Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 1

Artikel: Elektronische Zeitrelais für industrielle Anwendungen

Autor: Zahn, U.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916211

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

besserung der Übertragungskapazität der Kurzwellen wirken, ist derjenige des «Frequency Management» wohl der wirkungsvollste, aber auch in der Praxis am schwierigsten durchführbare. Aber die zunehmende Nachfrage dürfte hier doch zu einer erhöhten Einsicht hinsichtlich Angebot führen. Steht doch die rein verwaltungsmässige Formulierung der Shannonschen Beziehung bereits schon im Artikel 45 des internationalen Fernmeldevertrages von 1959:

«Die Ordentlichen und Ausserordentlichen Mitglieder halten es für wünschenswert, die Anzahl der verwendeten Frequenzen und die Breite des verwendeten Teils des Spektrums so weit zu beschränken, wie unerlässlich ist, um den Betrieb der notwendigen Dienste in befriedigender Weise zu gewährleisten.»

Literatur

[1] *J. W. Allnatt, E. D. J. Jones* and *H. B. Law:* Frequency Diversity in the Reception of Selectively Fading Binary Frequency-Modulated Signals. Proc. IEE Radio and Electronic Engineering B 104(1957)14, S. 98...110.

[2] Télégraphie harmonique sur les circuits radioélectriques. Comité consultatif international des radiocommunications, Documents Vol. 3, Rapport 198, CCIR Genève 1963.

[3] Improved Transmission System for HF Radiotelephone Circuits. CCIR Documents III/124, Period 1963...1966, CCIR Genève.

[4] *T. de Haas:* A Frequency-Differtial PSK Modem for HF Data Communications. IEEE First Annual Communication Technology Convention Record, June 1965. IEEE New York 1965.

[5] *R. W. Hamming:* Error Detecting and Error Correcting Codes. Bell Syst. techn. J. 29(1960)–, S. 147...160.

[6] *P. R. Keller:* An Automatic Error Correction System for Unidirectional HF Teleprinter Circuits. Point to Point Telecommun. 7(1963)3, S. 14...29.

[7] *A. Kohlenberg* and *A. S. Berner:* An Experimental Comparison of Coding Vs. Frequency Diversity for HF Telegraphy Transmission. Trans. IEEE Communication Technology 14(1966)4, S. 532...533.

[8] *H. B. Law, F. J. Lee, R. C. Looser* and *F. A. W. Levett:* An Improved Fading Machine. Proc. IEE Radio and Electronic Engineering B 104(1957)14, S. 117...123.

[9] *W. Lyons:* Error Protection via Time Diversity. Trans. IEEE Communication Technology 13(1965)2, S. 234...238.

[10] *R. R. Mosier* and *R. G. Clabaugh:* Kineplex, A Bandwidth-Efficient Binary Transmission System. Trans. AIEE Communication and Electronics 77(1958)34, S. 723...728.

[11] *W. W. Peterson:* Error Correcting Codes. M. I. T. Press Cambridge Massachusetts / John Wiley New York 1961.

[12] *R. Price* and *P. E. Green:* A Communication Technique for Multipath Channels. Proc. IRE 46(1958)3, S. 555...570.

[13] *P. N. Ridout* and *L. K. Wheeler:* Choice of Multi-Channel Telegraph Systems for Use on H. F. Radio Links. Proc. IEE 110(1963)8, S. 1402...1410.

[14] *H. C. A. van Duuren:* Error Control on HF Radio Channels. Het PTT Bedrijf 14(1966)2, S. 65...72.

[15] *P. M. Woodward:* Probability and Information Theory with Application to Radar. Pergamon Press London 1953.

Adresse des Autors:
H. A. Laett, Chefingenieur der Radio-Schweiz AG, 3000 Bern 25.

Elektronische Zeitrelais für industrielle Anwendungen

Von *U. Zahn,* Suhr

621.318.562.7

Der Aufsatz soll einen kurzen Überblick über den Stand der elektronischen Zeitrelais geben. Im ersten Teil wird der Anwendungsbereich der klassischen Schaltung umrissen. Die Diskussion einiger Dimensionierungsprobleme veranschaulicht die Grenzen für den Einsatz einer Verzögerungsschaltung mit Kaltkathodenröhre in industriellen Anlagen. Der zweite Teil begründet die Existenz von Zeitschaltungen mit Halbleiter-Bauelementen und orientiert über ein umfangreiches Programm von kontaktlosen Zeiteinheiten für logische Steuerungen in Industrie- und Kraftwerkanlagen .

