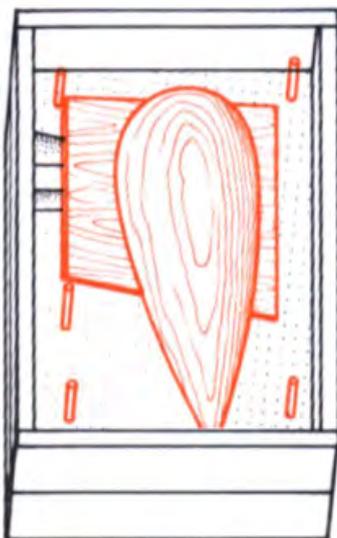
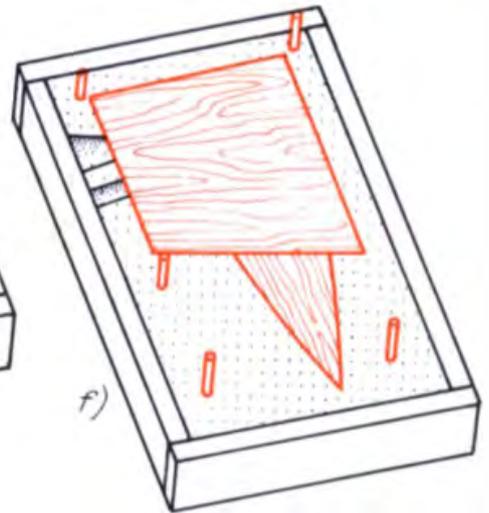
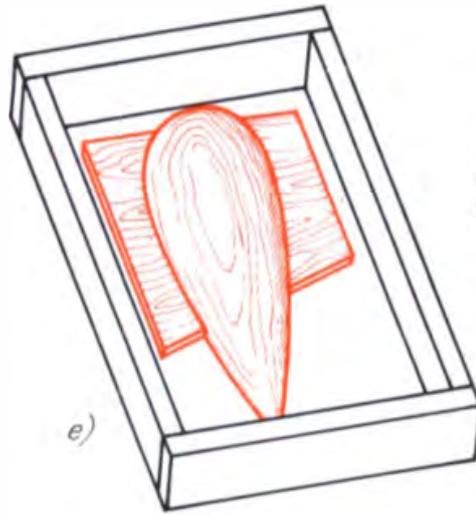
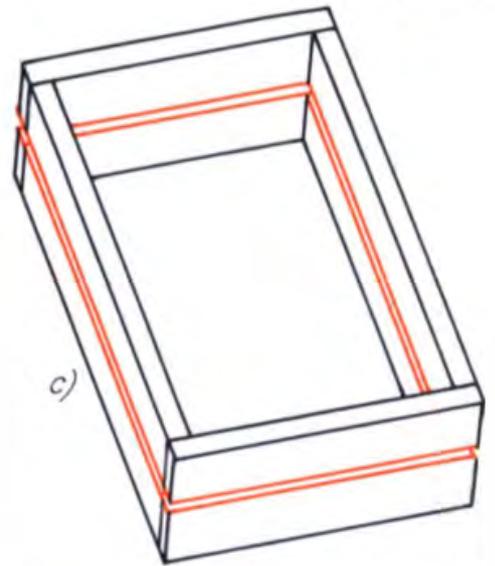
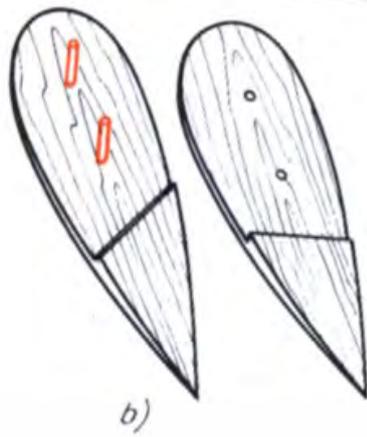
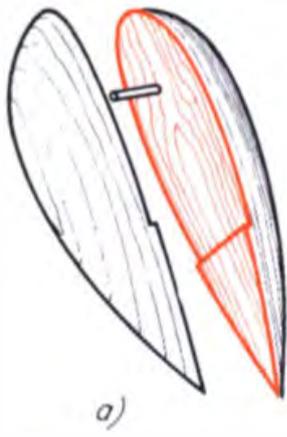
Bild 225. Der Ballast (Länge 260 mm, maximaler Durchmesser 63 mm)

auslegen, daß damit selbst bei stärkerem Wind gesegelt werden kann. Bei Bedarf können wir uns noch einen weiteren, leichteren Ballast für schwachen Wind anfertigen.

Als erstes stellen wir ein rotationssymmetrisches Holzmodell in Originalgröße (Bild 225) her. Dieses Modell erhält einen Schlitz in der Form der Flosse, damit wir den Ballast auf die Flosse aufschieben und mit einem Bolzen (54) befestigen können. Außerdem teilen wir das Modell in der Mitte in Richtung des Schlitzes in zwei symmetrische Hälften (Bild 226a). Damit diese wieder aufeinanderpassen, schlagen wir in eine Hälfte zwei Paßstifte (Nägel ohne Kopf). Die zweite Modellhälfte wird dann einfach paßgerecht auf die erste gepreßt (Bild 226b). Nun bringen wir an der Stelle des größten Durchmessers senkrecht zur Teilfläche eine durchgehende Bohrung von 6 mm Durchmesser an. Das Modell wird glattgeschliffen und mit angewärmtem Wachs eingestrichen.

Für die Gießform brauchen wir zwei Formrahmen, die aus Holzleisten (15 mm × 60 mm) zusammengesetzt werden. Sie haben etwa die Maße 130 mm × 250 mm und müssen genau zueinanderpassen (Bild 226c). Jetzt legen wir die eine Modellhälfte mit der flachen Seite auf eine völlig ebene Unterlage und stecken in den Schlitz ein Stück Sperrholz (4 mm), das so groß ist, daß bis zum Formrahmen jeweils 5 mm frei bleiben (Bilder 226d und e). Nun gießen wir in den Formrahmen Gips. Ist er ausgehärtet, kehren wir die Formhälfte um, schlagen in jede freie Ecke einen kräftigen Nagel als Paßstift (Bild 226f) ein und legen den anderen Formrahmen paßgerecht darauf. Dann wird die zweite Modellhälfte auf die Paßstifte gesteckt und der Schlitz wieder mit einem paßgerechten Stück Sperrholz (4 mm) ausgefüllt. Wir bohren die doppelte Sperrholz-





lage ebenfalls auf 6 mm auf und stecken in die Bohrung einen Gewindebolzen (6 mm). Dieser reicht durch die obere Modellhälfte 20 mm in die untere hinein und schließt mit der Oberkante des oberen Formrahmens bündig ab (Bild 226g). Die zweite Formhälfte wird nun ebenfalls mit dünn angerührtem Gips ausgegossen. Wir lassen den Gips aushärten und heben die obere Form vorsichtig ab. In beide Modellteile drehen wir jeweils eine Holzschraube. So können sie unter leichtem Klopfen ohne Schwierigkeiten aus der Gipsform herausgezogen werden. Der M6-Bolzen bleibt in der oberen Form. An der Stelle des größten Durchmessers des Ballastes schneiden wir in beide Formhälften einen Trichter (Innendurchmesser: 10 mm, Außendurchmesser: 20 mm), den Steiger, und 3 cm daneben noch einen etwas größeren Trichter, den Einguß (Bild 226h). Ist die Gipsform trocken, legen wir die beiden Sperrholzbrettchen wieder in die Form und drehen eine Messingmutter auf den M6-Bolzen, so daß zwischen Mutter und Sperrholz 5 mm Abstand bleiben. Die Mutter wird dann völlig vom Blei umschlossen und verbleibt im Ballast.

Zum Gießen werden die beiden Formteile unter Beilegen von Brettern mit zwei Schraubzwingen fest zusammengepreßt (Bild 226i). Wir schmelzen das kleingehackte Blei in einem Gang im Tiegel. Dabei werden etwa 50% mehr Blei angesetzt, als dann im Ballast enthalten sein soll. Ist das Blei dünnflüssig, schöpfen wir die Oxid- und Schmutzschicht von der Oberfläche ab und gießen es, ohne abzusetzen, in den Eingußtrichter, bis es im Steiger wieder hochkommt. **Vorsicht beim Gießen, flüssiges Blei spritzt:** Nach dem Erkalten trennen wir beide Hälften, drehen den M6-Bolzen heraus und entfernen die Sperrholzzwischenlage. Die Messingmutter verbleibt im

Bild 226. Wie wir den Ballast herstellen: a) das Ballastmodell aus Holz ist teilbar, b) Paßstifte sorgen für den genauen Sitz der beiden Hälften, c) auch die Formrahmen müssen genau zueinanderpassen, d) in den Schlitz legen wir eine längs teilbare Sperrholzplatte, die aber kleiner als das Innenmaß des Formrahmens ist, e) wir formen eine Hälfte ein, f) eine Formhälfte ist fertig – Paßstifte sichern den Sitz der beiden Hälften, g) die andere Hälfte wird eingeformt, h) die Formrahmen sind entfernt – Einguß und Steiger sind in den Gips geschnitten, i) beim Guß wird die Form mit Schraubzwingen zusammengepreßt

Ballast, denn sie dient mit dem Bolzen (54) zur Befestigung an der Flosse. Zum Schluß feilen und schleifen wir die Oberfläche sauber und lackieren sie.

Ein Kapitel Segeltechnik

Vor der ersten langerwarteten Fahrt unserer Segeljacht sollen noch einige Hinweise gegeben werden, die uns vor Überraschungen oder Enttäuschungen bewahren.

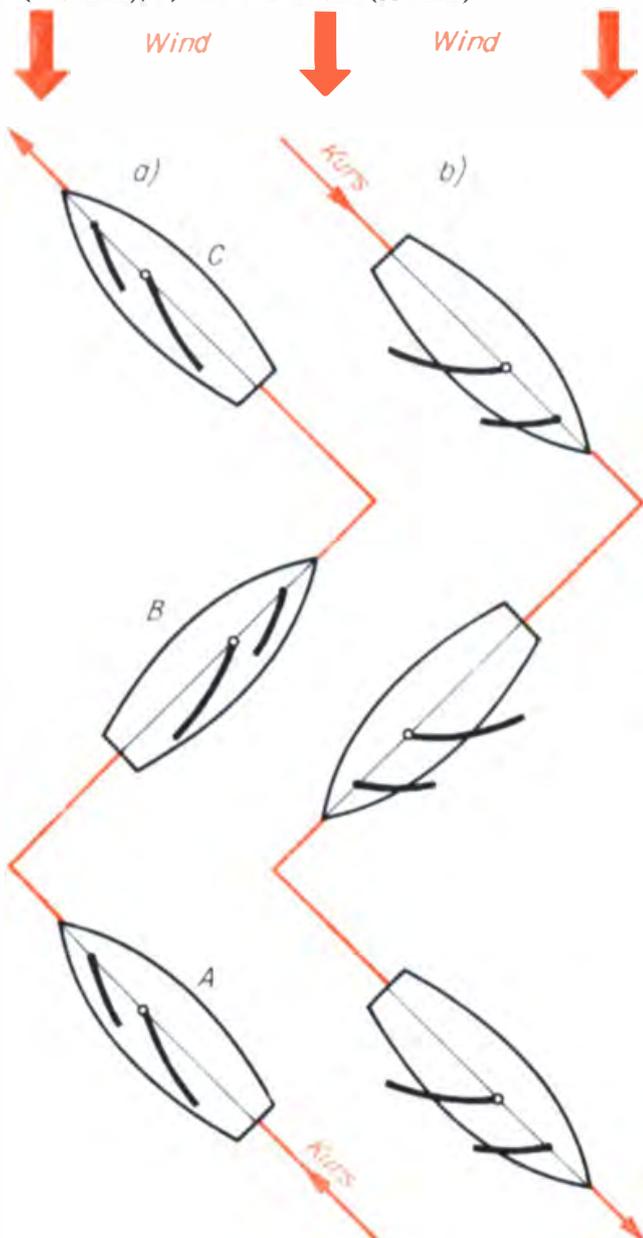
Die Jacht muß bei Windstille ein wenig hecklastig getrimmt sein, damit der Bug bei Vorwindkursen nicht unterschneidet. Für das Einsegeln ist am besten ein Tag geeignet, an dem ein leichter, in Richtung und Stärke gleichmäßiger Wind weht. Wir setzen den Mast in die Mitte der Mastschiene und spannen die Wanten gleichmäßig, so daß er nicht verzogen wird. Durch Versetzen des Mastes in der Schiene ermitteln wir die richtige Stellung. Dies geschieht am besten wechselseitig auf Kursen »am Wind« und wird so lange fortgesetzt, bis das Modell bei neutraler Ruderstellung (kontrollieren!) kursstabil läuft. Je gewissenhafter und genauer wir die richtige Maststellung ermitteln, um so leichter und exakter läßt sich die Jacht später steuern.

Die Schotleinen sind so zu bemessen, daß Fock- und Großbaum jeweils den gleichen Winkel zur Schiffsmittellinie bilden. Drehen wir die Jacht gegen den Wind, sollen beide Segel zur gleichen Zeit zu killen (flattern) beginnen. Beim Einsegeln der Jacht auf »Am-Wind«-Kurs kann man genau feststellen, wie spitz der Winkel ist, in dem die Jacht noch gegen den Wind segelt. Da uns natürlich auch ihre Schnelligkeit interessiert, suchen wir außerdem den Winkel des scheinbaren Windes, bei dem sie Höchstfahrt macht. Nach diesen ersten Segelversuchen müssen wir uns nun etwas mit den Segelmanövern befassen. Der große Vorteil der Fernsteuerung besteht ja gerade darin, mit der Modelljacht jeden Kurs so absegeln zu können wie mit einer richtigen Jacht. Dazu müssen wir nur die verschiedenen Manöver sicher beherrschen.

Wir üben die Segelmanöver

Zunächst wählen wir uns einen Zielpunkt, der genau in der Richtung liegt, aus der der Wind kommt. Dieser Punkt ist auf direktem Kurs nicht erreichbar, also müssen wir mit der Jacht *kreuzen* (Bild 227a). Das Kreuzen besteht aus kurzen Schlägen am Wind und Wenden. Segeln wir bei Kurs A mit Backbordschot, so müssen wir, um Kurs B zu erreichen, den Bug durch den Wind drehen; die Bäume *schiften* (von der einen zur anderen Bordseite umschlagen) dabei von backbord (links in Fahrtrichtung) nach *steuerbord* (rechts). Schon bei unserer ersten Wende werden

Bild 227. Die Jacht kreuzt: a) gegen den Wind (Wenden), b) vor dem Wind (Halsen)



wir feststellen, daß dieses Manöver nur dann gelingt, wenn die Jacht genügend Fahrtreserve hat. Das Wendemanöver führen wir daher aus der vollen Fahrt heraus zügig nur durch Legen des Ruders und ohne Veränderung der Schoten aus. Das Ruderkommando geben wir so lange, bis die Jacht auf dem neuen Kurs liegt. Da sie beim Wenden viel Fahrt einbüßt, muß die Wende schnell erfolgen. Wir stellen die Segel auf dem Kreuzkurs so ein, daß das Ruder nur zum Wenden oder gelegentlich zum Ausgleichen von Böen benutzt wird. Jeder Ruderausschlag auf Geradeauskurs bedeutet Fahrtverlust.

Auf Bild 204 erkennen wir, daß die Jacht auf Kurs »Vor dem Wind« wenig Fahrt macht und daß wir mit »Kreuzen vor dem Wind« unser Ziel meist schneller erreichen können. Beim Kreuzen vor dem Wind segeln wir wieder abwechselnd Steuerbord- und Backbordschot, dabei dreht nur das Heck durch den Wind. Dieses Segelmanöver bezeichnet man als Halse (Bild 227b). Außer in der Zeit, wo die Bäume schiften, steht die Jacht dauernd unter Winddruck. Sie verliert bei der Halse kaum an Fahrt und reagiert damit während dieses Manövers gut auf das Ruder. Im Gegensatz zur Wende betätigen wir dabei auch die Schoten. Aus dem »Raumen-Wind«-Kurs (A) bringen wir die Jacht durch *Fieren* der Segel auf reinen »Vor-dem-Wind«-Kurs (B). In dem Augenblick, da das Heck durch den Wind dreht, unterstützen wir die Halse durch *schnelles* Dicht-holen (Anziehen) der Schoten. Mit dem Ruderausschlag wird die Jacht über die Vorwindachse hinweggesteuert, so daß die Bäume schiften. Je nach dem Kurs bzw. der erforderlichen Fahrt können wir die Bäume nun wieder etwas fieren. Wir sehen daraus, daß für eine schnelle Halse die Schoten und das Ruder gleichzeitig bedient werden müssen. Um dieses Manöver sicher zu beherrschen, ist schon ein wenig Übung erforderlich. Mit Rücksicht auf die Lebensdauer der Takelage sollten wir beim Halsen vorsichtig zu Werke gehen. Da das Schiften der Bäume unter vollem Winddruck und damit schlagartig erfolgt, treten recht große Kräfte auf, die leicht zum Beschädigen der Segel (Ausreißen der Kauschen am Schothorn) führen können. Vorschriftsmäßig ist die Halse nur mit Hilfe der Segelwinde durchzuführen. Bei mittlerem Wind kann man aber auch ohne Segelwinde halsen.

Mögen diese wenigen Hinweise für den Anfang genügen. Will man mit seiner Jacht Wind und Wasser beherrschen, muß man fleißig üben und dabei die gewonnenen Kenntnisse richtig anwenden. Dazu viel Spaß!

Das ferngesteuerte Segelflugmodell

Beim Umgang mit der Segeljacht lernten wir, den Wind und die wirkenden Kräfte auf dem Wasser zu beherrschen und auszunutzen. Das Segelflugmodell (Bild 228) soll uns helfen, in das interessante Gebiet des Flugmodellsports einzudringen. Es ist ein reines Zweckmodell in Vollbausbauweise, hat ein gutes Flugverhalten und ist so konstruiert, daß es von einem Anfänger ohne Schwierigkeiten aufgebaut werden kann. Der

Bild 228. Unser Segelflugmodell



Raum für Empfänger, Batterie und Servo ist groß genug, um die Fernsteueranlage gut gepolstert unterzubringen. Die hier vorgestellte Version ist für den *Hangflug* gedacht. Um gute Leistungen im *Thermikflug* zu erzielen, bauen wir uns später einen zweiten Tragflügel mit 20...40 cm größerer Spannweite und erhalten so ein vielseitig einsetzbares Segelflugmodell. Ehe wir aber mit dem Bau beginnen, müssen wir unsere Kenntnisse der *Aerodynamik* vervollständigen. Einige der folgenden Gesetze sind uns bereits bekannt, obwohl manche Begriffe oder Zusammenhänge in der Fliegerei anders bezeichnet und betrachtet werden als in der Schifffahrt.

Warum die Luft trägt

Vergleichen wir das Profil des Segels von Bild 209 mit dem des Tragflügels des Segelflugmodells von Bild 229, so erkennen wir sofort eine Ähnlichkeit. Bei der Segeljacht diente es zur Erzeugung der Antriebskraft, die als Teil der Querkraft entstand. Beim Tragflügel ruft die Luftströmung ebenfalls eine Querkraft hervor, die wir aber jetzt gewissermaßen zum Halten des Flugmodells in der Luft, eben zum *Fliegen*, verwenden und daher als *Auftrieb* bezeichnen. Da dieser Auftrieb durch die strömende Luft entsteht, ist er folglich ein *dynamischer Auftrieb* (im Unterschied zum statischen Auftrieb beim schwimmenden Körper). Wir berechnen den Auftrieb eines Profils nach der Gleichung

$$F_A = c_a \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A_G.$$

Hierin bedeuten

F_A Auftriebskraft,

ρ Luftdichte,

v Strömungsgeschwindigkeit,

A_G Grundrißfläche des Tragflügels,

c_a Auftriebsbeiwert.

Der Auftriebsbeiwert ist eine dimensionslose Zahl, die im wesentlichen von der Form des Profils bestimmt wird.

Beim Tragflügel müssen wir noch eine weitere Kraft beachten, die beim Segel vernachlässigt wurde, den *Widerstand* gegen die Luftströmung. Diesen Widerstand und seine Wirkung erkennen wir am besten in einem Experiment. Als Pro-

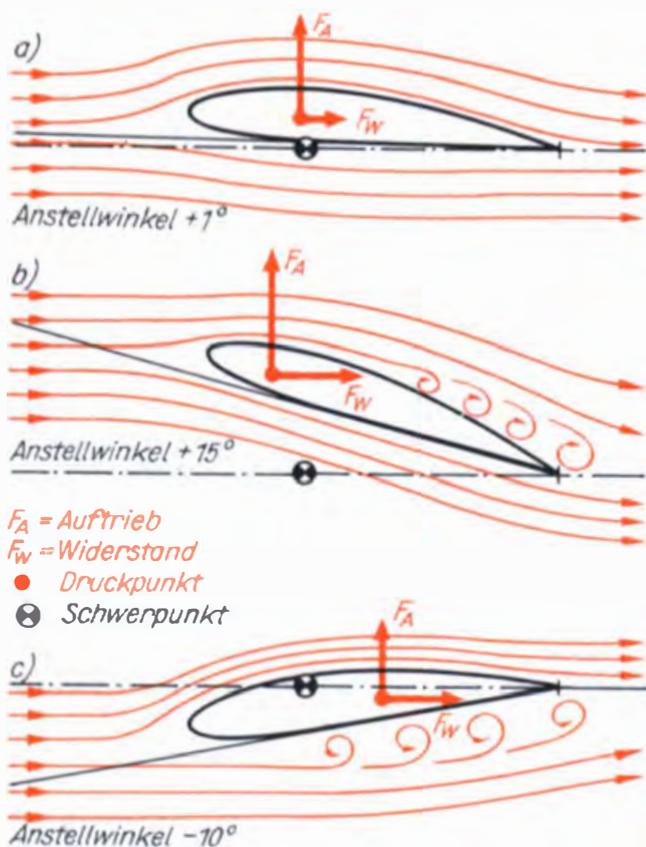


Bild 229. Profil des Tragflügels: a) bei normalem Anstellwinkel, b) bei vergrößertem positivem Anstellwinkel, c) bei negativem Anstellwinkel

betragflügel nehmen wir deshalb unsere gewölbte Platte, montieren sie diesmal senkrecht nach Bild 201 auf die Briefwaage und blasen sie direkt von oben an. So haben wir wieder mit der Anzeige der Briefwaage ein Maß für den Widerstand dieses Probekörpers. Einen solchen Widerstand hat auch der Tragflügel unseres Segelflugmodells. Er berechnet sich nach der Gleichung

$$F_W = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A_S.$$

Hierin bedeuten

F_W Widerstandskraft,

ρ Luftdichte,

v Strömungsgeschwindigkeit,

A_S Stirnfläche des Tragflügels,

c_w Widerstandsbeiwert.

c_w ist ebenfalls eine dimensionslose Zahl, die wiederum stark von der Form des Profils beeinflusst wird. Die Beiwerte c_a und c_w geben uns Auskunft über die Eigenschaften von Profilen. Wollen wir z. B. ein schnelles Flugmodell bauen,

oder, was gleichbedeutend ist, es bei starkem Wind fliegen lassen, so sollte c_w recht klein sein, da nach obengenannter Gleichung die Strömungsgeschwindigkeit quadratisch in den Widerstand eingeht. Wird nämlich F_W zu groß, würde das Modell bei starkem Wind sogar rückwärts fliegen. Soll es dagegen schon bei schwachem Wind gute Flugleistungen aufweisen, werden wir ein Profil mit großem c_a -Wert verwenden (in der Regel ein stark gewölbtes Profil). Es gibt jedoch kein Universalprofil, das für starken und schwachen Wind gleichermaßen gut geeignet ist.

