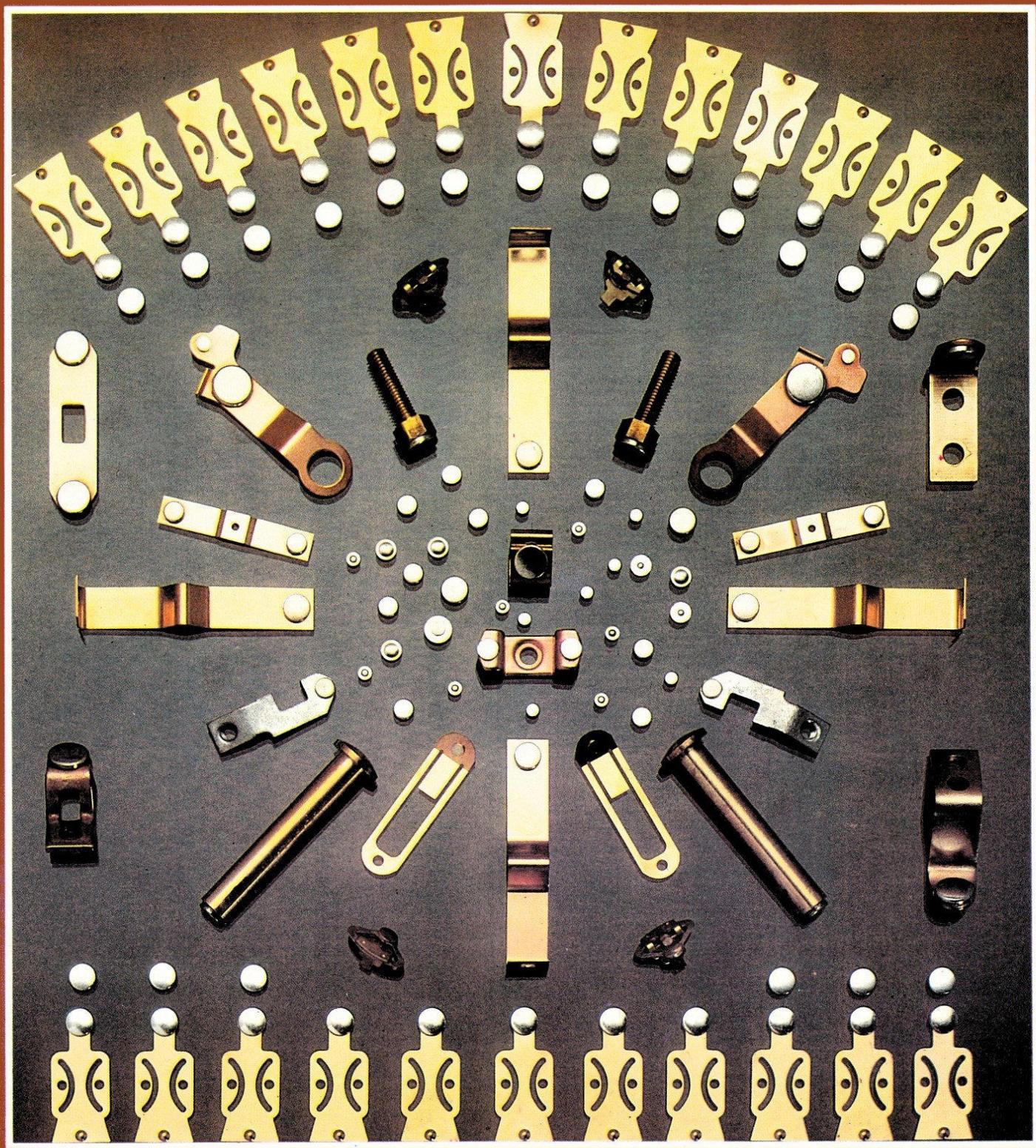


HEFT 51 EIN WÖCHENTLICHES SAMMELWERK ÖS 25
SFR 3.50 DM 3

WIE GEHT DAS

Technik und Erfindungen von A bis Z
mit Tausenden von Fotografien und Zeichnungen



scan:[GDL]

WIE GEHT DAS

Inhalt

Senkrechtstarter	1401
Servobremse	1407
Servolenkung	1410
Servosteuerung	1413
Sicherungen und Leistungsschalter	1417
Silber	1421
Silicium	1424
Sinusschwingung	1427

WIE SIE REGELMÄSSIG JEDO WOCHE IHR

HEFT BEKOMMEN

WIE GEHT DAS ist eine wöchentlich erscheinende Zeitschrift. Die Gesamtzahl der 70 Hefte ergibt ein vollständiges Lexikon und Nachschlagewerk der technischen Erfindungen. Damit Sie auch wirklich jede Woche Ihr Heft bei Ihrem Zeitschriftenhändler erhalten, bitten Sie ihn doch, für Sie immer ein Heft zurückzulegen. Das verpflichtet Sie natürlich nicht zur Abnahme.

ZURÜCKLIEGENDE HEFTE

Deutschland: Das einzelne Heft kostet auch beim Verlag nur DM 3. Bitte füllen Sie eine Postzahlkarte aus, an: Verlagsservice, Postfach 280 380, 2000 Hamburg 28. Postscheckkonto Hamburg 3304 77-202 Kennwort HEFTE.

Österreich: Das einzelne Heft kostet öS 25. Bitte füllen Sie eine Postzahlkarte aus, an: WIE-GEHT DAS, Wollzeile 11, 1011 Wien. Postscheckkonto: Wien 2363. 130. Oder legen Sie bitte der Bestellung einen Verrechnungsscheck bei Kennwort: HEFTE.

Schweiz: Das einzelne Heft kostet sfr 3,50. Bitte überweisen Sie den Betrag durch die Post (grüner Einzahlungsschein) auf das Konto: Schmidt-Agence AG, Kontonummer Basel 40-879 und notieren Sie Ihre Bestellung auf der Rückseite des Giroabschnittes.

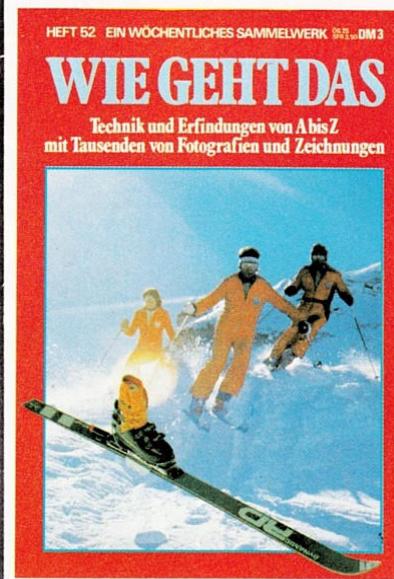
Wichtig: Der linke Abschnitt der Zahlkarte muß Ihre vollständige Adresse enthalten, damit Sie die Hefte schnell und sicher erhalten.

INHALTSVERZEICHNIS

Damit Sie in WIE GEHT DAS mit einem Griff das gesuchte Stichwort finden, werden Sie mit der letzten Ausgabe ein Gesamtinhaltsverzeichnis erhalten. Darin einbezogen sind die Kreuzverweise auf die Artikel, die mit dem gesuchten Stichwort in Verbindung stehen. Bis dahin schaffen Sie sich ein Inhaltsverzeichnis dadurch, daß Sie die Umschläge der Hefte abtrennen und in der dafür vorgesehenen Tasche Ihres Sammelordners verwahren. Außerdem können Sie alle 'Erfindungen' dort hineinlegen.

In Heft 52 von Wie Geht Das

Skifahren wird zum ständig beliebter werdenden Wintersport. Erfahren Sie aus Heft 52 von Wie Geht Das, wie die verschiedenartigen Skier und Skibindungen gefertigt werden.



Die Erforschung der Ausnutzung der Sonnenenergie ist eine der vielen Alternativen zum ständig steigenden Ölpreis. Wie die Energie der Sonne zur Gewinnung von Elektrizität oder Heißwasser genutzt werden kann, steht in der nächsten Ausgabe von Wie Geht Das.

SAMMELORDNER

Sie sollten die wöchentlichen Ausgaben von WIE GEHT DAS in stabile, attraktive Sammelordner einheften. Jeder Sammelordner faßt 14 Hefte, so daß Sie zum Schluß über ein gesammeltes Lexikon in fünf Ordnern verfügen, das Ihnen dauerhaft Freude bereitet und Wissen vermittelt.

SO BEKOMMEN SIE IHRE SAMMELORDNER

1. Sie können die Sammelordner direkt bei Ihrem Zeitschriftenhändler kaufen (DM 11 pro Exemplar in Deutschland, öS 80 in Österreich und sfr 15 in der Schweiz). Falls nicht vorrätig, bestellen Sie den Händler gern für Sie die Sammelordner.

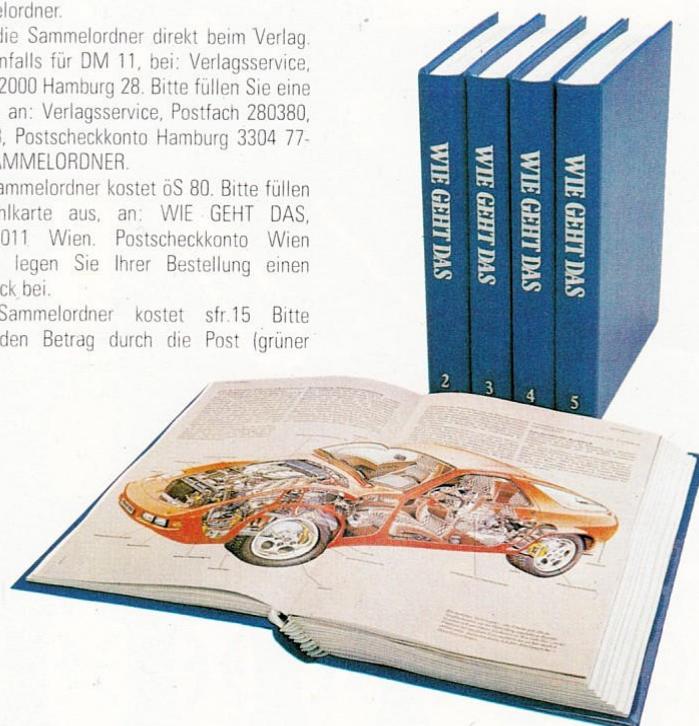
2. Sie bestellen die Sammelordner direkt beim Verlag Deutschland: Ebenfalls für DM 11, bei: Verlagsservice, Postfach 280380, 2000 Hamburg 28. Bitte füllen Sie eine Postzahlkarte aus, an: Verlagsservice, Postfach 280380, 2000 Hamburg 28. Postscheckkonto Hamburg 3304 77-202 Kennwort: SAMMELORDNER.

Österreich: Der Sammelordner kostet öS 80. Bitte füllen Sie eine Postzahlkarte aus, an: WIE GEHT DAS, Wollzeile 11, 1011 Wien. Postscheckkonto Wien 2363. 130. Oder legen Sie Ihrer Bestellung einen Verrechnungsscheck bei.

Schweiz: Der Sammelordner kostet sfr. 15. Bitte überweisen Sie den Betrag durch die Post (grüner

Einzahlungsschein) auf das Konto: Schmidt-Agence AG, Kontonummer Basel 40-879 und notieren Sie Ihre Bestellung auf der Rückseite des Giroabschnittes.

Wichtig: Der linke Abschnitt der Zahlkarte muß Ihre vollständige Adresse enthalten, damit Sie die Sammelordner schnell und sicher bekommen. Überweisen Sie durch Ihre Bank, so muß die Überweisungskopie Ihre vollständige Anschrift gut leserlich enthalten.



SENKRECHTSTARTER

Das Kampfflugzeug 'Harrier' ist nicht nur wegen seiner Fähigkeit, auf sehr kleinen Flächen senkrecht zu starten und zu landen, vielseitiger als herkömmliche Flugzeuge, sondern es besitzt darüber hinaus auch eine Manövriertfähigkeit, die es anderen Flugzeugen in der Luft überlegen macht.

Senkrechtstarter sind FLUGZEUGE, die ohne den bei konventionellen Flugzeugen (Flachstartern) erforderlichen Rollvorgang zur Erreichung der Abhebegeschwindigkeit vertikal abheben, dann in den Horizontalflug übergehen und später wieder mit senkrechtem Abstieg landen können. Theoretisch gehören auch BALLONS und Drehflügelflugzeuge (HUBSCHRAUBER) zur Familie der Senkrechtstarter. Die konstruktive Entwicklung der letzten Jahre hat jedoch dazu geführt, daß man als Senkrechtstarter ausschließlich Starrflügelflugzeuge bezeichnet, die ohne erkennbare Vorwärtsbewegung im Schwebeflug in der Luft 'stehenbleiben', landen oder starten können. Zu den Senkrechtstartern gehört auch der 'Kurzstarter', der, falls die Bedingungen dies zulassen, mit einem kleinen 'Anlauf' beträchtlich höhere Nutzlasten als Flach-

starter befördern kann. Mit einem größeren Brennstoffvorrat, der natürlich das Startgewicht erhöht, kann der Kurzstarter eine erheblich größere Reichweite als ein Senkrechtstarter erzielen.

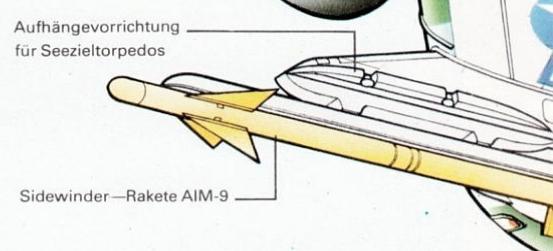
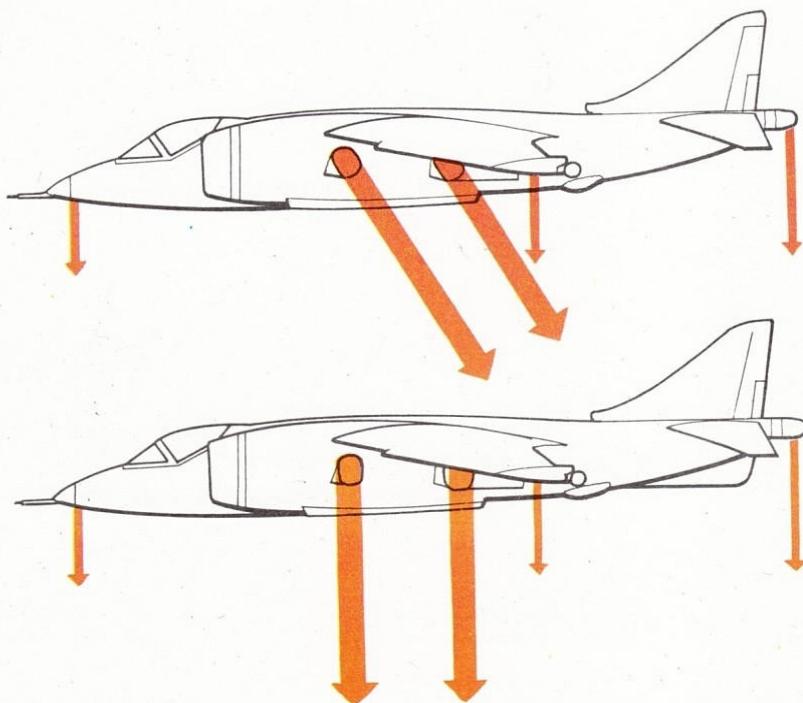
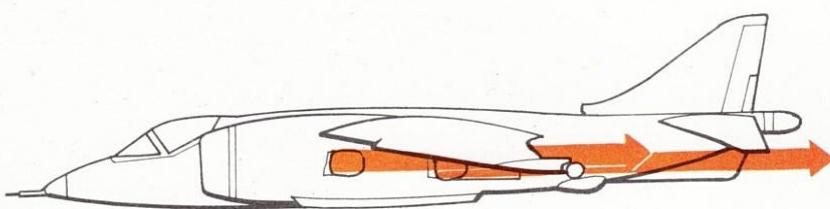
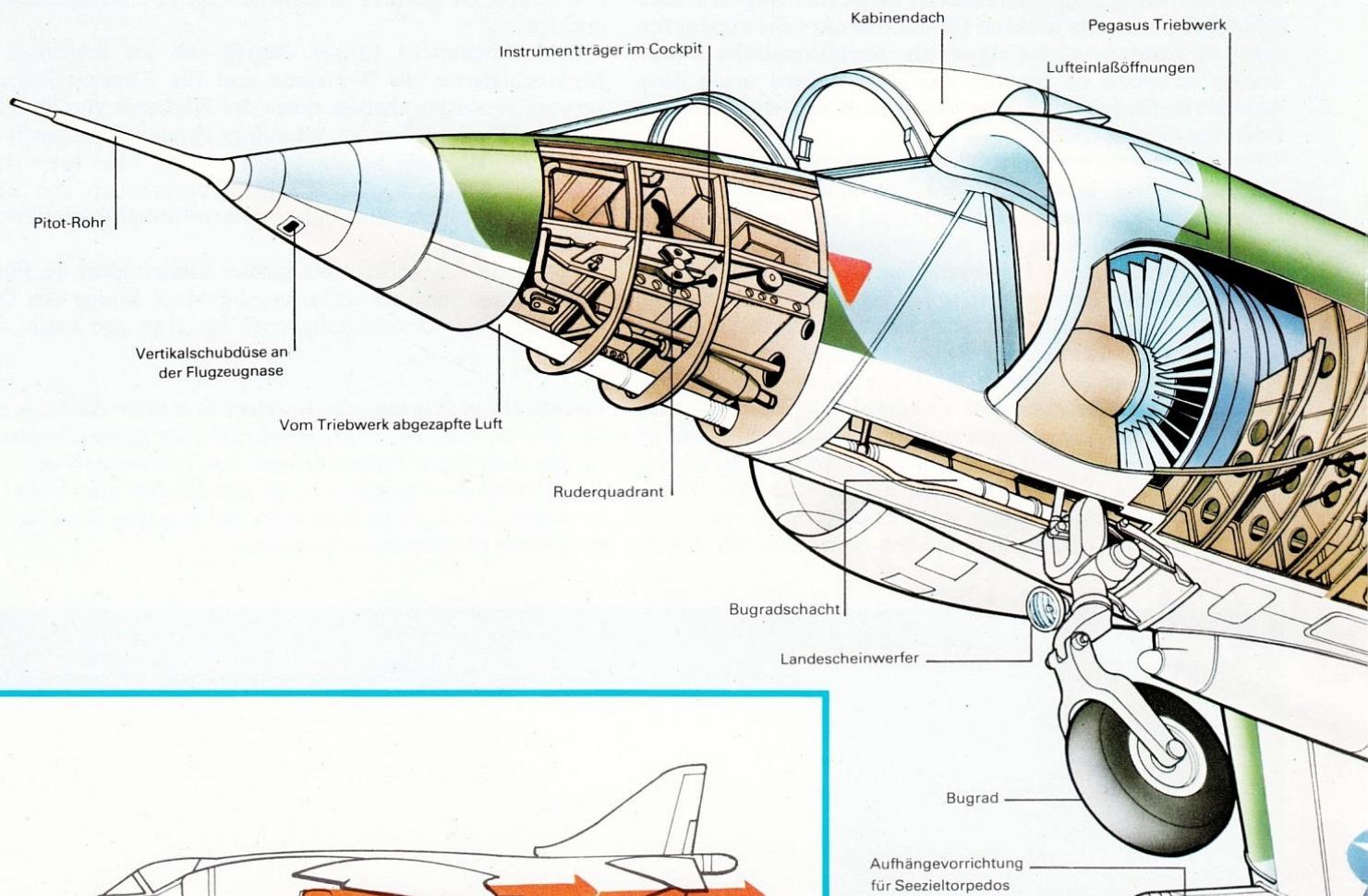
Senkrechtstartern (dieser Begriff soll im folgenden für Senkrechtstarter im Wortsinne und für Kurzstartflugzeuge verwendet werden) haften einige der Nachteile von Starrflüglern und Drehflüglern an, allerdings vereinigen sie auch eine Reihe von Vorteilen beider Typen in sich. Man kann sagen, daß Senkrechtstarter das Langsamflugverhalten von Starrflüglern verbessern und höhere Geschwindigkeiten erreichen als Drehflügler.

Hubschrauber haben trotz großer Vielseitigkeit im Einsatz den Nachteil, daß sie recht langsam sind. Einige von ihnen erreichen zwar Geschwindigkeiten bis etwa 400 km/h, doch

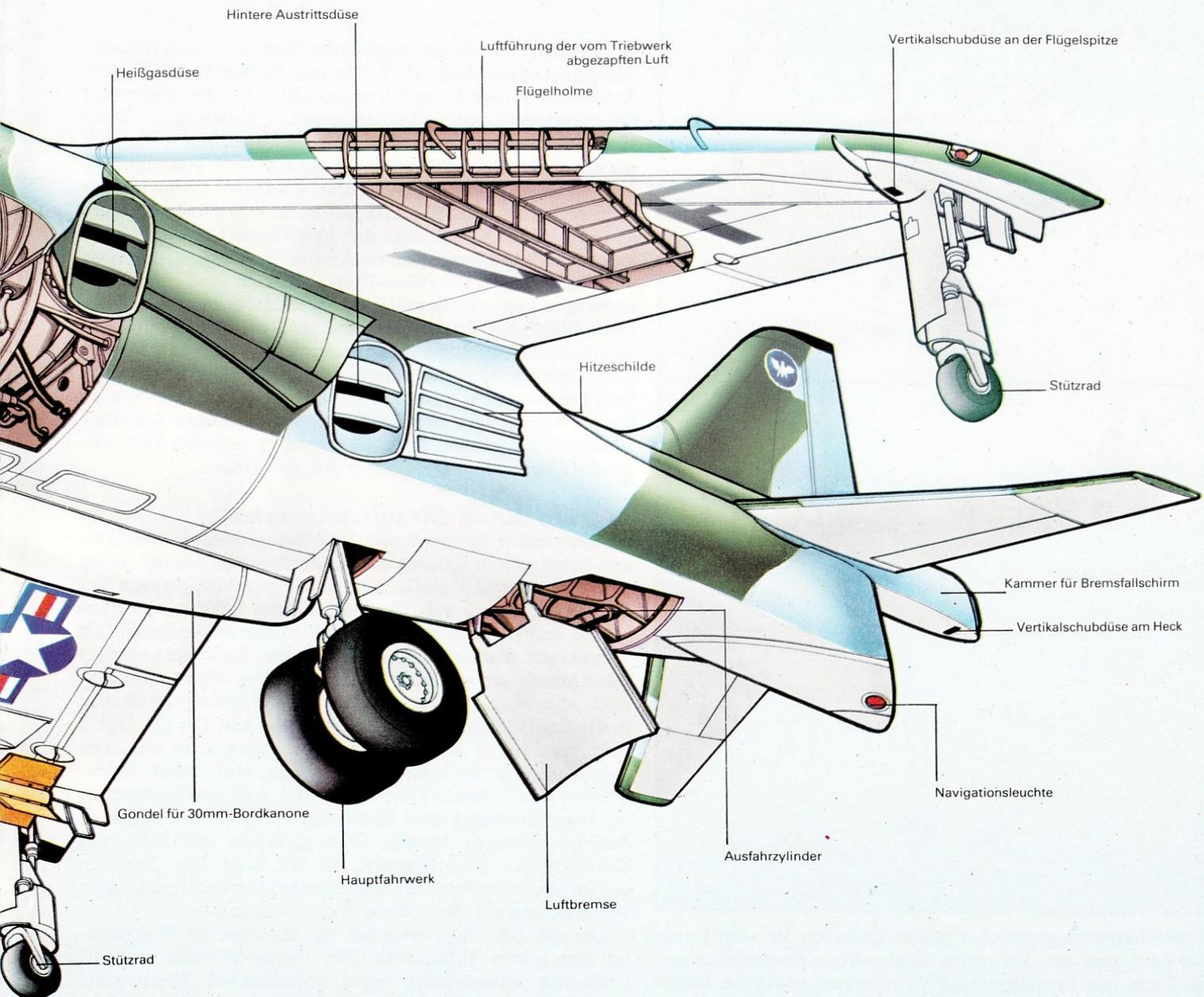
Unten: Dieses Flugzeug, der Harrier von Hawker Siddeley, verfügt über ein Hub-Schub-Triebwerk vom Typ 'Bristol Pegasus', das von Rolls-Royce hergestellt wird. Das Triebwerk ist mit vier Schwenkdüsen ausgestattet, die zum Senkrechtstart oder zur senkrechten Landung nach unten und zum Geradeausflug nach hinten geschwenkt werden können.