L'article fournit un aperçu sommaire de l'état des relais différés électroniques. La première partie esquisse le domaine d'application des connexions classiques. La discussion de quelques problèmes de dimensionnement illustre les limites d'application aux installations industrielles d'un circuit de retard avec cathode froide. La seconde partie motive l'existence de connexions temporisées à l'aide d'éléments semi-conducteurs et fournit une orientation au sujet du programme étendu se rapportant aux unités de temps sans contacts pour la commande logique des installations industrielles et des centrales électriques.

1. Allgemeines

Unter einem Zeitrelais versteht man eine Einrichtung, die auf ein bestimmtes Kommando hin den Beginn und das Ende eines vorher festgelegten Zeitintervalles angibt und damit Arbeitsvorgänge und Fertigungsprozesse zeitfolgerichtig zu steuern gestattet. Elektronische Zeitrelais werden überall dort bevorzugt verwendet, wo infolge hoher Schaltzahlen die Lebensdauer und Betriebssicherheit eines mit mechanischem Hemmwerk arbeitenden Zeitrelais nicht mehr genügt oder aber wo sehr kurze und genaue Verzögerungszeiten erforderlich sind. Wobei unter Genauigkeit bei Verzögerungsrelais nicht Bruchteile von Prozenten zu verstehen sind. In 99 von 100 Fällen in der Praxis stehen Kurz- oder Langzeitabweichungen innerhalb von $\pm$ 5 % gar nicht zur Diskussion.

In elektronischen Zeitschaltungen kommen als Schalt- und Verstärkerelemente Vakuumröhren, Kaltkathodenröhren und Transistoren zur Anwendung. Die Stabilisierungsschaltungen werden, je nach Spannung und Genauigkeit, mit Hilfe von VDR-Widerständen, Glimmröhren oder Zenerdioden als Referenzelemente ausgeführt.

In der jüngsten Zeit hat sich ganz eindeutig für die allgemeine Anwendung des Zeitrelais das Kaltkathodenthyratron als Verstärkerelement durchgesetzt. Relaisröhren mit kalter Reinmetallkatode gehören zu den empfindlichsten und betriebssichersten elektronischen Schaltern. Sie ermöglichen einfache Schaltungen, benötigen keine Heizung und sind immer und ohne Ruhestromverbrauch oder Abnützung betriebsbereit. Eine lange Brenndauer (25000 h) und Unempfindlichkeit gegen kurzzeitige Überlastung machen sie für industrielle Anwendungen geeignet. Mit Hilfe des Prinzips der Kondensatoraufladung lassen sich damit ohne grossen Schaltungsaufwand zuverlässige Zeitrelais bauen.

In der grossen Familie der Zeitrelais stehen Schaltungen zur Gewinnung einer zeitlichen Verschiebung zwischen einem Steuerbefehl und dessen Weiterschaltung im Vordergrund. Anlaufsteuerungen von Maschinen, Überbrücken von Störungsmeldungen während des Anlaufs und Steuern von Bewegungsabläufen sind die Hauptaufgaben der Zeitverzögerungsrelais in der industriellen Anwendung.

In der Folge soll auf die wichtigsten Punkte, die Vor- und Nachteile bei der Dimensionierung der klassischen Schaltung zur Zeitverzögerung eingegangen werden.

2. Arbeitsweise und Probleme eines Verzögerungsrelais mit Kaltkathodenröhre

Fig. 1 zeigt die Prinzipschaltung eines elektrischen Verzögerungsrelais. Nach Schliessen des Schalters S lädt sich der Verzögerungskondensator C über den Verzögerungswiderstand R auf, wobei der zeitliche Verlauf der Spannung am Kondensator durch die in Fig. 2 gezeichnete Exponentialkurve