Nun ist der Auftrieb eines Tragflügels nicht nur von der Profilform und der Grundrißfläche abhängig, sondern auch vom Anstellwinkel α . Jedes Profil erreicht bei einem bestimmten Anstellwinkel seinen maximalen Auftrieb. Vergrößern wir diesen Winkel noch mehr, so reißt die Strömung auf der Oberfläche ab (Bild 229b), sie wird turbulent. Damit wächst der Widerstand F_W sehr stark an, der Auftrieb F_A verkleinert sich. Außerdem wird dabei eine unangenehme Eigenschaft vieler Profile wirksam, die *Druckpunktwanderung*. Ähnlich wie Segel- und Lateral-schwerpunkt bei der Segeljacht sollten beim Flugmodell Druckpunkt und Gewichtsschwerpunkt des Modells dicht übereinander und auf einem Lot liegen. Durch die Druckpunktwanderung wird das Flugverhalten des Modells instabil. Wir werden also für unsere Modelle Profile auswählen, deren Druckpunkt bei verändertem Anstellwinkel nur geringfügig wandert. Wird der Anstellwinkel des Tragflügels negativ (Bild 229c), so reißt die Strömung an der Unterseite ab, der Widerstand wird ebenfalls größer und der Auftrieb kleiner. Außerdem wandert der Druckpunkt nach hinten aus.

Durch Messungen im Windkanal wurden für

Modellflugprofile die Werte $\frac{c_a}{c_w}$ bei verschiedenen

Anstellwinkeln gemessen. Diese Werte trägt man in ein *Polardiagramm* ein und erhält so eine anschauliche Aussage über die Eigenschaften des Profils (Bild 230). Der Punkt 1 entspricht einem großen negativen Anstellwinkel. Der Tragflügel erzeugt dabei negativen Auftrieb, wir könnten mit dem Modell also in Rückenlage fliegen. Der Auftrieb wird im Punkt 2 Null; das Modell befindet sich im *Sturzflug*. Im Punkt 3

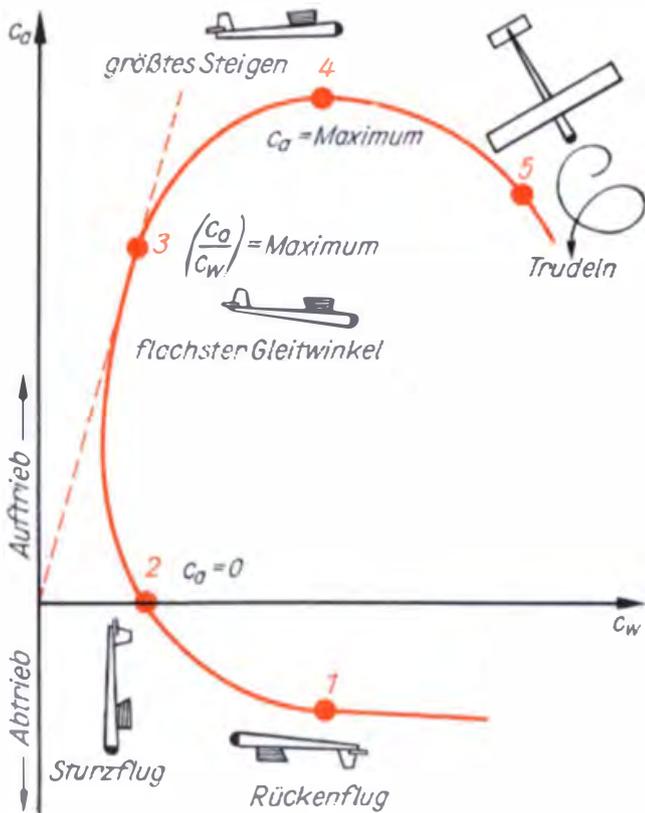


Bild 230. Polardiagramm eines Profils

erreicht der Quotient $\frac{C_a}{C_w}$ seinen maximalen Wert. Das Modell hat dabei den größten Auftrieb bei hohem Widerstand und minimaler Geschwindigkeit. Diesen Flugzustand streben wir bei der Landung an. Punkt 5 stellt den *überzogenen Flugzustand* dar, in dem die Strömung abreißt und das Modell zu trudeln beginnt. Die Eigenschaften des Profils und damit des Tragflügels bestimmen zum großen Teil die Eigenschaften des Flugmodells.

Noch mehr Wissenswertes aus der Aerodynamik

In Gesprächen mit Flugmodellbauern werden uns Begriffe wie Flächenbelastung, Sinkgeschwindigkeit und Gleitzahl begegnen. Die *Flächenbelastung* von Flugmodellen wird in der Regel in der Einheit g/dm^2 angegeben. Sie ergibt sich als Quotient aus der Masse des Modells beim Abflug und der Gesamttragfläche, bestehend aus der Fläche des Tragflügels und der des Höhenleitwerkes. Diese Berechnungsform wird im Flug-

modellsport angewendet und gilt nur bei Verwendung tragender, also auftrieberzeugender Leitwerke. Da unser Segelflugmodell ein nicht-tragendes Höhenleitwerk hat, legt man der Berechnung der Flächenbelastung nur die Fläche des Tragflügels zugrunde. Schnelle Modelle mit großer Sinkgeschwindigkeit haben in der Regel eine hohe Flächenbelastung. Dabei müssen wir aber beachten, daß jedes Profil für eine bestimmte Flächenbelastung ausgelegt ist. Überschreiten wir deren Maximalwert wesentlich, so verschlechtern sich auch die Flugleistungen des Modells. Das Profil Gö 539, das wir zum Aufbau des Tragflügels unseres Modells verwenden, ermöglicht gute Leistungen bis zur Flächenbelastung von $40 g/dm^2$.

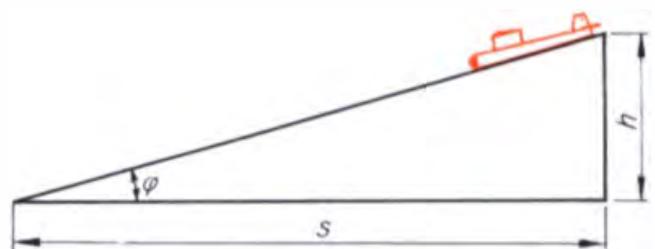
Die *Sinkgeschwindigkeit* gibt an, wieviel Meter das Modell in einer Sekunde sinkt. Da das Modell möglichst lange in der Luft bleiben soll, legen wir großen Wert auf geringes Sinken. Die *Gleitzahl* eines Flugmodells

$$\epsilon = \frac{h}{s} = \frac{C_w}{C_a} = \tan \varphi$$

gibt an, welche Strecke s das Modell beim Sinken um $h = 1 m$ zurücklegt (Bild 231). Sie ist besonders für die Streckenflugleistung eines Segelflugzeuges von Bedeutung. Bei uns spielt sie beim Hangflug und beim Landeanflug eine Rolle. Modelle mit großer Gleitzahl haben bei hoher Fluggeschwindigkeit einen sehr langgestreckten Landeanflug.

Bei den Überlegungen zur Geschwindigkeit und zum Fahrwiderstand des Schiffmodells erkannten wir, daß diese Größen nicht einfach maßstäblich vom Original auf das Modell übertragen werden können. Ähnlich verhält es sich bei den Flugmodellen. Für die Geschwindigkeiten unseres Flugmodells ist die *Reynoldssche Zahl* (abgekürzt *Re-Zahl*) eine wichtige Kenn-

Bild 231. Die Gleitzahl des Segelflugmodells



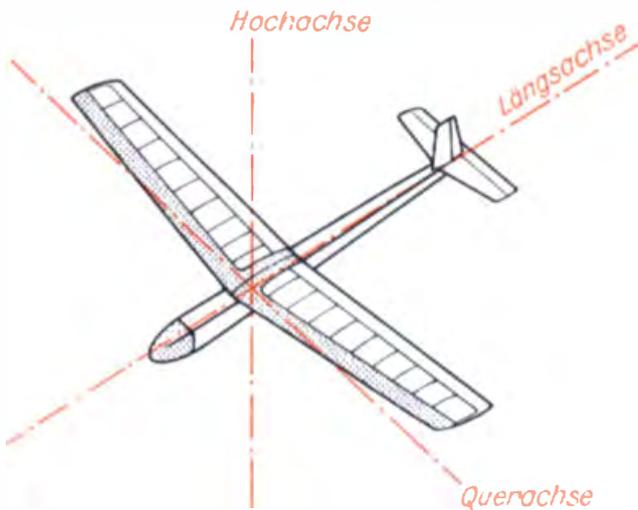


Bild 232. Die Achsen des Flugmodells

ziffer. Man berechnet sie nach der Gleichung

$$Re = \frac{\rho \cdot t \cdot v}{\eta}$$

Hierin bedeuten

Re Reynoldssche Zahl,

ρ Luftdichte,

t Profiltiefe,

v Strömungsgeschwindigkeit,

η dynamische Viskosität der Luft.

Wichtig für uns ist, daß die *Re*-Zahl einen Grenzwert darstellt. Wird die für ein bestimmtes Profil angegebene *Re*-Zahl unterschritten, so ändert sich der Charakter der Strömung, und die Leistungen des Tragflügels (*c_a*- und *c_w*-Werte) verschlechtern sich schlagartig. Für unsere Experimente bedeutet das, wir müssen mit dem Modell immer im Bereich der angegebenen *Re*-Zahl fliegen. Bei praktischen Berechnungen faßt man die konstanten Größen zusammen und erhält die zugeschnittene Größengleichung

$$Re = 70 \cdot v \cdot t.$$

Dabei werden *v* in m/s und *t* in mm Profiltiefe gemessen. Um die *Re*-Zahl bei Flugmodellkonstruktionen einzuhalten, bleiben uns also nur zwei Wege. Entweder wir bauen ein schnelles Modell oder einen Tragflügel mit großer Profiltiefe. Die Kompromisse, die wir dabei eingehen müssen, werden am praktischen Beispiel beim Entwurf unseres Segelflugmodells erläutert.

Nun noch ein paar Worte zur *Flugstabilität*.

Das Wesen der statischen Stabilität lernten wir bereits beim Schiffsmodell kennen. Beim Flugmodell handelt es sich um eine dynamische Stabilität, die um alle drei *Körperachsen* (Bild 232) gewährleistet sein muß. Die Achsen sind gedachte Linien, die senkrecht aufeinanderstehen und in deren Schnittpunkt der Schwerpunkt des Flugmodells liegt. Normalerweise kann ein Flugmodell um jede dieser Achsen mit einem Ruder gesteuert werden. So bewirkt das *Querruder* eine Drehung um die Längsachse, das *Höhenruder* eine Drehung um die Querachse und das *Seitenruder* eine Drehung um die Hochachse. Unser Modell muß um alle Achsen eigenstabil sein. Als *stabil* bezeichnen wir eine Fluglage dann, wenn das Modell bei einer Änderung seiner ursprünglichen Lage (durch Böen oder Thermik) ohne Ruderausschlag selbständig in die Normalfluglage zurückkehrt.

Die *Längsstabilität* bezieht sich auf die Drehung des Modells um die Querachse. Sie wird bestimmt durch die Flächen von Tragflügel und Höhenleitwerk, deren Einstellwinkel und den Abstand des Leitwerkes vom Schwerpunkt. Dabei ist die Differenz der beiden Einstellwinkel, die *Einstellwinkeldifferenz* (EWD), maßgebend (Bild 233). Wenn wir dafür sorgen, daß der Tragflügel stets den größeren Auftrieb (bedingt durch Profil und größeren Einstellwinkel) erzeugt, dann bewirkt das Höhenleitwerk bei einer Störung der normalen Fluglage (z. B. Heben oder Senken des Bugs) ein rückdrehendes Moment (Windfahnenwirkung) und führt so das Modell in die ursprüngliche Fluglage zurück. Die Längsstabilität des Modells kann ganz wesentlich durch die Verwendung druckpunktfester Profile erhöht werden. Erfahrungsgemäß erreichen wir mit der Einstellwinkeldifferenz (EWD) von 3° bei Flugmodellen eine ausreichende Längsstabilität. Ob wir die EWD von 3° z. B. durch die Einstellwinkel +5° und +2°; +3° und 0° oder 1° und -2°, bezogen auf die Rumpflängsachse, erreichen, ist dabei nicht so wichtig.

Bild 233. Die Einstellwinkeldifferenz beeinflusst wesentlich die Längsstabilität



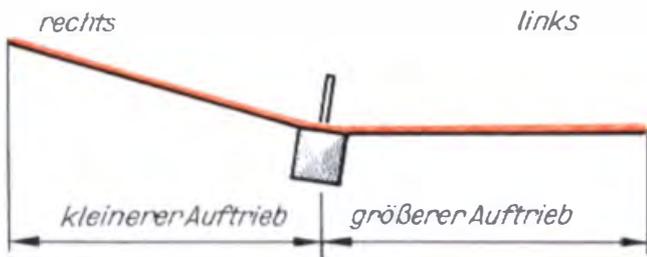


Bild 234. Die Querstabilität wird durch die V-Form des Tragflügels verbessert

Die *Querstabilität* wird für die Drehung des Flugmodells um die Längsachse angegeben. Im wesentlichen können wir die Querstabilität durch die V-Form des Tragflügels beeinflussen (Bild 234). Neigt sich das Modell in eine Schräglage, so sind die wirksamen Flächen der beiden Tragflügelhälften unterschiedlich groß. Die größere wirksame Fläche L erzeugt den stärkeren Auftrieb und damit ein rückdrehendes Moment, das das Modell in die Normalfluglage zurückführt. Bei Modellen ohne Querruder muß für erhöhte Querstabilität gesorgt werden, man wählt dann die verstärkte V-Form. Für den Winkel β haben sich Werte $5 \dots 8^\circ$ (für Segelflugmodelle mit Querruder $0 \dots 5^\circ$) bewährt.

Die *Richtungsstabilität* wird für die Drehung des Flugmodells um die Hochachse angegeben. Hauptsächlich das Seitenleitwerk stabilisiert die Flugrichtung. Da aber die Richtungsstabilität beim Kurvenflug direkt mit der Querstabilität verknüpft ist (denn das Modell fliegt eine Kurve in Schräglage und dreht dabei um Hoch- und Längsachse), ist andererseits eine zu starke Wirkung des Seitenleitwerkes unerwünscht. Man kann die Bewegungen des Modells um die Hochachse und damit zu heftiges Reagieren auf das Seitenleitwerk dadurch verringern, daß man die Fläche der Seitenansicht relativ groß auslegt. Die Richtungsstabilität wird ferner dadurch unterstützt, daß der wirksame Widerstand einer Tragflügelhälfte beim Schieben des Modells größer als der der anderen ist. Eine ähnliche Wirkung hatte ja die V-Form auf die Querstabilität. Als *Schieben* bezeichnet man die Fluglage, bei der das Modell, um die Hochachse gedreht, seinen Kurs weiterfliegt. Die stabilisierende Wirkung beim Fliegen kann man durch Pfeilung der Tragflächen erhöhen.

In der Praxis sind alle Stabilitätsarten eng und

wechselwirkend miteinander verknüpft. Wir haben hier nur die wichtigsten Grundlagen kennengelernt. Wer sich näher mit den Gesetzen der Aerodynamik befassen möchte, dem sei Spezialliteratur empfohlen. Für den Aufbau und das Einfliegen unseres Anfängermodells genügen die in diesem Buch erläuterten Zusammenhänge.

Vor dem Bauen wird überlegt

Welche Überlegungen liegen der Konstruktion unseres Flugmodells zugrunde? Die Grundforderungen an das Anfängersegelflugmodell sind folgende: Es muß mit geringem finanziellem Aufwand einfach und schnell zu bauen sein, unkomplizierte Flugeigenschaften sowie Einbaumöglichkeiten für jede Version der selbstgebauten Fernsteueranlage bieten, dabei soll es robust sein, um eine lange Lebensdauer zu erreichen. Wir wollen überlegen, wie sich diese Forderungen erfüllen lassen. Dabei werden wir sicher den einen oder anderen Kompromiß eingehen müssen.

Der erste Entwurfswert ist die *Größe* des Flugmodells. Wir müssen uns darüber im klaren sein, daß sich mit zunehmender Größe zwar die Flugleistungen verbessern, aber auch Baukosten, Bauzeit und Bruchempfindlichkeit erheblich steigen. Deshalb bauen wir unser Modell in mittlerer Größe, so daß es für die selbstgebauten Fernsteueranlagen eine genügende Tragfähigkeit besitzt. Beim *Thermikflug* soll das Modell enge Kreise fliegen, möglichst wenig sinken, aber doch so schnell sein, daß es gegen den Wind noch vorwärts fliegt. Letztere Voraussetzung gestattet uns, das Modell ferngesteuert an der vorgesehenen Stelle zu landen oder Aufwindgebiete zu suchen. Wollen wir mit dem Modell *am Hang* fliegen, so muß es von vornherein robuster und für höhere Fluggeschwindigkeiten ausgelegt sein und außerdem noch engere Kurven fliegen können als das Thermikmodell. Das hat direkte Auswirkungen auf die Spannweite des Tragflügels. In gewissem Maße können wir die Geschwindigkeit des Modells durch kopflastige Trimmung, größere Masse oder verringerte Einstellwinkeldifferenz erhöhen und es damit wechselnden Windgeschwindigkeiten anpassen.

Diese Maßnahmen bewirken aber auch größeres Sinken, verringerte Stabilität und setzen wegen der erhöhten Flächenbelastung Grenzen für das Fliegen bei starkem Wind. Daher ist es durchaus sinnvoll, für unterschiedliche Flug- und Windgeschwindigkeiten zwei Tragflügel mit verschiedenen Profilen zu bauen. Mit der in den Bildern dargestellten Tragflügelversion erhalten wir einen Hangsegler für leichte bis mittlere Windgeschwindigkeiten.

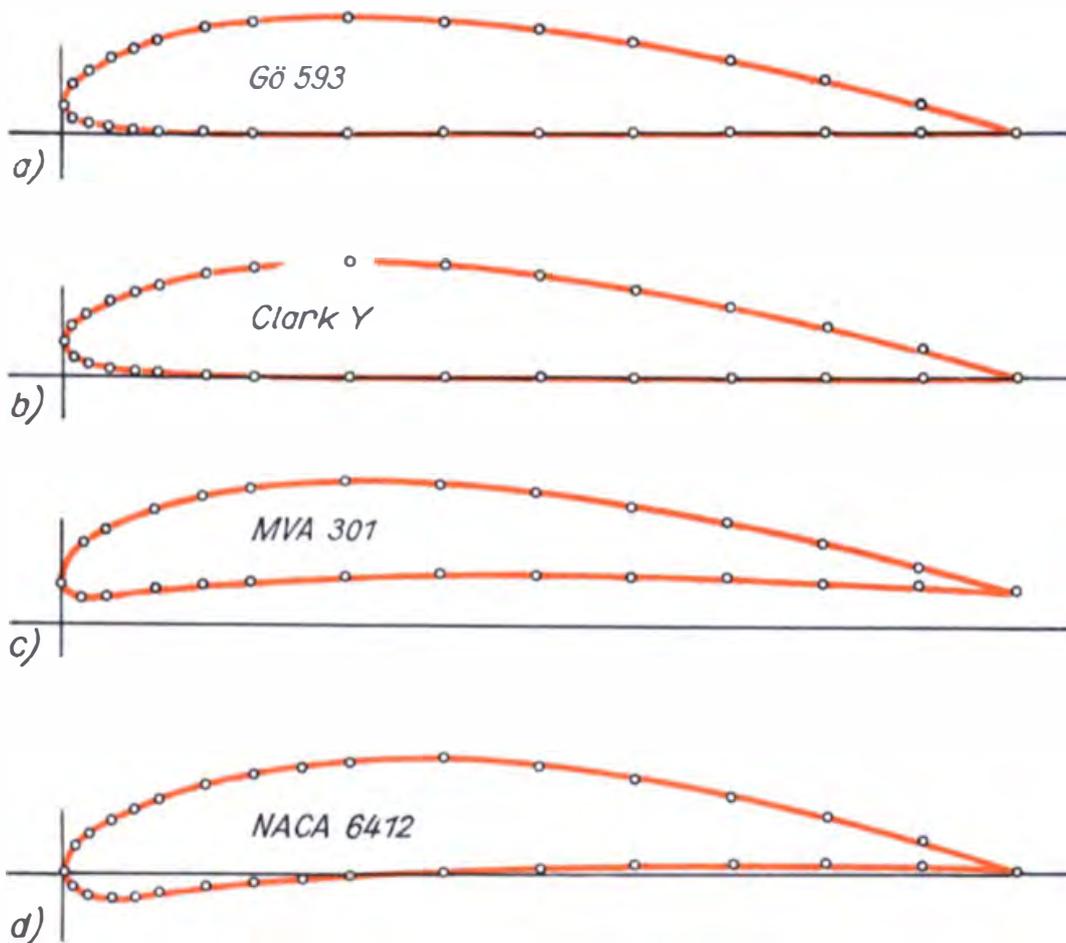
Befassen wir uns als nächstes mit der *Auslegung* der Tragflügel, die im wesentlichen die Flugleistungen des Modells bestimmt. Wir wissen, daß schmale Tragflügel nur bei hohen Windgeschwindigkeiten gute Leistungen bringen, und

Bild 235. Profile für Flugmodelle: a) Gö 593 (besonders geeignet für Hangflug bei mittleren Windgeschwindigkeiten), b) Clark Y (Universalprofil für höhere Windgeschwindigkeiten), c) MVA 301 (Hochleistungsprofil für mittlere Windgeschwindigkeiten), d) NACA 6412 (Universalprofil für niedrige Windgeschwindigkeiten)

legen daher die mittlere Flügeltiefe mit 200 mm fest, um so in weiten Bereichen der Fluggeschwindigkeit oberhalb des kritischen *Re*-Wertes zu bleiben. Die Spannweite wird durch die Flächenbelastung und die hohe Wendigkeit des Hangflugmodells bedingt. Mit 1600 mm Spannweite erhalten wir ein Flugmodell, das mit $160\text{ cm} \cdot 20\text{ cm} = 3200\text{ cm}^2 = 32\text{ dm}^2$ Fläche des Tragflügels und der Masse des flugfertigen Modells von etwa 900 g eine

Flächenbelastung von $\frac{900\text{ g}}{32\text{ dm}^2} = 28,2 \frac{\text{g}}{\text{dm}^2}$ hat.

Die *Flügelstreckung* als Verhältnis von Spannweite zu Flügeltiefe an der Wurzel beträgt 8 und liegt damit an der unteren Grenze. Bei *RC*-Hangseglern sind Werte von 8...12, bei *RC*-Thermikseglern von 11...15 gebräuchlich. Flügel mit hoher Streckung bringen eine bessere Leistung, während die geringere Streckung festere Flügel ergibt. Wir entscheiden uns für die zweite Möglichkeit, die wir außerdem durch geeignete Profilauswahl und entsprechenden



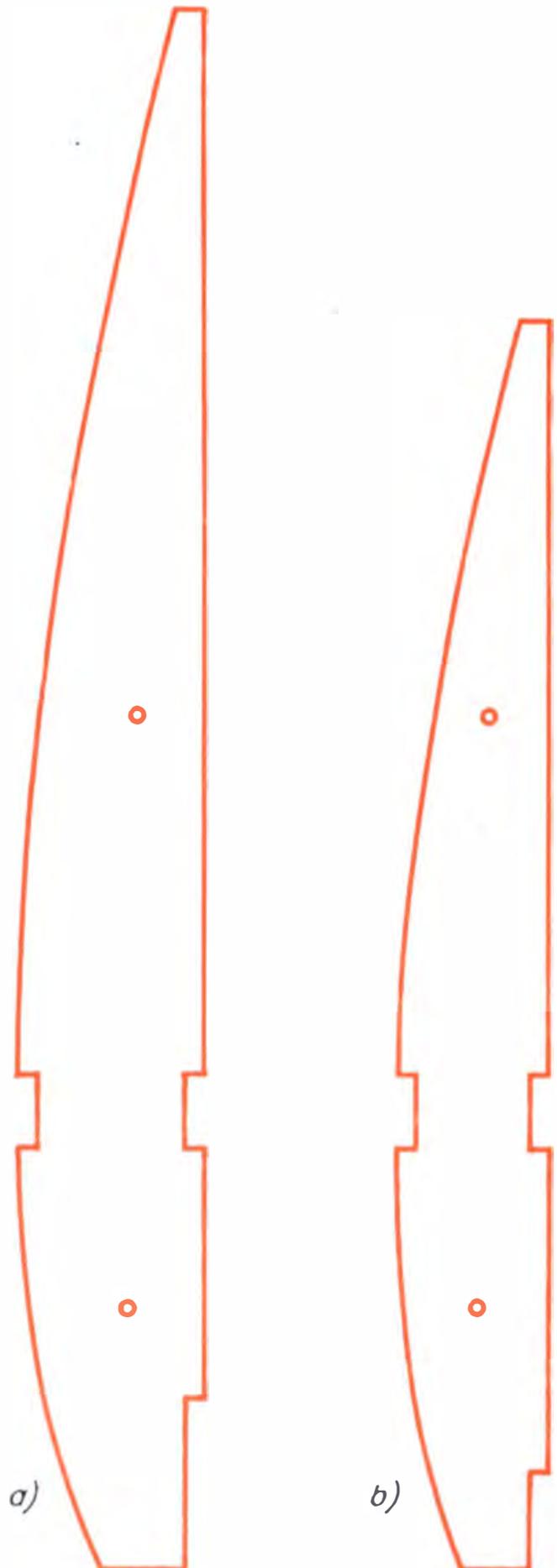
Aufbau unterstützen. Das benutzte Profil Gö 593 weist bei mittleren Windgeschwindigkeiten geringes Sinken sowie geringe Druckpunktwanderung auf, ermöglicht auf Grund seiner Dicke einen festen Flügelaufbau und bietet dank der geraden Unterseite keine Schwierigkeiten beim Bau. Um das Aussehen des Tragflügels zu verbessern, geben wir ihm eine leichte Trapezform. Da das Modell kein Querruder hat, muß der Tragflügel eine ausgeprägte V-Form erhalten, die mit 8° ebenfalls einen Mittelwert darstellt. Bedingt durch diese Form, die die Wirksamkeit des Seitenruders erhöht, können wir das Seitenruder mit $1,29 \text{ dm}^2$ Fläche relativ klein auslegen. Die Ruderwirksamkeit und damit auch die Stabilität werden weitgehend vom Leitwerkhebelarm (Abstand zwischen Schwerpunkt und Leitwerk hinterkante) bestimmt, der bei unserem Modell aus der Erfahrung heraus mit 780 mm festgelegt wurde.