HAWKER SIDDELEY



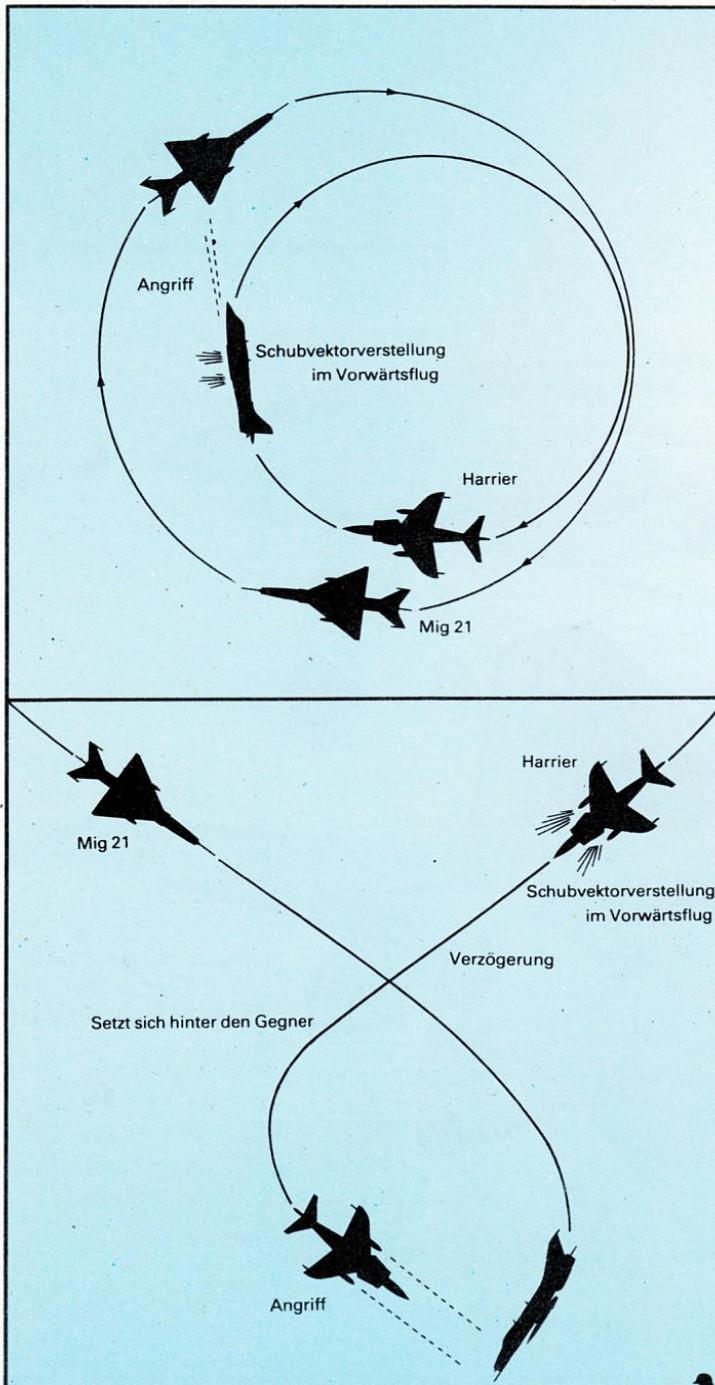
Oben: Der Harrier von Hawker Siddeley in den Farben des US Marine Corps. Er heißt in dieser Ausführung AV-8A. Man sieht, daß der Schub unmittelbar nach unten gerichtet ist. Auf den kleinen Zeichnungen ist zu sehen, wie der Übergang vom Senkrechtstart zum Horizontalflug erfolgt. Dabei werden die Düsen so geschwenkt, daß der (mit Pfeilen gekennzeichnete) Schub nach hinten geht. Während der Übergangsphase und im Schwebeflug halten vier Vertikalschubdüsen unter der Flugzeugnase, am Heck und unter den Flügel spitzen die Maschine in der Horizontalen. Sie werden durch die Bewegung des Steuerknüppels und der Ruderpedale gesteuert, so daß als einzige Zusatzeinrichtung ein Hebel zum Schwenken der Düsen erforderlich ist. Die beiden vorderen Düsen bekommen ihre Luft vom Gebläserad des Pegasus-Triebwerks, während die beiden hinteren mit Austrittsluft des Triebwerks arbeiten.



beträgt die Reisefluggeschwindigkeit der meisten Hubschrauber nur rund 200 km/h. Dies macht sie mehr oder weniger zu Kurzstreckenflugzeugen; ihre Möglichkeiten als Transportmittel standen lange im Schatten ihrer Fähigkeit, über längere Zeiträume hin mit sehr geringer Geschwindigkeit oder im Schwebeflug zu fliegen sowie von Stellen aus zu starten und auf ihnen zu landen, die für Flachstarter nicht zugänglich oder nicht speziell für sie eingerichtet sind. Den Bemühungen um eine höhere Höchst- oder Reisegeschwindigkeit war bisher nur wenig Erfolg beschieden. Ihr Einsatz ist, von besonderen Fällen wie der Versorgung von Bohrinseln oder der Wartung weitab liegender oder schwer zugänglicher Einrichtungen abgesehen, wegen ihrer vergleichsweise geringen Nutzlast unwirtschaftlich. Die besonderen Fähigkeiten von Drehflügelflugzeugen gehen zu Lasten der allge-

meinen konstruktiven Festigkeit, der aerodynamischen Werte und der Antriebsleistung.

Seit den 50er Jahren hat man zahlreiche Versuche zur Steigerung der Geschwindigkeit von Drehflügelflugzeugen unternommen. Man hat beispielsweise zusätzliche Triebwerke und Luftschauben, die einen stärkeren Schub erzeugen sollten (Flugschrauber) eingebaut sowie durch Hinzunahme kleiner Flügel zur Entlastung der Rotoren dafür gesorgt, daß diese bei hoher Geschwindigkeit keinen Auftrieb erzeugen müssen, sondern sozusagen im 'Freilauf' drehen können (Autogiroprinzip). Diese Hilfsmittel ließen einige der unerwünschten Auswirkungen in den Hintergrund treten, die auftreten, wenn der Rotor des Hubschraubers bei hoher Geschwindigkeit gleichzeitig Auftrieb und Vorwärtsschub erzeugen muß. Man hat zwar eine Anzahl sogenannter



JOHN BISHOP

Kombinationsflugschrauber gebaut, die neben den vom Triebwerk angetriebenen Rotoren noch über Vortriebseinrichtungen in Form von Propellern oder Schubdüsen sowie zur Entlastung des Rotors beim Reiseflug über starre Flügel verfügen. Man hat sie allerdings, von Probeflügen abgesehen, nicht eingesetzt, da ihre Leistung die zusätzlichen Kosten und die technische Komplexität nicht rechtfertigt.

Verwandlungsflugzeuge

Der nächste Schritt führte zum Verwandlungsflugzeug. In seiner einfachsten Form hatte es an seinem konventionellen Rumpf und Heckleitwerk vergleichsweise kleine Flügel, an deren Spitzen zwei Rotoren sitzen, die denen eines Hubschraubers ähneln, jedoch kleiner sind als diese. Bei Start und Landung rotieren sie, wie beim Hubschrauber, um eine senkrechte Achse; für den Reiseflug hingegen werden sie gekippt, so daß sie sich wie etwas zu groß geratene Luftschauben um eine waagerechte Achse drehen. Wegen dieser konstruktiven Besonderheit heißen sie auch Kipprotorflugzeuge. Bei anderen Verwandlungsflugzeugen wird der gesamte starre Flügel mitsamt den Triebwerken in die Senkrechte geschwenkt. Solche Flugzeuge werden auch im Deutschen

Bei Wendemanövern kann der Harrier in weit engerem Bogen fliegen als andere Flugzeuge. Auf Abfangkurs würden beide Piloten versuchen, in eine günstige Angriffsstellung zu kommen. Der Harrier kann ohne Verlust an Triebwerksleistung rasch verzögern und sich hinter den Gegner setzen. Eine MiG hingegen verlöre an Triebwerksleistung und damit Geschwindigkeit.

gelegentlich mit ihrem englischen Namen 'Convertiplane' bezeichnet. Den Auftrieb liefern bei beiden beschriebenen Arten des Verwandlungsflugzeugs während der Startphase die Rotoren oder Luftschauben, wohingegen beim Horizontalflug die Flügel diese Aufgabe übernehmen. Man hat die verschiedenen Verwandlungsflugzeuge wohl gründlicher als jede andere Ausführung senkrecht startender Luftfahrzeuge untersucht, denn sie stellen nach Ansicht vieler Konstrukteure den günstigsten Kompromiß dar. Von diesem Grundgedanken ausgehend, sind verschiedene Abwandlungen möglich: Das amerikanische LTV-Hiller-Ryan XC-142 war ein viermotoriges Transportflugzeug der beschriebenen Art, bei der beide Flügel mit Triebwerken und großen Luftschauben um eine waagerechte Achse gekippt werden konnten, so daß die Luftschauben synchron rotierten. Die von VFW in Deutschland gebaute VC 400 hatte je zwei Rotoren an den Spitzen ihrer Tandemflügel, also insgesamt vier. Allerdings war diese Maschine nie in der Luft. Gegenwärtig befinden sich nirgendwo Serienmaschinen dieser Art im Einsatz.

Antrieb durch Strahltriebwerke

Bei allen bisher beschriebenen Anordnungen wurden Auftrieb und Schub durch Rotoren oder Luftschauben erzeugt. Doch wurde eine ebenso große Zahl von Versuchsflogen der genannten Arten mit herkömmlichen Strahltriebwerken gebaut und geflogen wie mit anderen Antriebssystemen. Da man damals allgemein die Ansicht vertrat, Ende der sechziger Jahre könnte ein solches Flugzeug auf dem Markt aussichtsreich sein, stieg Dornier mit dem wohl ehrgeizigsten Projekt in die Entwicklung von Senkrechtstartern ein. Die Do 31, die 1967 zum ersten Mal flog, war ein Transporter mit zwei speziellen, von Rolls-Royce gelieferten Hub-Schub-Triebwerken. (Hub-Schub-Triebwerke sind Luftstrahltriebwerke, die ohne Änderung ihrer Einbaulage einen Schub und einen Auftrieb erzeugen können. Dies geschieht mit Hilfe von Schwenkdüsen oder Klappen, die bei Start oder Landung den im Horizontalflug schuberzeugenden Gasstrahl nach unten ablenken und auf diese Weise Auftrieb liefern.)

Um das Jahr 1970 erreichte das Interesse an Senkrechtstartern seinen Höhepunkt. Die Bundesluftwaffe und die Lufthansa veranstalteten einen gemeinsamen Wettbewerb, mit dem sie einen für zivile und militärische Zwecke gleichermaßen geeigneten Transporter mit einer Kapazität von hundert Sitzplätzen suchten. Die Industrie lieferte immerhin vier Beiträge, und einer dieser Vorschläge bekam den ersten Preis. Doch als die Konstruktion in allen Einzelheiten geprüft wurde, schienen die Nachteile und technischen Schwierigkeiten unüberwindlich zu sein, so daß die Pläne ins Archiv wanderten.

Etwa zur selben Zeit wurden in Großbritannien die Möglichkeiten eines senkrecht startenden und landenden Flugzeuges erforscht, wobei im großen und ganzen die gleichen Bedingungen zu erfüllen waren wie bei dem Wettbewerb in der Bundesrepublik Deutschland. Dabei schlug die Firma Hawker Siddeley einen Transporter mit 100 Sitzplätzen und einer Reichweite von 800 km sowie einer Geschwindigkeit von 0,85 Mach vor. Der Vorschlag ging von getrennten Hub- und Schubtriebwerken aus — für Senkrechtstarter die einzige Möglichkeit, wenn nicht mit Hilfe von Schwenkdüsen der jeweils geforderte Schubvektor von horizontal bis vertikal



Oben: Das Kurzstarterkonzept am Beispiel des Transportflugzeugs Breguet 941 S. Die vier großen Luftschauben drücken ihren Nachstrom auf der ganzen Flügelbreite durch eine komplizierte Anordnung von Spalt- und Strahlklappen, womit bei niedrigen Geschwindigkeiten ein großer Auftrieb erzeugt werden kann. Im Bild sind die Klappen im Winkel von 90° angestellt.

eingestellt werden soll. Statt eines Hub-Schub-Triebwerks lieferten hier zwei getrennte Triebwerksanlagen die Auftriebskraft und den Schub. Die Hawker Siddeley 141 war um zwei große Triebwerke zur Erzeugung des Marschschubs und eine Batterie von 16 kleinen Triebwerken herum konstruiert, die zu Beginn und am Ende des Fluges zur Erzeugung des Auftriebs zugeschaltet wurden und die Maschine in der Luft halten konnten, wenn die kleinen, geschwungenen Flügel dazu

nicht mehr in der Lage waren. Auch hier zeigte die endgültige Auswertung, daß trotz des Rückgriffs auf die fortschrittlichsten technischen Verfahren die Konstruktion technisch nicht unbedenklich und wirtschaftlich wenig attraktiv war.

Zur Zeit befindet sich weltweit nur ein einziger Senkrechtstarter im zivilen oder militärischen Einsatz, und zwar das Kampfflugzeug 'Harrier' des britischen Herstellers Hawker Siddeley, das für die Luftunterstützung von Truppen im

Unten: Das Versuchsflyzeug Do 31 von der Firma Dornier ist zur Erzeugung des eigentlichen Schubs beim Horizontalflug mit zwei Pegasustriebwerken sowie mit acht kleinen Rolls-Royce-Triebwerken RB 162 (je vier in den Gondeln an den Flügel spitzen) ausgerüstet, die ausschließlich zum Start und bei der Landung eingesetzt werden.





PHOTRI

Felde entwickelt wurde. Diese auf den ersten Blick wie ein herkömmliches Düsenflugzeug erscheinende Maschine ist mit einem Pegasus-Triebwerk von Rolls-Royce ausgerüstet, dessen Antriebsgase durch vier Hub-Schub-Düsen ausgestoßen werden. Dieses Kampfflugzeug ist nicht von leicht zerstörbaren Start- und Landepisten abhängig und kann beispielsweise von einer kleinen Freifläche nur wenige Kilometer vom Kampfplatz entfernt in das Geschehen eingreifen. Die Zeit für die Erfüllung eines Auftrages einschließlich der Rückkehr zum Stützpunkt und der Vorbereitung auf den nächsten Kampfauftrag ist um ein Mehrfaches kürzer als bei üblichen Kampfflugzeugen, die zum Erreichen ihres Ziels bis zu zomal längere Strecken fliegen, mehr Zeit für die Landung und das Ausrollen zum Nachtanken und Anbordnehmen neuer Waffen und Munition aufwenden müssen. Folgende Eigenschaften machen den Harrier 'produktiver': Er kann in einem bestimmten Zeitraum eine größere Anzahl von Bomben auf militärische Ziele abwerfen als andere Flugzeuge. Die Triebwerke sind so angelegt, daß die Maschine beim Start senkrecht abheben kann; außerdem sind sie doppelt so stark wie die von der Größe und Leistung nach vergleichbaren Triebwerken von konventionellen Kampfflugzeugen. Aus diesem Grunde kann der Harrier mit einem bestimmten Treibstoffvorrat nur halb so weit fliegen wie vergleichbare Kampfflugzeuge; dies ist hinsichtlich seiner Beweglichkeit jedoch nicht von Nachteil. Steht am Boden eine Rollbahn von nur rund 300 m zur Verfügung (herkömmliche Kampfflugzeuge benötigen 3 000 m bis 4 000 m), kann der Harrier eine weit größere Bombenlast befördern. Da nur sehr selten eine so kurze Startgelegenheit nicht zur Verfügung stehen dürfte, liefert die Kurzstartleistung eine realistischere Einschätzung der militärischen Möglichkeiten des Harrier als seine reine Senkrechtstartleistung.

Schwierigkeiten bei der zivilen Verwendung

Gegenüber diesen Möglichkeiten scheint der Einsatz von Kurz- oder Senkrechtstartern auf dem zivilen Sektor noch in

Oben: Die LTV-Hiller-Ryan XC-142, ein großes Verwandlungsflugzeug, startet senkrecht durch Verdrehen seiner Flügel mit den vier daran angebrachten Motoren, so daß es beim Start einem Drehflügelflugzeug entspricht. Für den Horizontalflug werden die Flügel wieder in die Normallage gebracht.

weiter Ferne zu liegen. Zwar sind von Stadtmitte zu Stadtmitte verkehrende Senkrechtstarter insofern konkurrenzlos, als sie auf Flächen von Parkplatzgröße landen können, dennoch brauchen sie mehr Bodenfläche, als es auf den ersten Blick den Anschein hat. Beispielsweise müssen die Start- und Landeflächen in gewisser Entfernung vom Abfertigungsgebäude mit Fluggästen, Wartungseinrichtungen und Fahrzeugen gehalten werden, da die Düsenabgase gesundheitsschädlich und aggressiv sind. Der Flächenbedarf eines Flughafens für Senkrechtstarter dürfte mindestens 200 000 m² betragen. Eine solche Fläche läßt sich in der Innenstadt von Hamburg oder München nicht ohne weiteres finden, vor allem, wenn man daran denkt, daß wegen der Rammgefahr keine Hochhäuser in der Nähe sein sollten. Neue herkömmliche Flugzeuge können bestehende Flughäfen und ihre Anlagen weiterbenutzen, so daß ihre Einführung durch Kosten in dieser Richtung nicht verteuert wird. Bei Senkrechtstartern würden jedoch zu den Erstkosten auch die zur Errichtung von Abfertigungsgebäuden, Wartungseinrichtungen, Auftankmöglichkeiten und der vielen anderen, mit einem Flughafen verbundenen Einrichtungen gehören, um ein Passagieraufkommen von beispielsweise 5 Millionen pro Jahr ohne Schwierigkeiten abfertigen zu können. Die größten technischen Schwierigkeiten liegen auf dem Gebiet des Lärmschutzes und der Entwicklung von speziellen Navigationsverfahren, die unter allen Wetterbedingungen und bei Dunkelheit einen 'senkrechten Abstieg' gestatten. Selbst zum militärischen Einsatz, bei dem die Sicherheitsvorkehrungen möglicherweise weniger streng sind als in der Zivilluftfahrt, sind für die nächste Generation Kurzstarter und keine Senkrechtstarter vorgesehen.

SERVOBREMSE

Der Fahrer eines mit Servobremse (Bremskraftverstärker) ausgerüsteten Sattelzuges braucht zur Betätigung der Betriebsbremse seines Fahrzeuges keinen höheren Fußdruck auf das Bremspedal auszuüben, als es bei einem Personenkraftwagen erforderlich ist.

Die normale hydraulische Bremsanlage eines Kraftwagens besteht aus einem über das Bremspedal betätigten Hauptzylinder, der durch Bremsleitungen mit einem oder mehreren, an jeder Radbremse angebrachten Nehmerzylindern bzw.-zylindern (Radzylinder) verbunden ist. Bei normalen Trommelbremsen werden durch den Doppelkolben des Hauptzylinders bis zu acht Radzylinder-Kolben betätigt.

Lie zum Abbremsen bzw. Anhalten des Fahrzeugs auf die Bremsbacken einwirkende Kraft ist bedeutend größer als die Kraft, die durch den Fußdruck des Fahrers auf das Bremspedal ausgeübt wird. Dieser Tatsache wird durch das Einbauen mechanischer Vorteile in die Bremsanlage Rechnung getragen. Angenommen, das Bremspedal wird so um seinen Lagerbolzen gedreht, daß eine bestimmte, durch den Fuß aufgewendete Kraft das Dreifache dieser Kraft auf den Kolben im Hauptzylinder einwirken läßt (wobei sich natürlich der Fuß entsprechend des Hebelgesetzes dreimal so weit wie der Kolben bewegen muß). Beträgt der Durchmesser des Hauptzylinder-Kolbens 1,5 cm, besitzt jeder Radzylinder-Kolben der Vorderradbremse einen Durchmesser von 3 cm, während die Radzylinder-Kolben der Hinterradbremse jeweils einen Durchmesser von 2 cm haben. (Vorderradbremsen sind immer größer dimensioniert, weil die Bremswirkung das Fahrzeuggewicht nach vorne schleudert.) Folglich wird die vom Fuß des Fahrers ausgeübte Kraft bei den Vorderradbremsen 48mal und an den Hinterradbremsen 21mal, also insgesamt 69mal, verstärkt. Der Fuß müßte sich 60mal so weit wie jeder einzelne Kolben bewegen. Da die Bremsbacken aber nur einen geringfügigen Abstand zu den Bremstrommeln haben, ergibt

sich ein akzeptabler Pedalweg von ein paar Zentimetern.

Bei der Trommelbremse erzeugt die Reibungskraft ein Moment, das die auflaufende Bremsbacke in die Trommelrundung hineinpreßt, also zu einer Selbstverstärkung der Bremswirkung führt. Aus diesem Grunde besitzen viele Vorderrad-Trommelbremsen zwei auflaufende Bremsbacken. Hierdurch wird die Bremswirkung noch weiter verstärkt.

Bei Scheibenbremsen kommt es jedoch zu keiner Selbstverstärkung, weshalb eine beträchtlich höhere Kraft zu ihrer Betätigung erforderlich ist. Weiterhin sind sie mit größeren Kolben als Trommelbremsen ausgerüstet und besitzen vielleicht pro Bremssattel vier anstatt zwei Kolben. Da dies zu einem nicht tolerierbaren langen Pedalweg führen oder einen sehr hohen Fußdruck erforderlich machen würde, sind fast alle Kraftwagen mit einem Bremsverstärker (Servobremse, Hilfskraftbremsanlage) ausgerüstet. Auch großvolumige Trommelbremsen, wie sie bei Autobussen und Lastkraftwagen verwendet werden, machen eine Bremskraftverstärkung erforderlich.

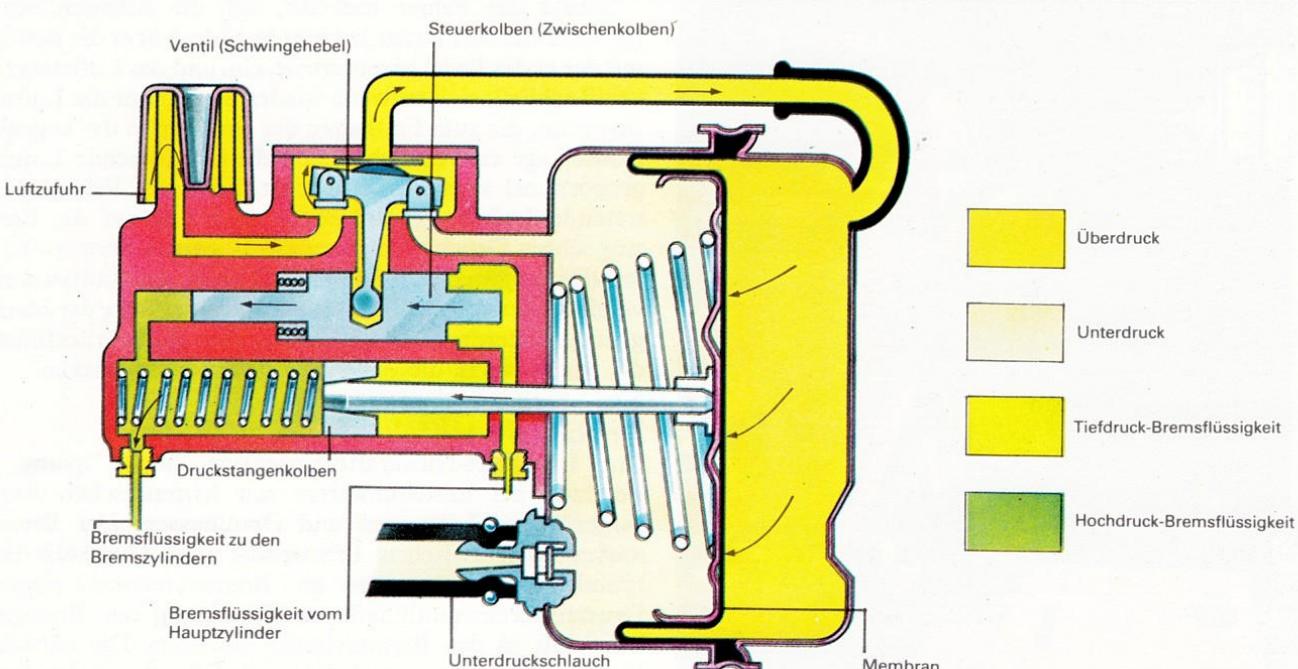
Durch Hilfskraft verstärkte Bremsen wurden ursprünglich für Flugzeuge konstruiert und in den vierziger Jahren allmäh-

NELSON HARGREAVES



Oben: Die Girling Powerstop hydraulische Bremse eignet sich für eine Reihe verschiedener Autotypen.

GIRLING/CHRIS GILLINGS



Bei Betätigung der Bremsen drückt die Flüssigkeit aus dem Hauptzylinder auf den Steuerkolben, wodurch sich das Ventil öffnet und atmosphärischen Druck in den Servo einströmen lässt. Dadurch werden Membran und Kolben in Bewegung gesetzt, die ihrerseits die Bremsflüssigkeit auf die Bremszylinder drücken.

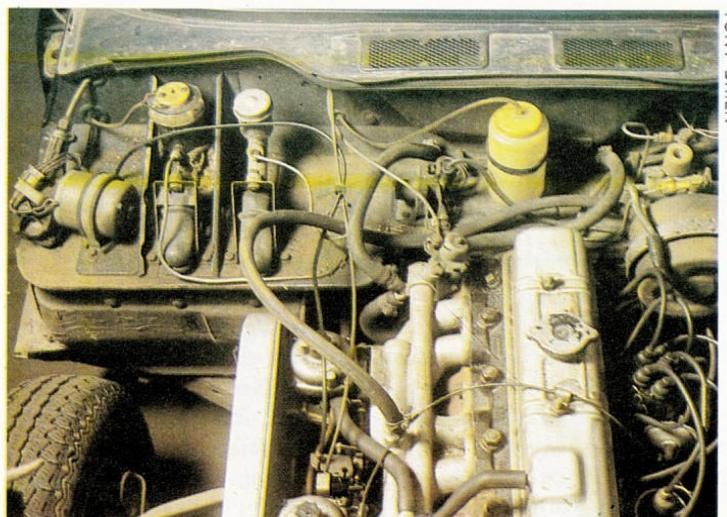
lich in Straßenfahrzeuge eingebaut. Heute werden die Bremsanlagen von Kraftfahrzeugen aller Typen so konstruiert, daß bei Verwendung von Hilfskraftbremsanlagen zum Abbremsen eines Autobusses kein höherer Pedaldruck erforderlich ist als bei einem kleinen Personenkraftwagen.