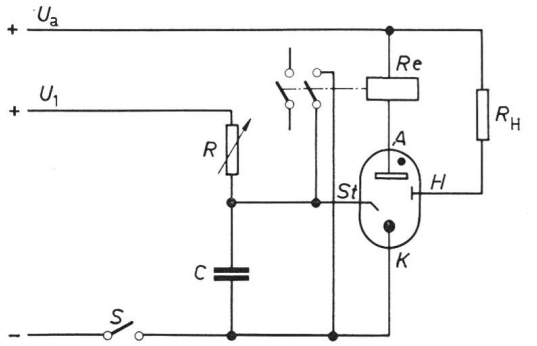


Fig. 1
Prinzipschaltung eines elektronischen Verzögerungsrelais mit Kaltkathodenröhre
U_a Anodenspannung; U_1 Ladespannung; R Verzögerungswiderstand; R_e Anzugsrelais; R_H hochohmiger Widerstand; C Verzögerungskondensator; S Schalter; H Hilfsanode; A Anode; St Steuerelektrode; K Katode

gegeben ist. Wenn die Spannung am Kondensator nach Ablauf der Verzögerungszeit die Starterzündspannung U_{zs} der Röhre erreicht, zünden der Reihe nach die Steuer- und die Hauptstrecke, und das elektromagnetische Ausgangsrelais *Re* zieht an. Wenn man die Anodenspeisespannung U_a unterbricht, fällt das Relais ab, und die Röhre löscht. Vor Einleitung eines neuen Verzögerungsvorganges wird der Kondensator C meist durch einen geeigneten Kontakt völlig entladen. Die Vergrösserung von R oder C ergibt einen langsameren Spannungsanstieg und eine spätere Zündung der Röhre (gestrichelte Kurve in Fig. 2). Zur Erhöhung der Genauigkeit, besonders bei kurzen Verzögerungszeiten, ist eine Vorionisation des Gases erwünscht. Man erreicht sie, indem man eine Hilfsanode H über einen hochohmigen Widerstand R_H mit dem positiven Pol der Anodenspannung verbindet.

Die Spannung am Ladekondensator C steigt nach folgender Funktion:

$$U_c = U_1\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \text{ wobei } \tau = R\,C$$

oder t explizit dargestellt:

$$t = R\,C \cdot \ln \frac{U_1}{U_1 - U_c}$$

Bei der Interpretation der rechten Seite der Gleichung geht klar hervor, dass die Zeit t nicht nur von R und C beeinflusst wird, sondern, dass auch die Ladespannung U_1 eine bemerkenswerte Änderung bewirken kann. Fig. 3 veranschaulicht graphisch diesen Zusammenhang.

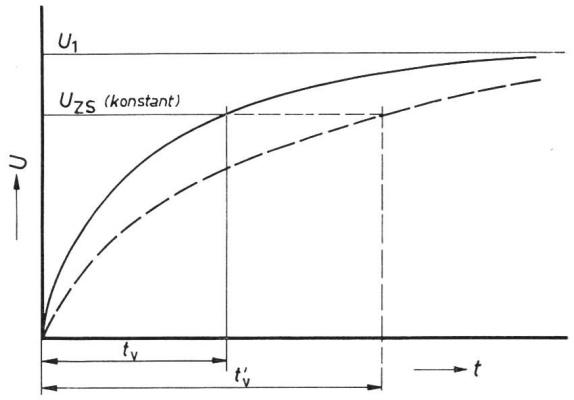


Fig. 2
Zeitlicher Spannungsverlauf am Verzögerungskondensator C wie in Fig. 1
Gestrichelte Kurve: Verlauf bei vergrössertem τ, wobei $\tau = RC$
U Spannung; U_1 Ladespannung; t_v Verzögerungszeit bei kleinem τ; t_v' Verzögerungszeit bei grossem τ; t Zeit; U_{ZS} Starterzündspannung

Unter der idealisierten Annahme, dass die Zündspannung U_{zs} konstant ist, wird ersichtlich, wie beträchtlich eine Abweichung der Ladespannung diejenige Zeit verändern kann, die benötigt wird, um U_c auf den Wert der Zündspannung zu bringen. Je kleiner das Verhältnis Ladespannung zu Zündspannung wird, umso prekärer wird die Situation. Ungefähr 50 % sollte die Ladespannung über dem Zündwert der Röhre liegen, wenn man nicht Gefahr laufen will, bei extremen Toleranzen mit der Zündung der Röhre in einen allzu flachen Teil der Ladekurve zu rutschen, wo die Zeitabweichungen unerträglich werden. Die Möglichkeit wird bestärkt, wenn man bedenkt, dass die vorher angenommene Zündspannung in Wirklichkeit keineswegs über alle Einflüsse hinweg konstant bleibt. Streuungen bis 3,5 % innerhalb der garantierten Lebensdauer von 25000 Betriebsstunden sind auch bei den neuesten und besten Kaltkathoden-Relaisröhren Normalwerte.