Das Leitwerk bauen wir als ebene Platte (Balsabrett) ohne Profil denkbar einfach auf. Da es nichttragend ist, wird es auch beim Einfliegen keine Schwierigkeiten bereiten. Die Einstellwinkeldifferenz zwischen Tragflügel und Höhenleitwerk stellen wir durch die Konstruktion der Rumpfsseitenansicht ein, die wie die Rumpfbreite so gestaltet ist, daß die Fernsteueranlage mühelos untergebracht werden kann und vor dem Schwerpunkt ein ausreichender Hebelarm vorhanden ist. Dann können wir in der Regel das Modell allein durch den Anlageneinbau genau austrimmen. Wichtig ist, daß wir dadurch ohne Zusatzgewichte auskommen und so ein geringes Fluggewicht erreichen.

Einiges über Profile

Zum Schluß noch einige Bemerkungen zum Tragflügel. So wie die Gesamtkonstruktion des Flugmodells für eine vorgesehene Fluggeschwindigkeit und Flächenbelastung ausgelegt ist, so muß auch das Profil des Tragflügels dem vorgesehenen Zweck angepaßt werden. In ferngesteuerten Segelflugmodellen haben sich die Profile Gö 593, Clark Y, MVA 301 und NACA 6412 gut bewährt

Bild 236. Wurzelrippe und Endrippe unseres Modells



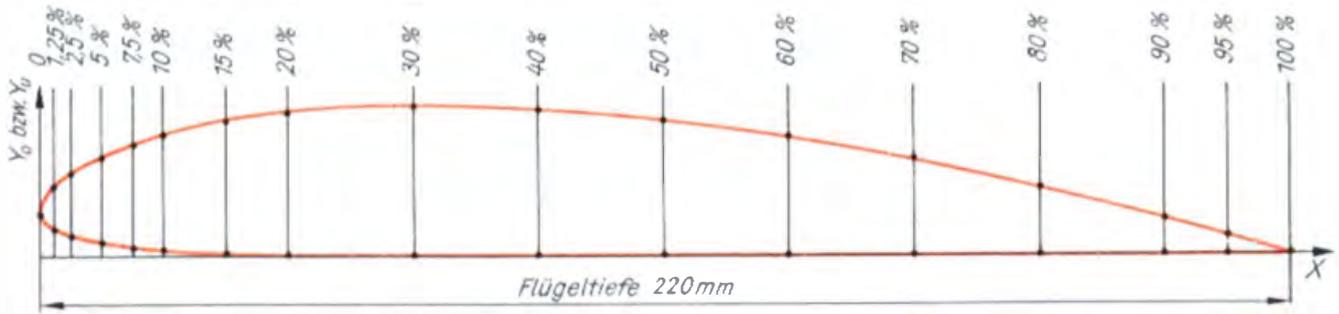


Bild 237. So wird das Profil der Musterrippe gezeichnet

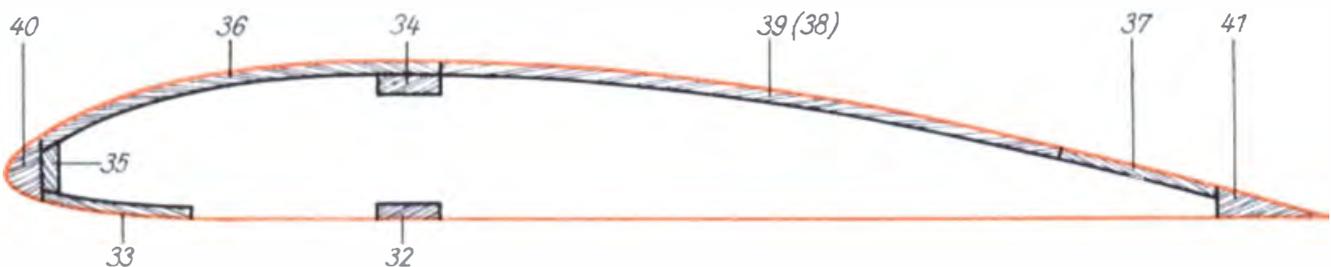
(Bild 235). Das sind Profile mittlerer Dicke, die eine feste Konstruktion ermöglichen. Tragflügel mit den Profilen Gö593 und Clark Y bereiten durch die gerade Unterseite außerdem kaum Schwierigkeiten beim Bau. Diese beiden Profile sind für mittlere, das Profil MVA301 ist für geringe bis mittlere und NACA 6412 für geringe Flug- bzw. Windgeschwindigkeiten geeignet. Da die Eigenschaften eines Tragflügels vom Charakter der ihn umgebenden Strömung abhängig sind, werden wir beim Aufbau auf volle Profiltreue achten. Kleine Profilungenauigkeiten, wie sie bei bespannten Flächen nicht zu vermeiden sind, wirken sich bei diesen Profilen noch nicht sehr stark auf die Flugleistung aus.

Der Bau des Tragflügels beginnt mit dem Zeichnen der Musterrippen nach der Profiltabelle (Tabelle 10). Dieser Arbeitsgang sei am Beispiel des Profils Gö593 erläutert. Als Musterrippen zur Herstellung der anderen Rippen brauchen wir die Wurzel- und die Endrippe, die wir beide aus 3 mm Sperrholz herstellen. Die Wurzelrippe hat eine Tiefe von 220 mm, die Endrippe von 180 mm. Da die Tabellenwerte Prozentangaben darstellen, berechnen wir eine neue Tabelle für die Musterrippen, indem wir die Werte mit den Faktoren 2,2 bzw. 1,8 multiplizieren (Tabelle 11). Diese

Werte übertragen wir nach Bild 237 Punkt für Punkt auf Millimeterpapier und zeichnen danach die Profile der Musterrippen. Um ihren genauen Umriß festzulegen, müssen wir noch die Stärke der Beplankung auf Ober- und Unterseite, die Aussparungen für Nasen- und Endleiste abziehen sowie die Holmausschnitte anbringen (Bild 236).

Die Konstruktion des Tragflügels mit Doppelholm, 50 mm Rippenabstand und Teilbeplankung gewährleistet eine große Festigkeit bei geringer Masse und hoher Profiltreue (Bild 238). Wir können sie noch erhöhen, wenn wir zwischen den Holmen senkrecht gefaserte Balsastege einkleben und damit die Holme gegen Knicken sichern. Damit die Bespannung auf der Oberseite nicht einfällt, wird die Nase bis zum Holm mit 1,5 mm Balsa beplankt und die Rippenauflage durch 10 mm breite Balsastreifen verbreitert. Zur Erhöhung der Drehsteifigkeit beplanken wir auch die Unterseite der Nase teilweise mit Balsa.

Bild 238. Die Konstruktion des Tragflügels an der Wurzelrippe



Wir bauen das Segelflugmodell

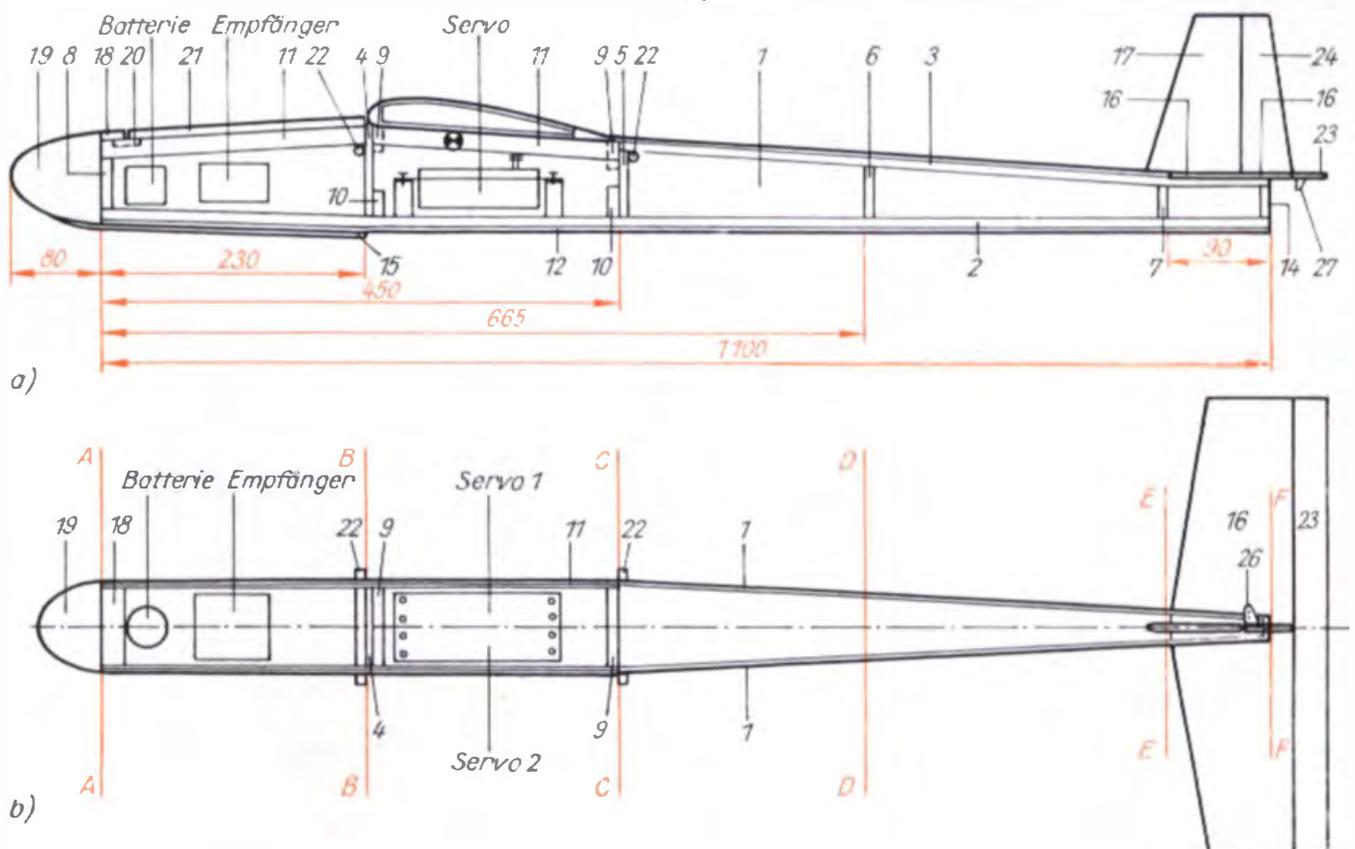
Mit dem Rumpf beginnen wir

Der Bauablauf wird beim Flugmodell in vielen Schritten dem der Schiffsmodele ähneln, nur ist jetzt Masseinsparung oberstes Gebot. Für alle Teile suchen wir sorgfältig getrocknetes, gleichmäßig gemasertes, astfreies Holz aus (Stückliste s. Tabelle 12), das von mittelharter Qualität sein sollte. Bis zum Trocknen der Klebestellen halten wir die Teile mit Stecknadeln oder übergespannten Gummiringen fest.

Als erstes schneiden wir die beiden Seitenteile (1) aus 3 mm Balsabrettchen aus. Die Tragflächenauflage zwischen den Spanten B und C bildet zur Seitenflächenunterkante zwischen Spant B und dem Heck einen Winkel von 3° , der der Einstellwinkeldifferenz entspricht, denn die Auflage der Höhenleitwerkflosse verläuft genau parallel zur Rumpfunterkante. Wir legen die

Seitenplatten deckungsgleich übereinander und bearbeiten sie gemeinsam nach den Angaben von Bild 239. Danach kleben wir innen die Verstärkungsleisten (2) und (3) sowie die senkrechten Spantleisten (4)...(7) auf. Bild 240 zeigt die Schnitte des Rumpfes. Sind die Leimstellen getrocknet, legen wir eine Seitenplanke auf das Hellingbrett und kleben den Kopfspant A (8) sowie die waagerechten Spantleisten (4) und (5) ein. Die zweite Planke wird gewissermaßen als Deckel genau winklig daraufgelegt und ebenfalls mit den Spanten A, B und C verleimt. Nun können wir die Spantverstärkung (9) und (10) und die Schlingen (11) einpassen und einkleben. Dann schneiden wir die Bodenplanke (12) aus und legen sie, genau nach der Mittellinie ausgerichtet, auf das Hellingbrett. In der Höhe des Kopfspantes A wird eine Leiste (5 mm \times 5 mm) untergelegt, damit sich die Planke genau dem Bodenverlauf des Rumpfgerippes anschmiegen kann. Wir bestreichen alle Klebeflächen mit Leim und heften das Gerippe zunächst an den Spanten A, B und C auf der Bodenplanke fest. Dann kleben wir die waagerechten Spantleisten D (6) und E (7) ein und biegen dabei das Heck zusammen. Gleichzeitig werden die Verstärkungsleisten mit der Bodenplanke (12) verleimt. Sind die Leimstellen aus-

Bild 239. Der Aufbau des Rumpfes: a) Seitenansicht, b) Draufsicht



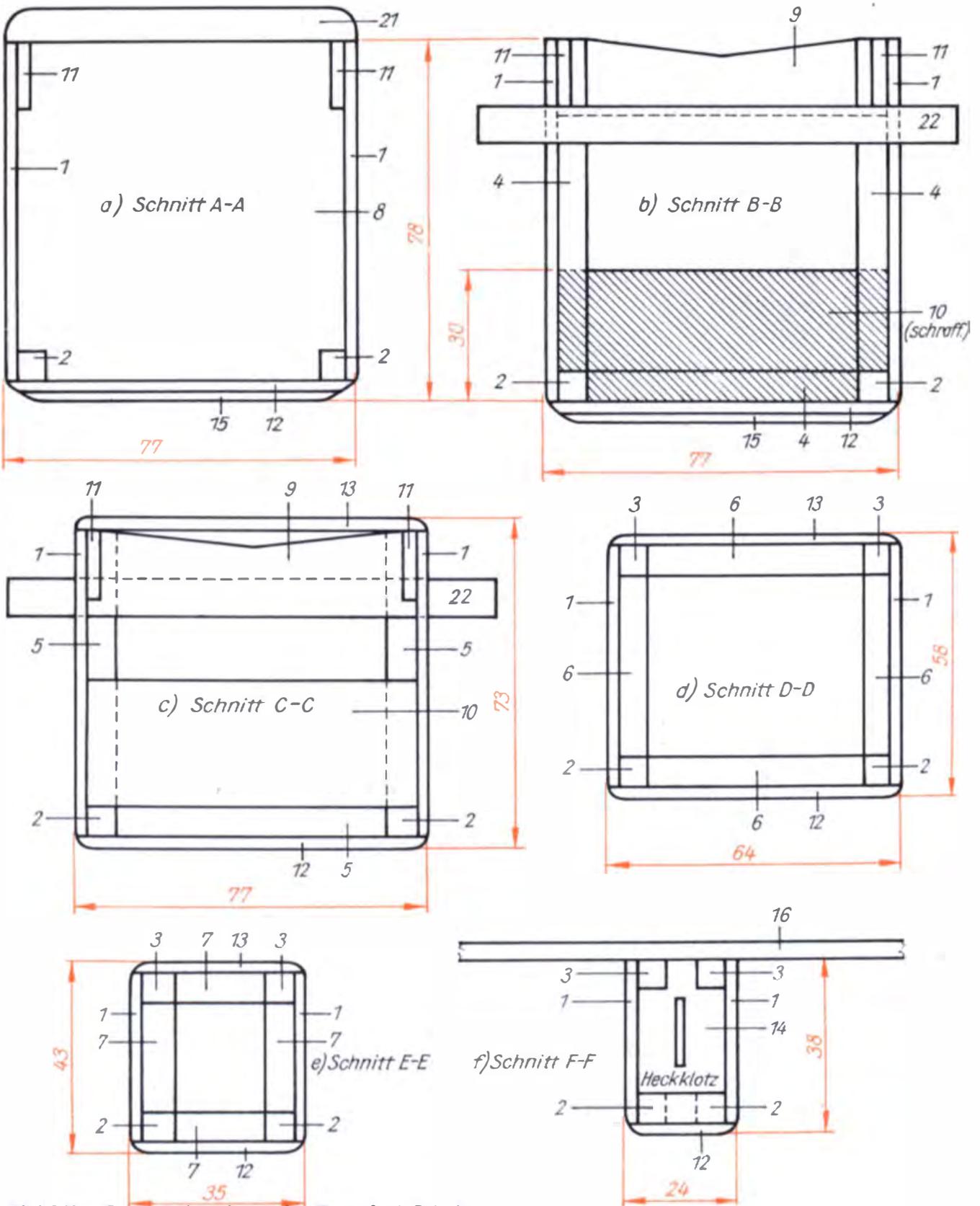


Bild 240. Querschnitte durch den Rumpf: a) Schnitt A-A (Kopfspant), b) Schnitt B-B (Spant B), c) Schnitt C-C (Spant C), d) Schnitt D-D (Spant D), e) Schnitt E-E (Spant E), f) Schnitt F-F (Heckklotz)

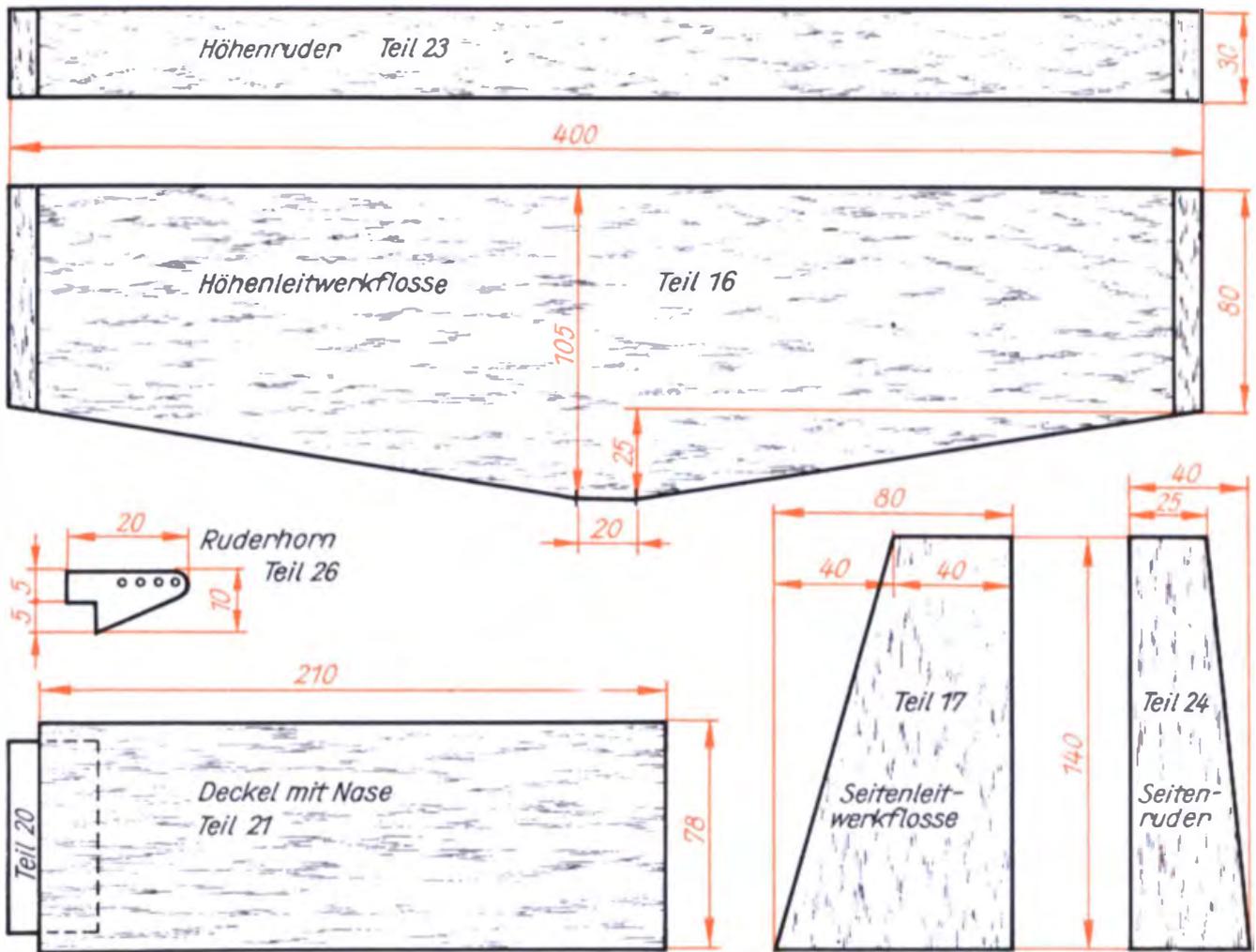


Bild 241. Höhenleitwerk (Teile 16 und 23), Seitenleitwerk (Teile 17 und 24), Ruderhorn (Teil 26 bzw. 27) und Deckel (Teile 20 und 21)

gehärtet, passen wir die Deckplanke (13) sowie den Heckklotz (14) an und leimen sie fest. Nun kann der Rumpf von der Helling genommen und die Bodenverstärkung (15) angebracht werden. Diese Bodenverstärkung dient als Scheuerfläche bei den Landungen und sichert das Gerätefach.

Nach der Fertigstellung des Rumpfes werden alle Kanten rund geschliffen. Dann spannen wir ihn wieder auf die Helling, richten die Höhenleitwerkflosse (16) (Bild 241) genau aus und kleben sie fest. Die Flosse ist der mit dem Rumpf des Flugmodells unbeweglich verbundene Teil des Höhen- oder Seitenleitwerkes. Die Seitenleitwerkflosse (17) wird dann rechtwinklig stumpf auf das Höhenleitwerk aufgeklebt. Das hat den Vorteil, daß bei eventueller Bruchlandung die Seitenleitwerkflosse an der Klebestelle

glatt abbricht und kaum beschädigt wird. Diese Sollbruchstelle ist außerdem wesentlich leichter zu reparieren als der Bruch eines verzapften Teiles. Am Rumpfbug kleben wir die Deckleiste (18) und den Bugklotz (19) an. Der Bugklotz besteht aus Vollbalsa, oder wir kleben ihn aus Schichten zusammen. Die Form wird mit Balsamesser und Schleifklotz hergestellt. Unter die Deckleiste (18) greift die Nase (20) des Deckels (21), der das Gerätefach abschließt und so festgehalten wird. Nun können wir auch die Durchbrüche für die Dübel (22) bohren und diese einkleben.