Saugluft-Hilfskraftbremsanlage

Bei den meisten Hilfskraftbremsanlagen für Personenkraftwagen handelt es sich um Saugluft-Bremsverstärker. Ein normaler Ottomotor (Benzinmotor) entwickelt während des Fahrbetriebes im Ansaugkrümmer einen partiellen Unterdruck, der ungefähr 0,7 bar unter dem normalen Luftdruck liegt. Dieser Unterdruck kann abgezweigt und als Kraftquelle benutzt werden. Er ist besonders nützlich für Bremsen, weil der Unterdruck den höchsten Wert erreicht, wenn der Fahrer seinen Fuß schnell vom Gaspedal nimmt, wie es beim Bremsen der Fall ist. Bei Dieselmotoren ist dieser Unterdruck nicht vorhanden, weshalb eine spezielle, vom Motor angetriebene Unterdruckpumpe benutzt wird.

Der Bremskraftverstärker besteht aus einem Gehäuse (Unterdruckzylinder), das eine große, auf beiden Seiten mit dem Ansaugkrümmer in Verbindung stehende Gummimembran enthält. Eine Seite ist direkt angeschlossen, während die andere über ein durch den vom Hauptzylinder erzeugten hydraulischen Druck geöffnetes und geschlossenes Luftsteuerungsventil angeschlossen ist. Zu dieser Seite wird die Membran durch eine kegelförmige Feder (Kolbenrückführfeder) gedrückt.

Die im Ausgleichbehälter des Hauptzylinders befindliche Bremsflüssigkeit dringt anteilig in den Hauptzylinder ein, dessen Kolben mit einer Bohrung versehen ist. Arbeitet der Bremskraftverstärker nicht (zum Beispiel bei abgestelltem Motor), wird der vom Hauptzylinder kommende Druck durch diese Bohrung (Übergangsbohrung) direkt zu den Bremsen weitergeleitet.



TONY BRIEN

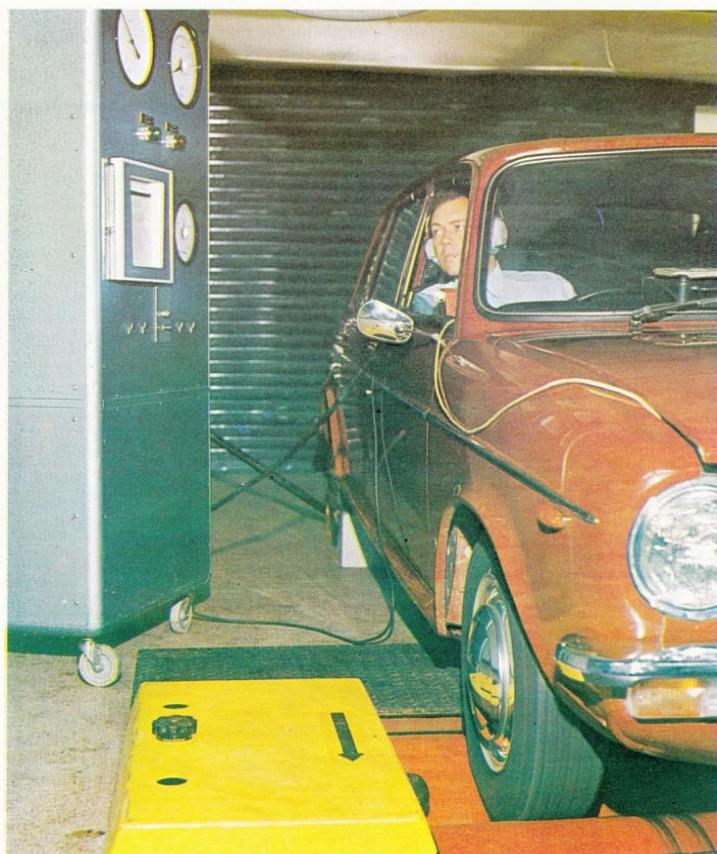
Oben: Plan eines Servosystems. Der Servo ist separat (oben rechts) vom Hauptbremszylinder (oben links) amontiert.

Vom Hauptzylinder aus führt ein Kanal 'stromaufwärts' durch den Hauptzylinder-Kolben zu einem kleinen Hilfszylinder, in dem sich ein mit dem Luftsteuerventil verbundener Kolben befindet. Der vom Hauptzylinder ausgehende Druck bewegt diesen Kolben, wodurch das Ventil geöffnet wird und Außenluft zu einer Seite der Membran gelangen kann. Da der Druck dieser Luft über dem im Ansaugkrümmer herrschenden Unterdruck liegt, drückt sie die Membran gegen den Federdruck in den Unterdruckzylinder hinein. Eine mit der Membran verbundene Druckstange bewegt sich gegen den Hauptzylinder-Kolben, verschließt die in ihm befindliche Bohrung und preßt ihn so weit in den Hauptzylinder hinein, bis der entstehende Druck die Bremsen betätigt. (Die Bohrung muß verschlossen werden, da sonst der zwischen dem Kolben und der Bremsanlage herrschende Druck zum Hauptzylinder zurückübertragen wird und das Bremspedal mit großer Kraft empordrückt.)

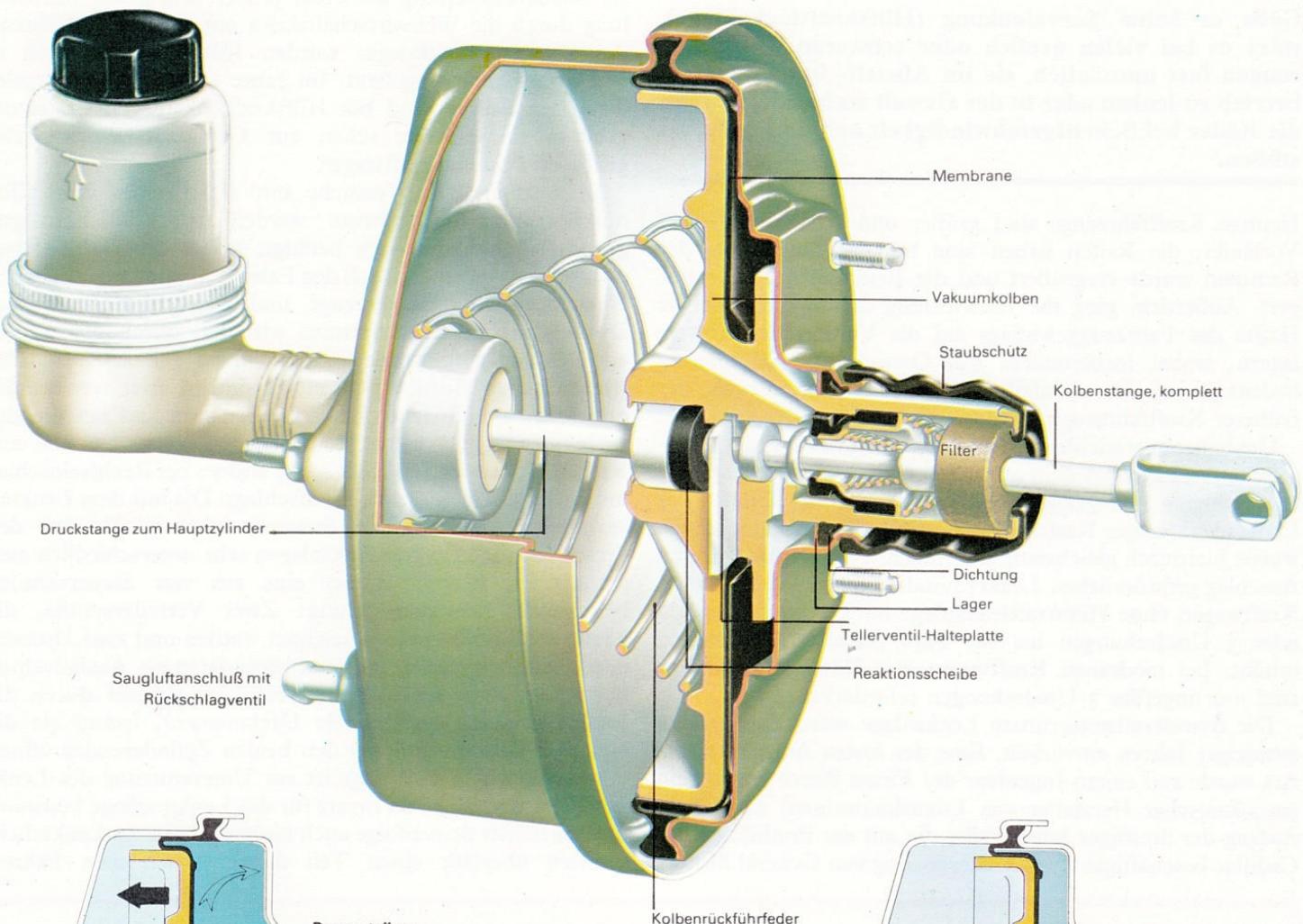
Sobald der Fahrer feststellt, daß die Bremsen mit ausreichend starkem Druck betätigt werden, hält er die Bewegung, mit der er das Pedal heruntertritt, ein, und das Luftsteuerventil schließt sich teilweise wieder, so daß nur die Luftmenge einströmt, die zum Festhalten der Bremsen in der augenblicklichen Lage erforderlich ist. Da die einströmende Luftmenge proportional zum Pedaldruck ist, kann der Fahrer die eintrretende Luftmenge und somit auch den auf die Bremsen ausgeübten Druck genau steuern. Wird das Bremspedal vollständig freigegeben, schließt sich auch das Luftsteuerventil wieder vollständig. Der nun auf jeder Seite der Membran gleiche Unterdruck ermöglicht es der Kolbenrückführfeder, die Membran in die Ausgangslage zurückzudrücken.

Druckluft-Hilfskraftbremsanlage

Die Druckluft-Hilfskraftbremsanlage findet häufig Verwendung bei mittelschweren, mit hydraulischen Bremsen ausgerüsteten Lastwagen und Omnibussen. Der Bremsverstärker wird zwischen Bremspedal und Hydraulik-Hauptzylinder eingebaut. Das im Bremsverstärker eingebaute Druckluftbremsventil läßt bei Betätigung des Bremspedals Druckluft in den Bremszylinder eintreten. Die entstehende Kolbenkraft wirkt zusätzlich zur Pedalkraft auf den hydraulischen Hauptzylinder. Die umfangreiche Drucklufterzeugungs- und Speicheranlage entspricht derjenigen der Fremdkraft-Druckluftbremsanlage und ist meist so ausgebaut, daß ein Anhänger mit Druckluftbremsanlage mitgebremst werden kann. Eisenbahnzüge sind ebenfalls mit Druckluft-Bremsanlagen ausgerüstet.

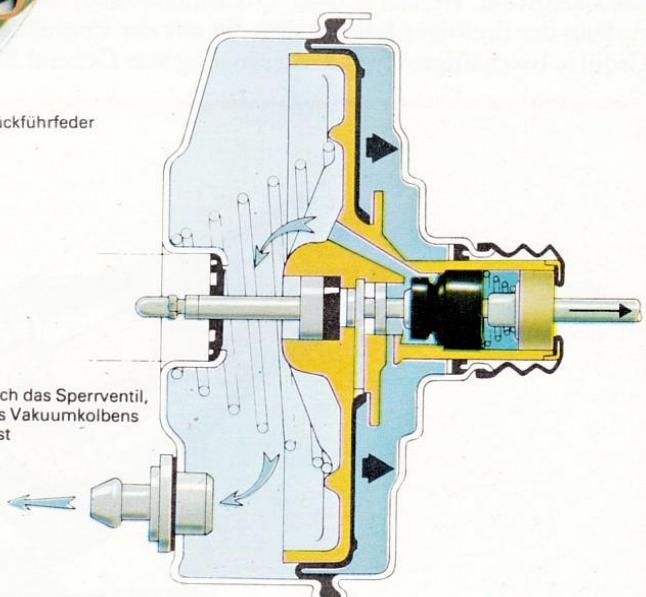
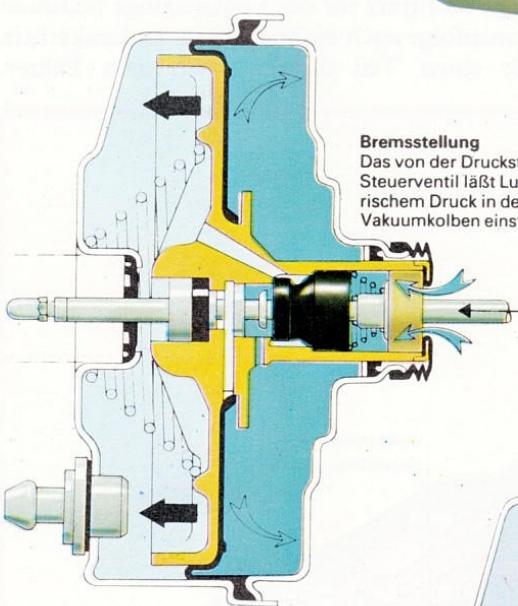


Oben: Messung des Bremsdruckes, wodurch letzten Endes bestimmt wird, wie schnell das Auto bremsen kann. Die Bremsen übertragen die Bewegungsenergie in Wärmeenergie.

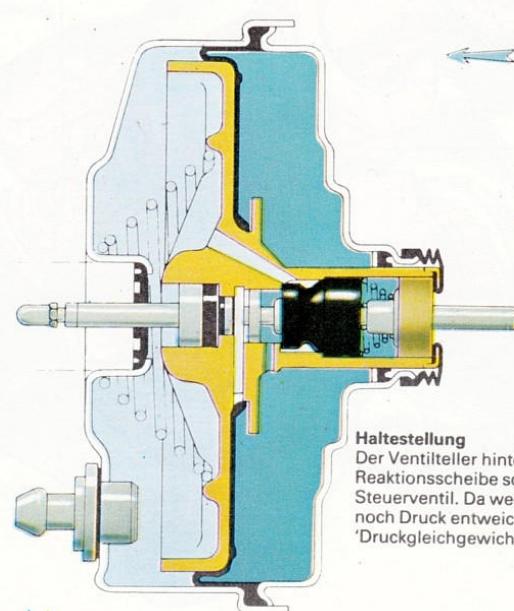


Bremsstellung
Das von der Druckstange beeinflußte Steuerventil lässt Luft mit atmosphärischem Druck in den Raum rechts vom Vakuumkolben einströmen

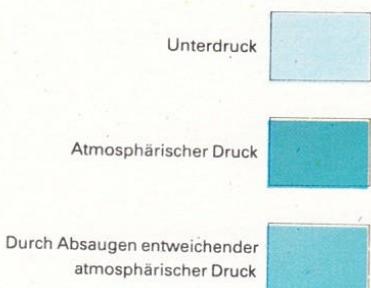
Lösestellung
Der Druck entweicht durch das Sperrventil, bis auf beiden Seiten des Vakuumkolbens Unterdruck vorhanden ist



Bei dieser Saugluft-Hilfskraftbremsanlage unterstützt die Saugluft (Unterdruck) den vom Fahrer auf das Bremspedal ausgeübten Druck und nicht den Hauptzylinder direkt. Die Druckstangen, zwischen denen eine vom Vakuum unterstützte Membran liegt, bilden im Fall von Saugluftversagen eine direkt wirkende mechanische Verbindung. Bei ausgeschaltetem Motor bildet sich kein Unterdruck.



Haltestellung
Der Ventilteller hinter der Reaktionsscheibe schließt das Steuerventil. Da weder Luft zuströmt noch Druck entweicht, bleibt das 'Druckgleichgewicht' erhalten.



SERVOLENKUNG

Gäbe es keine Servolenkung (Hilfskraftlenkanlage), wäre es bei vielen großen oder schweren Kraftfahrzeugen fast unmöglich, sie im Abstell- bzw. Rangierbetrieb zu lenken oder in der Gewalt zu behalten, wenn die Räder bei Schrittgeschwindigkeit auf ein Hindernis stoßen.

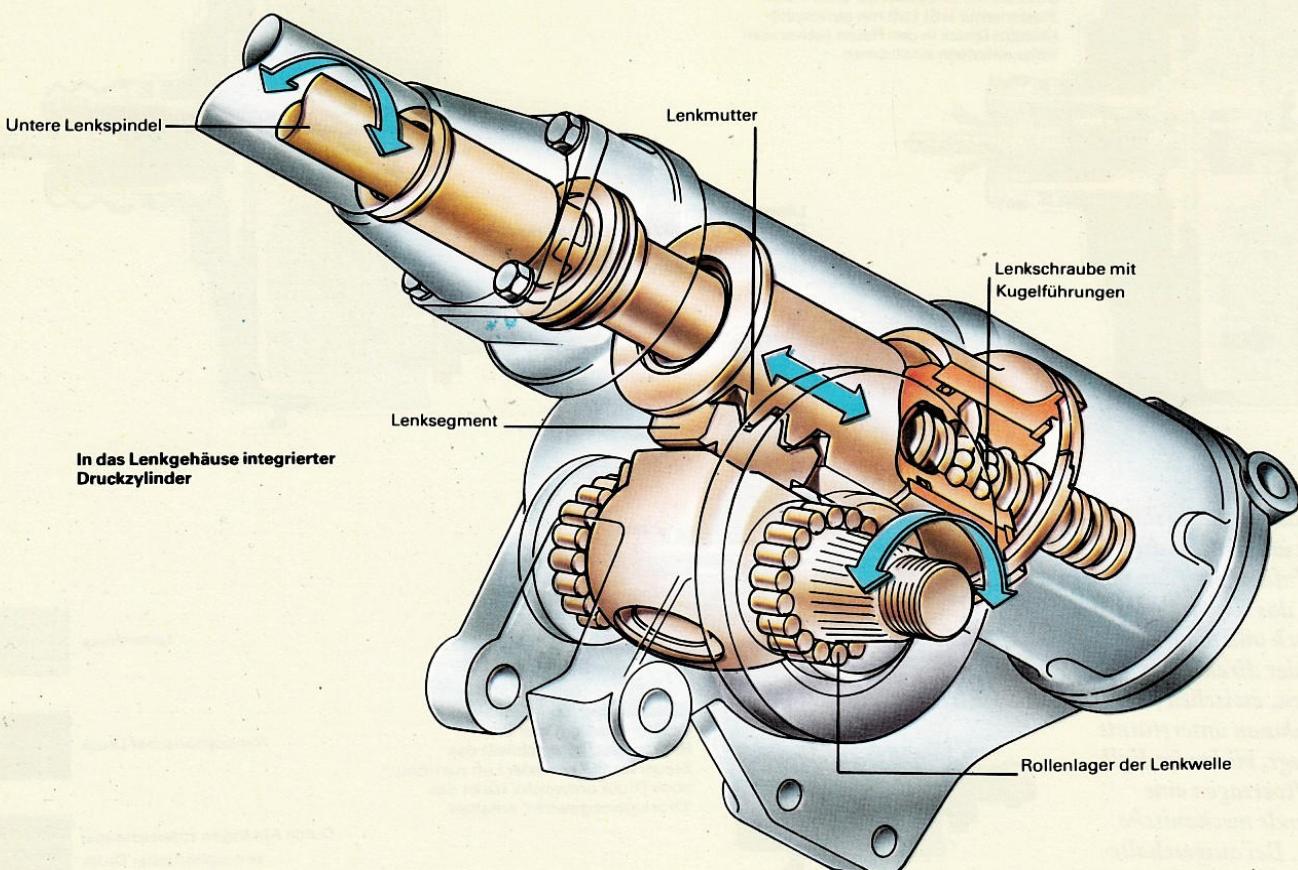
Heutige Kraftfahrzeuge sind größer und schwerer als ihre Vorfahren, die Reifen haben eine breitere Lauffläche, der Radstand wurde vergrößert und der Reifenluftdruck verringert. Außerdem ging die Entwicklung dahin, mehr als die Hälfte des Fahrzeuggewichtes auf die Vorderräder zu verlagern, wobei insbesondere das Gewicht des Motors zu bedenken ist, der ebenfalls größer und schwerer als der früheren Kraftfahrzeuge wurde.

Um Fahrzeuge leichter lenkbar zu machen, hat man das Übersetzungsverhältnis in dem am unteren Ende der Lenkspindel angeordneten Lenkgetriebe so geändert, daß das Drehen des Lenkrades weniger Kraftaufwand erforderlich machte; jedoch wurde hierdurch gleichzeitig die Anzahl der von Anschlag zu Anschlag erforderlichen Lenkradumdrehungen bei modernen Kraftwagen ohne Hilfskraftlenkanlage im Vergleich zu 2 1/2 oder 3 Umdrehungen bei vor 1940 gebauten Kraftwagen erhöht. Bei modernen Kraftwagen mit Hilfskraftlenkanlage sind nur ungefähr 3 Umdrehungen erforderlich.

Die fremdkraftunterstützte Lenkanlage wurde erst in den zwanziger Jahren entwickelt. Eine der ersten Anlagen dieser Art wurde von einem Ingenieur der Firma Pierce Arrow (ein amerikanischer Hersteller von Luxuslimousinen) entwickelt. Anfang der dreißiger Jahre wollte die mit der Produktion des Cadillac beschäftigte Zweigniederlassung von General Motors

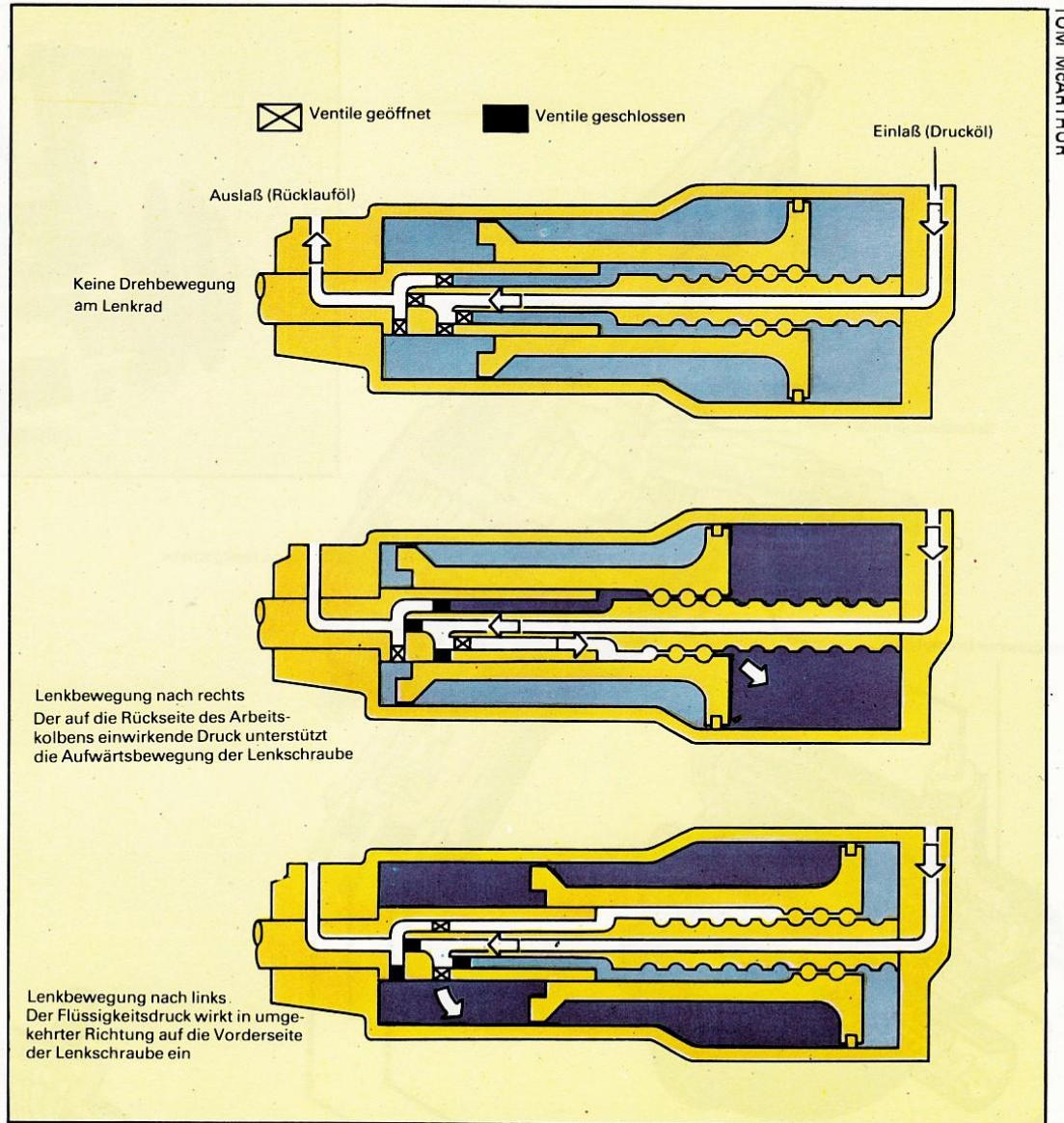
den Einbau von Hilfskraftlenkanlagen in einigen ihrer Modelle als Sonderausstattung anbieten. Jedoch wurde die Entwicklung durch die Weltwirtschaftskrise unterbrochen. Während des Zweiten Weltkrieges wurden Hilfskraftlenkanlagen in Militärfahrzeuge eingebaut. Im Jahre 1952 machte Chrysler dann den Anfang und bot Hilfskraftlenkanlagen an. Heute gehören sie teilweise schon zur Grundausstattung vieler größerer Personenkraftwagen.