2.1 Stabilisierung

Aus obigen Tatsachen heraus entstehen notwendigerweise die Probleme der Stabilisierung der Ladespannung. Bei un-

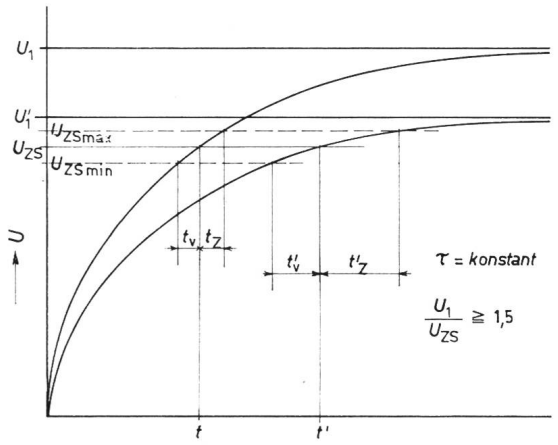


Fig. 3
Auswirkungen des Verhältnisses Ladespannung zu Zündspannung
U_1' Unterer Grenzwert der Ladespannung; t, t' Verzögerungszeit; t_Z Δt durch Streuung von U_{ZS} bei U_1; t_Z' wie t_Z jedoch bei der Ladespannung U_1'; τ Zeitkonstante RC
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2

stabilisierter Ladespannung, die normalen Netzspannungsschwankungen entsprechend +10 bis −15 % variieren kann, sind Verzögerungszeiten genauer als ±20 % nicht zu erwarten. Es bleibt natürlich eine Frage der Anwendung, wie weit Schaltungen mit derart geringen Genauigkeitsansprüchen überhaupt brauchbar sind. Es gibt einige Beispiele, da werden die Zeitabweichungen direkt dazu benutzt, Einflüsse durch Netzspannungsschwankungen zu kompensieren. Somit muss bei einer Neukonstruktion die Hauptanwendung einigermassen deutlich bekannt sein, wonach sich dann die Art und Qualität der Stabilisierung richtet. Weitaus am häufigsten werden auch hier Kaltkathoden-Stabilisierungsröhren eingesetzt, zumal heute auf dem Markt Röhren erhältlich sind, bei denen sich die Stabilisierungsstrecken und der Schalt- bzw. Verstärkerteil (in der Folge als Relaisteil bezeichnet, weil damit direkt das mechanische Relais angesteuert werden kann) in einem Miniaturglaskolben vereinen.

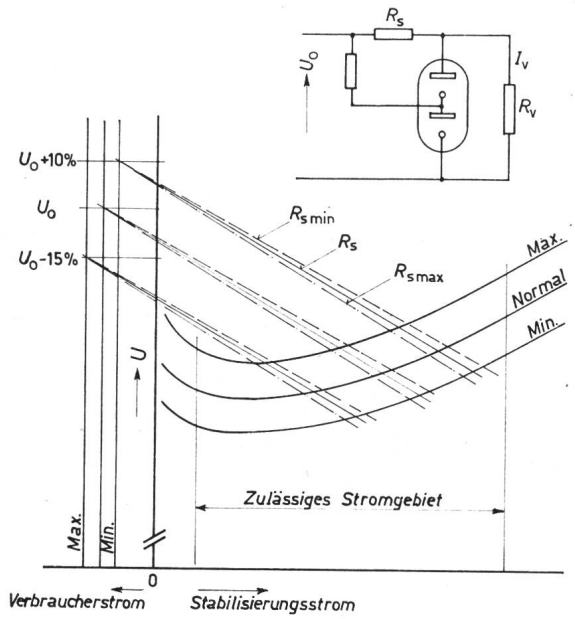


Fig. 4
Stabilisierung mit Kaltkathodenröhren
Zusammenfassende Darstellung sämtlicher Variabeln mit Rücksicht auf die Grenzdaten
U_0 Nennwert der Gleichspannung; R_s Vorwiderstand; I_v Verbraucherstrom; R_v Verbraucherwiderstand