Höhen- (23) und Seitenruder (24) verputzen und profilieren wir und befestigen sie mit Plastescharnieren an den Flossen (Bild 242). Das Scharniermaterial sollte weich und sehr flexibel sein. Wir verwenden dazu eine alte Polyäthylen-Plasteflasche (Spülmittelflasche). Für die Scharniere schneiden wir mit dem Balsamesser in Flosse und Ruder entsprechende Schlitze. Be-

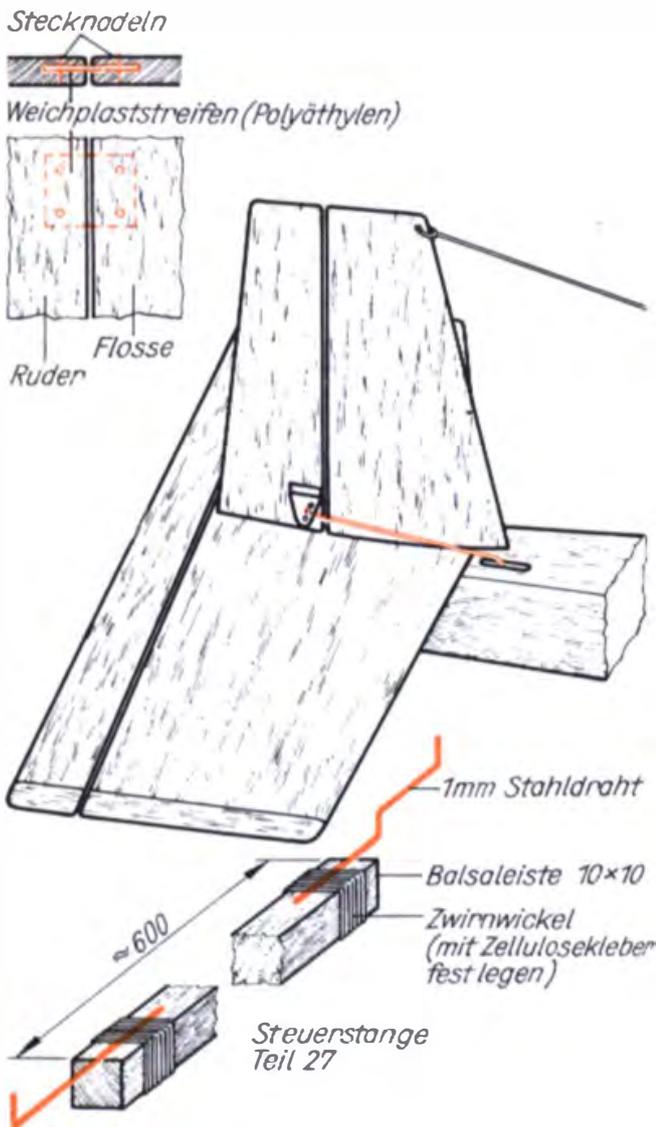


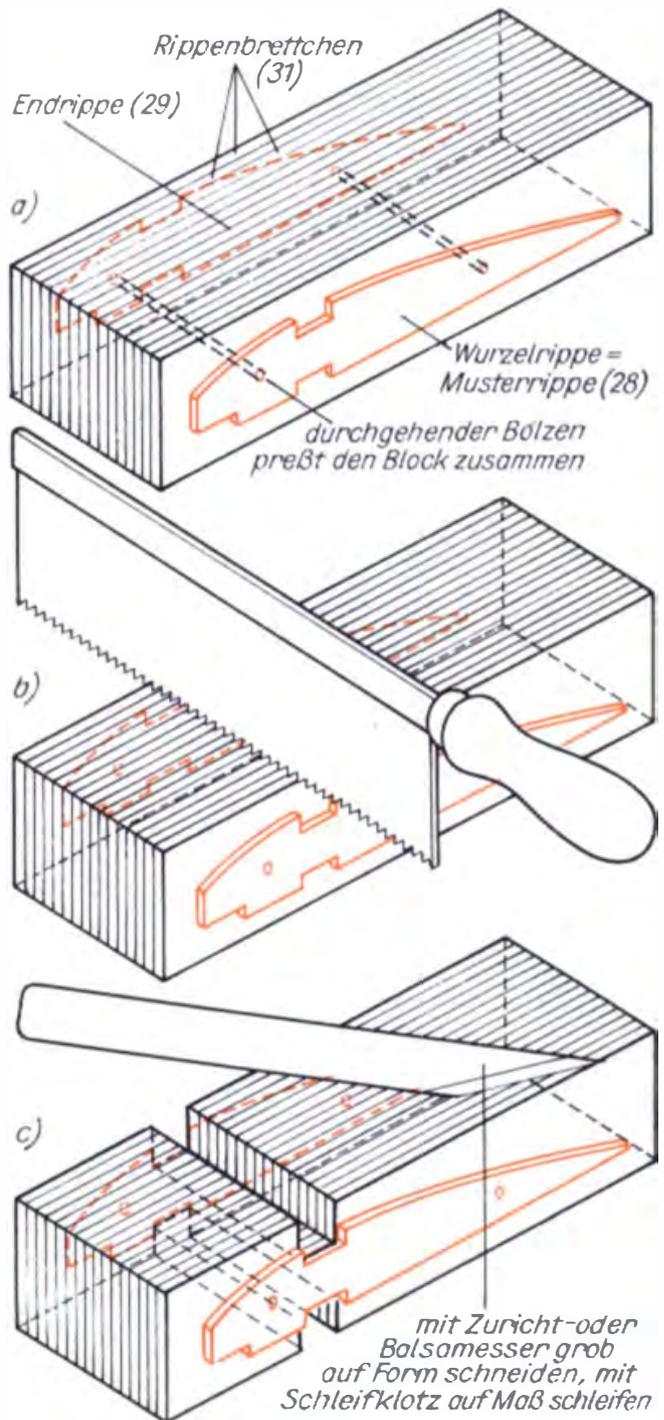
Bild 242. So sieht das Leitwerk aus

festigt werden die Scharniere mit durchgesteckten Stecknadeln, deren überstehende Länge wir abknöpfen. Zur Ruderbetätigung dienen Ruderhörner aus Leiterplattenmaterial (26), die in die Ruder eingeklebt werden. In der Rumpfoberseite (wie schon im Heckklotz) bringen wir einen Schlitz von 2 mm × 25 mm Länge an (Bild 242), durch den das abgewinkelte und am Seitenruder gekröpfte Drahtende der zugehörigen Stoßstange (27) geführt wird. Wir entscheiden uns für eine Balsastößstange, weil sie einfach herzustellen, leicht, fest und temperaturbeständig ist. Falls wir schon wissen, welche Fernsteueranlage wir verwenden, werden nun noch die Halterungen für die Servos bzw. Rudermaschinen eingebaut und die Stoßstangenenden nach Maß gebogen.

Wir fertigen den Tragflügel an

Die Rippen für den Tragflügel werden nach folgender Methode hergestellt. Unter genauer Einhaltung des Profilverlaufes von Bild 237

Bild 243. Wie wir die Rippen herstellen: a) die Rippenbrettchen werden von zwei durchgehenden Bolzen zusammengehalten, b) die Holmausschnitte werden ausgesägt, c) das Profil wird ausgeschnitten (grob mit Balsamesser, Feinbearbeitung mit Schleifklotz)



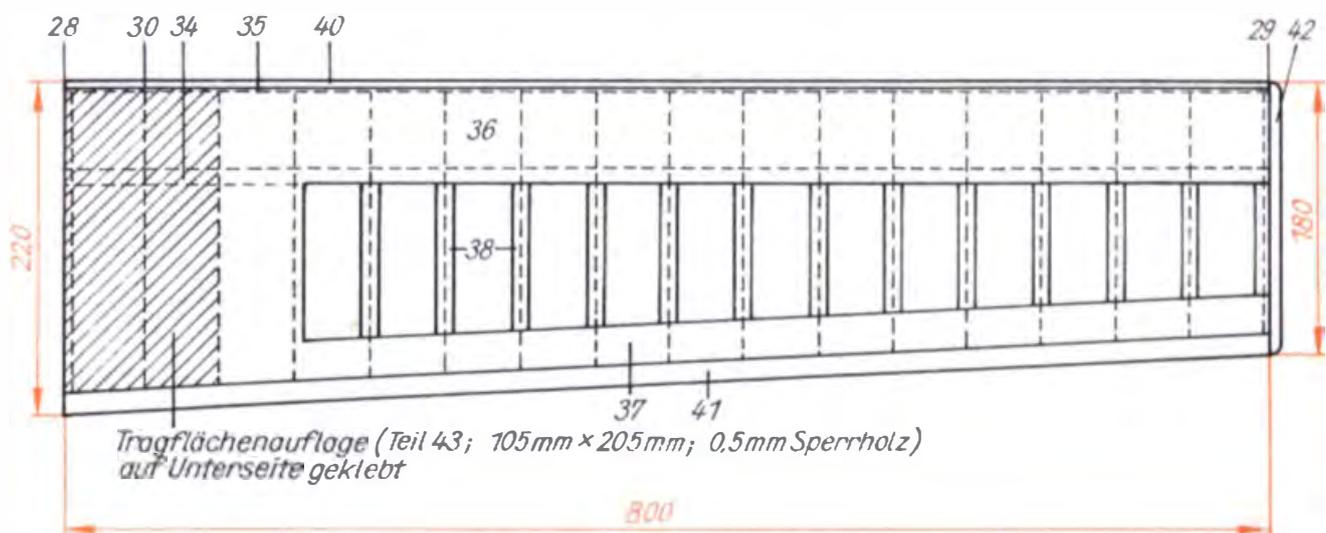
fertigen wir zwei Musterrippen aus 3 mm Sperrholz an und versehen sie nach den Angaben im Bild mit je zwei 3-mm-Bohrungen. Aus mittelhartem Balsa werden 16 Rippenbrettchen (2 mm stark) und ein Rippenbrettchen (5 mm stark) ausgeschnitten, deren Maße etwa 225 mm × 25 mm betragen sollten. Diese Brettchen verbinden wir unter beiderseitigem Anfügen der Musterrippen (28) und (29) – dabei liegt Rippe 1 (30) neben der Musterrippe (28) – mit Hilfe von zwei M3-Schraubenbolzen zu einem festen Block (Bild 243a). Nun können wir mühelos die Ausschnitte für die Holme aussägen und das Profil mit dem Balsamesser herausschälen. Die Feinbearbeitung erfolgt wieder mit dem Schleifklotz, bis die Musterrippen genau mit dem Rippenpaket übereinstimmen. Danach lösen wir die Haltebolzen und nehmen die Rippen ab, die dabei fortlaufend von 1 bis 17 nummeriert werden (Rippe 1 besteht dann aus 5 mm Balsa und wird die Wurzelrippe des Tragflügels). In der gleichen Weise stellen wir den Rippensatz für die andere Tragflügelhälfte her.

Ist unser Hellingbrett lang genug, können wir beide Tragflügelhälften gleichzeitig aufbauen. Dazu wird nach Bild 244 der Grundriß (Rippenabstand, Holm, Nasen- und Endleistenanordnung) auf Karton gezeichnet und auf das Hellingbrett aufgeklebt. Nun heften wir den unteren Holm (32) und die untere Nasenbeplankung (33) mit Stecknadeln an. Die Rippen 1...17 kleben wir

genau winklig auf den unteren Holm (32) und die Nasenbeplankung (33). Dabei werden sie in ihrer Lage durch Stecknadeln gehalten. Zur Kontrolle blicken wir an den Rippennasen und -enden entlang und stellen so fest, ob alle Rippen in einer Flucht liegen. Dann verleimen wir den oberen Holm (34) und die Nasenleiste (35) mit den Rippen und ziehen die obere Nasenbeplankung (36) und die obere Endbeplankung (37) auf. Anschließend werden die Rippenaufgaben (38) und die Wurzelbeplankung (39) eingepaßt und festgeklebt.

Nun können wir das Flügelgerippe vom Hellingbrett herunternehmen und die Klebeflächen für Nasen- (40) und Endleiste (41) plan und winklig schleifen. Zum Ankleben dieser Leisten heften wir die Flügelhälfte wieder auf die Helling. Ist der Leim getrocknet, schleifen wir die Klebefläche für den vorgeformten Randbogen (42) und kleben ihn an. Danach werden die beiden Tragflügelhälften unter Beachtung der V-Form von 8° (durch Unterlegen eines Klotzes unter den Randbogen) winklig ausgerichtet (Bild 245), so daß die Wurzelrippe (30) mit dem Hellingbrett bündig abschließt. In dieser Anordnung kann die Wurzelrippe für die Stoßstelle der beiden Hälften genau winklig geschliffen werden. Nun müssen noch die Auflage (43) aus 0,5 mm Sperrholz angepaßt und die Kanten abgeschliffen und angeklebt werden. Jede Tragflügelhälfte wird dann mit dem Schleifklotz sauber verputzt. Dabei erhalten Nasen- und Endleiste sowie Randbogen den letzten Schliff und ihr endgültiges Profil.

Bild 244. Draufsicht des Tragflügels



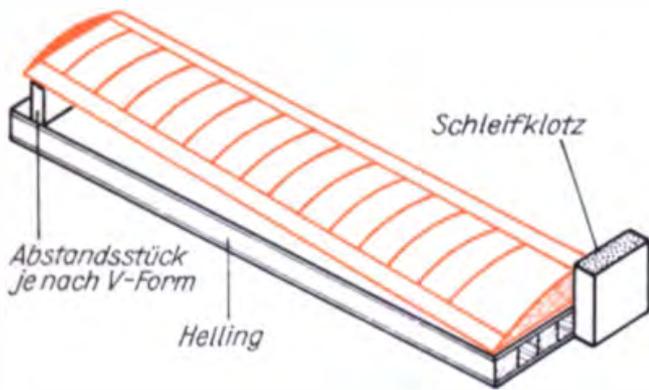


Bild 245. So wird die V-Form eingestellt

Wir bespannen Rumpf und Tragflügel

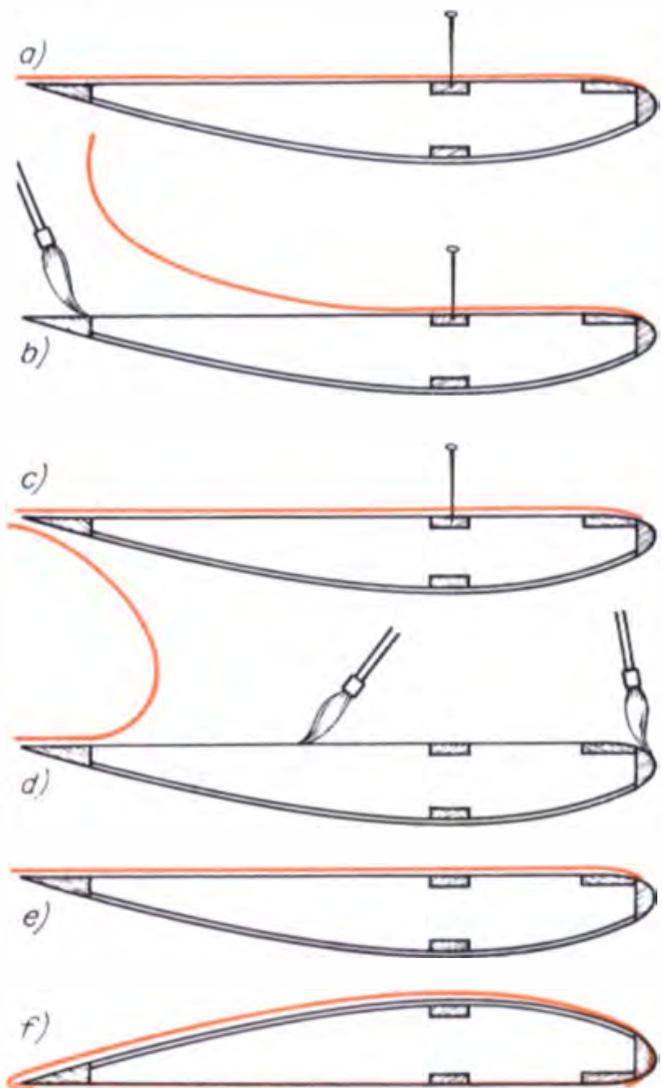
Durch die Bespannung erhöhen wir die Festigkeit und verbessern die Oberflächenqualität. Wir suchen uns **dazu** eine leichte Papiersorte ($\approx 20 \text{ g/m}^2$) aus. Wählen wir das Papier zu stark, so können beim Lackieren mit Spannlack so große Kräfte auftreten, daß sich der Tragflügel verzieht. Die Papierbespannung ist außerdem billiger, schneller und einfacher zu bearbeiten als eine Stoffbespannung. Wir verwenden das in Fachgeschäften erhältliche braune Bespannpapier. Noch besser geeignet ist allerdings Japanpapier, es ist leichter, fester und spannt sich gut. Für eine Stoffbespannung entscheiden wir uns, wenn ein größeres Modell gebaut werden soll und dafür Bespannstoff mit mehr als 25 g/m^2 verwendet werden kann. Sie ist zwar haltbarer als die Papierbespannung, aber auch schwerer zu reparieren.

Zum Bespannen eignet sich so gut wie jeder Klebstoff. Wir nehmen einfachen Spannlack. Er ist billig und gut verarbeitbar. Als erstes schneiden wir das Bespannpapier für Tragflügel und Rumpf so zurecht, daß sich die Stoßstellen etwa 5 mm überlappen. Wir achten darauf, daß die Fasern des Papiers parallel zum Tragflügelholm verlaufen. Den Faserverlauf ermitteln wir durch eine Reißprobe; diese ergibt in Faserrichtung einen relativ glatten, senkrecht zur Faserrichtung einen zackigen, meist schräg verlaufenden Reiß.

Haben wir die vier Bespannpapierstücke für den Tragflügel zugeschnitten, legen wir sie einzeln auf die Unterseiten und heften sie mit Stecknadeln am Holm fest (Bild 246a). Den Tragflügel befestigen wir zum Bespannen am besten wieder

auf der Helling, und zwar so, daß er gut austrocknen, sich dabei aber nicht verziehen kann. Nun heben wir das Papier an der Hinterkante an und pinseln die Endleiste mit Spannlack ein (Bild 246b). Danach lassen wir es herabfallen und streichen die Hinterkante mit dem Lackpinsel glatt und fest an. Es dürfen sich keine Falten bilden (Bild 246c). Der Lack muß einige Minuten anziehen, ehe wir die Stecknadeln herausziehen können und das Bespannpapier vorsichtig über die Endleiste zurücklegen (Bild 246d). Nun werden die Klebeflächen auf der Wurzelbeplankung, den Rippen, dem Randbogen, dem Holm und der Nasenleiste mit Spannlack eingestrichen. Wir heben das Papier an den beiden freien Ecken an und legen es wie beim Tapezieren von der Endleiste her gleichmäßig auf die Tragflügelun-

Bild 246. So bespannen wir den Tragflügel



terseite. Zum Glattstreichen verwenden wir ein langes Lineal. Abschließend streichen wir mit dem Lackpinsel das Bespannpapier vorsichtig an allen Klebestellen fest und faltenfrei an (Bild 246e). An allen Klebestellen muß das Bespannpapier gut von Spannack durchtränkt sein. Danach lassen wir den Spannack gründlich trocknen, bevor die Tragflügeloberseite in der gleichen Weise bespannt wird. Die überstehenden Papierränder schneiden wir mit einer scharfen Rasierklinge ab und verschleifen die Stoßstellen mit feinem Sandpapier (Bild 246f). In gleicher Weise werden die andere Tragflügelhälfte und der Rumpf (außer Höhen- und Seitenleitwerk) bespannt. Den Rumpf streichen wir zuletzt mehrmals mit farblosem, die Nase (20) und die Bodenverstärkung (15) mit schwarzem Nitrolack, bis wir eine glatte Oberfläche erhalten.

Nach dem Trocknen des Tragflügels werden wir feststellen, daß die Bespannung wellig ist und Falten aufweist. Wir müssen also noch die Oberfläche glätten, das Papier straffen und spannen. Zu diesem Zweck wird der Tragflügel auf dem Hellingbrett befestigt und mit einem weichen Schwamm oder mit einem wassergefüllten Haarlacksprüher *leicht* angefeuchtet (nicht durchnäßt!). Nach ein- oder zweimaligem Befeuchten und Austrocknen hat sich die Bespannung so weit geglättet, daß wir sie mit Spannack behandeln können. Bei Verwendung von Japanpapier erübrigt sich in der Regel das Anfeuchten, so daß wir diese Bespannung allein mit Spannack ausreichend straffen können. Der Lack soll das Papier nicht nur straffen, sondern es gleichzeitig luft- und wasserdicht machen und seine Festigkeit erhöhen. Auch bei diesem Arbeitsgang müssen wir einige Erfahrungen sammeln. In der Regel reichen drei bis fünf dünne Anstriche aus. Streichen wir zuviel Spannack auf die Flächen, können sie sich infolge der dadurch auftretenden Kräfte verziehen. Auch hier gilt die Regel, daß mehrere dünne Anstriche besser (auch besser zu kontrollieren!) sind als wenige dicke. Stellen wir nach dem Lackieren fest, daß sich der Tragflügel verzogen hat, so soll uns das keine Sorgen bereiten. Über die Beseitigung eines solchen Mangels erfahren wir im nächsten Kapitel noch einiges. Die beiden bespannten, verputzten und einander angepaßten Tragflügelhälften richten

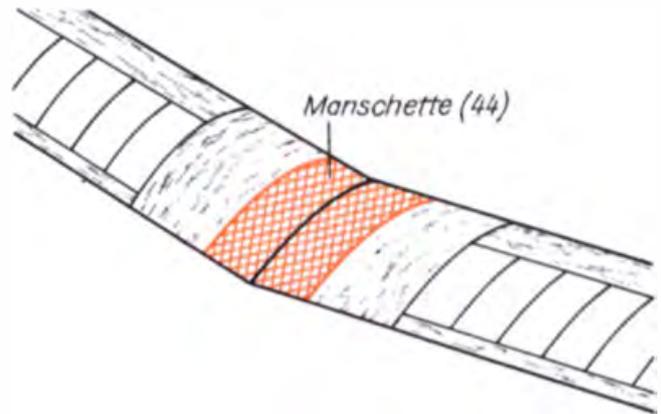


Bild 247. Die Klebestelle zwischen beiden Tragflügelteilen wird durch eine Manschette gesichert

wir auf der Helling nach der V-Form (Klötze unter Randbogen legen) aus und kleben sie stumpf aneinander. Den Stoß sichern wir durch eine Manschette (44) aus Leinen oder Dederon. Noch haltbarer ist allerdings eine Manschette aus Glasfasergewebe und Polyester (Bild 247).

An dieser Stelle sei noch einiges zu Reparaturen gesagt. Meist wird es sich um Schäden der Tragflügelbespannung handeln, die wir schon auf dem Fluggelände beheben können. Wurde ein Loch in die Bespannung gerissen, so schließen wir es mit einem Tropfen Zellulosekleber. Größere Löcher und kleinere Risse behandeln wir mit Selbstklebeband. Bei größeren Rissen kleben wir ein neues Stück Bespannpapier von Rippe zu Rippe und von Holm zu Nasen- bzw. Endleiste, so daß das ganze Feld mit etwa 5mm Zugabe rundherum abgedeckt ist. Kleinere Holzschäden können wir ebenfalls auf dem Flugplatz beheben, größere beseitigen wir mit der nötigen Sorgfalt in der Werkstatt.

Wir fliegen unser Modell ein

Das Einfliegen beginnt in der Werkstatt

Das mag uns zunächst unverständlich sein, aber gute Flugleistungen erzielen wir mit unserem Modell nur, wenn wir es vorher in der Werkstatt einer gründlichen Kontrolle unterziehen. Dabei gehen wir schrittweise nach einem strengen Plan,

der Checkliste, vor. Da die Flugstabilität und die Betriebssicherheit in erheblichem Maße von der Werkstattkontrolle abhängen, führen wir diese sehr sorgfältig durch.

Checkliste für die Werkstattkontrolle:

1. Überprüfung des Tragflügels auf Verzug

Wir prüfen den Tragflügel, indem wir Nasen- und Endleiste von vorn, quer und in Längsrichtung anvisieren. Meist erkennt man den verzogenen Flügel an der mehr oder weniger gekrümmten Endleiste. Geringfügigen Verzug können wir durch Richten über einer Gasflamme oder über Dampf bzw. mit einem gezielten weiteren Spannackanstrich beseitigen. Wenn nicht, sollten wir den Flügel neu bespannen oder uns zum Neubau entschließen, falls Bauungenauigkeiten die Ursache sind.

2. Überprüfung der Draufsicht

Wir prüfen mittels dreier Stecknadeln und eines Zwirnsfadens nach Bild 248 die Draufsicht. Sind Tragflügel und Leitwerk nicht genau winklig zur Mittellinie des Modells, so neigt das Modell ständig zum Kurven.