Es wurden auch Versuche mit elektrischen Lenkhilfen durchgeführt; doch heute werden Hilfskraftlenkanlagen grundsätzlich hydraulisch betätigt, wobei der Öldruck von etwa 70 bar von einer durch den Fahrzeugmotor angetriebenen Hochdruck-Ölpumpe erzeugt und aufrechterhalten wird. Durch den Servomechanismus wird das durch den Fahrer am Lenkrad aufgewendete Drehmoment verstärkt. In jeder hydraulischen Hilfskraftlenkanlage sind in zwei voneinander getrennten zylindrischen Druckräumen zwei starr miteinander verbundene, gleich große Kolbenflächen vorhanden. Die eine Kolbenfläche wird bei Links-, die andere bei Rechtseinschlag mit hydraulischem Druck beaufschlagt. Die mit dem Lenkrad verbundene hydraulische Steuereinrichtung, die bei den verschiedenen Hilfskraftlenkanlagen sehr unterschiedlich ausgeführt ist, betätigt immer eine aus vier Steuerventilen bestehende Steuereinrichtung: Zwei Verteilerventile, die häufig als Einlaßventile bezeichnet werden und zwei Drossel- oder Reaktionsventile, die man vereinfacht als Auslaßventile bezeichnet. Die Einlaßventile reagieren auf das durch die Lenkraddrehung entstehende Drehmoment, indem sie die kleineren Auslaßventile an den beiden Zylinderenden öffnen oder schließen. Die Anlage ist zur Unterstützung des Lenkgestänges und nicht als Ersatz für das Lenkgestänge bestimmt und verrichtet demzufolge auch nicht die gesamte Lenkarbeit, sondern überläßt einen Teil dieser Arbeit dem Fahrer.



Links unten und rechts:

Bei dieser Konstruktion einer Hilfskraft-Hydrolenkung werden im Lenkgehäuse untergebrachte Umlaufsteuerventile benutzt. Wirkt keine Drehbewegung auf das Lenkrad ein, d.h. fährt das Fahrzeug geradeaus, sind alle Ventile geöffnet und es herrschen gleichartige Druckverhältnisse vor und hinter dem Arbeitskolben, in dem die Lenkmutter drehbar gelagert ist. Wird das Lenkrad nach links oder nach rechts gedreht, schließen sich die betreffenden Ventile und der entstehende Flüssigkeitsdruck unterstützt die Drehbewegung der Lenkmutter auf der Lenkschraube. Bleibt aus irgendeinem Grunde der Druck aus, ist die rein mechanische Lenkverbindung in jedem Falle sichergestellt, wenn sich auch die Lenkung schwerer betätigen lässt. Das Lenkgestänge selbst ist über den Lenkstockhebel mit der Lenkwelle verbunden; die Lenkübersetzung ist dergestalt, daß ein kurzer, von der Lenkmutter auf der Lenkschraube zurückgelegter Weg einem großen Drehwinkelgrad der gelenkten Räder des Fahrzeugs entspricht.



Kommt es also zum Ausfall der hydraulischen Anlage, kann das Fahrzeug, wenn auch mit größerem Kraftaufwand, gelenkt werden, was wiederum ein wesentlicher Beitrag zur Verkehrssicherheit ist. Die Hilfskraftlenkanlage leistet auch einen direkten Beitrag zur Betriebssicherheit, da sie es dem Fahrer für den Fall, daß er ein Straßenhindernis überfährt oder einen Reifenschaden hat, erleichtert, sein Fahrzeug in der Gewalt zu behalten. Bei vielen großen Kraftwagen mit breiten, fest auf der Fahrbahn aufliegenden Gürtelreifen wäre ein Lenken ohne Fremdkraftunterstützung bei Schrittgeschwindigkeit fast unmöglich.

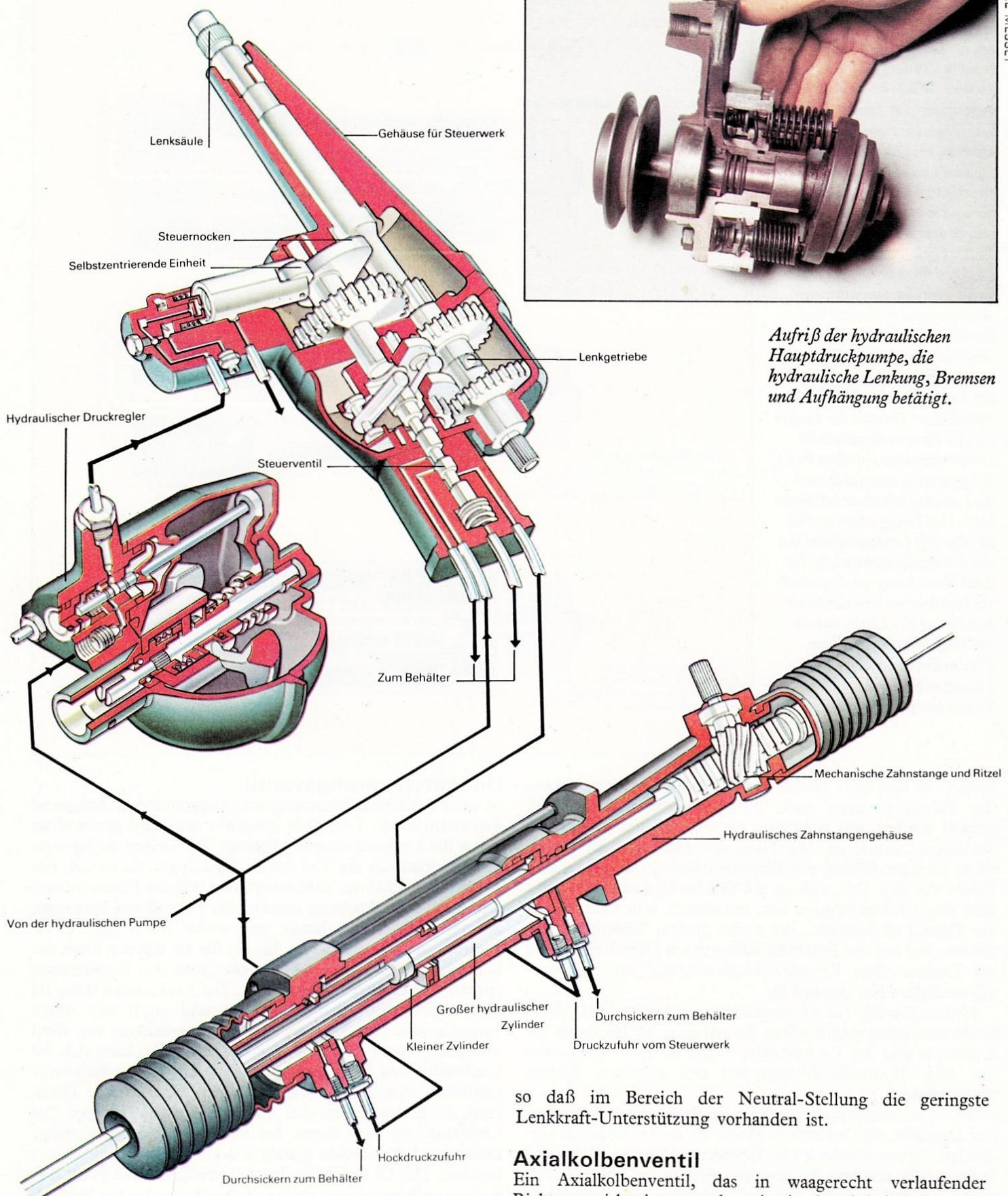
Hydrostatische, für Geländefahrzeuge konstruierte Hilfskraftlenkanlagen sind insofern Ausnahmen, als bei ihnen die Lenksäule und das Lenkgetriebe fortfallen und das Lenkrad nur über Hydraulikleitungen mit den gelenkten Rädern verbunden ist.

Zur Hilfskraftlenkanlage gehört ein Behälter zur Aufnahme des Drucköls. Bei laufendem Motor ist immer Öldruck vorhanden. Arbeitet jedoch die Hochdruckölspalte nicht und befindet sich die von ihr gespeiste Anlage im Ruhezustand, wie es der Fall ist, wenn sich das Lenkrad in Geradeausfahrtstellung befindet, wirkt auf beide Seiten des Arbeitskolbens dieselbe hydraulische Druck ein. Der Kolben bewegt sich nicht.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von Hilfskraftlenkanlagen: Bei der einen ist die hydraulische Steuereinrichtung im Lenkgehäuse untergebracht (Umlaufsteuerventil), während sie im anderen Falle im Arbeitskolbenzyylinder untergebracht ist (Axialkolbenventil).

Umlaufsteuerungsventil

In einer mit Umlaufsteuerungsventil ausgerüsteten Anlage ist das Ventil in die Lenksäule integriert und wird unmittelbar durch die Lenkradbewegung betätigt. Bei einigen Anlagen ist der Arbeitskolben ein Teil des Lenkgestänges. So ist z.B. der Arbeitskolben bei der Zahnstangenlenkung der Firma Adwest direkt auf der Zahnstange angebracht. Bei anderen Systemen, die in Deutschland häufig anzutreffen sind, gehört die Kugelmutter-Hydrolenkung, bei der die am unteren Ende der Lenksäule befindliche Lenkschnecke durch den Kugelumlauf mit der Lenkmutter verbunden ist. Die Lenkmutter selbst ist im Arbeitskolben drehbar gelagert und greift mit einem Steuerlineal in eine Aussparung des Steuerschiebers ein. Wird nun eine größere Kraft zum Lenken gebraucht, kann sich die Lenkmutter um einen kleinen Winkel mit der Lenkschnecke mitdrehen. Am Steuerlineal wirkt dann eine größere Drehkraft, die ausreicht, um den Steuerschieber zu bewegen (bei Linkseinschlag nach unten, bei Rechtseinschlag nach oben). Damit wird der direkte Rücklauf des Öls zur Pumpe unterbrochen. Das Öl strömt in den Arbeitskolben und preßt den Kolben nach vorne bzw. zurück. Steht das Lenkrad in Neutral-Stellung (Geradeausfahrt), sind die Ölbohrungen nicht unterbrochen, so daß das Öl gleichmäßig in beide Richtungen fließen kann. Es steht in der Neutral-Stellung jedoch nicht unter Druck. Wird die Neutral-Stellung durch Lenkeinschlag aufgehoben, fließt das bei Betrieb des Fahrzeugs unter Druck stehende Öl in eine Richtung. Dieses System kann so konstruiert werden, daß das Ausmaß der zum Lenken verfügbaren Hilfskraft proportional zum Drehwinkel der Lenksäule steigt,



Oben: Die Bestandteile der Lenkung im Citroen — hier im Schnittbild —, bestehend aus dem Steuerwerk, dem Druckregler und der Zahnstange.

so daß im Bereich der Neutral-Stellung die geringste Lenkkraft-Unterstützung vorhanden ist.

Axialkolbenventil

Ein Axialkolbenventil, das in waagerecht verlaufender Richtung wirkt, ist normalerweise in den Arbeitskolben des Lenkgestänges integriert, und zwar insbesondere bei Nutzfahrzeugen. Die Ventile werden durch die beim Drehen des Lenkrades auf das Lenkgestänge einwirkende Schubbelastung betätigt. Bei diesen Anlagen ist der Zylinderraum des Arbeitskolbens häufig auf einer Seite mit dem Lenkgestänge verbunden, während die Kolbenseite am Rahmen des Fahrzeugs angelenkt ist, so daß der Arbeitskolben bei seiner Betätigung eigentlich am Rahmen zieht bzw. gegen den Rahmen drückt.

SERVOSTEUERUNG

Ein modernes Flugzeug könnte man ohne Servoeinrichtungen nicht fliegen. Sie nehmen dem Piloten die körperlich belastenden Tätigkeiten ab, die damit verbunden sind, die Steuereinrichtungen mit der Hand zu 'stellen'. Ihre Aufgabe erfüllen sie ohne Ermüdungserscheinungen, mit großer Genauigkeit und ruckfrei.

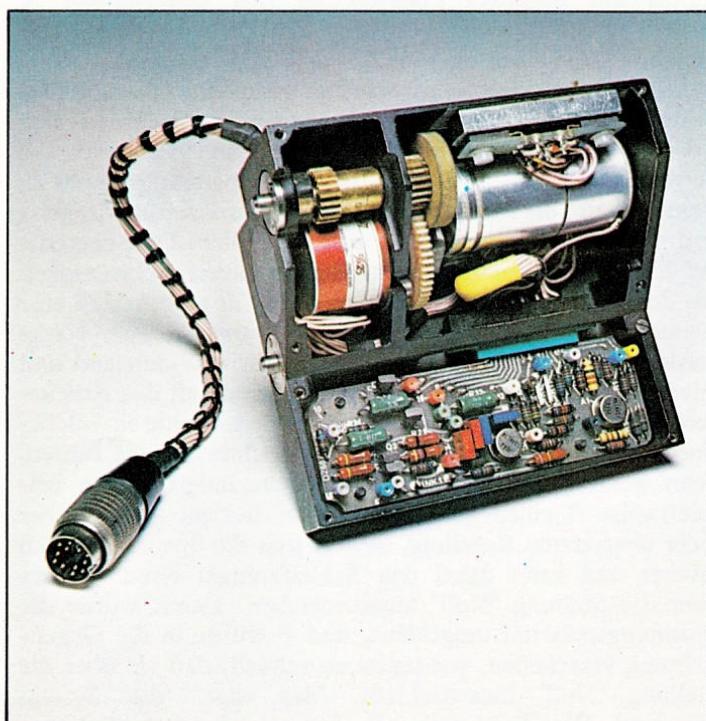
Im Wort 'Servoeinrichtung' oder 'Servosteuering' ist die lateinische Wortwurzel 'servus' (der Diener oder Sklave) enthalten. Und in der Tat handelt es sich dabei um Einrichtungen, die wie ein gehorsamer Sklave bestimmte Aufgaben erledigen, ohne daß der Herr sich dafür anzustrengen brauchte.

Servoeinrichtungen sind als geschlossene Regelkreise definiert (siehe RÜCKKOPPLUNG), bei denen eine kleine Eingangsgröße eine weit größere Ausgangsgröße in streng proportionaler Abhängigkeit steuert. Diese Steuerung kann mit Hilfe mechanischer, elektrischer, hydraulischer, pneumatischer und elektronischer Stelleinrichtungen (Stellglieder) geschehen — oder durch eine beliebige Kombination dieser Stelleinrichtungen. Im Prinzip erfolgt die Steuerung durch Vergleich des Sollwertes mit dem tatsächlich gegebenen Wert (Istwert), deren Differenzgröße (oder Abweichung) dann dazu dient, diesen Istwert dem Sollwert stärker anzunähern. In komplizierten automatischen Steuersystemen können zahlreiche verschiedene Servoeinrichtungen miteinander kombiniert werden, beispielsweise zur Steuerung von Atomreaktoren oder von chemischen Verarbeitungs- oder Veredelungsanlagen.

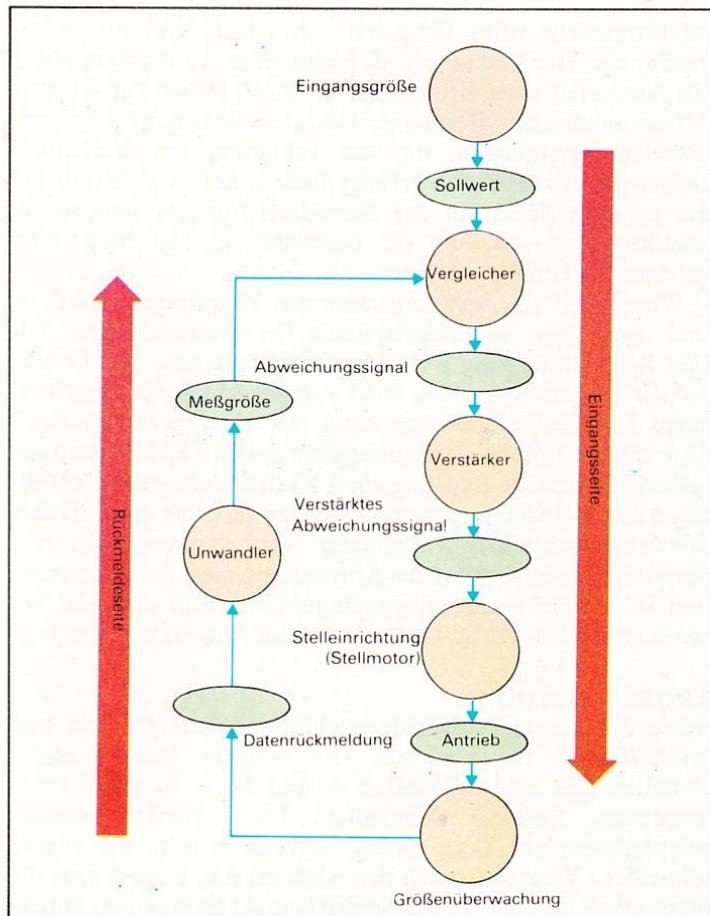
Die Theorie der Servoregelung ist inzwischen hochentwickelt. Einige Theoretiker erwägen sogar ihren Einsatz außerhalb der Technik auf dem Gebiet der Gesellschaftswissenschaften und der Wirtschaftswissenschaft. In diesem Artikel jedoch wollen wir uns ausschließlich mit der Anwendung bei physikalischen Systemen beschäftigen.

Geschichtlicher Hintergrund

In der Geschichte der Servoeinrichtungen handelt es sich weitgehend um Entwicklungen und Erfindungen zur Lösung



Oben: Vom Piloten betätigtes servounterstützte Rudereinrichtung. Der Wendezeigerkreisel gibt die Abweichung vom vor-gesehenen Kurs an.



Oben: Grundschema eines Folgeregelkreises mit Servoeinrichtung einschließlich Verstärker und Rückkopplung.

bestimmter technischer Aufgaben. So entwickelten Techniker Druck- oder Spannungsregler, als es wünschenswert schien, die Drehzahl von Dampfmaschinen automatisch konstant zu halten (d.h. zu regeln oder zu steuern). In der Chemie wiederum entstanden Einrichtungen zur Temperatursteuerung von Öfen und Prozeßabläufen. Die erste Regeleinrichtung wird James Watt (1736 bis 1819) zugeschrieben, der im Jahre 1775 einen Regler zur automatischen Drehzahlsteuerung von Dampfmaschinen erfand. Dabei waren zwei schwere Kugeln so an der Triebwelle der Maschine angebracht, daß sie sich mit zunehmender Drehzahl von ihr fort bewegten, wodurch eine mit ihnen verbundene Gleithülse auf der Welle verschoben wurde.

Eine Stange übertrug die Bewegung dieser Hülse zum Einlaßkanal für Frischdampf. Mit zunehmender Drehzahl verkleinerte die Hülse die Eintrittsöffnung und damit die Menge an einströmendem Frischdampf, wodurch die Drehzahl der Dampfmaschine herabgesetzt wurde. Dadurch rückten die Kugeln wieder näher an die Welle heran, verschoben die Hülse in die Gegenrichtung, es konnte mehr Dampf einströmen, d.h. die Drehzahl stieg wieder. Die Ausschläge der Kugeln und der Gleithülse wurden so lange immer kleiner, bis die Drehzahl konstant war.

Um solche und ähnliche Einrichtungen ging es bei der Servosteuerung bis etwa in die 30er Jahre unseres Jahrhunderts. Erst in vergleichsweise neuerer Zeit kam man auf den Gedanken, die einzelnen automatischen Regelsysteme könnten letztlich etwas Gemeinsames haben.

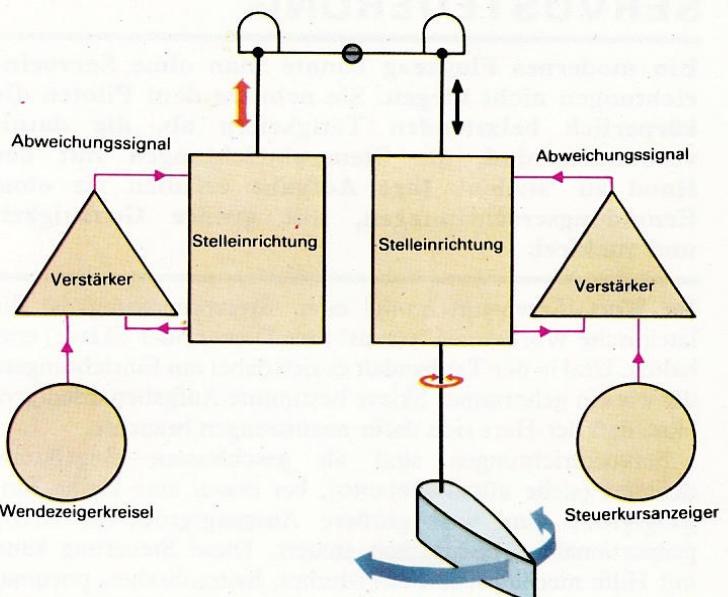
Den möglicherweise wichtigsten Beitrag zu einer grundlegenden Theorie über die Servoeinrichtungen lieferte dann die Elektronik. Die Theorie der elektrischen Verstärker und entsprechenden Schaltkreise entwickelte sich sehr rasch. Man führte das Prinzip der negativen Rückkopplung (Vor-

zeichenumkehr beim Vergleich von Regel- und Führungsgröße) ein. Die Erkenntnis, daß eine negative Rückkopplung ein Sonderfall einer Servoeinrichtung ist, führte zur Theorie der automatischen Regelung. Die gründlichen und weitreichenden Erwägungen, die zur Erklärung des Verhaltens elektrischer Schaltkreise geführt hatten, ließen sich nun auf das gesamte Spektrum der Servoeinrichtungen übertragen, unabhängig davon, ob sie pneumatisch, elektrisch oder mechanisch betätigt werden.

Wenn auch alle Servoeinrichtungen Regelsysteme sind, so sind doch nicht alle Regelsysteme Servoeinrichtungen. Für eine Servoeinrichtung gelten zwei Bedingungen: Die Größe, die die Steuerung auslöst, wird vom Ergebnis des Regelvorgangs beeinflußt, und man kann mit einer geringen Kraft über eine bestimmte Entfernung eine größere Kraft einwirken lassen. Die übliche Lenkung eines Kraftfahrzeuges z.B. erfüllt keine dieser Bedingungen und ist daher lediglich ein einfacher Steuermechanismus. Wesentliche Voraussetzung für eine Servoeinrichtung ist, daß die Abweichung zwischen Istzustand und Sollzustand einer Anlage ständig überwacht wird und daß etwas geschehen muß, wenn eine solche Abweichung vorliegt.

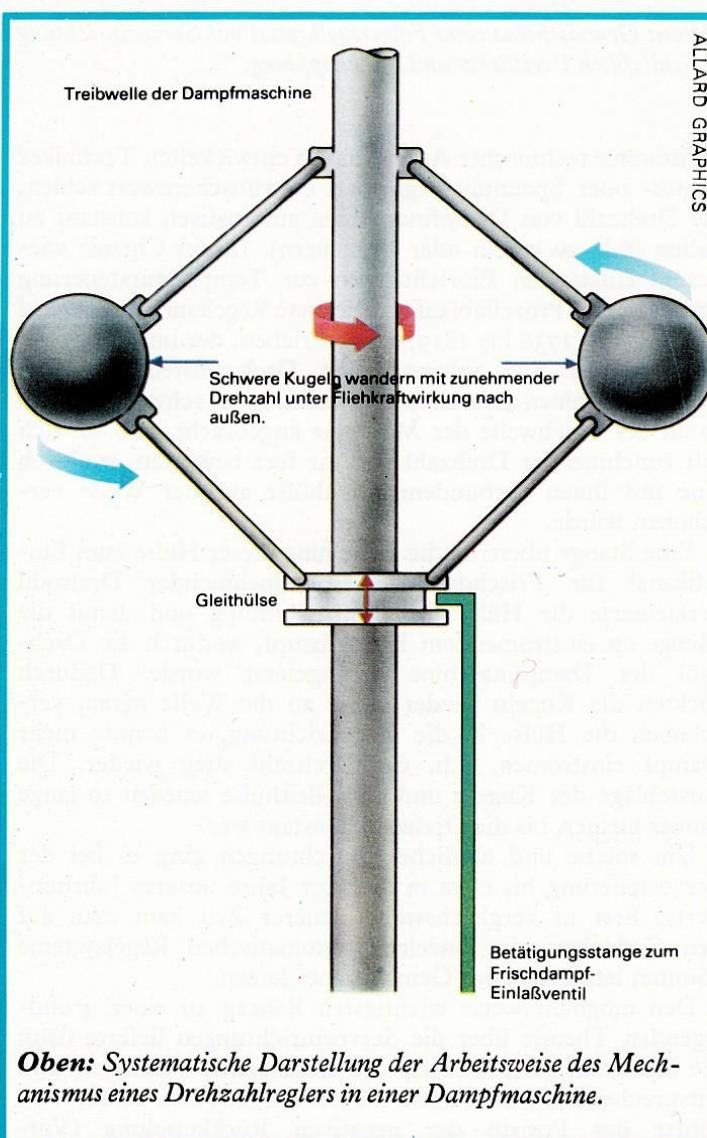
Lagesteuerung

Sehen wir uns eine Hybrideinrichtung mit elektrischen und mechanischen Bauteilen an. Die Aufgabe besteht darin, zwischen den beiden Punkten A und B (s. S. 1416) einen konstanten Abstand zu halten. Diese Punkte könnten beispielsweise die Lage zweier Sägeblätter sein, die Bleche schneiden. Vergrößert sich der Abstand AB, bewegt sich die Spanrolle P und mit ihr der Schleifkontakt nach unten. Sobald



Oben: Der Flugregler (Autopilot) stellt einen wirklichen Folgeregelkreis dar. Steuerkursanzeiger und Stelleinrichtung der Grundausführung der Servosteueraanlage ermitteln und korrigieren Abweichungen vom Sollkurs und ein Wendezeigerkreisel bestimmt die wahre Richtung.