Nun, dieses enge Beieinander zweier an sich getrennter Systeme hat leider nicht nur Vorteile für die Konstruktion, sondern bringt nicht unbedeutende Schwierigkeiten für die elektrische Dimensionierung mit sich. Bei gasdicht getrennten Systemen muss nämlich keine direkte gegenseitige Beeinflussung befürchtet werden. Anders verhält sich aber die Sache im vorerst erwähnten Fall. Es gibt durchaus mögliche Extremfälle im Betrieb, die, werden sie bei der Dimensionierung der übrigen Elemente nicht entsprechend berücksichtigt, in der Röhre Schaden anrichten können. In dem Falle nämlich, wo der Relaisteil der Röhre während der ganzen Anzugszeit des Relais gezündet bleibt (brennt), muss die Stabilisation, obschon für den Zeitkreis in dieser Situation unnötig, ebenfalls brennen, sonst kann die Konstanz der Brenn- und der Zündspannung als Folge der Kathodenverschmutzung im Stabiteil nicht mehr garantiert werden. In Fig. 4 sind die Verhältnisse graphisch dargestellt.

Durch die Berücksichtigung der erwähnten Einschränkung einerseits und die vom Gleichrichter (Netz) her zu erwartenden Extremwerte wird der Vorwiderstand R_s der beiden in Serie geschalteten Stabistrecken bestimmt. Allerdings darf dabei nicht ausser Acht gelassen werden, dass auch bei einer maximal zulässigen Netzsunterpannung und ungünstigsten Toleranzen der Röhre und der übrigen Elemente die Zündbedingung erfüllt bleiben muss (Fig. 4).

$$U_{z\,max} = U_{0\,min} - (I_v\, R_{s\,max})$$

Darin bedeuten:

$U_{z\,max}$ maximale Zündspannung
$U_{0\,min}$ minimale Gleichspannung
I_v maximaler Verbraucherstrom
$R_{s\,max}$ maximaler Vorwiderstand

Dabei geschieht es oft, dass der günstigste Stabilisierungsbereich überschritten werden muss, um bei der «worst case»-Dimensionierung die Zündbedingung zu garantieren. Demgegenüber stehen aber wieder die Einschränkungen des Röhrenherstellers, welcher beim Strombereich besonders bezüglich kleinerer Stabilisierungsströme Vorschriften macht, um die Konstanz der Strom-Spannungskennlinie sicherzustellen. Der gefundene Kompromiss kann schliesslich in engen Grenzen von der Gleichrichterschaltung her beeinflusst werden.

Auf jeden Fall ist die Garantie hoher Zeitgenauigkeiten mit relativ geringen Netzspannungstoleranzen verbunden, soll nicht die Stabilisierung über mehrere Stufen erfolgen (Präzisionsstabilisierung).

2.2 Gleichrichtung

Die Gleichspannung für den Betrieb der Schaltung soll direkt aus dem Netz bezogen werden können. Bei Normalspannungen (220/110 V~) ist es natürlich schon aus preislichen Überlegungen wünschenswert, ohne Netztransformator auszukommen. Werden elektronische Schaltungen ohne Trenntransformator mit Industrienetzen verbunden, so ist Vorsicht am Platz. Zwar gelten auch hier die normal üblichen Toleranzen für die Spannungsschwankungen, was aber darüber hinaus an energiereichen Spannungsspitzen, herrührend vom Abschalten grosser Induktivitäten, zu beobachten ist, kann weder qualitativ noch quantitativ erfasst werden. Die Ursachen sind von Fall zu Fall andere und die Störgrössen somit unbestimmt.

Einweggleichrichterschaltungen führen auch bei reichlicher Überdimensionierung der Sperrspannung der Diode nicht zum Ziel. Selbst bei Sperrspannungen über 1200 V kann keine Garantie erfolgen. Die Brückenschaltung (Fig. 5) umgeht dieses Problem. Dort werden die statischen, kurzzeitigen Überspannungen durch den Strombegrenzungswiderstand am Netzeingang unschädlich gemacht. Für 110-V-Netze findet die übliche Spannungsverdopplerschaltung Anwendung.

Die Auswahl geeigneter Bauteile und Schutzmassnahmen gegen unerwünschte Fehlzündungen der Röhre infolge Spannungsspitzen bei Schaltvorgängen sind beim Bau wirklich zuverlässiger Geräte von erheblicher Bedeutung.