3. Überprüfung der Vorderansicht

Wir kontrollieren wie unter Punkt 1. die Vorderansicht (Bilder 249a und b). Dabei soll die Rumpflängsachse parallel zur Auflagefläche verlaufen. Fehlerhaften Sitz von Tragflügel oder Leitwerk korrigieren wir durch einseitiges Unterlegen und (Festkleben!) von entsprechenden Balsa- oder Sperrholzstreifen.

4. Überprüfung der Schwerpunktlage

Wir wissen, daß die richtige Lage des Schwer-

Bild 248. Prüfung der Draufsicht

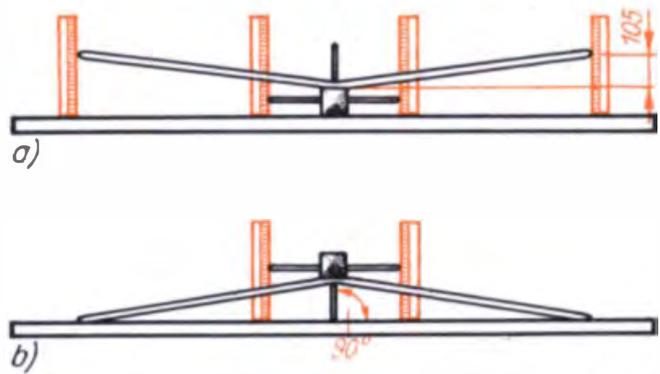
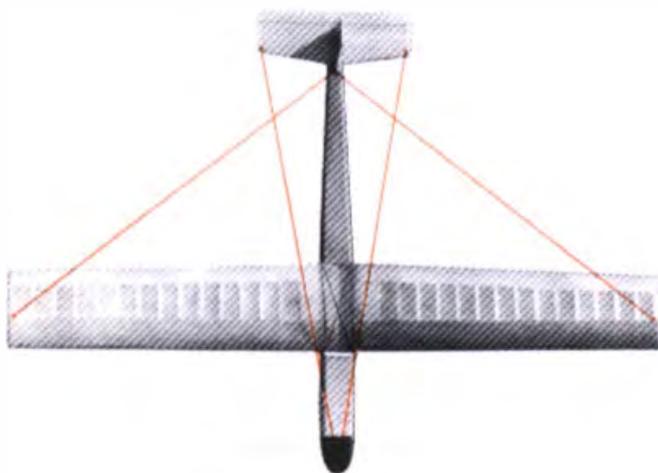


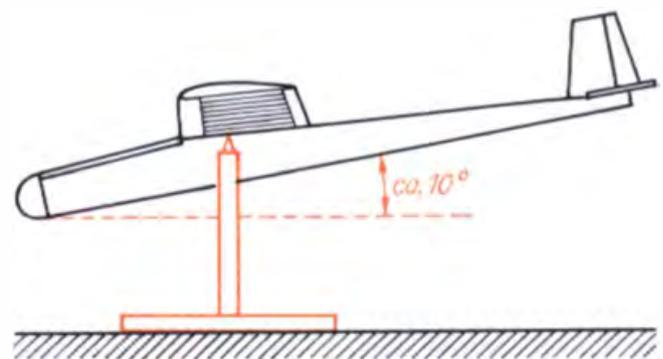
Bild 249. Prüfung der Vorderansicht: a) in Normallage, b) in Rückenlage

punktes die Flugstabilität erheblich beeinflusst. Abweichungen gegenüber den Angaben in der Zeichnung korrigieren wir durch Verschieben von NK-Akku und Empfänger im Gerätefach. Wir können mit dem im Bild 250 dargestellten Bock das Modell genau auswiegen, so daß die Nase etwa 10° geneigt ist.

5. Überprüfung der Einstellwinkeldifferenz

Wir legen das Modell so auf eine völlig ebene, genügend große Tischplatte, daß die Bodenfläche zwischen Spant B und Heckklotz aufliegt. Dabei muß das Höhenleitwerk in Längsrichtung genau parallel zur Tischplatte verlaufen. Legen wir an die Profilunterseite eine Leiste, so soll sie mit der Auflagefläche und folglich auch mit dem Höhenleitwerk einen Winkel von 3° bilden, der der Einstellwinkeldifferenz entspricht (Bild 251). Eventuelle Abweichungen korrigieren wir durch Ausschneiden der Auflagefläche an den Spanten B und C bzw. durch Unterlegen von Sperrholzstreifen.

Bild 250. Wir prüfen die Schwerpunktlage



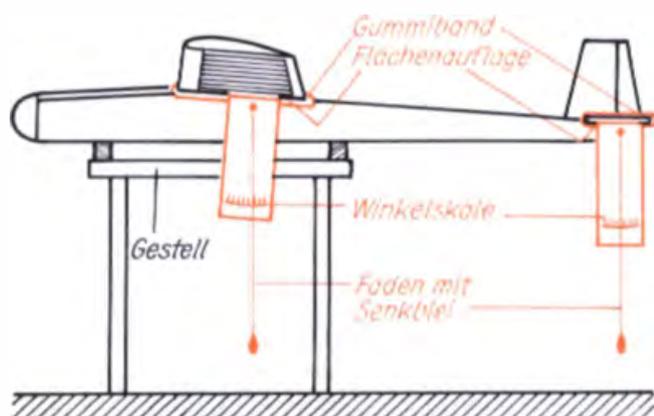


Bild 251. Wir prüfen die Einstellwinkeldifferenz

6. Überprüfung der Ruderfunktion und Ruderstellung

Höhen- und Seitenruder sollen bei Betätigung der Fernsteueranlage (Abstand des Senders größer als 3 m!) leicht und spielfrei bewegt werden können sowie exakt in die Nulllage zurückkehren. Die Ruder müssen vor Beginn der Flugerprobung auf »Null« stehen (Mittellinie von Ruder und Flosse müssen übereinstimmen!). Das Rudergestänge sollte durch übergeschobene Lack-schlauchstücke oder Federn gesichert sein.

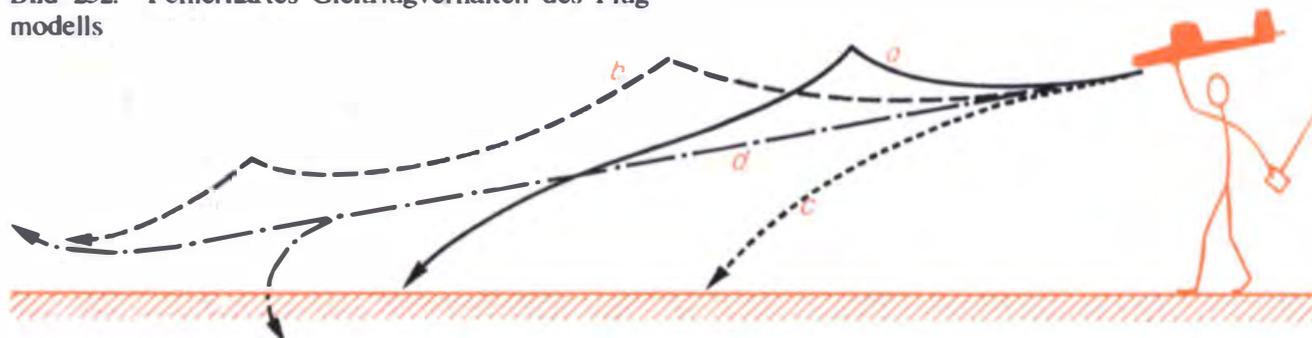
Erste Flugversuche

Die Flugerprobung führen wir bei ruhigem Wetter (leichter Wind ist erwünscht) von einer etwas überhöhten Startstelle aus durch. Fliegt das Modell gegen den Wind, so wird sich seine Gleitfluggeschwindigkeit um die Windgeschwindigkeit verringern und es folglich langsamer und weniger hart als bei Windstille aufsetzen. Die vorgesehene Landestelle sollte keine Hindernisse oder Bodenwellen aufweisen und möglichst mit Gras bewachsen sein. Steine sind immer eine große Gefahr. Damit wir Fehler im Flugverhalten

des Modells auch bei der Erprobung erkennen, dürfen wir nicht im verwirbelten Wind fliegen, also nicht im Lee von Gebäuden, Bäumen oder Sträuchern.

Sind nach sorgfältiger Werkstattkontrolle keine Korrekturen mehr am Modell erforderlich, so führt es den gewünschten Gleitflug nur aus, wenn es von Hand in die richtige Fluglage und mit seiner normalen Gleitfluggeschwindigkeit in die Luft »geschoben« und nicht geworfen wird. Daher lassen wir zunächst die Fernsteueranlage ausgeschaltet und erlernen den Handstart. Mit der Längsachse des Modells zielen wir auf einen 10...15 m vor uns liegenden Landepunkt (normale Gleitfluglage) und beginnen, mit dem Modell gegen den Wind zu laufen. Mit steigender Laufgeschwindigkeit wird es an einem bestimmten Punkt in der Hand gewichtslos, nämlich dann, wenn Lauf-plus Windgeschwindigkeit gleich der Gleitfluggeschwindigkeit geworden sind. Das ist im wesentlichen von der herrschenden Windgeschwindigkeit abhängig. Wir laufen dann mit gleicher Geschwindigkeit weiter und lassen das Modell los. Es wird nun einen gestreckten Gleitflug ausführen. Wenn der erste Versuch nicht richtig gelingt, probieren wir das Ganze noch einmal. Sollte das Modell vom gewünschten Gleitflugverhalten abweichen, verändern wir zunächst nichts, sondern trainieren weiter den Handstart (Fluglage und Geschwindigkeit beachten!). Erst wenn dann immer noch der gleiche Mangel auftritt, gehen wir an die systematische Fehlersuche. Ein Fehler kann verschiedene Ursachen haben. Daher soll es unser Prinzip sein, von Flug zu Flug immer nur eine der in Betracht kommenden Fehlerquellen näher zu untersuchen bzw. Änderungen vorzunehmen. Wir müssen darauf achten, daß beim Korrigieren nicht neue Fehler entstehen. Besonders die Einstellwinkeldifferenz darf nicht zu weit verringert

Bild 252. Fehlerhaftes Gleitflugverhalten des Flugmodells



Beobachteter Fehler	Mögliche Ursache	Korrektur
Modell steigt nach der Freigabe steil weg, verliert an Fahrt und kippt nach vorn ab (Bild 252a)	Startgeschwindigkeit zu groß	mit geringerer Laufgeschwindigkeit den Start wiederholen
	Einstellwinkeldifferenz zu groß	Balsa- oder Sperrholzstreifen entsprechender Dicke unter die Endleiste des Tragflügels legen
	Modell ist schwanzlastig, der Schwerpunkt liegt zu weit hinten	Batterie und Empfänger im Gerätefach weiter vorn einbauen; falls nicht möglich, Blei im Rumpfbug befestigen
Modell fliegt in wellenförmiger Flugbahn (Modell pumpt) (Bild 252b)	Startgeschwindigkeit zu groß	mit geringerer Laufgeschwindigkeit den Start wiederholen
	Einstellwinkeldifferenz zu groß	Sperrholzstreifen (0,6 mm) unter die Endleiste des Tragflügels legen
	Modell ist leicht schwanzlastig	Batterie und Empfänger etwas nach vorn rücken
Modell gleitet nach kurzer Flugstrecke steil zu Boden (Bild 252c)	Startgeschwindigkeit zu gering	mit größerer Laufgeschwindigkeit den Start wiederholen
	Einstellwinkeldifferenz zu klein	Balsa- oder Sperrholzstreifen entsprechender Dicke unter die Nasenleiste des Tragflügels legen
	Modell ist kopflastig, der Schwerpunkt liegt zu weit vorn	Batterie und Empfänger im Gerätefach weiter zum Schwerpunkt hin einbauen

Beobachteter Fehler	Mögliche Ursache	Korrektur
Modell beschreibt bei normalem gestrecktem Gleitflug eine Links- oder Rechtskurve (Bild 252d)	Start mit hängendem Flügel	Start mit waagrecht gehaltenem Modell wiederholen
	eine Flügelhälfte ist verzogen	Verzug im Tragflügel beseitigen
	eine Flügelhälfte ist schwerer als die andere	etwas Blei am Randbogen der anderen Flügelhälfte befestigen
	der Rumpf ist verzogen	Verzug des Rumpfes beseitigen
	das Seitenleitwerk ist schief montiert bzw. verzogen	Seitenleitwerk richten bzw. Verzug beseitigen
das Höhenleitwerk ist nicht im rechten Winkel zum Seitenleitwerk montiert	Höhenleitwerk durch Unterlegen von Balsastreifen richten	

werden, da sie die Längsstabilität des Modells beeinflusst. Sollten sich bei der Flugerprobung Fehler zeigen, gehen wir wieder systematisch vor. Dabei wird es sich als zweckmäßig erweisen, vorgenommene Änderungen genauestens schriftlich festzuhalten (Tabelle S. 218).

Um uns mit der Wirksamkeit der Fernsteuerung vertraut zu machen, führen wir die letzten Flüge ferngesteuert durch. Oberstes Gebot ist, nur kleine Steuerausschläge zu geben! Haben wir vorher Schiffsmodelle ferngesteuert, so müssen wir uns jetzt gründlich umstellen. Jeder Vollauschlag eines Ruders in Bodennähe führt mit Sicherheit zu einer unsanften Landung, oft zum Bruch des Modells. Da es eigenstabil fliegt und allein auch besser landen kann, sollten sich unsere ersten Fernsteuerversuche auf Korrekturen des Geradeausfluges beschränken. Kennen wir die Eigenarten des Modells, so geben wir auch einmal ganz vorsichtig Höhenruder. Das Modell reagiert dabei rascher, als wir denken. Auf diese Weise studieren wir genau das Flugverhalten und lernen es beherrschen, ehe wir einen Hang- oder Hochstart wagen.

Ein Kapitel Hangflugtechnik

Durch sorgfältige Trimmung haben wir ein eigenstabil fliegendes Modell erhalten. Das ist auch die Voraussetzung für den Hangflug.

Wird ein Hang im rechten Winkel vom Wind angeströmt, so entsteht infolge der Ablenkung ein Aufwind v_a (Bild 253a), der um so stärker sein wird, je größer die Windgeschwindigkeit bzw. je steiler der Hang ist. Die Höhe des Aufwindes über dem Hang ist von Hangprofil und Windgeschwindigkeit abhängig. Die Praxis hat gezeigt, daß man mit dem Modell etwa bis zur doppelten, manchmal auch bis zur dreifachen Hanghöhe über der Hangkante fliegen kann. Solange die Aufwindgeschwindigkeit größer als die Sinkgeschwindigkeit ist, wird das Modell steigen, um in Höhen, in denen beide Geschwindigkeiten gleich groß sind, hin- und herzufliegen. Ist der Hang unregelmäßig bewachsen, zu steil, oder hat er Stufen, so ist mit Verwirbelungen und Abwinden zu rechnen (Bild 254). Die schwarzen

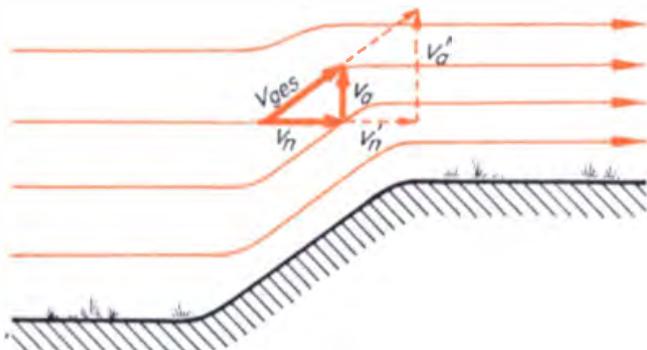


Bild 253. Der Aufwind am Hang

Pfeile kennzeichnen jeweils Abwindzonen, sie sind auf jeden Fall zu meiden. Komplizierter sind die Verhältnisse, wenn der Hang nicht rechtwinklig vom Wind angeblasen wird. Abgesehen von Verwirbelungen wird der Aufwind kleiner, je spitzer der Winkel zwischen Windrichtung und Hangfläche ist.

Nun wollen wir uns einige Regeln einprägen.

1. *Wir trimmen das Modell auf gute Gleiteigenschaften.*

Meist spielt die Sinkgeschwindigkeit des Modells eine untergeordnete Rolle. Sie hat erst Bedeutung, wenn der Hang sehr flach oder die Windgeschwindigkeit gering ist. Wichtiger dagegen ist ein flacher Gleitwinkel des Modells, damit wir bei plötzlicher Flaute den Landepunkt noch erreichen.

2. *Wir trimmen das Modell auf gute Längsstabilität.*

Wir wissen, daß in den meisten Fällen am Hang

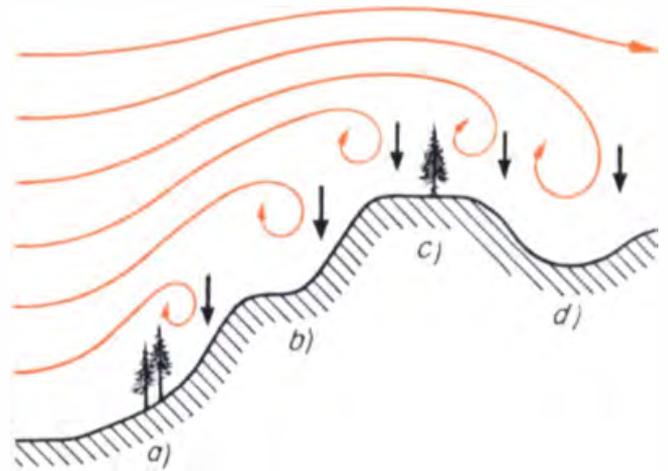


Bild 254. Ungünstige Hangprofile erzeugen Verwirbelungen: a) teilweiser Baumbestand, b) Stufen im Hang, c) Baumbestand hinter der Hangkante, d) Bodenwellen hinter der Hangkante

mit Verwirbelungen zu rechnen ist. Daher ist die Längsstabilität des Modells von entscheidender Bedeutung (EWD nicht zu klein wählen!).

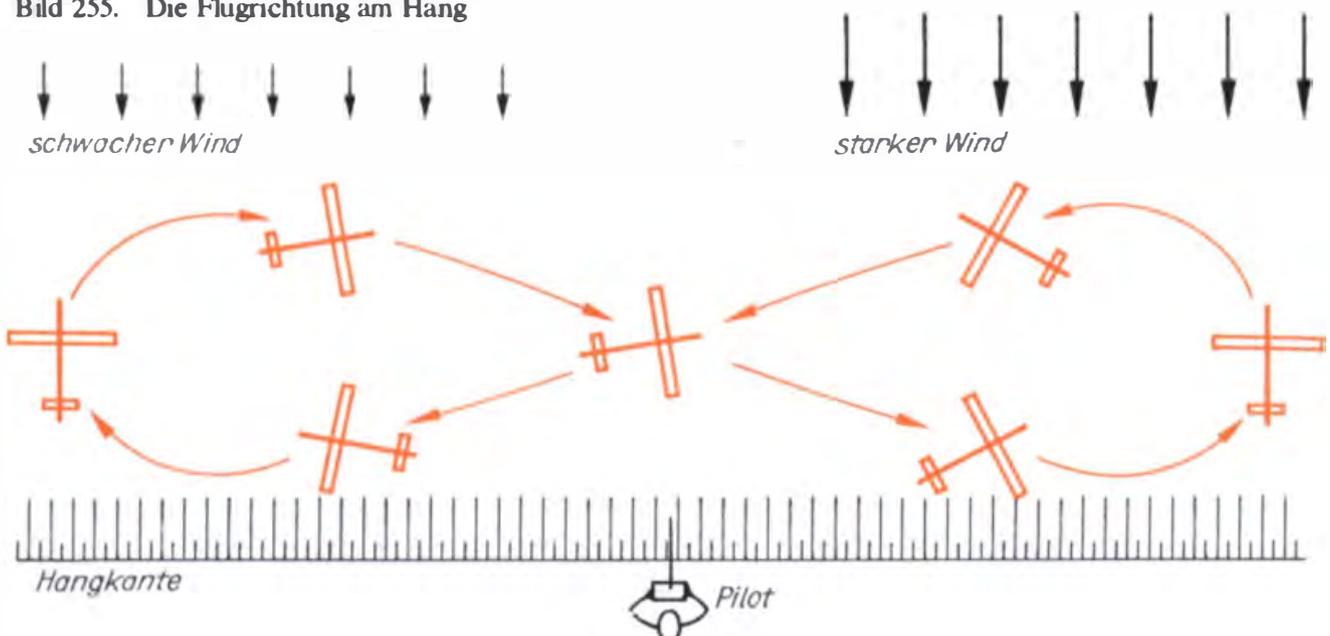
3. *Wir fliegen nur im Luv vor der Hangkante.*

Wollen wir das Modell ständig unter Kontrolle haben und der Gefahr seines Davonfliegens entgehen, so fliegen wir es immer im Luv vor der Hangkante. Wir haben dann in der Regel noch Zeit und Gelegenheit, es bei Änderungen der Windgeschwindigkeit zu landen.

4. *Wir fliegen alle Kurven im Aufwind stets vom Hang weg.*

Wollen wir das Modell ständig im Luv fliegen,

Bild 255. Die Flugrichtung am Hang



müssen wir es je nach Windgeschwindigkeit mehr oder weniger stark gegen den Wind richten. Wir fliegen daher vor dem Hang liegende Achten mit der Nase des Modells zum Wind. Der Winkel zwischen Längsachse und Windrichtung ist bei starkem Wind kleiner als bei schwachem Wind zu wählen (Bild 255).

5. Wir landen das Modell in einem wirbelfreien Gebiet nahe unserem Standpunkt.

Für die Landung des Modells gibt es verschiedene Möglichkeiten, wobei die Wahl der günstigsten Variante von den örtlichen Verhältnissen bestimmt wird. Auf jeden Fall führen wir die Landung in einem nichtverwirbelten Gebiet durch. Die Landung am Fuß des Hanges scheidet aus, da dieser in der Regel von unserem Standpunkt zu weit entfernt ist und wir dem Einfluß von Böen nicht sehr gut begegnen können. Es bieten sich zwei *Landeverfahren* an. Bei schwachem Wind fliegen wir das Modell mit Rückenwind zum Hang und geben vor diesem kräftig Höhenruder. Das Modell landet bergauf. Bei stärkerem Wind verlagern wir seine Flugbewegung über die Hangkante hinweg in das Leegebiet, fliegen die Acht noch ein- bis zweimal, bis wir die Landehöhe erreicht haben. Dann stellen wir das Modell direkt gegen den Wind und landen dicht hinter der Hangkante. Da wir in diesem Gebiet mit Böen rechnen müssen, beobachten wir jede Reaktion des Modells und steuern, wenn erforderlich, gegen.

Unser Modell ist speziell für den Hangflug konstruiert. Es hat »gutmütige« Flugeigenschaften, ist wendig, robust und für einen großen Geschwindigkeitsbereich des Windes geeignet. Mit ihm können wir stundenlang am Hang fliegen, vorausgesetzt, der Wind bläst in der nötigen Stärke aus der gewünschten Richtung, und die Akkus sind geladen. Daß wir auch noch andere Aufwinde zum Segelfliegen ausnutzen können, werden wir im nächsten Kapitel sehen.

Der Thermikflug

Thermik ist ein Wärmeaufwind. Voraussetzung für seine Entstehung ist eine ungehinderte Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche, die sich je nach Färbung und Bodenbeschaffenheit unterschiedlich stark erwärmt, oder eine künstliche Wärmequelle. Die darüberliegende Luft erwärmt sich ebenfalls unterschiedlich stark, dehnt sich aus und wird dadurch leichter. Es bilden sich Warmluft- oder Thermikblasen, die, wenn sie groß genug sind, aufsteigen. Diesen Vorgang nennt man *Ablösung* (Bild 256). Beim Aufsteigen kühlt sich die Luft wieder ab, bis sie die gleiche Temperatur wie die Umgebung hat. Wir müssen beachten, daß zirkulierende Luft in der Umgebung der Thermikblase auch Abwinde hervorruft.

Bei Sonneneinstrahlung treten Thermikblasen vornehmlich über hellen Sandflächen, Getreidefeldern und auch Ortschaften auf. Über feuchten und »dunklen« Gebieten (Wiesen, Wäldern und Seen) treten Abwinde in Erscheinung. Die Ablösung der Thermikblasen vom Boden wird durch den Wind gefördert. So sind bei Windstille wenige, aber kräftige Ablösungen mit Steiggeschwindigkeiten um 2 m/s und mehr zu beobachten. Unter dem Einfluß von Wind erfolgen dagegen häufiger schwächere Ablösungen, die in Windrichtung abwandern. Für die Thermikentstehung genügen bereits Temperaturunterschiede von 2..3°C, so daß praktisch zu jeder Jahreszeit Thermik entsteht, vorausgesetzt, die Sonne scheint. Da die Strahlung der Sonne im Sommer am stärksten ist und fast senkrecht einfällt, wird dann die Thermik auch am kräftigsten sein.