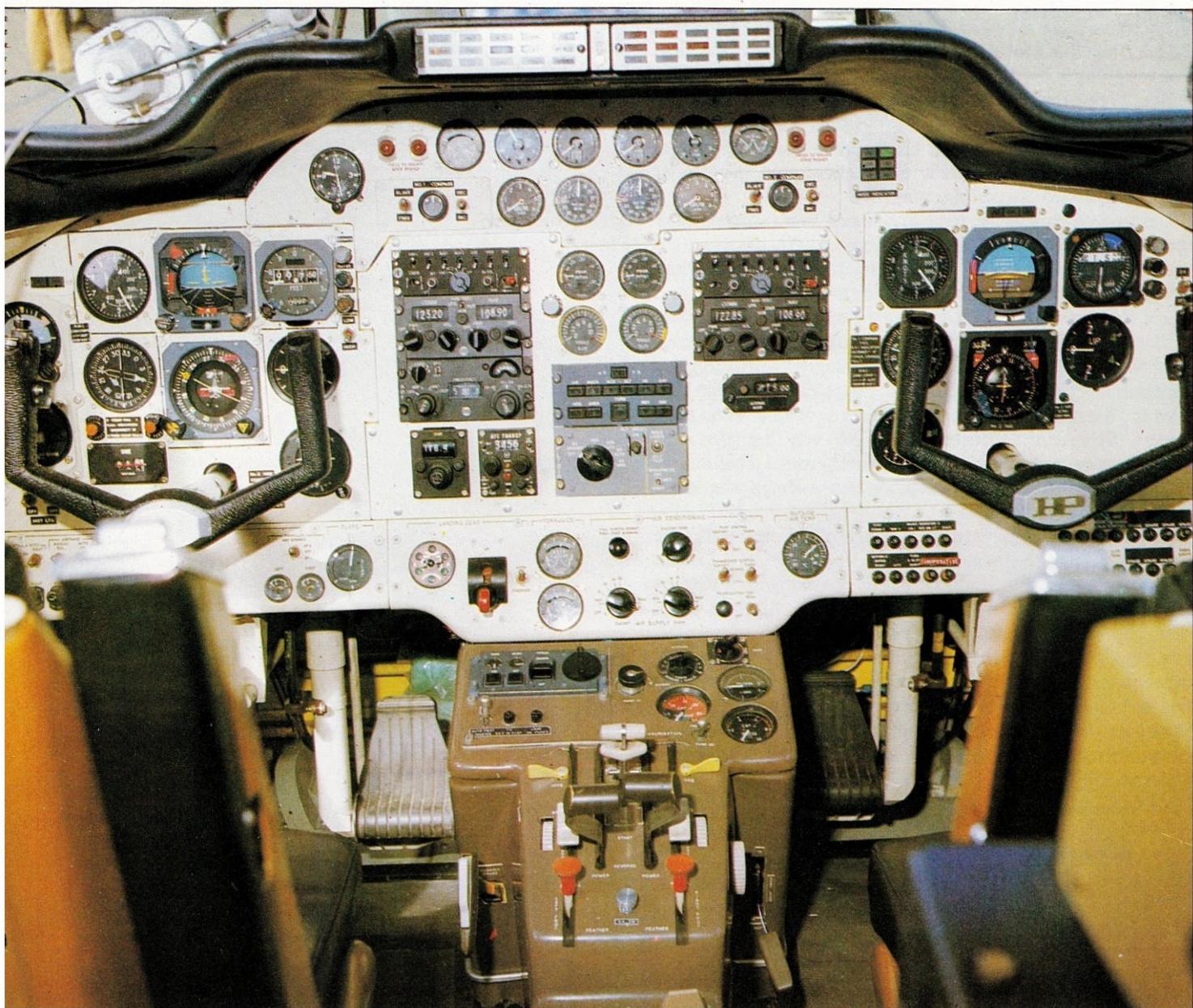
Rechts unten: Einweg-Stelleinrichtung (Stellmotor), wie sie bei der automatischen Flugzeugsteuerung Verwendung findet.



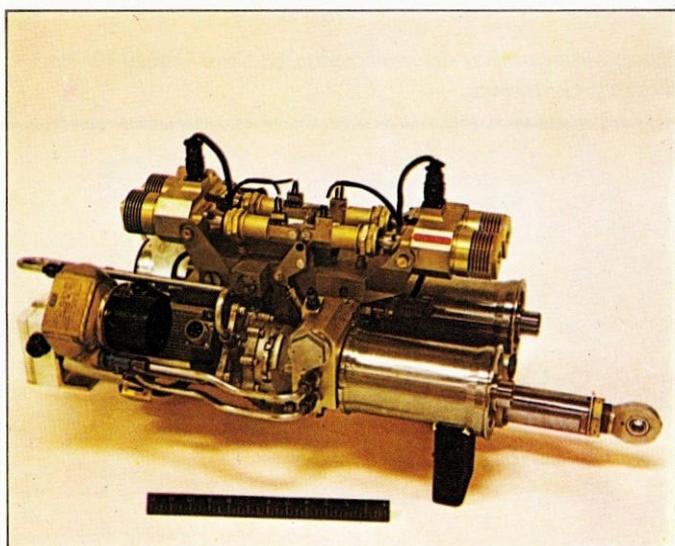
Oben: Systematische Darstellung der Arbeitsweise des Mechanismus eines Drehzahlreglers in einer Dampfmaschine.

dies geschieht, gibt der Schleifkontakt einen Spannungsimpuls positiver Polarität an den Elektromotor X, der über die Kraftübertragung Y die Zahnstange Z nach links verschiebt, bis die Spanrolle P und der Schleifkontakt wieder ihre ursprüngliche Lage einnehmen. Nun liegt am Motor eine Nullspannung an, er bleibt stehen. Der Abstand AB ist ebenso groß wie vor dem Auftreten der Störung. Vermindert sich der Abstand AB, bewegt sich die Spanrolle P nach oben und mit ihr der Schleifkontakt. In diesem Falle wird ein Spannungsimpuls mit negativer Polarität an den Elektromotor X geleitet, so daß nun die Zahnstange Z in die entgegengesetzte Richtung verschoben und der Abstand AB vergrößert wird.

Aus diesem einfachen Schema geht eine Anzahl von Faktoren hervor, die zu berücksichtigen sind. Ändert sich z.B. der Abstand AB nur geringfügig, kann der durch die Bewegung des Schleifkontakte bedingte Spannungsimpuls zu klein sein, um die Reibung im Motor, in der Kraftübertragung und die Trägheit der Massen zu überwinden. Dies begrenzt die Empfindlichkeit des Systems. Um dieser Schwierigkeit aus dem Wege zu gehen, könnte man dafür sorgen, daß eine kleine Abstandsänderung zwischen A und B eine starke Auslenkung von P hervorruft. Bei gleichem Widerstand und unverändertem Schleifkontakt würde man damit den Arbeitsbereich des Systems verkleinern. Außerdem könnte ein solches Vorgehen zum Pendeln oder zu Regelschwingungen führen, denn wenn P bei einer kleinen Lageveränderung von beispielsweise A einen größeren Weg zurücklegt als bei einer nicht übersetzten Regelung, bewegt sich die Spannrolle auch rascher und kann dabei den Schleifkontakt ohne weiteres über die Stellung 'Null' hinausschieben. Damit würde die Spannungspolarität umgekehrt, und P würde in die Gegenrichtung verschoben, wiederum so schnell, daß sie über die Stellung 'Null' hinausschiebt. Man sagt: 'das System schwingt'. Dies ließe sich z.B. dadurch abstellen, daß man den Widerstand im Verhältnis zur Lage des Schleifkontakte gestaltet. Ganz allgemein: Ein System ist umso anfälliger für Regelschwingungen, je empfindlicher es ist.



PHOTRI



Anwendungsgebiete

Folgeregelkreise und zugehörige Servoeinrichtungen finden sich in vielen Industriezweigen. Beispielsweise könnten moderne Flugzeuge ohne solche Einrichtungen nicht fliegen. Man stelle sich die Belastung eines Piloten vor, der einen bestimmten Kurs nach einer vorgegebenen Kompaßzahl fliegen muß und dem ständig ein Seitenwind von schwankend

Oben: Der Flugregler (Autopilot) SEP 10 hat den Kursanzeiger für den Piloten oben und das Schaltpult unten eingebaut.

kender Stärke das Leben schwer macht. Die körperliche Belastung, die darin liegt, über längere Zeit mit einem nur um wenige Grad gestellten Ruder fliegen zu müssen, wäre schon nach kurzer Zeit kaum erträglich. Eine Möglichkeit, dies abzustellen, besteht in der Verwendung von Stelleinrichtungen (Stell- oder Steuermotoren, z.B. kleine Linearmotoren).

Der Pilot schaltet, sobald er auf dem vorgegebenen Kurs ist, die aus einem Steuerkursanzeiger, einer Verstärkerseinrichtung, einem Steuermotor und einer Rückkopplungsschleife (Regelkreis) bestehende Servoeinrichtung ein. Von diesem Augenblick an nimmt der Steuercursanzeiger jede Abweichung des Flugzeugs vom eingegebenen Kurs wahr und stellt den Weg ein, den die Stelleinrichtung zur Korrektur dieses Zustands zurücklegen muß. Sie verkürzt oder verlängert das Steuergestänge zum Ruder, das in die der Abweichung entgegenwirkende Richtung einschlägt. Dieser 'Kurshalter' ist auf eine begrenzte Wirkung von beispielsweise fünf Grad Ruderausschlag programmiert und kann vom Piloten jederzeit durch Direkteingriff außer Funktion gesetzt ('übersteuert') werden. Alle Ruderflächen eines Flugzeugs lassen sich mit Stellmotoren verbinden, dennoch handelt es sich bei dieser

Einrichtung nicht um einen Automatischen Piloten (Autopilot, Flugregler), sondern lediglich um eine Hilfsanlage, die dem Flugzeugführer körperliche Belastungen erspart.

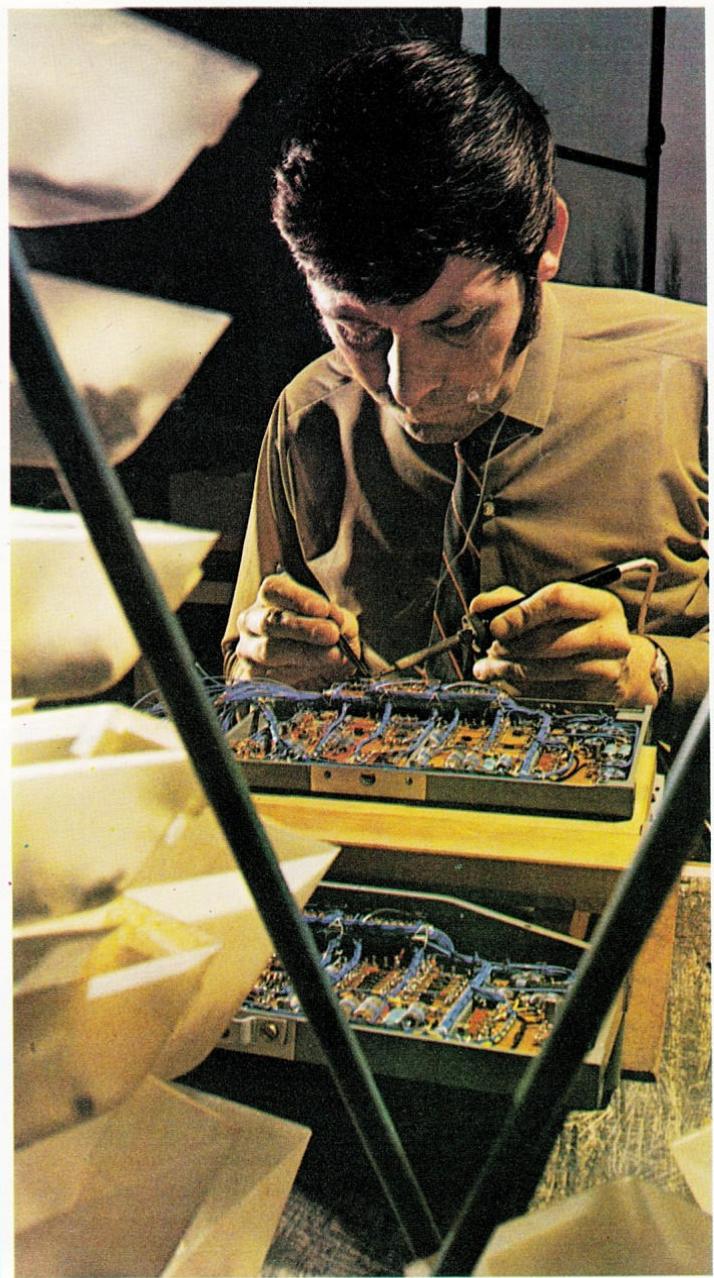
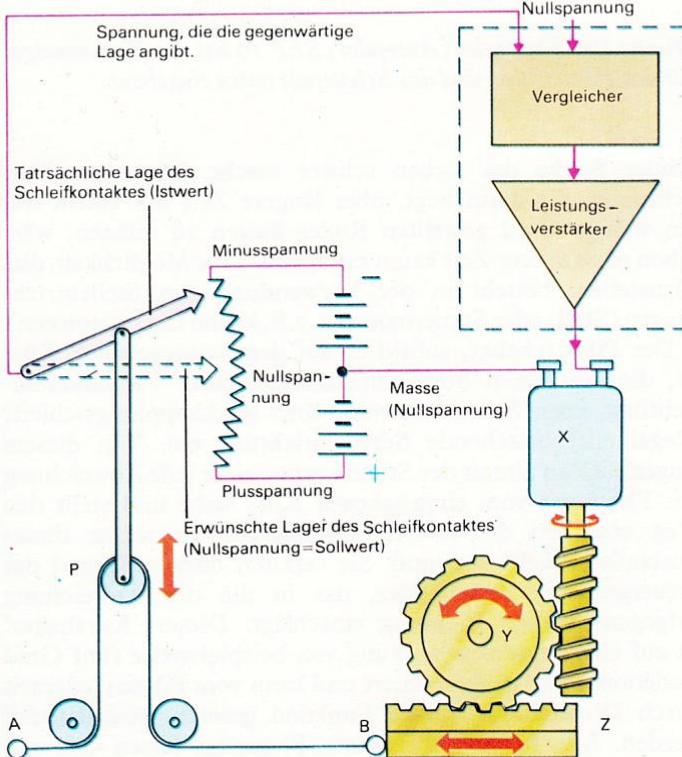
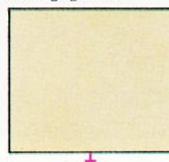
Ein Flugregler ist weit komplizierter. Er ist ein elektronisches Hilfsgerät zur selbsttätigen Steuerung eines Flugzeugs. Er überwacht die eingestellten Kurs- und Flugdaten und regelt automatisch die Stellmotoren der Ruder nach, sobald sich Steuerfehler ergeben.

Das erste Servosystem wird durch den Steuerkursanzeiger gemeinsam mit einem anderen Gerät gesteuert, das ebenfalls am Rudergestänge angreift und aus einem Wendeziegerkreisel, einem weiteren Stellmotor, einer Verstärkereinrichtung und einem Regelkreis besteht. Der zweite Stellmotor vermag weit größere Bewegungen auszuführen und in Reaktion auf Signale vom Wendeziegerkreisel Kursabweichungen vollständig zu korrigieren. Bei eingeschaltetem Flugregler braucht der Pilot die Maschine nicht selbst zu steuern, denn er kann auch weitere Steuereinrichtungen mit Hilfe von Signalen, die beispielsweise vom künstlichen Horizont, vom Höhenmesser und von anderen Flugüberwachungsinstrumenten abgenommen werden, betätigen.

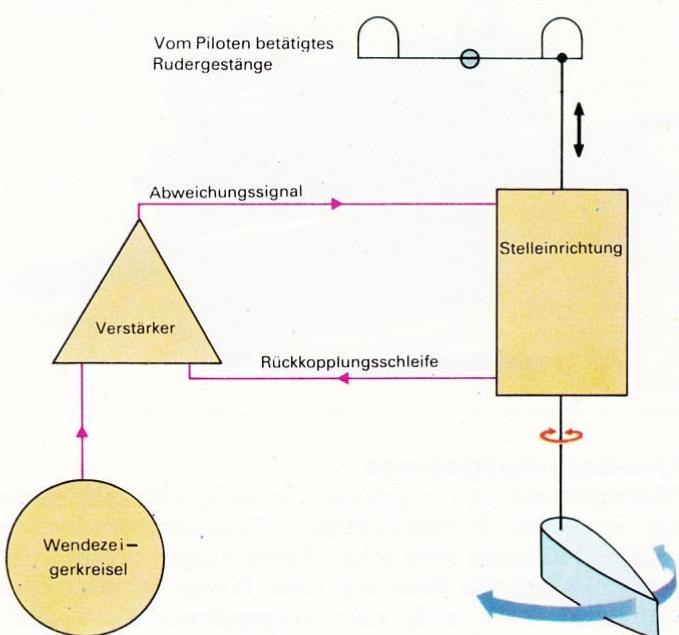
Es wurden hier nur wenige Beispiele für Folgeregelkreise und zugehörige Servoeinrichtungen beschrieben. Daraus müßte sich aber ein Einblick in die vielfältigen Aufgaben gewinnen lassen, die man mit solchen Einrichtungen lösen kann und die auf andere Weise kaum zu erfüllen wären. Die Fähigkeit, über eine gewisse Entfernung mit einem Mindestaufwand an Kraft und mit optimaler Reaktionsgeschwindigkeit und Genauigkeit Funktionen zu steuern, gestattet es dem Menschen der Gegenwart, eine nahezu unbegrenzte Fülle von komplizierten und verwickelten Verfahren oder Tätigkeiten sicher zu beherrschen.

*Folgeregelkreis zur Lagesteuerung.
Die Eingangsgröße ist der erwünschte
Abstand AB, der Soll- Spannungswert
ist Null. Das Abweichungssignal besteht
in der durch die Verschiebung des
Schleifkontaktes auftretenden Spannung.*

Erforderlicher Abstand AB wird durch Nullspannung wiedergegeben.



Oben: Zusammenbau einer elektronischen Steuereinheit für eine Flugzeug-Gasturbine.



SICHERUNGEN UND LEISTUNGSSCHALTER

Sicherungen und Leistungsschalter gehören zu den Bauteilen, die elektrische Schaltungen und ihre Umgebung vor Zerstörungen schützen sollen. Ohne sie können übermäßig ansteigende Spannungen und Ströme zum Ausbruch von Feuer, Explosionen oder sogar zur Tötung von Menschen durch elektrischen Strom führen.

Durch plötzlich anwachsende Spannungen und Ströme unterliegen die Bauteile elektrischer Schaltungen außerordentlich hohen Belastungen, die zur schlagartigen Zerstörung führen können. Um diese für Leben und Geräte gefährlichen Auswirkungen zu verhindern oder abzuschwächen, fügt man an ausgesuchten Stellen einer Schaltung Sicherungen oder Leistungsschalter ein. Sicherungen dienen dem Schutz kleinerer Industrie- und Haushaltsgeräte; Leistungsschalter werden hauptsächlich in großen Industrieanlagen eingesetzt; man findet sie als wichtigen Bestandteil in Kraftwerksschaltanlagen. Ähnlich geartete Bauteile sind die Miniaturleistungsschalter; sie erfüllen Schutz- und Kontrollfunktionen in Industrie- und Haushaltsgeräten geringerer Leistung.

Sicherungen

Eine Sicherung ist im wesentlichen nichts anderes als ein Stück Draht mit genau festgelegten Materialeigenschaften und für einen bestimmten Belastungsfall berechneten geometrischen Abmessungen. Übersteigt der hindurchfließende Strom einen vorausbestimmten Grenzwert, schmilzt der Draht, d.h. der Stromkreis wird unterbrochen.

Dieser Vorgang beruht auf dem Prinzip der Wärmewirkung eines stromdurchflossenen Leiters. Die vom Stromfluß erzeugte Wärme verhält sich nämlich proportional zum Quadrat des Stromes. Dies bedeutet: Bei einer Verdopplung des Stromes vervierfacht sich die Wärmewirkung.

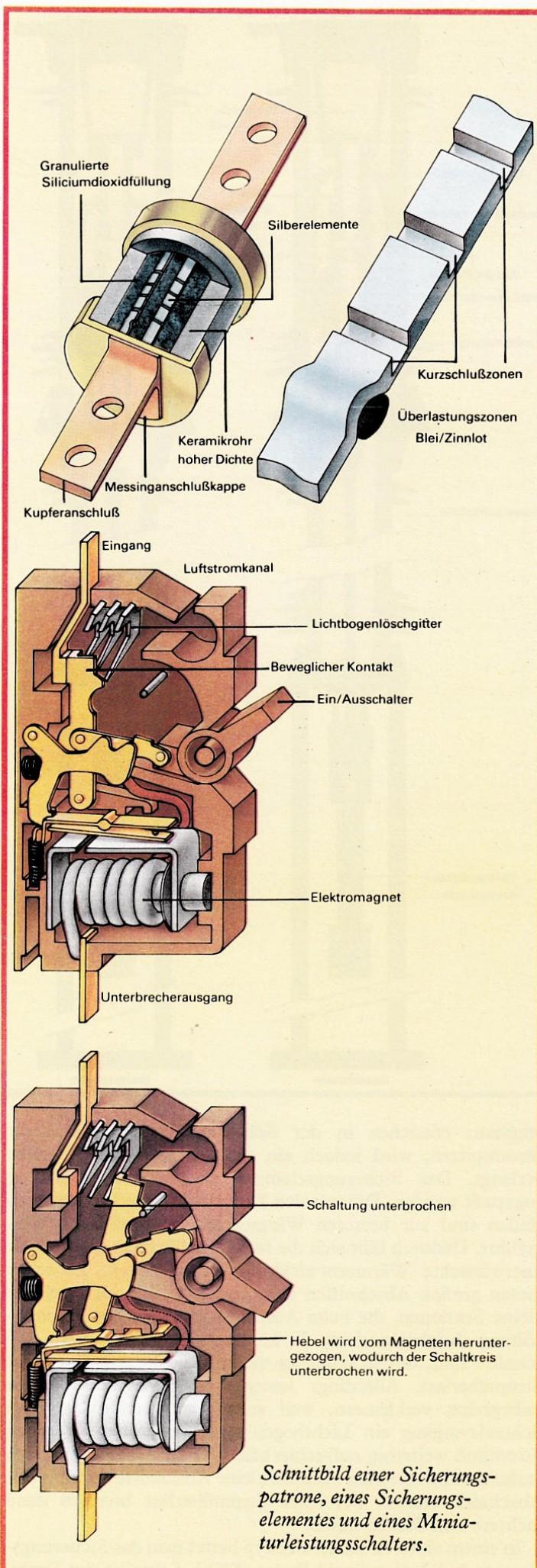
Im allgemeinen teilt man die Sicherungen nach dem maximal möglichen Strom ein, dem sie ständig ausgesetzt sein können, ohne daß ein Schmelzvorgang ausgelöst wird. Der Einbau einer bestimmten Sicherung zum Schutze einer Schaltung setzt daher sorgfältige Überlegungen zur Auswahl der richtigen Größe voraus.

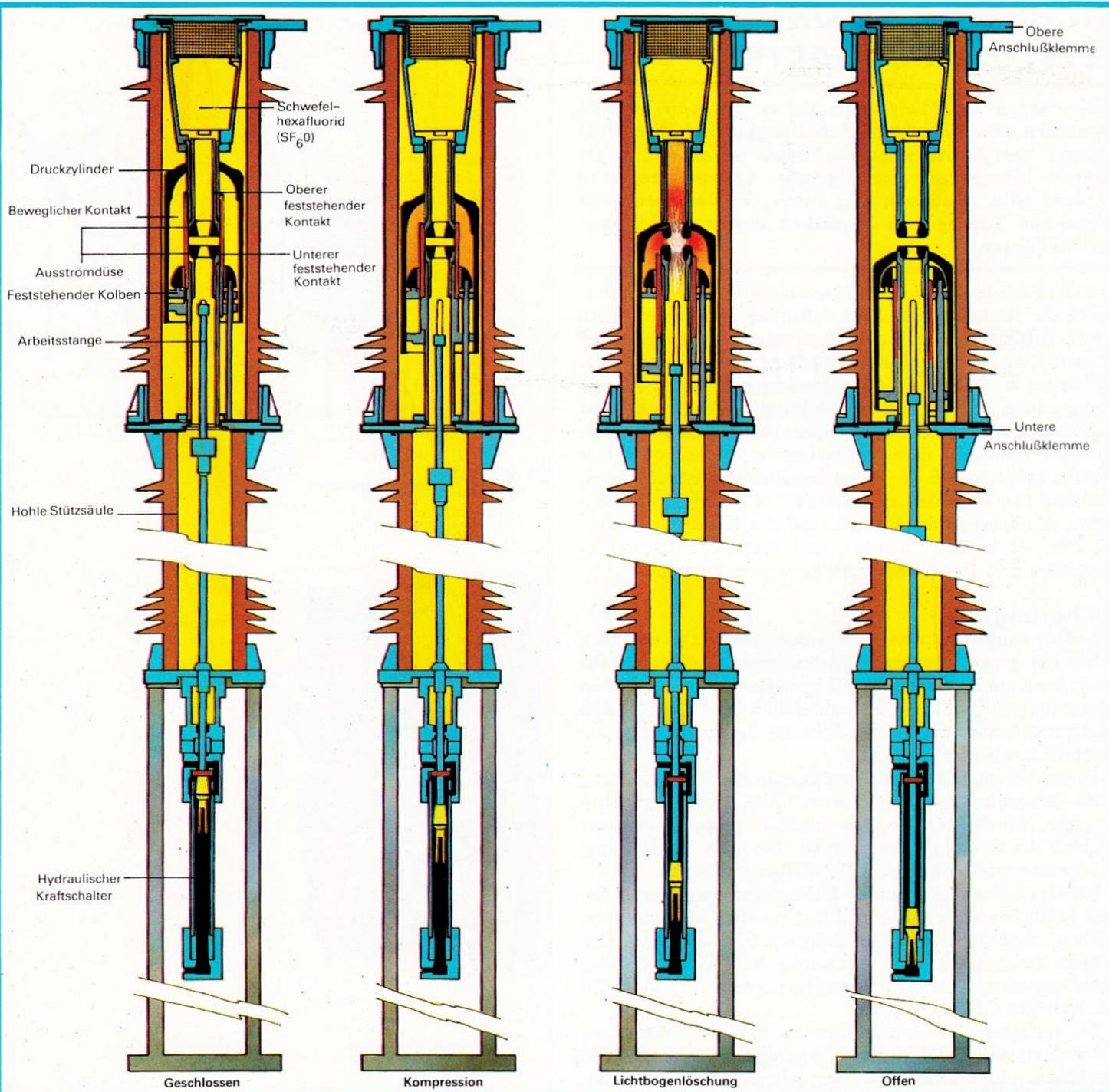
Die einfachsten Sicherungen können demnach Drähte sein, die man ersetzen kann, wenn sie durchgebrannt sind. Solche Drahtsicherungen können nur unter sehr allgemein gehaltenen Bedingungen ihre Schutzfunktion erfüllen. Hinzu kommen Schwierigkeiten beim Erneuern durchgebrannter Sicherungen. Denn das Drahtstückchen muß in die entsprechenden Anschlüsse eingefädelt werden, was neben handwerklichem Geschick auch einen möglichst dicken Draht voraussetzt, damit nicht schon während des Einfädelns Bruchstellen entstehen. An Bruchstellen treten unzulässige Querschnittsverjüngungen auf; als Folge würde der Draht schmelzen, obwohl sich der Strom noch in zulässigen Grenzen bewegt.

Sicherungspatronen

Die Sicherungspatrone stellt eine Lösung der erörterten Probleme dar, allerdings läßt sie sich nicht mehr selbst herstellen. Sie besteht aus einem hohlen, elektrisch nichtleitenden Glas- oder Porzellankörper, in dem das eigentliche Sicherungselement befestigt ist. An den Enden sind Metallanschlüsse angebracht, durch die der elektrische Kontakt zur Schaltung hergestellt wird.

Einfache Sicherungspatronen, wie man sie im Haushalt findet, bestehen aus blanken Drähten, den eigentlichen Sicherungselementen. Der Schmelzvorgang verläuft verhältnismäßig





langsam; entstehen in der Schaltung länger andauernde Stromspitzen, wird jedoch ein schlagartiges Durchbrennen verlangt. Das Sicherungselement muß dieser Forderung angepaßt werden. Die mit den Patronenkappen verbundenen Enden sind zur besseren Wärmeableitung großflächig ausgeführt. Dadurch läßt sich die im Normalbetrieb entstehende unerwünschte Wärmeentwicklung gering halten. Zwischen diesen großen Abschnitten befinden sich eine oder mehrere kleine Sektionen, die beim Auftreten einer starken Stromerhöhung durchschmelzen. Je kleiner und kürzer diese Abschnitte sind, um so schneller verläuft die Reaktion auf eine Stromüberlast. Allerdings lassen sich diese Zonen nicht unbegrenzt verkleinern, weil sonst im Anschluß an den Schmelzvorgang ein Lichtbogen entstehen würde, der den Stromfluß weiterhin aufrechterhält. Der Lichtbogen läßt sich verhindern, wenn man mehrere kleine Abschnitte durch große Abschnitte trennt. Bei einer Stromüberlast brennen dann mehrere Abschnitte durch.

In einem anderen Sicherungstypbettet man das Sicherungselement in Siliciumdioxid-Puder (SiO_2). Schmilzt der Draht,

entstehen Metalldämpfe, die eine Lichtbogenbildung verhindern. Die bei diesem Vorgang entstehende Wärme erzwingt eine chemische Reaktion zwischen dem Puder und dem Metalldampf, in deren Verlauf sich beide miteinander verbinden und eine Substanz bilden, die sich wie ein elektrischer Isolator verhält. In Isoliermaterialien kann sich kein Lichtbogen ausbilden.

Leistungsschalter

Einen großen Raum nimmt in der Theorie der Schaltkreisunterbrechung das Löschen des elektrisch sehr gut leitenden Lichtbogens ein, der während des Trennvorganges der Schaltkontakte des Leistungsschalters entsteht. Dies ist von Bedeutung, weil der Stromkreis über den Lichtbogen trotz geöffneter Kontakte weiterhin geschlossen bleibt und die Oberflächen der Kontakte wegen des Lichtbogens allmählich zerstört werden.

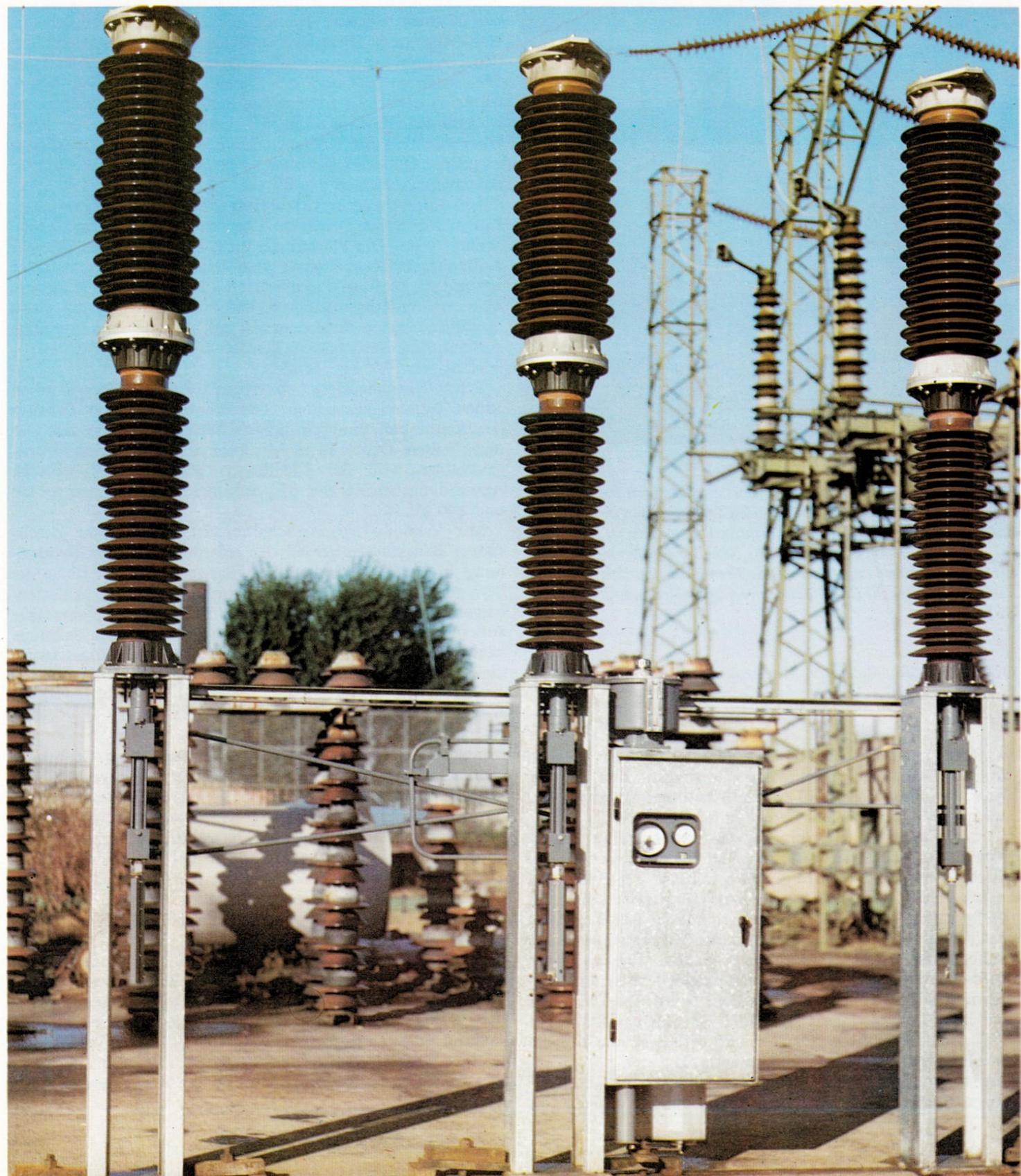
Man findet überwiegend mit Wechselstrom betriebene Leistungsschalter. Der Grund ist einfach: Zur allgemeinen Stromversorgung dient ein gut ausgebautes Wechselstromnetz.

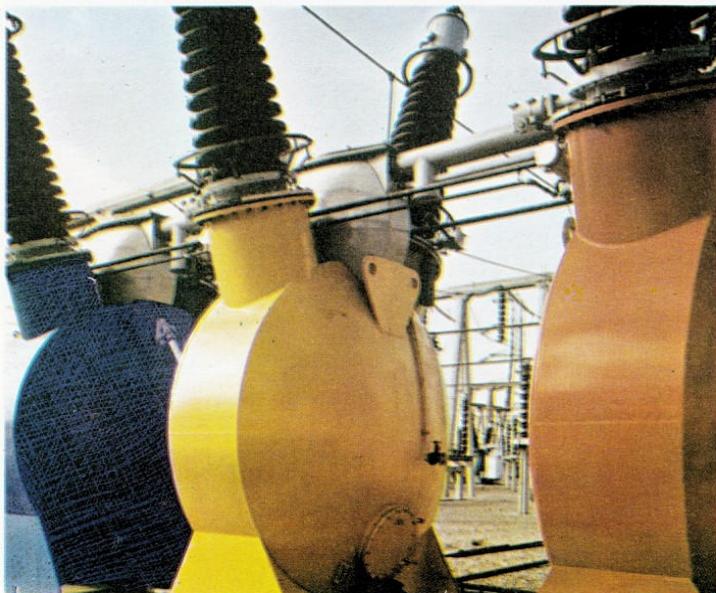
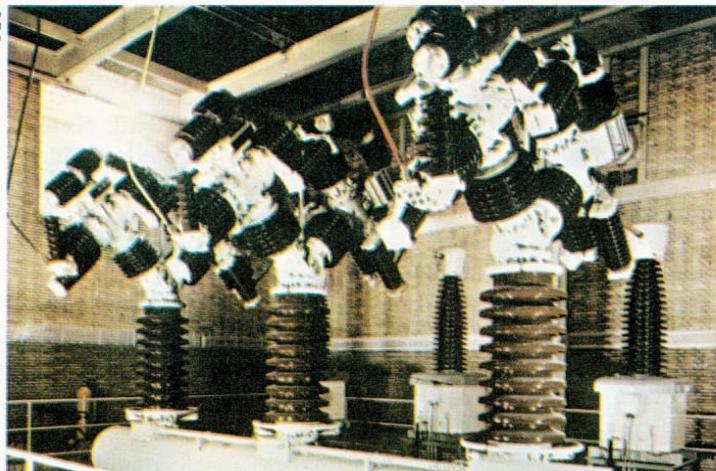
Links: Vier Stadien des Öffnungsvorganges eines Kontaktunterbrechers in einem 145 kV-SF₆-Leistungsschalter. Beim Beginn des Öffnungsvorganges bewegt sich der Druckzylinder zusammen mit der Kontakteinheit auf den feststehenden Kolben zu. Sie werden von der Arbeitsstange bewegt, die sie mit dem hydraulischen Kraftschalter verbindet. Das SF₆-Gas im Zylinder wird komprimiert. Wenn die Verbindung zwischen dem beweglichen und dem am Oberteil feststehenden Kontakt gelöst wird, entweicht das Gas durch die Ausströmdüsen. Der Druck des komprimierten Gases zerreißt den Lichtbogen.

Unten: Drei Kontaktunterbrecher (je Phase einer) eines 145 kV 2500-A-SF₆ Leistungsschalters.

Bei diesen Leistungsschaltern nutzt man den zweifachen Nulldurchgang während einer Wechselstromperiode. Die Netzfrequenz beträgt 50 Hz. Dies bedeutet, daß innerhalb einer Sekunde der Strom 100 mal auf den Wert Null absinkt. Damit würde auch ein Lichtbogen an diesen Stellen oder in der Nähe des Nulldurchganges abreissen. Man erhält aber nur dann eine vollständige Unterbrechung des Schaltkreises, wenn der Widerstand des abreißenden Lichtbogens groß genug ist und verhindert, daß sich durch die Spannung über den Kontakten ein neuer Stromfluß aufbaut.

Die Störung, die das Ansprechen des Leistungsschalters auslöst, wird durch Schutzrelais aufgespürt. Schutzrelais reagieren außerordentlich schnell auf Störungseinflüsse, in





Ganz oben: Ein Leistungsschalter, bei dem der Lichtbogen mit Druckluft gelöscht wird. Er ist in einem 150 kV-Netz in Rotterdam in den Niederlanden installiert. Das Netz ist für Ströme bis zu 4000 A ausgelegt. Die Schalter werden mechanisch mit Glasfaserstäben angetrieben. Die Trenngeschwindigkeit der Kontakte ermöglicht Schaltzeiten von nur zweieinhalb Perioden bei 50 Hz.

Oben: Ein Kesselölschalter. Man ersetzt ihn neuerdings durch Druckluftschalter.

der Regel innerhalb einer halben Periode des Netzwechselstromes. Daraufhin spricht der Leistungsschalter an. In Hochspannungsnetzen muß er den Schaltkreis innerhalb von zwei bis drei Perioden unterbrochen haben.

Die Geschwindigkeit, mit der eine vollständige Unterbrechung der Schaltkreise erfolgt, hängt von der Geschwindigkeit ab, in der die Kontakte getrennt werden. Weiterhin sind die Anzahl der Kontaktpaare, die Beziehung zwischen Strom und Spannung (die wiederum von der Art der Last bestimmt wird, für die die Stromversorgung dient) und die angewendete Methode der Lichtbogenlöschung wichtig. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal der Leistungsschalter ist das Verfahren, mit dem der Lichtbogen gelöscht wird. Die Löschung kann über Luft, Öl, Druckluft und Schwefelhexafluoridgas (SF_6) erfolgen. Manche Schalter sind so aufgebaut, daß die Unterbrecherkontakte im Vakuum arbeiten.

Leistungsschalter mit einer Luftprennstrecke besitzen horizontal angebrachte Kontakte, deren schnelles Öffnen von

einer vorgespannten Feder unterstützt wird. Der sich über den öffnenden Kontakten ausbildende Lichtbogen wird gezwungen, sich in einer Löschkammer auszudehnen. Dadurch vergrößert sich seine Länge, bis er von der Spannung über den Kontakten nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Der Lichtbogen läßt sich durch magnetische Felder beeinflussen. Bei einigen Schalttypen erzeugt man daher mit Elektromagneten ein magnetisches Feld, das so gerichtet ist, daß der Lichtbogen in die Löschkammer abgelenkt wird. Leistungsschalter dieser Art findet man in Anlagen mit Spannungen, die von 400 V bis 3,3 kV reichen.

Bei Ölleistungsschaltern wird das Öl als Hilfsmittel zur Bogentöschung und als Isolierflüssigkeit verwendet. Die Kontakte liegen in einer kleinen ölfüllten Wanne. Während der Kontakt trennung erzeugt der entstehende Lichtbogen eine derart große Hitze, daß im Öl ein Durchschlag stattfindet; dabei werden Gase unter hohen Drücken frei. Durchläuft der Wechselstrom während der Periode einen Nulldurchgang, füllt sich der im Öl entstandene Pfad wieder auf. Wegen der isolierenden Eigenschaften des verwendeten Öls ist keine Überbrückung der Kontakte durch einen neuen Lichtbogen möglich. Ölleistungsschalter setzt man bei Spannungen zwischen 3,3 kV und 330 kV ein.

Leistungsschalter mit Druckluft arbeiten mit komprimierter Luft, deren hoher Druck zur Löschung des Lichtbogens ausgenutzt wird. Die Blasluft zerreißt den Lichtbogen in einer dafür ausgebildeten Kammer und verhindert gleichzeitig seine erneute Ausbildung durch schnelle Trennung der Kontakte. Man erreicht dann eine beschleunigte Kontakt trennung, wenn man die bewegten Teile klein hält und aus leichten Materialien aufbaut. Eingesetzt werden Schalter dieser Art im Spannungsbereich von 1 kV bis 750 kV.

Schwefelhexafluorid ist ein trüger Gas mit außerordentlich hohen Isolereigenschaften. Die Kontakte solcher Schalter liegen innerhalb eines gasdichten Behälters, in dem das Gas unter hohem Druck steht. Mit zwei sich kreuzenden Druckgasstrahlen wird der Lichtbogen gelöscht. Der typische Anwendungsbereich der SF_6 -Schalter liegt zwischen 33 kV und 400 kV.

Mit Vakuum-Leistungsschaltern ist eine Anzahl gleichartiger Baugruppen gemäß der erforderlichen Betriebsspannung in Reihe geschaltet. Die Basisbaugruppe enthält die bewegten Kontakte, die sich im Inneren einer hochvakuierten, balgartigen Kammer befinden. Ihre Trennung wird von einer äußeren Kraft bewirkt, die am Balg liegt. Wegen des Vakuums kann kein wirklicher Lichtbogen entstehen. Leistungsschalter dieser Art lassen sich bei Spannungen von 11 kV bis 132 kV einsetzen.

Miniaturlistungsschalter

Miniaturlistungsschalter werden vorwiegend zur Kontrolle kleiner Industriemotoren und Haushaltsgeräte eingesetzt. Das Wechselstromversorgungsnetz liefert selten rein sinusförmige Größen; 'Spitzen' und andere harmlose kurzzeitige Überlastvorgänge treten häufig auf. Die Miniaturlistungsschalter müssen so beschaffen sein, daß sie auf diese kurzzeitigen Überlasten nicht reagieren. Geringe, aber ständig anstehende Überlasten jedoch müssen den Schalter auslösen. Ein übermäßiger Stromanstieg — wie er im Kurzschlußfall auftritt — soll ihn unverzüglich ansprechen lassen.

Um die Ansprechempfindlichkeit bei kurzzeitigen Überlasten zu verringern, kann man zur Zeitverzögerung ein Bauteil in die Schaltung einfügen. Eine Zeitverzögerung läßt sich mit Bimetallstreifen erreichen, die auf kleine, aber dauernd anliegende Überlasten empfindlich reagieren. Eine schnelle Reaktion auf große Überstromstöße erhält man mit Elektromagneten, die zur Trennung der Kontakte eingebaut werden.

SILBER

Silber ist nicht nur ein seltenes und schönes Metall, sondern es wird auch wegen seiner Verwendungsmöglichkeiten in der Industrie geschätzt.

Silber ist von allen Metallen das weißeste. Auf diese Eigenschaft sowie auf sein besonders großes Reflexionsvermögen ist sein lateinischer Name Argentum zurückzuführen, der 'licht und glänzend' bedeutet. Das chemische Zeichen für Silber (Ag) ist eine Abkürzung des lateinischen Namens.

Da Silber nicht leicht oxidiert, kann man es im gediegenen Zustand finden, d.h. eher in metallischer Form als in Form einer Verbindung. Man kann daher annehmen, daß es eines der ersten Metalle war, das der Mensch entdeckt und verwendet hat. Es wurde in Gräbern gefunden, die aus der Zeit um 4000 v. Chr. stammen.

Vorkommen und Gewinnung

Die Menge des Silbers, das im gediegenen Zustand gewonnen wird, ist kommerziell unbedeutend. Der größte Teil des Metalls wird als ein Nebenprodukt bei der Gewinnung und Reinigung von Kupfer, Nickel und Blei gewonnen, obwohl auch Erze, die das Mineral Argentit (Silbersulfid, Ag₂S) enthalten, immer noch abgebaut werden.

Der erste bedeutende Schritt in der Entwicklung von Methoden zur Gewinnung von Silber aus seinen Erzen wurde bald nach Erschließung der mexikanischen Silberminen durch die Spanier im frühen 16. Jahrhundert unternommen. Sie entwickelten das Patio-Verfahren, ein primitives Amalgamierungsverfahren, das in einem gepflasterten Hof durchgeführt wurde. Es bestand aus dem Vermischen von pulverisiertem Erz, Kochsalz (NaCl) und geröstetem Kupfer-

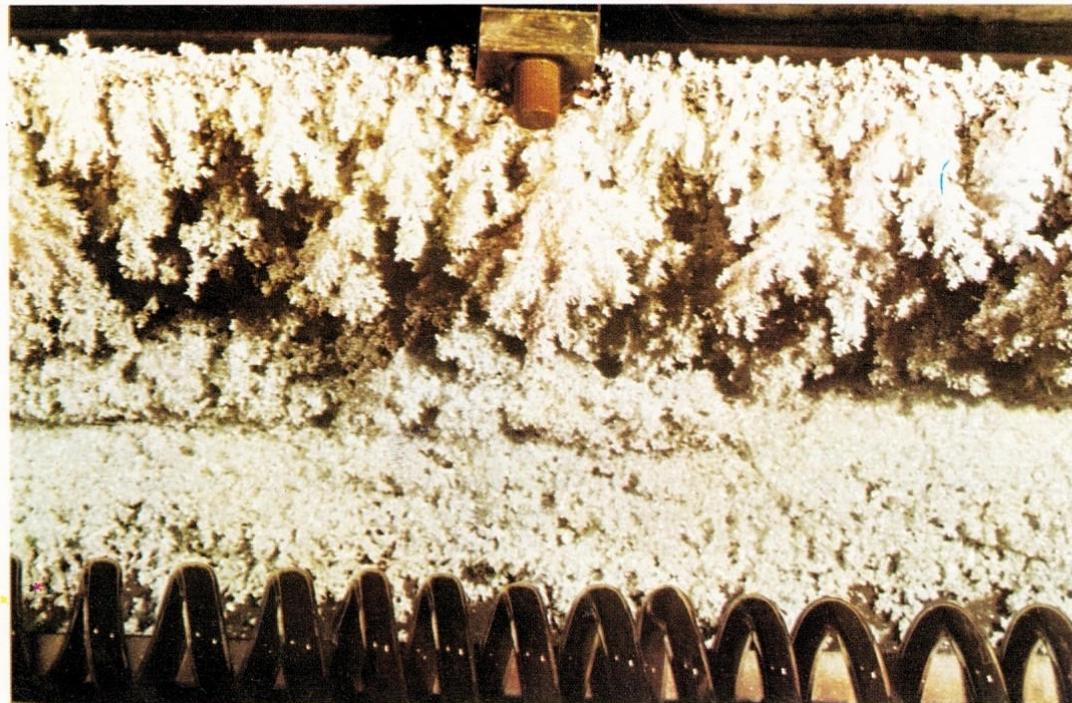
sulfid (CuS) mit Wasser sowie dem Verteilen des so entstandenen Schlammes auf dem Hof. Das Salz und das Kuperoxid erzeugten Kupferchloride, die unter Bildung von Silberchlorid (AgCl) mit dem Silbersulfid reagierten. Das Silberchlorid wurde dann durch Hinzufügen von Quecksilber zu dem Metall reduziert, wobei das Quecksilber auch dazu diente, das Silber als ein Amalgam (Lösung von Metall in Quecksilber) 'aufzunehmen'. Das Verfahren war nicht besonders wirksam, und die Quecksilberverluste waren außerordentlich hoch — es wurde tatsächlich gesagt, daß man eine Quecksilbermine brauchte, um ein Silberbergwerk betreiben zu können. Das Patio-Verfahren wurde in einigen Gebieten bis zum Beginn dieses Jahrhunderts angewendet, obwohl es im allgemeinen durch wirksamere Methoden ersetzt worden war, wie z.B. durch das von-Patera-Verfahren. Dabei wird Silberchlorid durch Erhitzen des Erzes mit 7% Steinsalz hergestellt und dann mit Natriumhyposulfitlösung (eine ähnliche Reaktion wie die zum 'Fixieren' von fotografischem Material) herausgelöst.