Verringert sich gegen Abend die Sonneneinstrahlung immer mehr, so kommt die Luftbewegung zur Ruhe. Von einem gewissen Grad der Abkühlung an geben die dunklen Stellen der Erdoberfläche die gespeicherte Wärme an die darüberliegende Luft ab, so daß diese nun als Thermik in die Höhe steigt (*Abendthermik*). Sie ist in der Regel schwächer, aber gleichmäßiger und großflächiger als die Tagethermik. Nutzen wir diese Erscheinung bewußt aus und finden wir ein geeignetes Fluggelände, so bestehen bei entsprechenden Wetterverhältnissen im Sommer

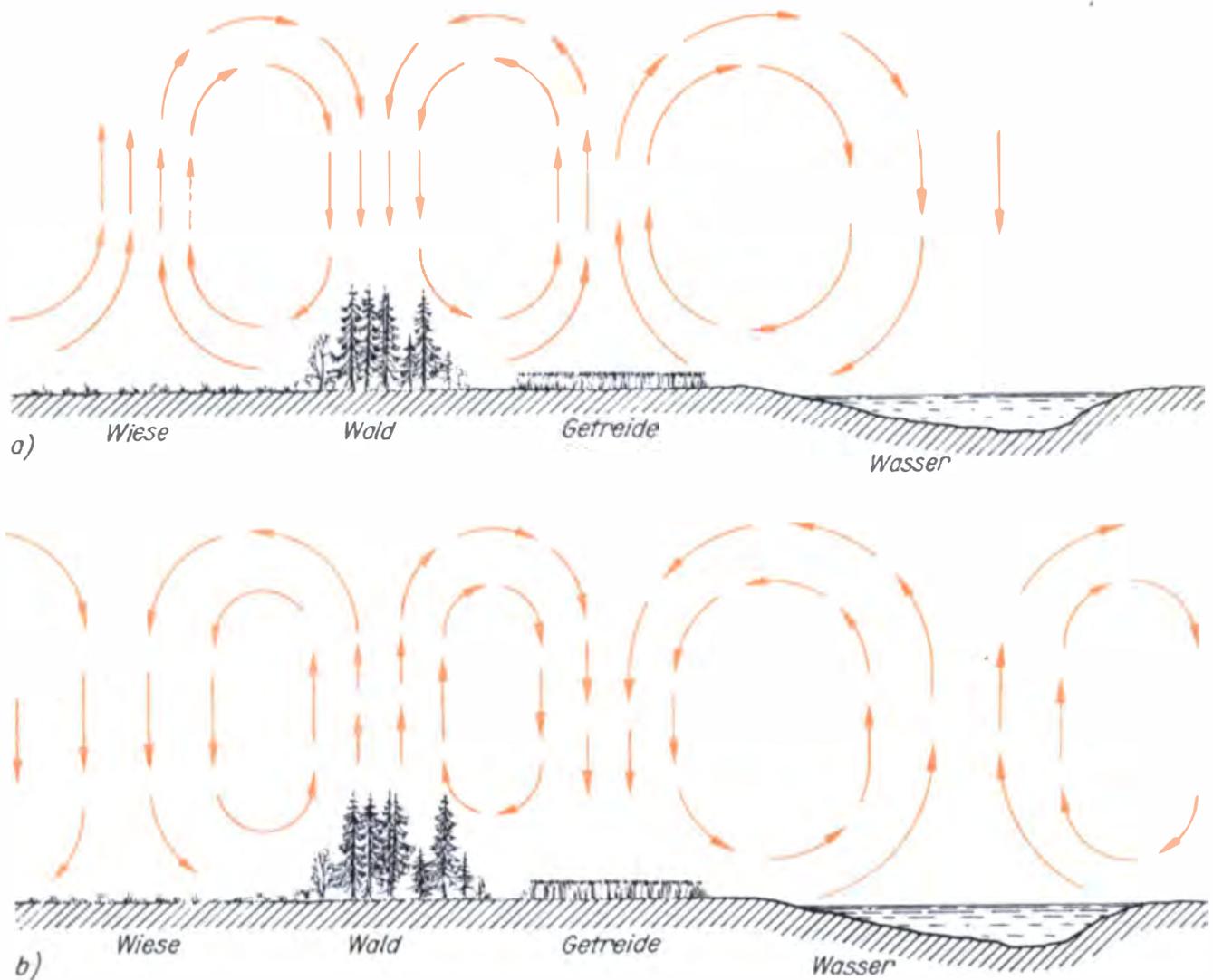


Bild 256. Thermikentstehung: a) Thermikblasen entstehen und steigen auf, b) Abendthermik

den ganzen Tag Thermikflugmöglichkeiten. Bedingung ist, daß wir mit dem Modell auf Thermiksuche gehen. Erforderlich ist dazu eine entsprechende Ausgangshöhe, die das Modell durch den Hochstart erreicht.

Gestartet wird mit einer Schnur

Um das Modell auf eine für die Thermiksuche ausreichende Höhe zu bringen, brauchen wir 200...300m Hochstartschnur. Am Modell muß für den Hochstart ein Hochstarthaken angebracht werden (Bild 257). Durch seine richtige Formgebung gewährleisten wir das sichere Ausklinken des Ringes mit der Hochstartschnur,

wenn das Modell die Ausgangshöhe erreicht hat. Haben wir einige Erfahrungen im Hochschleppen des Modells, können wir es so lange herumführen, bis uns ein verstärkter Zug an der Schnur das Aufsteigen einer Thermikblase signalisiert. Erst dann klinken wir das Modell aus und lassen es in der Thermik kreisen.

Wie erfolgt nun der Start? Wir halten das Modell (Sender und Empfänger sind eingeschaltet), und ein Helfer schleppt es wie einen Drachen gegen den Wind hoch (Bild 258a). Da es auf Grund seiner Konstruktion eine recht große Fluggeschwindigkeit hat, haben wir mit dieser Methode nur bei mittleren bis größeren Windgeschwindigkeiten Erfolg, andernfalls wird die Schnelligkeit des Helfers kaum ausreichen, um mit dem Modell eine normale Ausgangshöhe zu erreichen. Also müssen wir die Schleppgeschwindigkeit erhöhen. Zu diesem Zweck

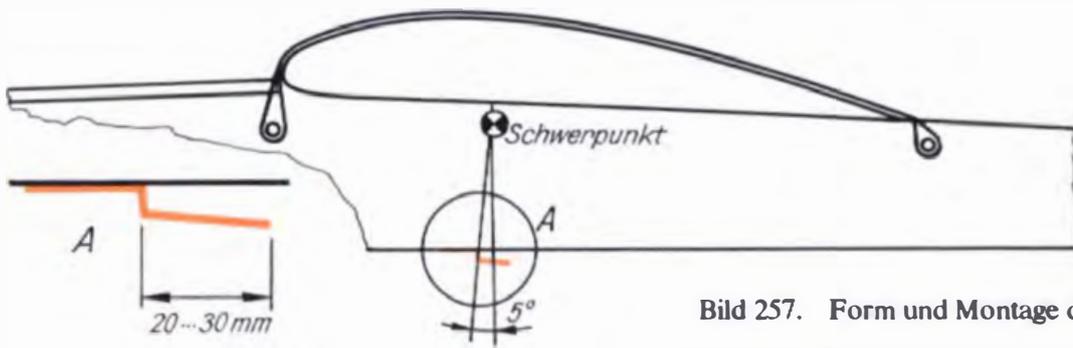
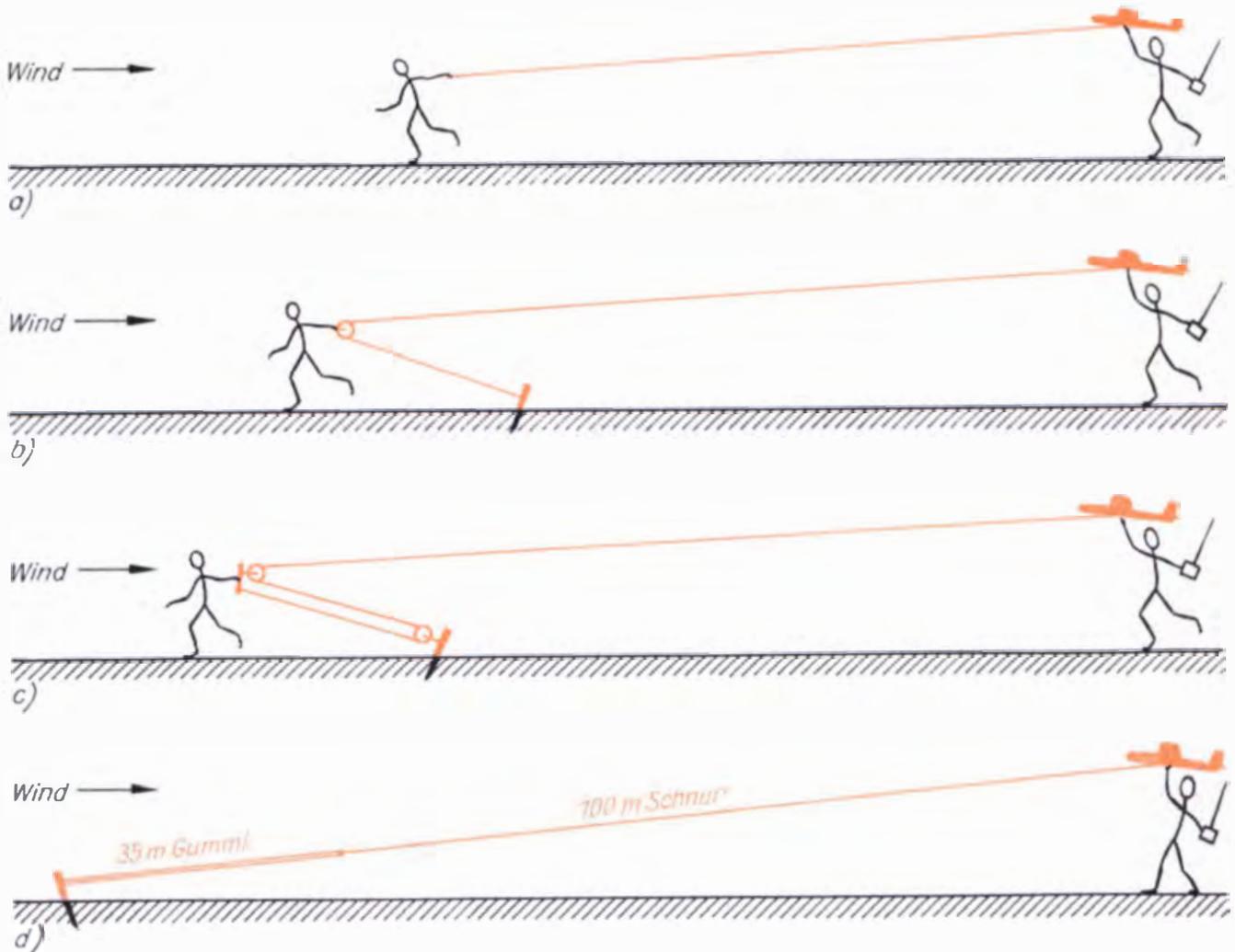


Bild 257. Form und Montage des Hochstarthakens

verwenden wir eine *Umlenkrolle* (Bild 258b) und erreichen die doppelte Schleppgeschwindigkeit; nur hat sich so die Ausgangshöhe um den beim Anlaufen zurückgelegten Weg verringert. Bei Windstille müssen wir unter Umständen sogar zwei Umlenkrollen verwenden (Bild 258c). Die feste Rolle befestigen wir mit einem stabilen

Pflock (Zelthering) im Boden, während der Helfer das Ende der Hochstartschnur und die lose Rolle führt. Die Schleppgeschwindigkeit erhöht sich so auf den dreifachen Wert der Laufgeschwindigkeit, aber die Ausgangshöhe verringert sich gleichzeitig um den doppelten Laufweg. Wir sollten alle drei Möglichkeiten üben. Haben wir keinen Helfer beim Hochschleppen des Modells zur Hand, so müssen wir zur Selbsthilfe greifen. Eine mögliche Lösung ist der

Bild 258. Hochstart: a) mit einfacher Hochstartschnur, b) mit einer Umlenkrolle, c) mit zwei Umlenkrollen, d) Gummihochstart



Gummihochstart (Bild 258d) mit 35 m Gummischnur (4 mm × 4 mm) und etwa 100 m Dederonschnur. Diese Startschnur wird an einem stabilen Pflöck befestigt und auf die dreifache Länge ausgezogen. Haben wir das Modell sorgfältig eingeflogen, wird es flugstabil bis zur Ausklinkhöhe steigen.

Auch beim Hochstart ist eine sorgfältige Trimmung Voraussetzung für einwandfreies Flugverhalten. Dabei beachten wir, daß die Eigenstabilität unseres Modells erhalten bleiben muß. Wir trimmen es also nicht unbedingt auf geringstes Sinken. Viel wichtiger ist ein günstiger Gleitwinkel bei gleichzeitig hoher Flugge-

schwindigkeit. Damit kann das Flugmodell auch bei stärkerem Wind zur Startstelle zurückkehren. Den Gleitwinkel können wir gegenüber der Hangflugversion verbessern, indem wir einen zweiten Tragflügel mit den gleichen Daten (Profil, Flächentiefe, Konstruktion), jedoch 20...40 cm größerer Spannweite bauen.

Haben wir unsere ersten Hochstartversuche durchgeführt und sind mit den Ergebnissen noch nicht so recht zufrieden, hilft uns die Tabelle auf dieser Seite bei der Fehlersuche.

Beobachteter Fehler	Mögliche Ursache	Korrektur
Modell pendelt an der Hochstartschnur und steigt wenig	Starthaken zu weit vorn	Starthaken stufenweise nach hinten setzen
	zu geringe Schleppgeschwindigkeit	schneller schleppen, evtl. Umlenkrolle benutzen
Modell steigt sehr schnell, bricht aus und kommt nicht selbständig in die Startrichtung zurück	Starthaken zu weit hinten montiert	Starthaken stufenweise nach vorn verlegen
	Modell wurde zu stark und zu schnell hochgeschleppt	langsamer schleppen
Modell klinkt kurz nach dem Start aus	Starthaken hat ungünstige Form Starthaken zu weit hinten montiert	Form des Starthakens verändern (zubiegen) Starthaken nach vorn verlegen
	Modell wurde zu langsam bzw. mit zu geringer Kraft hochgeschleppt	schneller schleppen
Modell bricht immer nach einer Seite aus	Verzug einer Flügelhälfte	Verzug beseitigen
	schiefes Seitenleitwerk	Seitenleitwerk richten
Modell steigt zunächst einwandfrei, bricht aber nach dem Ausklinken aus	Verzug von Flügel oder Leitwerk, der durch anderen Verzug während des Schleppens (andere Anstellwinkel des Tragflügels) kompensiert wurde	Modell nochmals gründlich auf Verzüge prüfen und diese gegebenenfalls beseitigen

Regeln für den Thermikflug

1. *Wir fliegen mit unserem Modell nur bei den Windgeschwindigkeiten, für die es konstruiert ist.*

Bei stärkerem Wind muß die Fluggeschwindigkeit immer noch größer sein als die Windgeschwindigkeit. Wir werden mit dem Modell daher nur bei einer Windgeschwindigkeit fliegen, bei der seine sichere Rückkehr zur Startstelle gewährleistet ist.

2. *Wir trimmen das Modell auf beste Gleitflugeigenschaften und nicht auf geringstes Sinken.*

Die sichere Rückkehr zur Startstelle hängt wesentlich von den Gleitflugeigenschaften des Modells ab. Hat es einen so flachen Gleitwinkel, daß es aus gegebener Höhe sehr weit fliegt, so kann es auch aus geringer Flughöhe noch zur Startstelle zurückkehren.

3. *Das Modell wird auf volle Eigenstabilität getrimmt; in kritischen Fluglagen soll es sich von selbst stabilisieren.*

Das Trimmen, besonders die Verringerung der Einstellwinkeldifferenz, darf die Eigenstabilität des Modells nicht beeinträchtigen. Es muß sich in jeder kritischen Fluglage von selbst wieder stabilisieren.

4. *Wir steuern das Modell nur mit kleinen Ruderausschlägen.*

Das Modell fliegt allein besser, als wir es steuern können. Lassen wir es also fliegen und begnügen uns mit Kurskorrekturen. Sollte es infolge einer Bö oder eines falschen Steuerkommandos in eine kritische Fluglage (Steilkurve, Pumpen u. ä.) geraten, so versuchen wir auf keinen Fall, durch überhastete Kommandogebung etwas zu »retten«. Sicher geben wir dann ein falsches oder falsch dosiertes Kommando, das die Fluglage nur verschlechtert. Ein eigenstabiles Modell beruhigt sich von selbst. Durch unsere Kommandogebung führen wir nur in unkritischen Fluglagen kleine Kursänderungen durch.

5. *Wir fliegen das Modell in einer Sicherheitshöhe von 200...300 m.*

Die Windgeschwindigkeiten (horizontal und vertikal) sind in größeren Höhen oft sehr anders als am Boden und von uns nur nach dem Verhalten des Modells zu beurteilen. Bei starker Thermik an heißen Sommertagen besteht die

Gefahr, daß das Modell in einer kräftigen Blase bis in eine Wolke aufsteigt und entfliegt. Wir suchen deshalb in einer Sicherheitshöhe von 200...300 m nach Thermik und lassen es nicht über 500 m steigen. In größeren Höhen bzw. Entfernungen von mehr als 500 m sind der Flugzustand und die Reaktion sowieso sehr schwer einzuschätzen, da es nur noch als Punkt erkennbar ist.

6. *Gerät das Modell in einen so starken Aufwind (Thermikblase), daß es trotz Tiefenruderausschlag weiter steigt, fliegen wir es auf Geradeauskurs aus der Thermik heraus und lassen es auf die Sicherheitshöhe sinken.*

Wir versuchen nicht, durch einen Spiralsturz oder Trudeln das Steigen zu beenden, da das Modell dabei zu stark beansprucht wird und die Gefahr des Bruches besteht.

7. *Um Seitenverwechslungen zu vermeiden, stellen wir uns schräg zur Flugrichtung und »zeigen« mit der Sendeantenne immer in Flugrichtung. Dabei wird beharrlich das »Hineinversetzen« in das Modell geübt, bis wir die Steuertechnik ohne Seitenverwechslungen beherrschen, also nicht vor jedem Kommando überlegen müssen.*

Haben wir bereits Schiffsmodelle ferngesteuert, so ist uns bekannt, daß die Seitenvertauschung bei der Bewegung des Modells auf uns zu bzw. von uns weg oft der Anlaß zu falscher Kommandogebung war. Beim Flugmodell kann ein solcher Fehler selbst in harmlosen Situationen zu kritischen Fluglagen führen. Beherrschen wir durch fleißiges Training mit den Schiffsmodellen die Steuertechnik, so wird uns auch die Fernsteuerung beim An-, Über- und Abflug des Flugmodells keine Schwierigkeiten bereiten. Es ist zweckmäßig, wenn wir uns immer etwas schräg zur Flugrichtung stellen und mit der Sendeantenne in diese Richtung »zeigen«. Dann wird es bei den Knüppelbewegungen bzw. Kommandos auch tatsächlich die Kurven in der gewünschten Richtung fliegen. Noch besser ist es allerdings, wenn wir uns von Anfang an in das Modell »hineinversetzen«. Dann fliegen wir gewissermaßen mit, und die Seitenvertauschung wird uns bald keine Schwierigkeiten mehr bereiten. Das beharrliche Üben ist wichtig, damit wir mehrere Funktionen sicher, gleichzeitig und ohne Nachdenken steuern können.

8. *Bei stärkerem Wind fliegen wir das Modell nur im Luv und in unserer Nähe, um alle Reaktionen unter Kontrolle zu haben.*

Bei stärkerem Wind haben wir vollauf damit zu tun, das Modell gegen den Wind auf Kurs zu halten. Soll es uns nicht entfliegen, halten wir es ständig auf der Luvseite. Besteht dann die Gefahr des Abtreibens, haben wir immer noch Zeit für eine sichere Landung. Wenn wir dagegen im Lee fliegen, müssen wir uns stets auf den Wind konzentrieren und haben möglicherweise noch Schwierigkeiten mit der Seitenvertauschung. Absturz oder Verlust sind meist die Folge. Das Fliegen im Luv ist noch aus einem anderen Grund ratsam. Fliegt das Modell etwa 100m vor uns, und gehorcht es uns infolge einer Störung nicht mehr, so wird es vom Wind auf uns zugetrieben. Falls erforderlich, können wir die Wegreserve nutzen und zu dem voraussichtlichen Landepunkt laufen.

9. *Am Modell bringen wir an gut sichtbarer Stelle, aber wettergeschützt, unsere Adresse sowie die Bitte an, bei eventuellem Verlust den Fund des Modells dem Besitzer zu melden.*

Sollte unser Modell trotz aller Vorsichtsmaßnahmen einmal davonfliegen und ein Verfolgen nicht möglich sein, ist der Finder in der Lage, uns zu benachrichtigen.

10. *Wir lassen das Modell selbständig aus geringerer Höhe gegen den Wind landen.*

Die Landung ist der schwierigste und wichtigste Flugabschnitt. Daher müssen wir sie bei unterschiedlichsten Windverhältnissen gründlich trainieren. Sehr bald werden wir merken, daß sie schwieriger ist als das Starten und Fliegen. Unsere Kenntnisse vom Gleitflugverhalten des Modells nutzen wir bei den Landeübungen aus. Da es einen recht flachen Gleitwinkel hat, dürfen wir die Landung nicht so hoch ansetzen, weil es sonst weit entfernt landet. Beschädigungen durch Steine, Bodenwellen o.ä., die wir nicht gesehen haben, sind dann meist unvermeidlich. Das Modell fliegt eigenstabil, es kann also auch selbständig landen. Wir bringen es in Landeanflughöhe auf geraden Kurs und lassen es ohne Steuerkommando ausgleiten. Die Windrichtung läßt sich prüfen, indem wir trockenes Gras in die Luft werfen oder den Wimpel an der Sendeanenne beobachten.

11. *In Bodennähe geben wir nur ganz kleine Ruderausschläge und leiten auf keinen Fall eine Kurve ein.*

Beherrschen wir die Landung, so können wir jetzt auch vorsichtig Kurskorrekturen beim Landeanflug ausführen. In Bodennähe sollten nur ganz kleine Ruderausschläge gegeben werden. Bodennähe heißt für Anfänger: bis zur Höhe eines dreistöckigen Hauses. Auf keinen Fall sollte ein Kurvenflug eingeleitet werden! In der Schräglage wirkt das Seitenruder auch als Tiefenruder. Bei jedem Kurvenflug verliert das Modell an Höhe und nimmt Fahrt auf. Damit besteht die Gefahr des Pumpens, einer in Bodennähe gefährlichen Flugsituation.

Nun aber genug der Regeln. Wir wollen endlich das Modell fliegen lassen und selbst erleben, wie es auf die Fernsteuerung reagiert, was es »leistet«. Sollte es einmal zu Bruch gehen, suchen wir zunächst nach den Fehlern, um sie künftig zu vermeiden. Meist sind Vergeßlichkeit, Nachlässigkeit oder Leichtsinns die Ursachen dafür. Es wäre falsch, zuerst die Schuld dem Modell, seiner Konstruktion oder der Fernsteueranlage zu geben. Andererseits gibt es kein absturzsicheres Flugmodell, und das sollten wir bedenken, ehe wir uns über ein Mißgeschick ärgern. Aus Fehlern können wir nur lernen. So nehmen wir also für alle Fälle zum Fliegen immer ein zweites Modell mit und sind so nicht zum Zuschauen verurteilt, wenn einmal ein Schaden am Modell aufgetreten ist.

Einige Bemerkungen zum Schluß

»Erst wenn wir das *Wie und Warum* einer Sache erklären können, haben wir sie verstanden.« (Aristoteles)

Dieses Motto stand gewissermaßen über jedem Kapitel des vorliegenden Buches und soll weiterhin Leitspruch für unser Arbeiten sein. Mit einfachen Experimenten beginnend, haben wir uns die erste Fernsteueranlage und erste Modelle gebaut.