Die Methode zur Gewinnung von Silber durch Zyanidlauge, die zumeist das von-Patera-Verfahren ersetzt hat, ist im wesentlichen die gleiche wie die zur Gewinnung von Gold. Das Silbererz wird durch eine verdünnte Lösung aus Natriumzyanid unter Zufuhr von Luft gelöst, die Lösung wird gefiltert und das Metall durch den Zusatz von Zinkstaub wieder ausgefällt.

Der größte Teil der Grundmetalle, wie beispielsweise Kupfer und Nickel, die durch Elektrolytverfahren gereinigt werden (siehe ELEKTROLYSE), enthalten Silber als Verun-

Unten: Rohsilberblöcke verschiedener Größe und verschiedenen Gewichts werden gewogen.





BASF

reinigung. Im allgemeinen ist Silber in dem Elektrolyten nicht löslich und stellt, zusammen mit Gold, Platin und anderen Edelmetallen, einen Bestandteil des Anodenschlamms dar. Der gesammelte Schlamm wird den Prozessen des Röstens, Auslaugens und Schmelzens unterworfen, um so viel wie möglich von dem Grundmetall, das nun die Verunreinigung darstellt, zu entfernen. Er wird dann in Anodenblöcke gegossen; das im Schlamm vorhandene Silber wird in einem Bad aus Silbernitratlösung auf den Katoden, die entweder aus Kohlenstoff oder reinem Silber bestehen, elektrolytisch abgeschieden. Das auf diese Weise hergestellte Silber ist feiner als 999 (Reinheit von 99,9%). Die anderen Edelmetalle werden in einem weiteren Anodenschlamm gesammelt.

Bleierze sind eine wichtige Silberquelle. Das Silber wird nach einem Verfahren, das als Parkes-Verfahren bekannt ist, durch Flüssigphasenverteilung in das geschmolzene Zink aus dem geschmolzenen Rohblei entfernt.

Eigenschaften und Verwendung

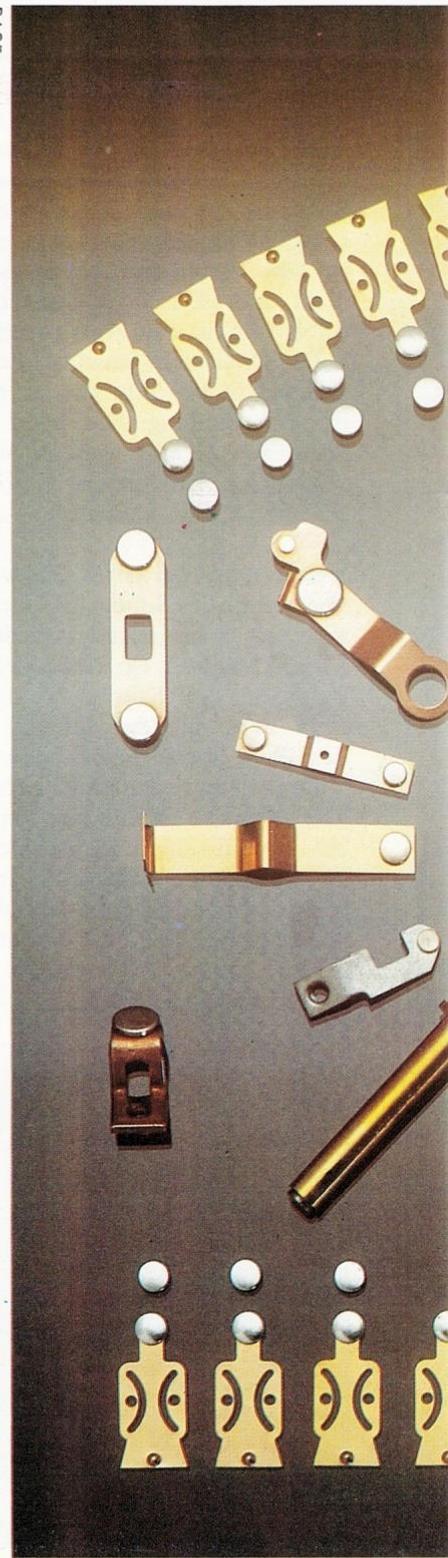
Silber ist einzigartig, da es nicht nur die größte Wärmeleitfähigkeit aller Metalle aufweist, sondern auch der beste elektrische Leiter ist. Seine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit (34% besser als Kupfer) ist jedem bekannt, der mit einem Löffel aus massivem Silber heißen Tee in einer Tasse umgerührt hat. Da es der beste Stromleiter ist (jedoch nur 5% besser als Kupfer), empfiehlt sich seine Verwendung bei besonderen Gegebenheiten, wie z.B. zum Umhüllen von Leitungen, die Hochfrequenzströme führen, die nur in den Oberflächenschichten fließen. Seine Verwendung für elektrische Kontakte ist nicht so sehr auf seine große Leitfähigkeit zurückzuführen, sondern eher auf die Eigenschaften der dünnen Schichten aus Oxiden und Sulfiden, die sich auf seiner Oberfläche bilden. Diese Schichten können verhindern, daß die Kontakte zusammenkleben; sie sind jedoch so dünn, daß sie nur einen geringfügigen Widerstand aufweisen.

Durch seinen leuchtenden Glanz ist Silber bei Menschen aller Altersgruppen beliebt. Massives Silber, wie es für Eßbestecke und Schmuck verwendet wird, ist niemals vollkommen rein, da es zu weich wäre. Es wird gewöhnlich mit 5% Kupfer gemischt, was die als Sterlingsilber bekannte Legierung ergibt. Bei Schmuckgegenständen kann der Kupfergehalt bis zu 20% betragen. Grundmetalle können mit Silber galvanisiert werden, wie es zum Beispiel bei EPNS-Artikeln (galvanisiertes Neusilber) der Fall ist, wobei eine

Oben: Ein Katalysator aus Silber auf Asbestosgrundlage. Er wird verwendet, um die Oxidation von Methanol zur Bildung von Formaldehyd, einem wichtigen Rohmaterial der Industrie, zu beschleunigen.

Rechts: Teile verschiedener Kontaktsets aus Silberknopfkontakte, die auf eine Kupferlegierung aufgeschweißt worden sind. Die Silberknopfkontakte werden hierbei verwendet, weil Silber besonders gute Leitungseigenschaften hat.

Rechts unten: Dispersion einer silberhaltigen Paste auf Harzgrundlage. Sie dient zur Herstellung von elektrisch leitenden Aufstrichmitteln. Mit einem solchen Aufstrichmittel lassen sich sehr leicht Schaltungssysteme herstellen.



Legierung aus Kupfer und Nickel, die Neusilber genannt wird, mit einer dünnen Schicht Silber galvanisiert wird. Vor dem Aufkommen der Galvanotechnik im Jahre 1840 wurde ein anderes Galvanisierverfahren angewendet. Es wurde ein Kupferblock erhitzt und zwischen zwei Silberplatten zusammengepreßt, so daß sich zwei Druckverschweißungen bildeten. Das gesamte Schichtelement konnte dann im Walzverfahren in jede gewünschte Dicke gebracht werden. Dieses Produkt ist als Sheffield-Platte — versilberte Metallplatte aus Sheffield — bekannt.

Silber läuft durch die Bildung einer dünnen Oberflächenschicht aus Silbersulfid an, da das Metall mit geringen Mengen von Schwefelverunreinigungen aus der Luft reagiert. Der Beschlag kann mit einem geeigneten Metallpoliermittel, durch ein Elektrolytverfahren oder durch Eintauchen des Gegenstandes in eine verdünnte Lösung aus Zinnchlorid entfernt



werden. Andererseits kann der Beschlag vermieden werden, indem das Silber dünn mit Rhodium (siehe PLATINMETALLE) galvanisiert wird.

Ein weiteres Anwendungsgebiet, bei dem das große Reflexionsvermögen des Silbers ausgenutzt wird, ist das Verspiegeln. Die zu behandelnde Oberfläche wird in eine Mischlösung aus Silbernitrat (AgNO_3) und Ammoniumhydroxid (NH_4OH) eingetaucht, und das Silber wird durch Zusatz eines geeigneten Reduktionsmittels auf das Glas ausgefällt.

Es war Tradition, Silber für das Prägen von Münzen zu verwenden. Allerdings wird dieses Metall heute in keinem größeren Land mehr für die Herstellung von 'Silber'-Münzen eingesetzt. Neuere 'Silber'-Münzen bestehen aus einer Legierung von Kupfer und Nickel.

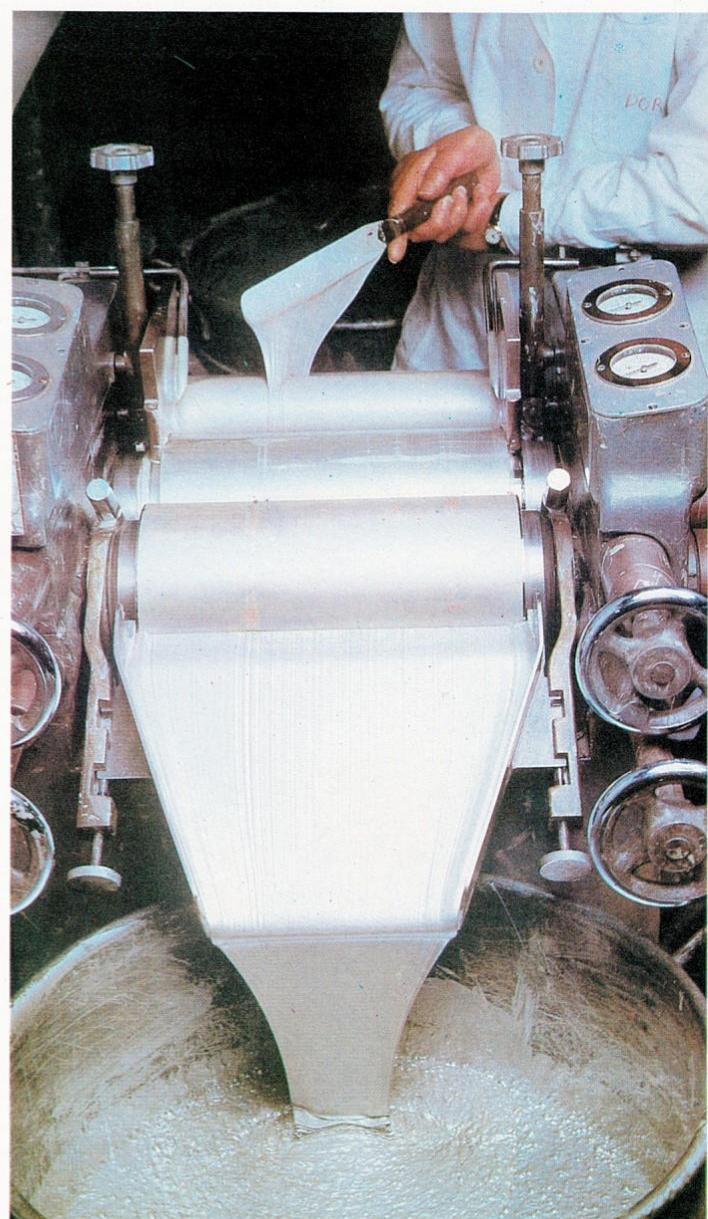
Silberlot ist eine Legierung aus 30% Kupfer und 10% Zink in Silber. Es hat (für ein Lötmittel) einen hohen Schmelzpunkt

von 770°C und weist eine beträchtliche Festigkeit auf. Es wird bei der Herstellung von Apparaten und Instrumenten hoher Qualität und in der Schmuckindustrie verwendet.

Fotografie

Der bedeutendste Nutzer von Silberverbindungen ist die Fotoindustrie, die jährlich Tausende von Tonnen Chlorsalze und Bromsalze (AgCl und AgBr) verwendet. Ein fotografisches Bild setzt sich aus zahllosen, winzig kleinen Silberkristallen zusammen. Diese werden während der Entwicklung von dem Halogensalz ausgefällt, und zwar in einem Ausmaß, das von der Menge des Lichtes abhängt, dem das Salz zuvor ausgesetzt war. Die Entwicklung ist eine Reduktionsreaktion (siehe OXIDATION UND REDUKTION), bei der die Silberionen in dem Silberbromid zu metallischem Silber reduziert werden, wobei Hydrochinon als Reduktionsmittel (Entwicklersubstanz) verwendet wird.

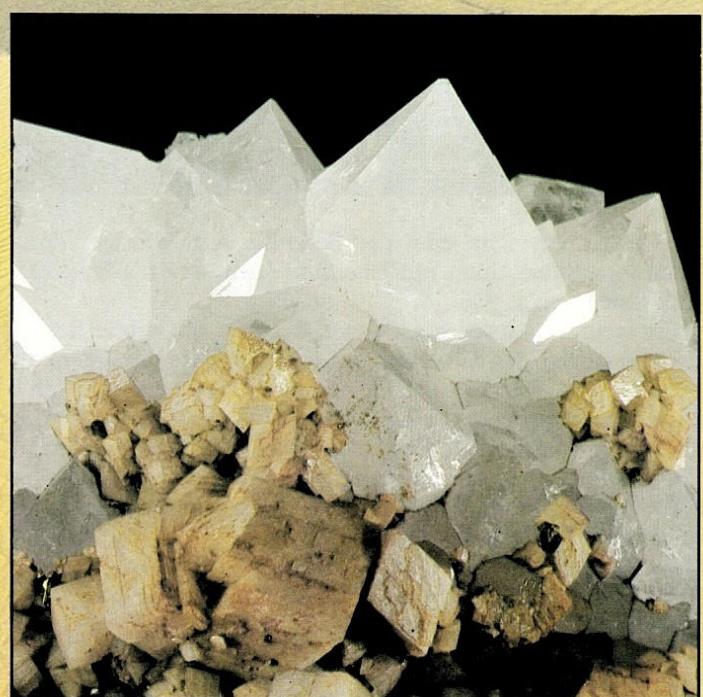
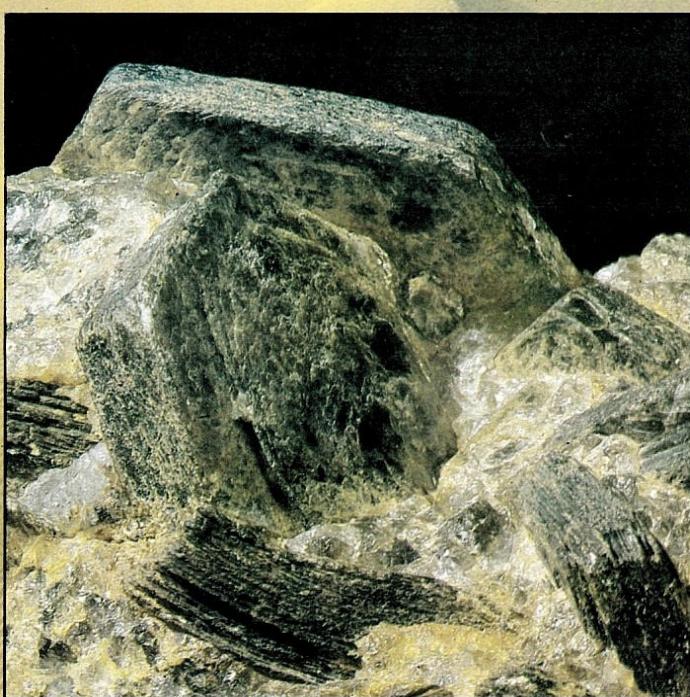
In der Praxis wird das saure Hydrogenbromid, das bei dieser Reaktion auch gebildet wird, unmittelbar nach seiner Bildung durch ein Alkali, wie z.B. Natriumcarbonat (Na_2CO_3), das in der Entwicklerlösung vorhanden ist, neutralisiert. Nach der Entwicklung muß das Bild 'fixiert' werden; dazu gehört das Entfernen des überschüssigen Silberbromids, das während der Belichtung durch das Licht nicht aktiviert wurde. Dies geschieht gewöhnlich durch die Behandlung mit einem Thiosulfatsalz, wie z.B. Ammoniumthiosulfat, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$, das einen löslichen Komplex mit dem Silberbromid bildet.



SILICUM

Mit Einführung der Halbleitertechnik und integrierten Schaltungstechnik gewann das Element Silicium immer größere Bedeutung. Seit 1959 hat sich die Anzahl der auf einem Halbleiterplättchen zu integrierenden Bausteine jedes Jahr verdoppelt.

Das chemische Element Silicium (Si) ist nach dem Sauerstoff (50%) das meistverbreitete Element (27%). Der Begriff Silicium leitet sich von dem lateinischen Namen 'silex' (Kieselstein) ab. Wegen der hohen Affinität des Siliciums zu Sauerstoff kommt dieses Element in der Natur zu 95% in Form von Silicaten oder auch in Form von Siliciumdioxid (SiO_2) als Seesand, Quarz, Bergkristall, Kieselstein und Amethyst vor.



INST. OF GEOL. SCIENCES

Da Silicium nur gebunden auftritt, wurde es erst relativ spät rein dargestellt. Die Forscher, die sich zuerst mit Silicium beschäftigten, glaubten, daß Siliciumdioxid ein Element ist. Deshalb unternahmen sie keine Versuche, diese Verbindung in ihre Komponenten zu zerlegen. Im Jahre 1787 vermutete A. L. Lavoisier (1743 bis 1794), daß Siliciumdioxid das Oxid eines noch unbekannten Elementes sein könnte. Jedoch erst im Jahre 1823 wurde Silicium von J. J. Berzelius (1797 bis

1848) zum ersten Male in sehr unreiner Form hergestellt. Die Aufbereitung von reinem, kristallinem Silicium gelang im Jahre 1854 dem französischen Chemiker H. Sainte-Claire Deville (1818 bis 1881).

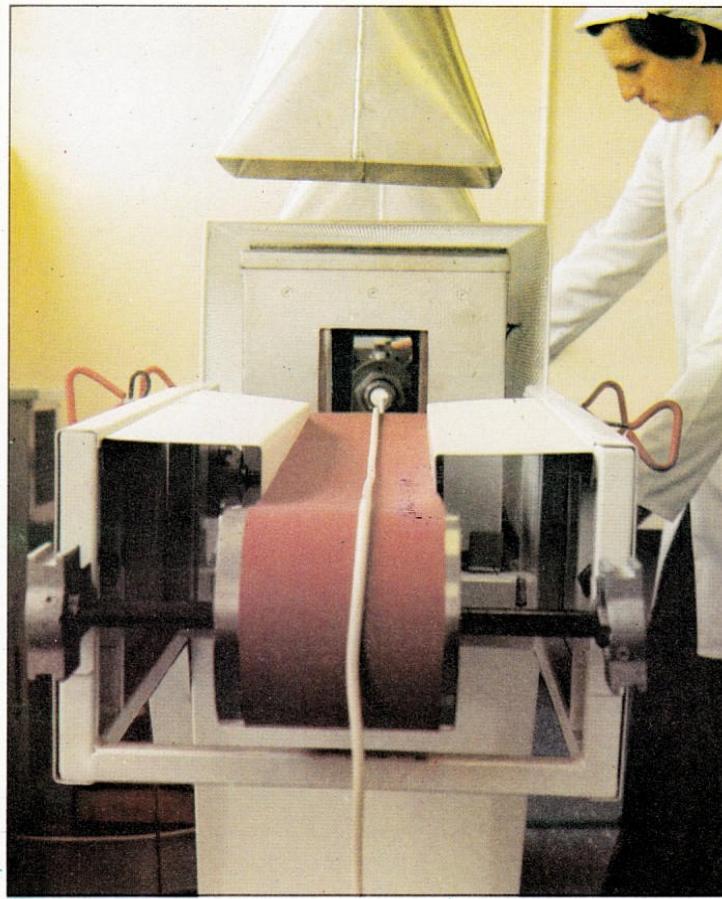
Unten: Sand besteht weitgehend aus Siliciumverbindungen (Siliciumdioxid). Hier die Dünen von Maspalomas auf Gran Canaria.



ZEFA

Ganz links: Muskovit, eine Art Glimmer, ist ein Mineral, das Silicium enthält. Glimmer wird in der Elektronikindustrie als Isolationsmaterial verwendet, da es Strom nicht leitet.

Links: Quarzkristalle in Dolomitkristallen eingebettet. Quarz ist ein Siliciumdioxid-kristall mit hohem Widerstand. Es findet wegen seiner piezoelektrischen Eigenschaft in vielen modernen elektronischen Geräten Anwendung.



Oben: Herstellung von Silicongummiröhren für medizinische Verwendungszwecke. Der Silicongummi wird von einer Heißluftvulkanisieranlage hergestellt.

Reines Silicium ist ein dunkelgraues, undurchsichtiges, stark glänzendes Element, das bei 1410°C schmilzt. Es hat die gleiche Kristallstruktur wie der Diamant. Silicium zählt zu den sogenannten halbleitenden Elementen.

Darstellung

Technisch lässt sich Silicium durch Reduktion von Quarz (siehe OXIDATION UND REDUKTION) mittels Kohle in einem Elektroofen gewinnen. Bei der Reaktion entstehen Silicium und Kohlenstoffmonoxid.

Das so gewonnene Silicium hat einen Reinheitsgrad von 98%. Diese Reinheit reicht zur Herstellung von Halbleiterbauelementen — heute das Hauptanwendungsgebiet von Silicium — nicht aus. Will man einen höheren Reinheitsgrad erhalten, führt man das vorgereinigte Silicium in Trichlorsilan (SiHCl_3) über, das sich durch Destillation reinigen lässt. Dieses Trichlorsilan wird anschließend in einer Wasserstoffatmosphäre bei 1200°C zu Silicium reduziert. Hierbei entstehen Hydrogenchlorid und Silicium.

In diesem Silicium tritt weniger als eine Verunreinigung pro einer Million Moleküle auf. Aus diesem Werkstoff werden dann Halbleiterbauelemente (z.B. Dioden, Transistoren, Solarzellen) und integrierte Schaltungen gefertigt. Das weniger reine Silicium dient zur Herstellung von Siliciumpolymeren (siehe unten) und wird als Legierungselement zur Härtung von Metallen wie Aluminium, Kupfer und Magnesium herangezogen.

Die bekannteste Silicium-Verbindung ist Siliciumdioxid, das in der Keramikindustrie, bei der Glasherstellung, bei feuerfesten Öfen und als Quarz bei piezoelektrischen Kristallen oder Quarzoszillatoren Verwendung findet. Lässt man Siliciumdioxid mit überschüssigem Kohlenstoff reagieren, entsteht Siliciumcarbid (SiC), das wegen seiner außergewöhn-

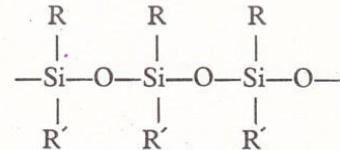
lichen Härte als Schleifmittel dient.

Silicate sind in der Erdoberfläche sehr weit verbreitet. Viele von ihnen haben praktische Bedeutung erlangt. Beispielsweise ist Ton ein hydratisiertes (Wasser enthaltendes) Aluminiumsilicat. Asbest ist ein Calcium/Aluminium-Silicat und Glimmer ein Aluminiumsilicat, das bei der Herstellung von Kondensatoren eine wichtige Rolle spielt. Einige der Silicate lassen sich in einer chemischen Formel, wie z.B. Muskovit ($\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$), darstellen. Andere Silicate haben extrem komplexe Strukturen; ihre chemische Zusammensetzung lässt sich nicht genau angeben.

Siliciumtetrachlorid (SiCl_4) lässt sich unmittelbar aus seinen Elementen herstellen. An feuchter Luft ist es eine rauchende Flüssigkeit. In Verbindung mit Ammoniak (NH_3) kann es als Rauchschwaden für militärische Zwecke eingesetzt werden. Der Rauch besteht aus kleinen Siliciumdioxid- und Ammoniumchlorid-Teilchen; beides sind kristalline Festkörper.

Silicone

Die Silicone sind eine der bedeutendsten Verbindungen, die in den vergangenen Jahren entwickelt wurden. Es handelt sich um Polymerverbindungen, die ähnlich wie organische Polymere Ketten bilden. In diesem Falle sind es keine Kohlenstoff- sondern Silicium/Sauerstoff-Ketten. Zwei organische Radikale (siehe ORGANISCHE CHEMIE) — meist sind es Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) — befinden sich an jedem Siliciumatom. Die allgemeine Darstellung von Siliconmolekülen lautet:



Hierbei versteht man unter R und R' organische Radikale. Derartige Polymerverbindungen können flüssig oder plastisch sein. Sie zeichnen sich durch gute Schmiermittelfähigkeit, Oxidationsunempfindlichkeit und Temperaturstabilität aus. Fette, die extremen Temperaturbedingungen ausgesetzt sind, basieren auf Siliconen. Ebenso bestehen einige Kunststoffüberzüge aus Siliconen, um Temperaturen zwischen 300°C und 500°C zu widerstehen. Des Weiteren haben Silicone ausgezeichnete elektrische Isolationseigenschaften, weshalb sie zur Verkapselung elektronischer Bauteile herangezogen werden.

Eines der bekanntesten Silicone ist Polydimethylsiloxan, dessen R-, R'-Gruppen Methylreste sind. Es wird hergestellt, indem man Silicium mit Methylchlorid (CH_3Cl) unter Verwendung von Kupfer oder Kupferoxid als Katalysator verbindet. Unter diesen Verbindungen ist Dichlordimethylsilan ($(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$) die bedeutendste Verbindung. Dichlordimethylsilan wird durch Destillation von den anderen Verbindungen getrennt und durch Hydrolyse zu Polydimethylsiloxan weiterverarbeitet.