Freude und Stolz auf das Gelingen, aber auch die Tatsache, daß wir nun eine recht komplizierte



Bild 259. RC-Modell eines Sportwagens

Technik selbst beherrschen, werden bald weitergehende Überlegungen auslösen und Wünsche wecken. Wir wollen dann bestimmt leistungsfähigere Modelle selbst entwerfen, bauen und dabei alle Steuerungsmöglichkeiten der Siebenkanal-Proportionalanlage ausnutzen. Aus den Fachzeitschriften für Elektronik und Modellbau des In- und Auslandes, auch Fachbüchern und auf Modellsportveranstaltungen erhalten wir viele Anregungen.

Elektronik und Modelltechnik befinden sich ständig in der Weiterentwicklung. Mit Automodellen (Bild 259) werden beispielsweise auf Betonpisten Rennen gefahren. Die vielen Klassen der Schiffsmodelle sind ebenfalls sehr reizvoll, ob man nun ein Zweckmodell der Renn-

Bild 261. Doppeldecker



Bild 260. RC-Flugmodell für Hochleistungssegelflug

klasse baut oder ein vorbildgetreues Modell. Bei den Segeljachten entstehen durch Verwendung von Glasseide und Polyester leistungsfähige Regattamodelle. Ähnlich vielfältig sind die Klassen der Flugmodelle. Der Schritt vom hier beschriebenen Hangflugmodell zum Hochleistungs-Hangflugmodell mit Polyesterrumpf und balsabeplankten Schaumstoffflächen ist nicht weit (Bild 260). Solche Modelle existieren sogar schon als vorbildgetreue Nachbauten von Leistungssegelflugzeugen mit Spannweiten von 3...5 m. Ihre Flugleistungen sind hervorragend. Wer seine Liebe für Motorflugmodelle entdeckt, wird bald merken, daß auch hier der Reiz in der Vielfalt liegt. Kunstflugmodelle mit 10-cm³-Motor und Einziehfahrwerken erreichen Geschwindigkeiten von 150...180 km/h.



Bild 262. Hubschrauber »Bell 47 G«

Reizvoll sind aber auch langsam fliegende Doppeldecker (Bild 261), Wasserflugmodelle oder vorbildgetreue Flugmodelle. Der ferngesteuerte Hubschrauber ist ebenfalls den Kinderschuhen entwachsen (Bild 262). Gleiches kann man vom Elektroflug sagen. Die Entwicklung von Hochleistungselektromotoren und hochbelastbaren Nickel-Kadmium-Sinterzellen führte zur Entwicklung von leistungsfähigen Elektro-Segelflugmodellen und -Kunstflugmodellen (Bild 263). Mit letzteren können fast alle Kunstflugfiguren geflogen und auch Bodenstarts ausgeführt werden. Die Entwicklung geht aber auch auf dem Gebiet der Fernsteuerelektronik mit Riesenschritten voran. In zunehmendem Maße werden elektronische Funktionen in der Fernsteueranlage mit integrierten Schaltungen realisiert. Welche Fortschritte dabei gemacht wurden, erkennt der Leser, wenn er die 1. Auflage dieses Buches mit der nun vorliegenden 3. Auflage vergleicht. In Industrieanlagen ermöglicht heute die Verwendung von integrierten Schaltungen völlig neue Steuerkennlinien (Exponential-Steuerung, Zweiweg-Umschaltung) oder Steuerfunktionen (Mischer, Parallelbetätigung zweier Funktionen), aber auch wesentlich störfestere Übertragungsverfahren (Schmalband-Frequenzmodulation). In zunehmendem Maße wird international das 433-MHz-Band zur Modellfernsteuerung genutzt.

Dieser kurze Überblick möge als Anregung für weitere Arbeiten und Experimente genügen. Noch mehr Hinweise kann der Leser in Fachbüchern und Fachzeitschriften finden, die im Literaturverzeichnis enthalten sind. Sollten sie nicht zu kaufen sein, leihen wir sie uns in Bibliotheken aus.

Das vorliegende Buch gab uns viele Anregungen zur Durchführung der Experimente und zum Aufbau der Geräte. Es soll und kann aber kein Rezeptbuch sein, sondern will physikalisches und technisches Denken schulen. Ob wir alles verstanden haben und die Theorie richtig anwenden können, wird sich zeigen, wenn ein Gerät einmal infolge einer zu harten Landung oder eines defekten Bauelements seinen Dienst versagt. Die systematische Fehlersuche erfordert dann eigenes schöpferisches Nachdenken und hilft uns, die recht komplizierte Technik der elektronischen Fernsteuerung zu beherrschen.

Die erläuterten Schaltungen und Verfahren werden ohne Rücksicht auf die Patentlage mitgeteilt. Sie sind ausschließlich für Amateur- und Lehrzwecke bestimmt und dürfen nicht gewerblich genutzt werden. Alle elektronischen Geräte hat der Verfasser selbst entworfen und aufgebaut. Neben eigenen Unterlagen wurden dazu auch Schaltungen bewährter Industrie- und Selbstbauanlagen verwendet. Trotzdem sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Verfasser und Verlag weisen deshalb darauf hin, daß sie weder die Verantwortung noch die Haftung für Folgen übernehmen, die auf fehlerhafte Angaben zu-



rückgehen. Sie nehmen Fehlerhinweise jederzeit dankbar auf.

Der Dank des Verfassers gilt zum Schluß besonders den Sportfreunden N. Wybranitz und L. Schramm sowie den Gutachtern, R. Fiebich und Dr. L. König, die durch Erfahrungsaustausch und wertvolle Anregungen zum Entstehen des Buches beitrugen.

Erfurt, im März 1980

Dr. Günter Miel

Bild 263. Elektroflugmodelle: a) Segelflugmodell »Elektro-Baby«, b) Kunstflugmodell »sky-fly«



Auswahl empfehlenswerter Literatur

Elektronik

- Autorenkollektiv: Bastelbuch für Modellelektronik. – Berlin: Militärverlag der DDR 1970
- Autorenkollektiv: Fachkunde Elektromaschinenbauer. 3. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1977
- Backe, H. und L. König: Elektrotechnik und Elektronik selbst erlebt. 2. Aufl. – Leipzig/Jena/Berlin: Urania-Verlag 1980
- Eckhardt, D., W. Groß: Grundlagen der digitalen Schaltungstechnik. 2. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1975
- Fiedler, W., H.-D. Gottwalt, D. Hacker: Steuerungs- und Regelungstechnik. 5. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1979
- Fischer, H.-J. und W. E. Schlegel: Transistor- und Schaltungstechnik. – Berlin: Militärverlag der DDR 1979
- Jakubaschk, H.: Das große Elektronikbastelbuch. 5. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1976
- Jakubaschk, H.: Das große Schaltkreisbastelbuch. – Berlin: Militärverlag der DDR 1978
- Kaczmarek, H.: Tausend Tips für den Amateurelektroniker. – Berlin: Militärverlag der DDR 1970
- König, L.: Rundfunk und Fernsehen selbst erlebt. 4. Aufl. – Leipzig/Jena/Berlin: Urania-Verlag 1978
- Kronjäger, O.: Meßtechnik für Amateure. Teil I und Teil II. Reihe »electronica«, Bände 158 und 159. – Berlin: Militärverlag der DDR 1978
- Kühn, E. und H. Schmied: Handbuch Integrierte Schaltkreise. 2. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1980
- Lechner, D.: Kurzwellenempfänger. – Berlin: Militärverlag der DDR 1975
- Lechner, D. und P. Fink: Kurzwellensender. – Berlin: Militärverlag der DDR 1979
- Leonhardt, E.: Grundlagen der Digitaltechnik. 2. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1980
- Miel, G.: Digitale Fernsteuerung. Teil 1: Senderschaltungen, Teil 2: Empfängerschaltungen.

gen. Reihe »electronica«, Bände 120 und 121. – Berlin: Militärverlag der DDR 1973

- Miel, G.: Elektronik des Modellantriebs, Teil I...III. Reihe »electronica«, Bände 173, 174 und 175. – Berlin: Militärverlag der DDR 1979
- Miel, G.: Elektronische Modellfernsteuerung. 2. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1978
- Miel, G.: Fernsteuerungen, selbst gebaut. Teil I: Senderschaltungen, Teil II: Empfängerschaltungen. Reihe »electronica«, Bände 108 und 109. – Berlin: Militärverlag der DDR 1972
- Pabst, B.: Fehlersuche in Transistorempfängern. 4. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1973
- Rothammel, K.: Antennenbuch. 8. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1975
- Rumpf, K.-H.: Bauelemente der Elektronik. 9. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1978
- Schubert, K.-H.: Amateurfunk. 5. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1978
- Schubert, K.-H.: Das große Radiobastelbuch. 4. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1974
- Streng, K. K.: abc der Stromversorgungstechnik. – Berlin: Militärverlag der DDR 1972
- VEM-Handbuch: Die Technik der elektrischen Antriebe. 6. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1976
- Zeitschriften: Der Funkamateurl
Radio – Fernsehen – Elektronik
- ## Modellbau
- Autorenkollektiv: ABC des Segelns. 5. Aufl. – Berlin: Sportverlag 1971
- Autorenkollektiv: Das Buch vom Flugzeug. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1975
- Autorenkollektiv: Praktikus. 13. Aufl. – Leipzig: Fachbuchverlag 1977
- Autorenkollektiv: Schiffbau – Schifffahrt. Meyers Taschenlexikon. 3. Aufl. – Leipzig: VEB Bibliographisches Institut 1973
- Autorenkollektiv: transpress Lexikon Luftfahrt. 4. Aufl. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1980
- Autorenkollektiv: transpress Lexikon Seefahrt. 2. Aufl. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1978
- Balcke, G.: Gutes Werkzeug – halbe Arbeit. 2. Aufl. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1975

- Buch, H.: Segelfliegen. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1980
- Curti, O.: Schiffmodellbau. 2. Aufl. – Rostock: VEB Hinstorff Verlag 1974
- Dopatka, R. und A. Perepeczko: Das Buch vom Schiff. 2. Aufl. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1978
- Hennicke, L.: RC-Flugmodelle und RC-Modellflug. 2. Aufl. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1979
- Johansson, D.: Ein Schiffmodell entsteht. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1979
- Johansson, D.: Technologie des Schiffmodellbaus. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1976
- Krause, B.: Modellmotoren. 2. Aufl. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1979
- Meyer, K.J.: Segeln. – Berlin: Sportverlag 1977
- Miel, G.: Elektroantrieb von Modellen. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1981
- Schulze, H.: Luftschrauben für Modellantriebe. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1980
- Schulze, H., J. Löffler, W. Zenker: Modellflug in Theorie und Praxis. – Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen 1977
- Zeitschriften: modellbau heute (DDR)
Modelar (ČSSR)
Modelist konstruktor (UdSSR)
Modelarz (VR Polen)
Modellezes (VR Ungarn)
Mlad konstruktor (VR Bulgarien)

Tabelle 1. Internationale Normreihen E 6, E 12, E 24 zur Stufung der Widerstandswerte in Abhängigkeit von der Auslieferungstoleranz

E 6 ±20%	E 12 ±10%	E 24 ±5%
1,00	1,00	1,00 1,10
	1,20	1,20 1,30
1,50	1,50	1,50 1,60
	1,80	1,80 2,00
2,20	2,20	2,20 2,40
	2,70	2,70 3,00
3,30	3,30	3,30 3,60
	3,90	3,90 4,30
4,70	4,70	4,70 5,10
	5,60	5,60 6,20
6,80	6,80	6,80 7,50
	8,20	8,20 9,10

Tabelle 2. Internationaler Farbkode für Widerstände

Farbe	1. Ring oder 1. Punkt gleich 1. Ziffer	2. Ring oder 2. Punkt gleich 2. Ziffer	3. Ring oder 3. Punkt gleich Multipli- kator	4. Ring oder 4. Punkt gleich Toleranz
Silber	—	—	10 ⁻²	±10%
Gold	—	—	10 ⁻¹	± 5 %
Schwarz	—	0	10 ⁰	—
Braun	1	1	10 ¹	± 1%
Rot	2	2	10 ²	± 2%
Orange	3	3	10 ³	—
Gelb	4	4	10 ⁴	—
Grün	5	5	10 ⁵	—
Blau	6	6	10 ⁶	—
Violett	7	7	10 ⁷	—
Grau	8	8	10 ⁸	—
Weiß	9	9	10 ⁹	—

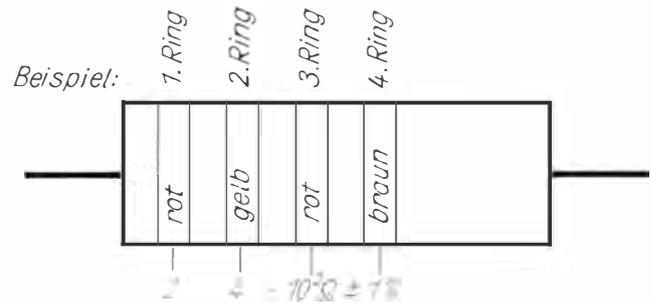


Tabelle 3. Richtwerte zur Beurteilung des Ladezustandes gasdichter NK-Akkus

Einzu- ladende Kapazität in %	Erforder- liche Ladezeit in h	Klemmenspan- nung je Zelle bei Belastung in V	Klemmen- spannung der Batterie bei Belastung in V			
			2,4 V	4,8 V	6 V	12 V
10	1,5	1,30	2,60	5,20	6,50	13,0
20	3,0	1,27	2,54	5,08	6,35	12,7
30	4,5	1,25	2,50	5,00	6,25	12,5
40	6,0	1,23	2,46	4,92	6,15	12,3
50	7,5	1,21	2,42	4,84	6,05	12,1
60	9,0	1,20	2,40	4,80	6,00	12,0
70	10,5	1,19	2,38	4,76	5,95	11,9
80	12,0	1,17	2,34	4,68	5,85	11,7
90	13,0	1,10	2,20	4,40	5,50	11,0
100	14,0	1,00	2,00	4,00	5,00	10,0

Tabelle 4. Abhängigkeit der Parameter einer Transistorschaltung von der Schaltungsart

Größe	Emitterschaltung	Basisschaltung	Kollektorschaltung
Eingangswiderstand	10 Ω...10 kΩ	10 Ω...100 Ω	100 kΩ...1 MΩ
Ausgangswiderstand	10 Ω...100 kΩ	100 kΩ...1 MΩ	10 Ω...1 kΩ
Stromverstärkung	10...200	<1	10...200
Spannungsverstärkung	10 ² ...10 ⁴	10 ² ...10 ⁴	<1
Leistungsverstärkung	10 ³ ...10 ⁴	10 ² ...10 ³	10...200
vorwiegende Anwendung der Schaltung als	Verstärker	Oszillator	Anpassungsstufe

Tabelle 5. Kennwerte universell verwendbarer Halbleiterbauelemente und Typenbeispiele

TUP und TUN	DUG	DUS	
$U_{CE0max} = 20\text{ V}$	U_{Rmax}	20 V	25 V
$I_{Cmax} = 100\text{ mA}$	I_{Fmax}	35 mA	100 mA
β_{min} bzw. $h_{21emin} = 100$	I_{Rmax}	100 μA	1 μA
$P_{totmax} = 100\text{ mW}$	P_{totmax}	250 mW	250 mW
$f_{Tmin} = 100\text{ MHz}$			

Typ	Beispiele		
TUP	KF 517	BC 251/2/3	BC 415/6/7/8/9
	BC 157/8	BC 261/2/3	BC 512/3/4
	BC 177/8	BC 307/8/9	BC 557/8/9
	BC 204/5/6	BC 320/1/2	
	BC 212/3/4	BC 350/1/2	
TUN	SC 236/7/8/9	BC 107/8/9	BC 207/8/9
	SF 136/7	BC 147/8/9	BC 237/8/9
	SS 216/8/9	BC 171/2/3	BC 317/8/9
		BC 182/3/4	
DUG	GA 100 (bedingt)	OA 95	
	OA 85	AA 116	
	OA 91		
DUS	SAY	BAX 13	
	12/16/17/18		
	BA 127	BAY 61	
	BA 217/18	1 N 914	
	BA 221/22	1 N 4148	
	BA 317/18	KA 221/22/23/24/ 25	

Tabelle 6. Kanalaufteilung des 27,12-MHz-Fernsteuerbandes mit den international bevorzugten 12 Normfrequenzen für die Modellfernsteuerung

Kanal Nr.	Kanalfrequenz (Sender) in MHz	Oszillatorfrequenz des Supers für die Zwischenfrequenz 455 kHz in MHz
2	26,975	26,520
4	26,995	26,540
7	27,025	26,570
9	27,045	26,590
12	27,075	26,620
14	27,095	26,640
17	27,125	26,670
19	27,145	26,690
22	27,175	26,720
24	27,195	26,740
27	27,225	26,770
30	27,255	26,800

Tabelle 7. Daten der LC-Bandfilter (ZF = 455kHz)

Typ	Maße in mm × mm × mm	Farbe	Impedanz in kΩ	Güte Q_0	Güte Q_L
LMC-4100 A	7 × 7 × 11	gelb	50:0,5	105	35
LMC-4101 A	7 × 7 × 11	weiß	30:0,5	105	35
LMC-4102 A	7 × 7 × 11	schwarz	15:5	105	35
LPC-4200 A	7 × 7 × 11	gelb	15:0,15	60	35
LPC-4201 A	7 × 7 × 11	weiß	35:0,15	60	35
LMC-4202 A	7 × 7 × 11	schwarz	37:12	105	40

Tabelle 8. Stückliste für die Motorjacht

Teil	Bezeichnung	Anzahl	Werkstoff	Abmessungen
1	Spiegel	1	Sperrholz	4 mm
2	Spant 1	1	Sperrholz	4 mm
3	Spant 2	1	Sperrholz	4 mm
4	Spant 3	1	Sperrholz	4 mm
5	Spant 4	1	Sperrholz	4 mm
6	Spant 5	1	Sperrholz	4 mm
7	Spant 6	1	Sperrholz	4 mm
8	Vordersteven	1	Sperrholz	4 mm
9	Kielleiste	2	Kiefer	3 mm × 15 mm
10	Balkweger	2	Kiefer	3 mm × 10 mm
11	Kimmstringer	2	Kiefer	3 mm × 10 mm
12	Bodenplanke	2	Sperrholz	1,5 mm
13	Seitenplanke	2	Sperrholz	1,5 mm
14	Totholz für Ruderkoker	1	Kiefer	5 mm
15	Totholz für Wellenrohr	1	Kiefer	5 mm
16	Ruderkoker	1	Messing	Rohr 6 mm Ø 1 mm Wandung
17	Wellenrohr	1	Messing	Rohr 8 mm Ø 1 mm Wandung
18	Deckplanke	1	Sperrholz	1,5 mm
19	Deckunterzug	4	Kiefer	3 mm × 6 mm
20	Bodenleiste	4	Kiefer	5 mm × 5 mm
21	Scheuerleiste	2	Kiefer	2 mm × 2 mm
22	Abweiser	2	Kiefer	5 mm × 5 mm
23	Ruder	1	Sperrholz	6 mm
			Rundmessing	4 mm Ø
24	Kajütseitenwand	2	Sperrholz	1,5 mm
25	Kajütstirnwand	2	Sperrholz	1,5 mm
26	Kajütdach	1	Sperrholz	1,5 mm
27	Dachspant	2	Kiefer	3 mm × 10 mm
28	Cockpitfußboden	1	Sperrholz	1,5 mm
29	Cockpitstirnwand	1	Sperrholz	1,5 mm
30	Cockpitrückwand	1	Sperrholz	1,5 mm
31	Ruderstand	1	Sperrholz	1,5 mm
32	Scheuerleiste	2	Kiefer	3 mm × 3 mm
33	Tür des Niederganges	1	Sperrholz	1,5 mm
34	Schiebetür des Niederganges	1	Sperrholz	1,5 mm
35	Reling	1	Messingrohr (Kugelschreiber- mine)	3 mm
36	Handlauf	2	Messingrohr	2 mm
37	Klampe	5	Messing	
38	Wimpel mit Stange	1		
39	Sitz		Messingrohr	3 mm
40	Positionslampe	4	Holz/Alu	
41	Signalhorn	1	Holz/Alu	
42	Kajütfenster Klebstoffe Lacke, Farben		Zellon	

Tabelle 9. Stückliste für die Segeljacht

Teil	Bezeichnung	Anzahl	Werkstoff	Abmessungen
1	Spant 1	1	Sperrholz	4 mm
2	Spant 2	1	Sperrholz	4 mm
3	Spant 3	1	Sperrholz	4 mm
4	Spant 4	1	Sperrholz	4 mm
5	Spant 5	1	Sperrholz	4 mm
6	Spant 6	1	Sperrholz	4 mm
7	Spant 7	1	Sperrholz	4 mm
8	Spant 8	1	Sperrholz	4 mm
9	Spant 9	1	Sperrholz	4 mm
10	Deckunterzug	1	Kiefer	5 mm × 10 mm
11	Vordersteven	1	Sperrholz	4 mm
12	Flosse	1	Sperrholz	8 mm
13	Kielleiste	2	Kiefer	4 mm × 10 mm
14	Kimmstringer	2	Kiefer	3 mm × 10 mm
15	Balkweger	2	Kiefer	3 mm × 10 mm
16	Spiegel	1	Sperrholz	4 mm
17	Bodenplanke	2	Sperrholz	1,5 mm
18	Seitenplanke	2	Sperrholz	1,5 mm
19	Deckunterzug	4	Kiefer	3 mm × 10 mm
20	Leiste	1	Kiefer	10 mm × 10 mm
21	Totholz	1	Kiefer	8 mm × 20 mm
22	Ruderkoker	1	Messingrohr	7 mm Ø
23	Deck	1	Sperrholz	1,5 mm
24	Lukensäule	8	Kiefer	3 mm × 10 mm
25	Scheuerleiste	2	Buche	3 mm Ø
26	Lukendeckel	2	Sperrholz	1,5 mm
27	Randleiste	8	Kiefer	3 mm × 10 mm
28	Ruder	1	Sperrholz	8 mm
29	Ruderschaft	1	Messing	5 mm Ø
30	Wantenbeschlag	2	Aluminium	1,5 mm
31	Mastschiene	1	Aluminium	1,5 mm
32	Vorstagspur	1	Aluminium	1,5 mm
33	Schrauben	15	Messing	M 3 × 7
34	Umlenkrolle	3	Messing	
35	Schrauböse	5	Messing	
36	Mast	2	Kiefer	7 mm × 20 mm
37	Großbaum	1	Kiefer	5 mm × 20 mm
38	Fockbaum	1	Kiefer	5 mm × 10 mm
39	Mastbeschlag	1	Messing	1,0 mm
40	Großbaumbeschlag	1	Messing	1,0 mm
41	Fockbaumbeschlag	1	Kupfer	1,5 mm Ø
42	Wirbel	1		
43	Vor- und Achterstag	2	Dederonschnur	0,7 mm
44	Want	2	Dederonschnur	0,7 mm
45	Spannschloß	2	Messing	
46	Drahtaken	4	Messingdraht	1,5 mm Ø
47	Großsegel	1	Leinen	
48	Focksegel	1	Leinen	
49	Großsegellatte	4	Zellon, PVC	0,5 mm
50	Focksegellatte	3	Zellon, PVC	0,5 mm
51	Schotleine	2	Skalseil	
52	Gummifaden	1	umspinnener Fadengummi	
53	Ballast	1	Blei	5 kg
54	Bolzen	1	Messing	M 5 × 60

Tabelle 12. Stückliste für das Segelflugmodell

Teil	Bezeichnung	Anzahl	Werkstoff	Abmessungen
1	Seitenteil	2	Balsa	3 mm
2	Bodenstringer	2	Balsa	6 mm × 6 mm
3	Verstärkungsleiste	2	Balsa	6 mm × 6 mm
4	Spantleiste B	3	Balsa	6 mm × 6 mm
5	Spantleiste C	4	Balsa	6 mm × 6 mm
6	Spantleiste D	4	Balsa	6 mm × 6 mm
7	Spantleiste E	4	Balsa	6 mm × 6 mm
8	Kopfspant A	1	Balsa	10 mm
9	Spantverstärkung	2	Balsa	10 mm × 20 mm × 72 mm
10	Spantverstärkung	2	Balsa	10 mm × 30 mm × 72 mm
11	Schlinge	4	Kiefer	2 mm × 15 mm
12	Bodenplanke	1	Balsa	1,5 mm
13	Deckplanke	1	Balsa	1,5 mm
14	Heckklotz	1	Balsa	10 mm
15	Bodenverstärkung	1	Sperrholz	0,6 mm
16	Höhenleitwerkflosse	1	Balsa	5 mm
17	Seitenleitwerkflosse	1	Balsa	5 mm
18	Deckleiste	1	Balsa	7 mm
19	Bugklotz	1	Balsa	
20	Nase	1	Balsa	7 mm × 32 mm × 64 mm
21	Deckel	1	Balsa	7 mm × 78 mm × 210 mm
22	Dübel	2	Buche	8 mm Ø
23	Höhenruder	1	Balsa	5 mm
24	Seitenruder	1	Balsa	5 mm
25	Scharnier	5	Weichplast	
26	Ruderhorn	2	GFK-Platinenmaterial	1,5 mm
27	Stoßstange	2	Balsa/Draht (Stahl)	10 mm × 10 mm/ 1,5 mm Ø
28	Wurzelrippe (Musterrippe)	1	Sperrholz	3 mm
29	Endrippe (Musterrippe)	1	Sperrholz	3 mm
30	Rippe 1	2	Balsa	5 mm
31	Rippen 2...17	32	Balsa	2 mm
32	unterer Holm	2	Kiefer	3 mm × 10 mm
33	untere Nasenbeplankung	2	Balsa	1,5 mm
34	oberer Holm	2	Kiefer	3 mm × 10 mm
35	Nasenleiste	2	Balsa	3 mm × 10 mm
36	obere Nasenbeplankung	2	Balsa	1,5 mm
37	obere Endplanke	2	Balsa	1,5 mm
38	Rippenaufgabe	26	Balsa	1,5 mm
39	Wurzelbeplankung	2	Balsa	1,5 mm
40	Profilnasenleiste	2	Balsa	6 mm × 10 mm
41	Endleiste	2	Balsa	10 mm × 16 mm
42	Randbogen	2	Balsa	10 mm × 10 mm
43	Sperrholzaufgabe	2	Sperrholz	0,5 mm
44	Manschette	1	Glasfaser/ Polyester	
45	Bespannpapier			
46	Gummiringe	5		

Tabelle 13. Anschriften von Fachgeschäften für Elektronik- und Bastelbedarf

VEB Industrievertrieb Rundfunk und Fernsehen

Fachfiliale RFT Amateur
1058 Berlin, Kastanienallee 87
Fachfiliale RFT Amateur
1034 Berlin, Kopernikusstr. 3
Fachfiliale RFT Amateur
7500 Cottbus, Marktstr. 2
Fachfiliale RFT Amateur
8010 Dresden, Ernst-Thälmann-Str. 9
Fachfiliale RFT radio-television
1220 Eisenhüttenstadt, Leninallee 10
Fachfiliale RFT Amateur
5010 Erfurt, Hermann-Jahn-Str. 11/12
Fachfiliale RFT radio-television
9200 Freiberg, Korngasse 10
Fachfiliale RFT radio-television
5800 Gotha, Hauptmarkt 32
Fachfiliale RFT Amateur
4020 Halle, Klement-Gottwald-Str. 40/41
Fachfiliale RFT Amateur
9010 Karl-Marx-Stadt, Straße der Nationen 46
Fachfiliale RFT Amateur
7010 Leipzig, Grimmaische Str. 25
Fachfiliale RFT Amateur
3010 Magdeburg, Lüneburger Str. 25
Fachfiliale RFT Amateur
1500 Potsdam, Friedrich-Ebert-Str. 113
Fachfiliale RFT Amateur
2500 Rostock, Steinstr. 6
Fachfiliale RFT Amateur
2700 Schwerin, Martinstr. 1

Ferner führen die Fachfilialen RFT radio-television in den Kreisstädten elektronische Bauelemente in Teilsortimenten

Versand von Elektronik-Bauelementen
KG Kr. Oschatz, Elektroverkaufsstelle 4154
7264 Wermsdorf, Clara-Zetkin-Str. 21

Modellbauartikel führen
die HO-Filialen für Bastelbedarf in den Bezirks- und Kreisstädten, die Centrum-, die Konsument- und meist auch die Kontaktring-Kaufhäuser

Tabelle 14. TTL-Schaltkreise der Standardreihe 74

Standardreihe DDR	VR Polen	ČSSR	UdSSR	
7400	D 100	UCY 74 H 00	MH 7400	K 1 LB 553
7474	D 174	UCY 74 H 74	MH 7474	K 1 TK 552
74121		UCY 74121		K 1 55 AG 1
74164			MH 74164	

Sachwörterverzeichnis

A

Abendthermik 221
A-Betrieb 97
Abgleich der Vorkreise 148
– des Supers 148
– des ZF-Verstärkers 148
Ablösung 221
Abnahme 10
Abweiser 180
8-Bit-Schieberegister 137
Aerodynamik 201
Akkuladezustand 39
Akkumulator 34
Akkuprüfer 39
Akzeptor 50
Alleskleber 13
Alu-Blech 12
Aluminium-Elektrolytkonden-
sator 26
Ampere 19
Amperesekunde 24
Amplitude 28
»am Wind« 199
Anfangsładestrom 40
Anker 45
Ankopplung, induktive 99
Anpassung 99
Anstellwinkel 202
Antenne 86, 104
–, *Marconi*- 105
Antennen|befestigung 107
-fußpunktwiderstand 99
-stab 107
Antrags|muster 10
-stellung 10
Arbeits|kennlinie 64
-platz 11
-punkt 63, 64
-widerstand 63, 64
Archimedisches Prinzip 173
Ätzmittel 12
Aufbau, fliegender 15
Auflade|vorgang 27
-zeit 27
Aufschalteinrichtung 74, 77, 86
Auftrieb, dynamischer 201

–, statischer 201
Ausgangsleistung 90
axial 18

B

backbord 200
Balkweger 176, 189
Ballast 197
Ballastgewicht 185
Balsamesser 170
Bananenstecker 13
Band|breite 34
-filter 146
– –, Tabelle 235
Basis 58
Basis|schaltung 65
– –, Tabelle 233
-strom 59
Basteltypen 66
Batterien 35
Bauchsender 113
Bauschaltplan 139
B-Betrieb 98
Begrenzerwirkung 146
Beplankung 178
Bereich, aktiver 67
Bespannung 214
Bestückungsplan 80
Betriebs|verhalten 46
-zeiten 164
Blindwiderstand 29, 30, 32
Blinkschaltung 71
Boden|nähe 226
-planke 209
-verstärkung 211
Bugklotz 211
Bürstenfeuer 48

C

C-Betrieb 98
Clark Y 208
Cockpit 180
*Collins*filter 99

D

Dämpfung 34, 88, 117, 118
Dauermagnet 45
Deck|beplankung 179
-planke 190
-sprung 176
-unterzug 189
Defektelektron 50
Demodulation 95
Depolarisator 34
D-Flip-Flop 128
Dielektrikum 23
Dielektrizitätskonstante 23
Differenzierglieder 126
Diffusionsspannung 52
Digitaltechnik 69
Diode 49
Diode-Universal-Germanium 66
– – -Silizium 66
Dipol 104
Dipolantenne 104
Donator 50
Dotierung 50
Dreh|widerstände 19
-zahlsteller 155
Dreieckimpuls 78
Druck 181
Druck, dynamischer 181
–, statischer 181
Druckpunktwanderung 202
DUG 66
–, Tabelle 234
Durchbruchgebiet 55
Durchlaß|richtung 52
-strom 53
DUS 66
–, Tabelle 234

E

Effektivwert 29
Eichservo 135
Eigen|leitung 50
-stabilität 224, 225
Einbaulage 37

- Einfliegen 215
 Eingangsfiler 145
 Einstell|regler 19
 -winkeldifferenz 204, 209, 216, 217
 Eisen(III)-chlorid 12
 Elektrolyt 35
 Elektromotor 43
 Elektronen|paarbindung 50
 -röhre 57
 -strahloszillograph 15
 Element, galvanisches 34
 Emitter 58
 Emitter|schaltung 65
 – –, Tabelle 233
 -verlustleistung 61
 Empfänger 86
 Empfangs|antenne 145
 -feldstärke 94
 Endabgleich des Supers 148
 Endbeplankung 213
 Entlade|kennlinie 37
 -schlußspannung 38
 -strom 27
 -vorgang 28
 Endleiste 213
 Endrippe 208
 Endstufenabgleich 103
 Entstörfilter 48
 Entstörung 47, 163
 Erregerspule 45
 EWD 204
 Experimentierplatine 13, 15
 Exponential-Steuerung 228
- F**
- Fachbücher 227
 Fachgeschäfte für Elektronik und Bastelbedarf 240
 Fachzeitschriften 227
 Fahr|akku 40
 -regler 155
 Fahrtregler 155
 –, Betrieb des 165
 Fahrtwind 184
 Farad 24
 Farb|gebung 180
 -kodes 19
- punkte 19
 -ringe 19
 Federspangen 170
 Fehlersuche 166
 Fehlstelle 50
 Feinabgleich 135
 Feld, elektrisches 23
 –, magnetisches 31
 Fernsteuer|kommando 73
 -sender 86
 F5-M 181
 fieren 187
 Flächen|belastung 203, 207
 -diode 54
 -transistor 58
 Fliegen 201
 Flip-Flop (FF) 72
 Flosse 185, 188
 Flügelstreckung 206
 Flug|erprobung 217
 -stabilität 204
 -verhalten 217
 -zustand, überzogener 203
 Fluß, magnetischer 31
 Fluß|änderung 31
 -mittel 12
 -spannung 53
 Fock|baum 192
 -segel 186
 Form|schwerpunkt 174
 -stabilität 174
 Fourieranalyse 97
 Fremdatome 50
 Frequenz 29
 Frequenz|bänder 11
 -toleranz 88
Froudesches Gesetz 174
 Fußliek 187
- G**
- gasdicht 37
 Gatter 125
 Gehäuse 83
 Genehmigungsurkunde 10
 Generator 69
 Gerätezelle 35
 Germanium 49
 Gesamt|segelschwerpunkt 185
- spannung 21
 -strom 22
 -verlustleistung 54, 60
 -widerstand 22
 Gewichts|schwerpunkt 174
 -stabilität 174
 Glaskopfstecknadeln 170
 Gleich|richter 40
 -spannung, gepulste 160
 Gleit|boot 175
 -eigenschaften 220
 Gleitflug|eigenschaften 225
 -geschwindigkeit 217
 -verhalten 217
 Gleitzahl 203
 Gö 539 203
 Gö 593 208
 –, Tabelle der Koordinaten der Musterrippen 238
 Graetzschaltung 57
 Grenz|daten 53
 -frequenz 87
 -schicht 52
 Großbaum 187, 191
 Großsignalverstärkung 61
 Grundschwingung 97
 Gummi|hochstart 224
 -ringe 170
 Güte 88
- H**
- Halbleiter 49
 Hals am Segel 194
 Halse 200
 Hand|läufe 180
 -start 217
 Hang|fliegen 205
 -flug 201, 219
 Hauptsegel 186
 HC-25/U 88
 HC-6U 88
 Heizelement 35
 Hellingbrett 170, 209
 Henry 32
 HF 86
 HF-|Abgleich des Senders 140
 – -Leistung 91
 – -Oszillator 87

- -Vorabgleich 101
 Hobel 170
 Hochfrequenz 87
 Hochfrequenzsender 93
 Hochstart 222
 Hochstart|haken 222
 -schnur 222
 Höhen|leitwerkflosse 211
 -rudder 204
 Hohlnieten 13
 Holzwäscheklammern 170
 Hüllkurve 101
- I
- IC 121
 Impuls 69
 Impuls|dehnung 78, 114, 122
 -diagramm 77
 -inverter 135
 -telegramm 127
 -umkehrung 132
 -vergleich 77, 157
 -verstärker 146
 Induktions|gesetz 32
 -konstante 32
 Induktivität 30
 Integrator 130
 Invertierung 132
 ISA 244 150, 154
 IS-Super 147, 150
 ISTCA 440 150
- K
- Kabelfernsteuerung 84
 Kajütboot 173
 Kajüte 180
 Kajütkreuzer 175
 Kanal 75
 Kanal|aufteilung, Tabelle 235
 -impuls 75
 -potentiometer 76
 Kapazität 23
 –, nutzbare 38
 Keep 191
 Kennlinienverlauf, linearer 19
 –, positiv logarithmischer 19
- , negativ logarithmischer 19
 Keramikkondensator 25
 Kettenfahrzeug 83
 Kielleiste 176
 Kimmstringer 176, 189
 Kipp|schwingung 68
 -stufe 75
 Klampe 180
 Kleinrelais 42
 Kleinsignalverstärkung 61
 Knickspantbauweise 176
 Kniespannung 67
 Knopfzellen 37
 Koder 125, 135
 Kohleschichtwiderstände 18
 Kohle-Zink-Element 34
 Kollektor 44, 58
 Kollektor|reststrom 58, 61
 -schaltung 65
 – –, Tabelle 233
 -strom 59
 -verlustleistung 61
 Kolophonium 12
 Kommando|aufschalteinrichtung 74
 -empfänger 73
 -geber 73
 -sender 73
 Kommutator 44
 Kondensatoren 23
 –, gepolte 26
 –, ungepolte 26
 Kontaktkleber 13, 170
 Körperachsen 204
 krängen 185
 Kränkungskraft 183
 Kreis, magnetischer 45
 Kreisfrequenz 29, 32
 kreuzen 200
 Kreuzmodulation 145, 164
 Kristallgitter 50
 Kühlfläche 161
 Kunstharzlack 171
 Kunstleder 12
 Kupfer|lackdraht 12
 -litze 12
 Kursstabilität 186
 Kurvenflug 226
 Kurzschlußstrom 36
 Kurzschlußstromverstärkung 61
- L
- Lackfilmkondensator 25
 Lackierung 171
 Lade|bereich 41
 -buchse 127
 -faktor 38
 -gerät 40
 -kennlinie 37
 -spannung 40
 -strom 27, 40
 -zustand (Richtwerte) 233
 Ladungsmenge 23
 $\lambda/2$ -Dipol 104
 laminar 187
 Land|fahrzeuge 83
 -funkdienst 9
 -funkordnung 9, 88
 Landung 221, 226
 Längsstabilität 204, 220
 Lateral|fläche 185
 -schwerpunkt 186
 Lebensdauer 37
 leegierig 186
 Lehrer-Schüler-Betrieb 166
 Leisten 12
 Leistendeck 180
 Leistung 21
 Leistungs|transistor 160
 -verstärkung 65
 Leiterplattenmaterial 12
 Leitungsvorgang 50
 Leitwerk 207
 Loch 50
 Löt|lack 81
 -wasser 12
 -zinndraht 13
 Luft|spalt 45
 -widerstand 201
 Luke 191
 luvgerig 186
- M
- Magnetfeld 20
 Majoritätsträger 51
Marconi-Antenne 105
 Mast|beschlag 192
 -schiene 191

Maximalwert 28
 Meßbereicherweiterung 22, 23
 -geräte 13
 -klemmen 13
 Metallpapierkondensator 25
 Mignonzelle 35
 Minoritätsträger 51
 Mischung 143
 Mittelstellung 117
 Modellsportveranstaltungen 227
 Modellverbrennungsmotor 175
 Modulation 95, 100
 Momentanwert 28
 Monozellen 20, 35
 Motorjacht 173
 –, Stückliste, Tabelle 236
 Multivibrator 68
 –, astabiler 68
 –, bistabiler 72, 157
 –, monostabiler 71
 –, monostabiler – in TTL-
 Technik 157
 Musterrippe 208, 213
 MVA 301 208

N

NACA 6412 208
 Nachlaufverstärker 114
 Nadelimpulse 70, 126
 Nasen|beplankung 213
 -leiste 213
 Nenn|gleichspannung 26
 -größen 19
 -verlustleistung 21
 Netzwechselspannung 41
 NF-Fernsteuerung 11
 n-Germanium 51
 Nickel-Kadmium-Akku 37
 Niederholer 187
 Niedervolt-Elektrolytkonden-
 sator 26
 Nitrol|harzlack 171
 -lack 12
 -verdünnung 12
 NK-Akku 37
 Normreihen, internationale 18
 –, Tabelle 232

O

Oberwelle 97
 Oberwellenunterdrückung 99
 Ohm 19
 Oszillator 69, 87
 Oszillatorabgleich 103

P

Papier|bespannung 214
 -kondensator 25
 Parallel|ausgabe 137
 -schaltung 22
 -schwingkreis 34
 Pendelempfänger 11, 142
 Periodendauer 29
 Permanentmagnet 45
 Permeabilität 32
 Pertinax 12
 Pfeilung 205
 p-Germanium 51
 Phasenverschiebung 29, 34, 64
 Piacryl 12
 π -Filter 99
 Planardiode 55
 Plastfoliekondensator 25
 Polardiagramm 202
 Polschuhe 45
 Polystyrol 83
 Polystyrolkondensator 25
 Positionslampen 180
 Potentiometer 19
 Primärelemente 34
 Profile, druckpunktfeste 204
 –, Tabelle 238
 Profiltabelle 208
 Proportional|anlage 113
 -information 76
 -kanäle 113
 PVC 12

Q

Quarze 145
 Quarzstabilisierung 145
 Quer|kraft 182
 -ruder 204
 -stabilität 205

R

radial 18
 Rasierklinge 170
 Raspel 170
 RC-|Glied 28
 -Kombination 98
 Rechteckimpuls 70
 Referenz|generator 77, 114
 -impuls 77, 157
 Regelung des Supers 146
 Regelvorgang 116
 Reihenschaltung 21
 Relais 42
 Reling 180
 Reparaturen 215
 Resonanz|frequenz 33, 90
 -widerstand 34
 Restimpuls 77, 114, 158
 Reynoldssche Zahl 203
 Re-Zahl 203
 Richtdiagramm 105
 Richtungsstabilität 205
 Rigg 191
 Rippe 212
 Rohr|kondensator 25
 -trimmer 25
 RS-Flip-Flop 160
 Ruder 212
 Ruder|funktion 217
 -koker 178, 190
 -maschine 114
 -stellung 217
 Rumpferippe 209

S

Schablone 192
 Schalter 13
 Schalt|kanal 113
 -kreise, integrierte 121
 Schaltung, gedruckte 79
 Schalt|verstärker 77, 120
 -zustände 66
 Scharniermaterial 211
 Scheiben|kondensator 25
 -trimmer 25
 Scheitelsperrspannung 54
 Scheuerleiste 179

- Schieben 205
 Schieberegister 137
 Schiffsschraube 176
 schiften 200
 Schleifer 19
 Schleifpapier 170
 Schleppgeschwindigkeit 223
 Schmalband-Frequenz-
 modulation 228
 Schneckenrad 195
 Schönwettersegel 192
 Schot|führung 191
 -horn 194
 Schrauben 13
 Schüttelfestigkeit 37
 Schwerpunktlage 216
 Schwerwettersegel 192
 Schwimmstabilität 173
 Schwing|quarz 88
 -kreis 33
 — —, offener 104
 Segelflugmodell, Profile und
 Koordinaten, Tabelle 238
 —, Stückliste, Tabelle 239
 Segeljacht, Stückliste, Tabelle
 237
 -latten 194
 -manöver 200
 -winde 120, 195
 Seidenband, oberes 101
 —, unteres 101
 Seiltrommel 195
 Seiten|frequenz 101
 -leitwerkflosse 211
 -planken 209
 -ruder 204
 -verwechslung 225
 Sekundärelemente 34
 Selbstentladung 36, 37
 Sendefeldstärke 94
 Sender|gehäuse 107
 -handhabung 164
 Service-Werkzeug 172
 Servo 86, 114
 Servoelektronik 114
 —, vollintegrierte 120
 Servo-IS 121
 Servo|mechanik 117
 -motor 114
 -prüfer 78, 82
 Sicherheits|höhe 225
 -vorschrift 41
 Siebenkanaldekoder 136
 Silizium 49
 Simultansteuerung 74
 Sinken, geringstes 225
 Sinkgeschwindigkeit 203
 Sinusspannung 28
 Spannlack 171, 214
 Spannung 19
 Spannungs|durchbruch 53
 -fehlerschaltung 52
 -quellen, chemische 34
 -stabilisierung 57, 127
 -verstärkung 63, 65
 Spanten 176, 188
 Speicherzeit 67
 Sperr|bereich 67
 -holz 12
 -kennlinie 52
 -richtung 52
 -spannung 53
 -strom 53
 Spiegel 176
 Spiegelfrequenz 145
 Spitzen|diode 54
 -durchlaßstrom 54
 Sprungschalter 13
 Spule 30
 Stabelement 35
 Stahlblech 12
 Stapelschlitten 190
 steuerbord 200
 Steuerknüppel 113
 -mechanik 109
 -strom 42, 63
 Störfrequenzen 47
 Stoßstange 212
 Strahlungswiderstand
 105
 Streckung 186
 Strom 19
 Strom|fehlerschaltung 52
 -linien 181
 -verstärkung 63
 -verstärkungsfaktor 61
 -verstärkungsgruppen 61
 -wender 44
 Stückliste für die Motorjacht,
 Tabelle 236
 — — das Segelflugmodell,
 Tabelle 239
 — — die Segeljacht, Tabelle
 237
 Stufen|anpassung 98
 -verstärkung 65
 Sturzflug 202
 Styroxflexkondensator 25
 Subminiaturhalter 88
 Sülleiste 191
 Super 143
 Synchronimpuls 132

 T
 Takt|generator 75, 123
 -impulsfolge 131
 Tantal-Elektrolytkondensator
 26
 Tapetenleim 170
 TCA 440 150
 Teil|spannung 21
 -ströme 22
 Telefonbuchsen 13
 Teleskopantenne 107
 Temperatur|bereich 38
 -verhalten 24
 Thermik 221
 Thermik|blase 225
 -flug 201, 205, 225
 Thomsonsche Schwingungs-
 gleichung 33
 Toleranzreihe 19
 Tot|bereich 122
 -holz 190
 Tragflügel 206, 207, 212
 —, Überprüfung 216
 Transformator 41, 57
 Transistor|super 147
 -Logik 128
 -Universal-NPN 66
 — — PNP 66
 Treiberstufenabgleich 103
 Trimmung 111, 175, 224
 Trommelanker 45
 TTL 128
 -Schaltkreise, Tabelle 240
 TUN 66
 —, Tabelle 234

- TUP 66
–, Tabelle 234
turbulent 187
- U
- Überlagerungsempfänger 143
Übersteuerungsbereich 67
Übertragung, drahtlose 86
–, zeitmultiplexe 75
Umgebungstemperatur 21
Umlenkrolle 223
- V
- Valenzelektron 50
V-Form 205, 207, 215
Verdrängen 174
Verdünnung 171
Vergleichsstufe 77, 114
Verklicker 184
Verlängerungsspule 106
Verlustfaktor, $\tan \delta$ 24
-leistung 21
-leistungshyperbel 61
Verstärker 114
Vielfachmesser 15
- 433-MHz-Band 228
Volt 20
Vorabgleich 135
»Vor-dem-Wind«-Kurs 200
Vorgelege 195
Vorderstevien 176, 188
Vorstagspur 191
Vortriebskraft 183
Vorwiderstand 40
- W
- Wantbeschläge 191
Watt 21
Wechselspannung 28
Wechselstrom|kurzschluß 30
-widerstand 28
Weißeim 170
Wellen, elektromagnetische 86
Wellenrohr 178
Werkstoffe 11
Werkzeuge, benötigte 11
Werkzeugkiste 172
Wickelkörper 30
Widerstand 18, 20
Widerstandswert 19
Wiederaufladbarkeit 37
Wind, halber 184
–, hoch am 184
–, raumer 184
–, scheinbarer 184
–, vor dem 184
–, wahrer 184
Wind|querkraft 183
-richtung 226
Windungszahl 31
Wirbel 183, 192
Wirkwiderstand 30
Wirkungsgrad 44, 46
Wölbung 186
Wurzelrippe 208
- Z
- Z-Diode 53, 55
Zeitkonstante 28
Zellulosekleber 13, 170
ZF 143
Zubehörteile 11
Zurichtmesser 170
Zusatzinduktivität 106
Zustandstabellen 128
Zwei-D-Flip-Flop 128
Zweikomponentenkleber 13, 170
Zwischenfrequenz 143, 145
Zylinderspule 30