Silikonkautschuk besteht aus Polydimethylsiloxan, das noch pulverisiertes Siliciumoxid und ein peroxidhaltiges Mittel zum Aushärten enthält. Das Peroxid bildet, ähnlich Schwefel bei der Vulkanisierung von Gummi, Sauerstoffketten oder $-\text{CH}_2\text{CH}_2-$ -Ketten zwischen den Siliciumatomen in dem Polymer.

Silikonkautschuk eignet sich in der Medizin sehr gut für Verpflanzungen z.B. von künstlichen Herzklappen. Denn er ist einer der wenigen Stoffe, die der menschliche Körper nicht abstoßt. Silikonkautschuk bildet auch die Grundlage für Klebstoffe und Dichtungsmaterialien. Diese Klebstoffe sind sehr hart und wasserabstoßend; mit ihnen kann man z.B. Glasscheiben eines Aquariums zusammenkleben, ohne einen Rahmen zu benötigen.

SINUSSCHWINGUNG

Ändert sich die Größe oder eine andere Eigenschaft irgendeines Objektes in der Art einer Sinuswelle, nennt man diese Veränderung sinusförmig. Es werden zum Beispiel die Spitzen einer Stimmgabel zu sinusförmigen Schwingungsbewegungen angeregt, und auch der Spannungsverlauf der elektrischen Stromversorgung im Haushalt hat Sinus-Form.

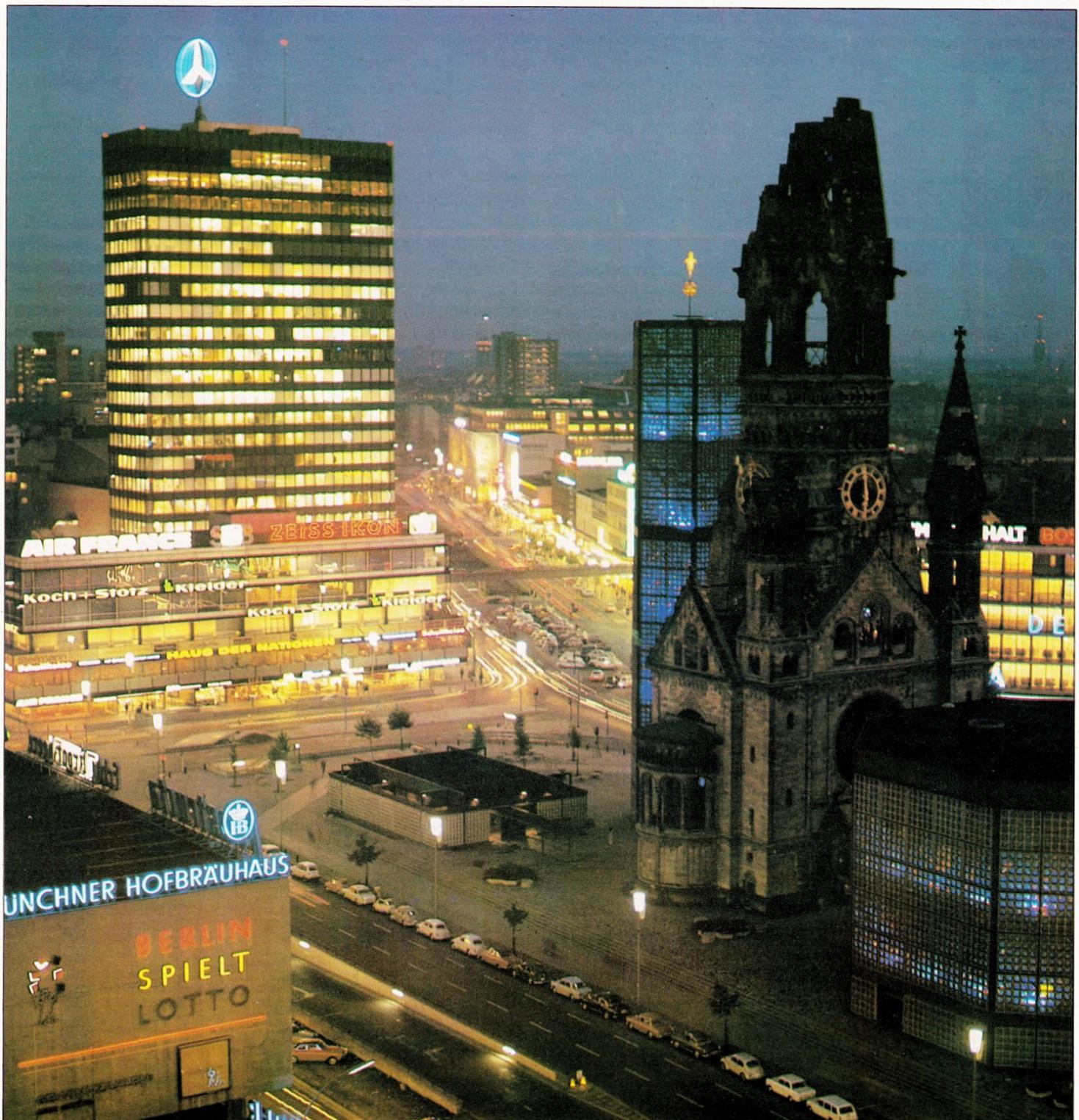
Die Sinuswelle ist eine sehr häufig auftretende, von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren vielfach benutzte Wellenform. Sie beschreibt die 'harmonische' Schwingung, wie sie von Pendeln und Oszillatoren ohne Dämpfung ausgeführt werden. Daneben ist die Sinuswelle eng mit der Kreiskurve und den Eigenschaften rechtwinkliger Dreiecke verbunden, die einem Kreis einbeschrieben sind. Aus rechtwinkligen

Dreiecken kann bekanntlich der Sinus und Cosinus eines Winkels bestimmt werden.

Der Übergang von der Kreisbewegung zur linearen Bewegung

Die Triebstange einer Dampflokomotive bewegt sich nahezu sinusförmig vor- und rückwärts, da sie exzentrisch am Antriebsrad angebracht ist. Fährt der Zug mit konstanter Geschwindigkeit, führt die Triebstange eine periodische Bewegung aus: Sie wird zunächst bis zur Mittellage beschleunigt, schießt wegen ihrer Trägheit darüber hinaus und wird dann bis zur größten Auslenkung abgebremst; dort kehrt sich die Bewegungsrichtung um, die Triebstange wird wieder zur Mittellage hin beschleunigt und so weiter.

Normaler Haushaltsstrom ist Wechselstrom, der Sinusform hat. Hier eine Großstadtbeleuchtung — Gedächtniskirche in Berlin.



Es sei nun eine Anordnung betrachtet, die aus einem Rad und einer damit durch einen Zapfen verbundenen Exzenterstange besteht, deren freies Ende eine Papierrolle berührt; diese Rolle wiederum wird durch ein Getriebe (gleichlaufend zum Rad) weitergedreht. Die bei Drehung des Rades erzeugte Kurve ist dann sinusförmig. Ist das Rad so eingestellt, daß der Kurbelzapfen auf der Horizontalen rechts vom Radmittelpunkt liegt, ist seine vertikale Auslenkung Null, und der Stift steht in der Mitte des Papiers. Dreht man das Rad aus dieser Lage gegen den Uhrzeigersinn, bewegt sich der Zapfen nach links oben; Zapfen und Schreibstift sind über die Mittellage angehoben. Der Stift zeichnet dann die vertikale Auslenkung gegen den Drehwinkel, beziehungsweise gegen den vom Papier zurückgelegten Weg auf. Im Bereich von 0° bis 180° liegt die Auslenkung oberhalb der Mittellinie und wird positiv genannt; im Bereich von 180° bis 360° — also bei der Vollschriftung der ganzen Umdrehung — ist der Zapfen unter der Mittellinie, das heißt er hat negative Auslenkung.

Wurde der Zapfen um 360° gedreht, ist er (und mit ihm der Schreibstift) in die Ausgangslage zurückgekehrt; dreht man weiter, zeichnet der Stift noch einmal dieselbe Kurve, d.h. die ursprüngliche Sinuswelle wird wiederholt. Die Sinuswelle wird deshalb periodisch genannt. Die während eines vollen Kurvenzuges zurückgelegte Strecke heißt Wellenlänge.

Dreht sich das Rad mit konstanter Geschwindigkeit, nennt man die Bewegung des Schreibers ‘harmonisch’. Vollendet das Rad in einer Sekunde zehn Umdrehungen, werden pro Sekunde zehn Sinuskurven aufgezeichnet. Die Schwingungsfrequenz des Schreibstiftes ist dann zehn Schwingungen pro Sekunde, gewöhnlich 10 Hertz (10 Hz) geschrieben.

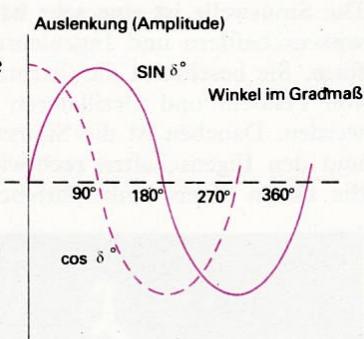
Die Sinus- und Cosinusfunktion

Die Mathematiker haben der Sinuswelle eine eigene Funktion zugeordnet, die das Aussehen kennzeichnet und beschreibt, die Sinusfunktion. Wird der Kurbelzapfen aus der Anfangs-

lage (ohne Auslenkung) um den Winkel δ verdreht, so entspricht die vertikale Auslenkung dem $\sin \delta$, sofern man den Radius des Rades als eine Einheit — etwa 1 m — annimmt.

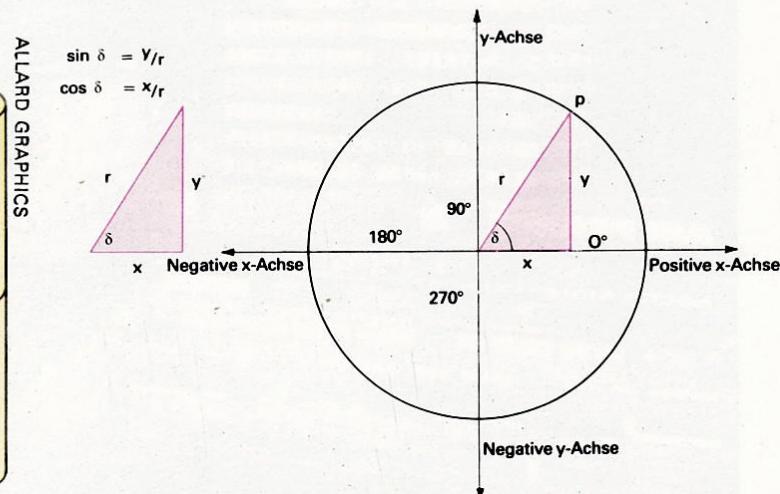
Trägt man $\sin \delta$ längs der vertikalen Achse in Abhängigkeit des Winkels δ (längs der Horizontalen wachsend) auf, erhält man eine Sinuswelle. Der Cosinus eines Winkels hat graphisch das gleiche Aussehen, jedoch ist die Kurve gegenüber dem Sinus um 90° nach links verschoben. Sinus und Cosinus sind daher komplementäre Funktionen.

Die Wellenform der Sinus- und Cosinusfunktion wiederholt sich jeweils nach 360° . Die maximale Auslenkung (Amplitude) entspricht dem Radius des die Funktion erzeugenden Kreises. Im Bild ist δ im Gradmaß angegeben, obwohl heute die Angabe im Bogenmaß (Radian) die Norm ist. Es entsprechen hier 360° im Bogenmaß $2\pi = 6,2832$.



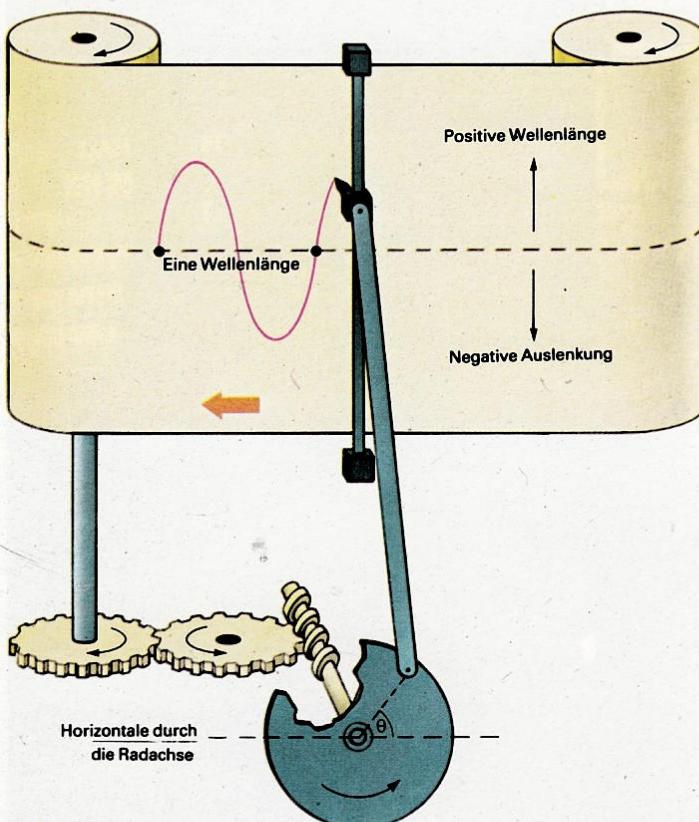
Die Beziehungen zwischen Sinus- und Cosinusfunktion sind aus den Eigenschaften des rechtwinkligen Dreiecks gut zu erkennen. Bei der Behandlung des rechtwinkligen Dreiecks begegnet man diesen Funktionen im allgemeinen zum ersten Mal.

Die volle Bedeutung dieser ‘Winkelfunktionen’ läßt sich am besten zeigen, indem man ein rechtwinkliges Dreieck so einem Kreis einbeschreibt, daß die Hypotenuse mit dem Radius des Kreises übereinstimmt. Dann stellt x den horizontalen und y den vertikalen Abstand vom Kreismittelpunkt dar.



Aus $\delta = 0$ folgt dann $y = 0$ und damit $\sin 0^\circ = 0$, gleichzeitig gilt $x = r$ und damit $\cos 0^\circ = 1$. Ist andererseits $\delta = 90^\circ$, also $y = r$ und $x = 0$, ergibt sich $\sin 90^\circ = 1$ bzw. $\cos 90^\circ = 0$. Kennzeichnet man die Koordinatenachsen als positiv in der einen und negativ in der Gegenrichtung, können $\sin \delta$ und $\cos \delta$ für alle Winkel δ bis zu 360° dargestellt werden. Es ergeben sich: $\sin 180^\circ = 0$ und $\cos 180^\circ = -1$, $\sin 270^\circ = -1$ und $\cos 270^\circ = 0$ sowie $\sin 360^\circ = \sin 0^\circ = 0$ und $\cos 360^\circ = \cos 0^\circ = 1$. Aus dem Verlauf der Sinuswelle ergeben sich entsprechend die Zwischenwerte.

Die Seiten eines rechtwinkligen Dreiecks sind nach dem Lehrsatz des Pythagoras durch die Beziehung $x^2 + y^2 = r^2$ verknüpft. Teilt man beide Seiten der Gleichung durch r^2 , so erhält man $(x/r)^2 + (y/r)^2 = 1$. Doch ist $x/r = \cos \delta$ und $y/r = \sin \delta$, woraus folgt $(\cos \delta)^2 + (\sin \delta)^2 = 1$. Diese Beziehung verbindet den Sinus- und Cosinuswert eines Winkels.



Oben: Übersetzung einer Kreisbewegung in eine lineare Bewegung. Oben rechts: Die Verknüpfung von Sinus- und Cosinusfunktion ist aus den Eigenschaften des rechtwinkligen Dreiecks ersichtlich.

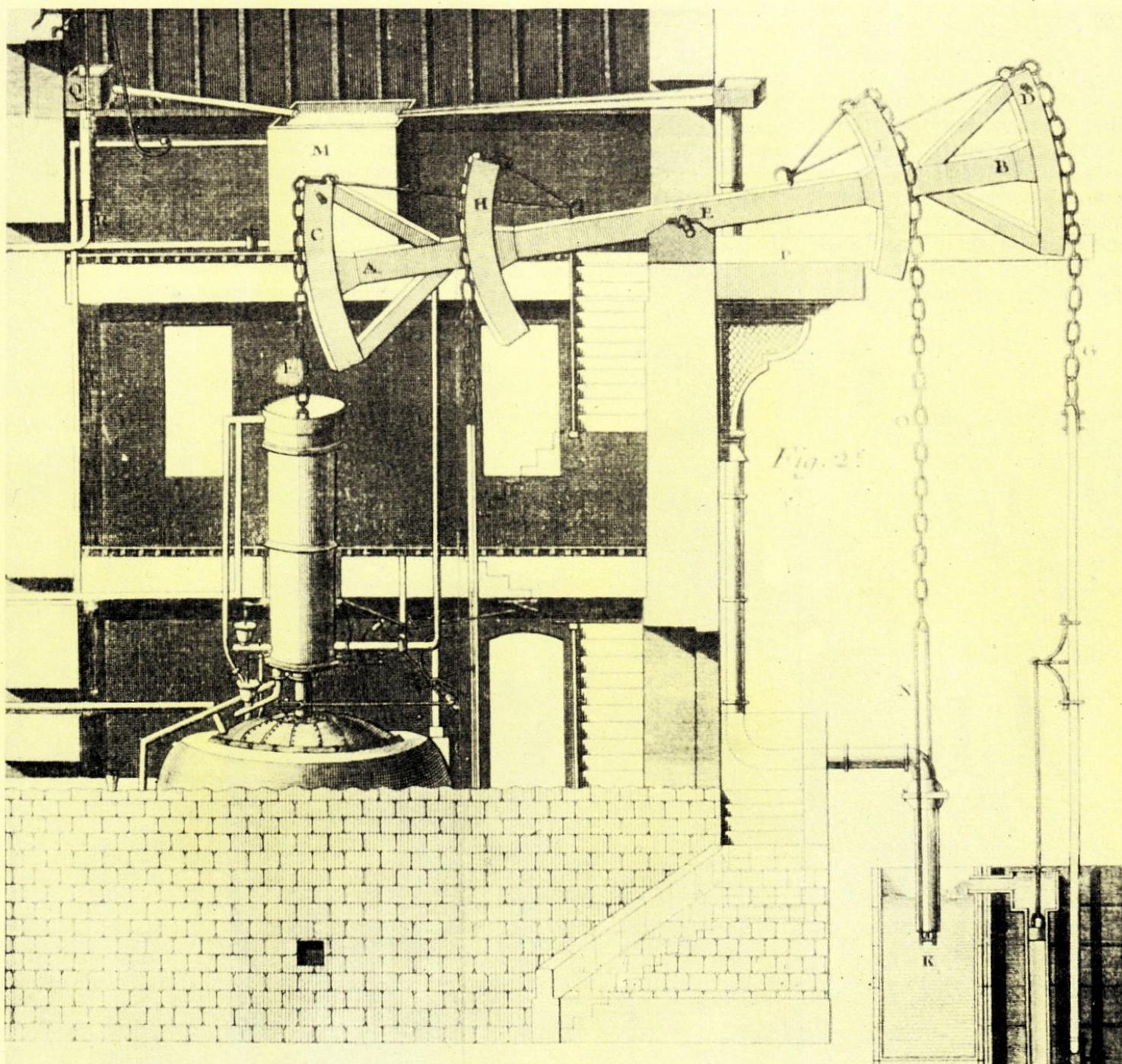
Erfindungen 47: ATMOSPHÄRISCHE DAMPFMASCHINE

Die erste funktionstüchtige Dampfmaschine wird heute allgemein Thomas Newcomen (1663 bis 1729) zugeschrieben. Sie wurde über fünfzig Jahre vor der ersten, von James Watt (1736 bis 1819) gebauten Maschine in Betrieb genommen. Newcomen war ein Grobschmied aus Dartmouth in Devon (Südengland); er arbeitete mit John Calley zusammen. Wir können nur Vermutungen darüber anstellen, inwieweit die beiden Erfinder Kenntnis von früheren Experimenten auf dem Gebiet der Dampfmaschine hatten. Beispielsweise hatte der französische Physiker Denis Papin (1647 bis

1712), der seit 1687 im Exil in Hessen lebte und arbeitete, an einem von ihm erbauten Modell gezeigt, daß Dampf einen Kolben in einem Zylinder bewegen kann. Einige Jahre später baute in Großbritannien Captain Thomas Savery (1650 bis 1715) eine dampfgetriebene Wasserhebe-

Die atmosphärische Dampfmaschine nach Newcomen mit einer Pumpe zum Entwässern von Gruben (rechts unten im Bild). Die Abbildung stammt aus dem Werk 'Architecture Hydraulique', das im Jahre 1739 in Paris erschien.

maschine, die allerdings nur ein Teilerfolg war, denn es handelte sich nicht um eine Dampfmaschine im üblichen Sinne. Da sie nicht über einen hin- und hergehenden Kolben verfügte, konnte man mit ihr Maschinen oder Fahrzeuge nicht unmittelbar antreiben. Doch im Jahre 1698 ließ sich Savery eine Dampfpumpe patentieren. Sein Patent steckte einen so weiten Rahmen ab, daß es auch die von Newcomen entwickelte atmosphärische Dampfmaschine umfaßte. Newcomen entschloß sich daraufhin im Jahre 1705, gemeinsam mit Calley, zur Zusammenarbeit mit Savery.



Das Arbeitsprinzip der atmosphärischen Dampfmaschine

Nach mehreren Versuchen baute Newcomen im Jahre 1712 seine erste Maschine in der Nähe von Dudley Castle (vermutlich bei Tipton in Staffordshire), wenn man sich auf eine Zeichnung verlassen darf, die Thomas Barney im Jahre 1719 anfertigte. Newcomen nutzte bei seiner Maschine die Tatsache, daß Dampf sein Volumen deutlich verringert, wenn man ihn so stark abkühlt, daß er wieder zu Wasser kondensiert. Läuft dieser Vorgang in einem luftdicht verschlossenen Gefäß ab, entsteht darin ein Vakuum. Newcomens 'Gefäß' war ein hoher, oben offener Zylinder, in dem ein kreisrunder Kolben auf- und abglitt. Befand sich der Kolben am oberen Ende des Zylinders, war der darunter liegende Raum mit Dampf gefüllt. In ihm wurde jetzt kaltes Wasser gesprüht, der Dampf kondensierte sich. Da nun der auf die Außenseite des Kolbens einwirkende atmosphärische Druck größer ist als der Druck im Inneren des Zylinders, vollführte er einen Arbeitshub nach unten. Durch Zufuhr von Dampf kehrte der Kolben wieder in seine Ausgangsstellung am oberen Ende des Zylinders zurück. Dampfmaschinen dieser Art trugen Newcomens Namen, obwohl er sie keineswegs alle selbst gebaut hatte.

Man nannte sie auch 'Feuermaschinen' oder, wie in diesem Artikel, 'atmosphärische' Maschinen.

Einsatzmöglichkeiten

Die nach Newcomens Prinzip gebauten Maschinen waren langsam, verfügten nur über ein geringes Leistungspotential und hatten einen sehr schlechten Wirkungsgrad. Trotzdem waren sie in der damaligen Zeit für den Zweck des Wasserhebens aus Bergwerken allen anderen verfügbaren Einrichtungen überlegen und fanden daher weite Verbreitung. Die erste Maschine, die Newcomen baute, leistete lediglich 3,7 kW bis 4,5 kW. Diese Leistung wurde später von anderen Technikern verbessert. Beispielsweise baute John Smeaton, der Erbauer des Leuchtturmes auf den Eddystone Rocks vor der südenglischen Küste bei Plymouth, mehrere atmosphärische Dampfmaschinen. Eine von ihnen hatte einen Zylinder-

durchmesser von 1,80 m und eine Leistung von etwas mehr als 55 kW.

Als erwiesen war, daß Newcomens Dampfmaschine eine zuverlässige Antriebsquelle war, versuchten Ingenieure um die Mitte des 19. Jahrhunderts, sie auch für den Antrieb umlaufender Maschinen umzurüsten. Bis dahin hatte man diese Dampfmaschinen ausschließlich mit auf- und abgehenden Pumpen eingesetzt. Schon im Jahre 1763 hatte John Oxley einen Versuch in dieser Richtung unternommen, und zwar mittels eines Ratschenmechanismus, über den eine Welle in Umdrehung versetzt und Kohle aus einem Bergwerk gefördert wurde. Im Jahre 1780 brachte einer der Konkurrenten von James Watt einen Kurbelmechanismus an einer atmosphärischen Dampfmaschine an. Da er sich diese Anordnung patentieren ließ, war Watt gezwungen, seinerseits mit einer Übertragung zu arbeiten, die aus einem Sonnenrad und Planetenräder bestand (Planetengetriebe). Allerdings erwies sich, daß Watts Dampfmaschine mit ihrem getrennten Kondensator einen höheren Wirkungsgrad hatte. Eine Ausnahme bildeten lediglich bestimmte Gegenden, in denen Kohle billig war. Dort konnte man die atmosphärische Dampfmaschine nach Newcomen noch bis ins 20. Jahrhundert in Betrieb sehen.

Unten links: Eine atmosphärische Dampfmaschine zur Bergwerksentwässerung, entworfen von Newcomen.

Unten rechts: Die erste atmosphärische Dampfmaschine in der Nähe von Schloß Dudley. Man beachte die offene Feuertür und den Heizer.