Positive Spannungssprünge anodenseitig an der Relaisröhre mit Steilheiten > 1 V/µs können die Zündspannung zwischen Anode und Kathode zur Unbrauchbarkeit reduzieren. Werden vom Netzteil her nicht grössere Zeitkonstanten garantiert, so muss der Spannungsanstieg mit zusätzlichen Mitteln ver-

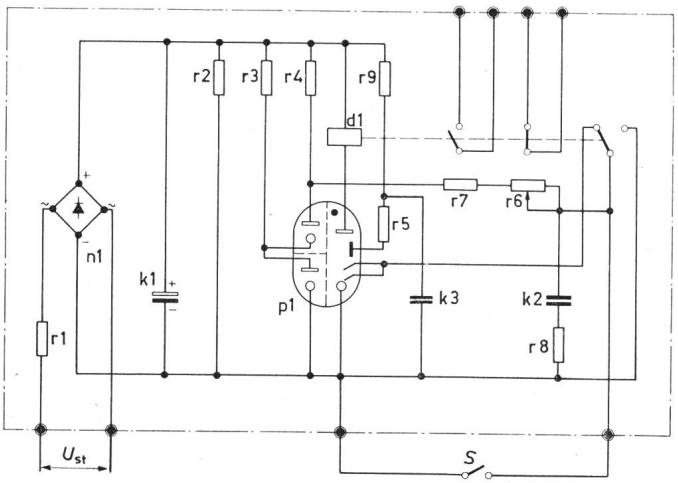


Fig. 5
Anzugverzögertes Zeitrelais in 220-V~-Ausführung
U_{st} Steuerspannung 220 V ± 15 %; *k1...k3* Kondensatoren für Siebung und Zeitglied; *r1...r9* Widerstände zur Strombegrenzung und Stabilisierung; *p1* Kaltkathoden-Relaisröhre mit Stabilisierung; *n1* Graetz-Schaltung; *d1* mechanisches Relais; *S* Schalter für extreme Entladung des Kondensators *k2*

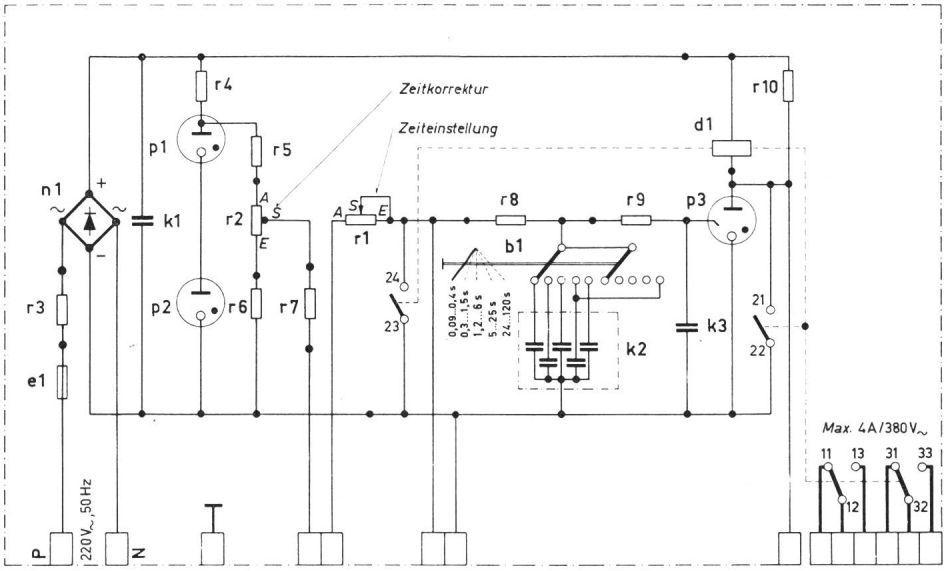


Fig. 6
Schaltschema eines elektrischen Zeitrelais
5 Zeitbereiche sind durch einen Stufenschalter wählbar. Jeder Bereich lässt sich zudem im Verhältnis ≈ 1 : 5 kontinuierlich einstellen
p1...p3 Kaltkathodenröhren; *k1...k3* Kondensatoren für Sieb- und Zeitrelais; *r1...r10* Widerstände zur Strombegrenzung und Spannungsteilung; *A, S, E* Potentiometer zur Zeiteinstellung; *e1* Feinsicherung; *d1* mechanisches Relais; *n1* Gleichrichter; *P, N* Eingangsklemmen für die Steuerspannung

zögert werden. Natürlich dürfen diese Dämpfungsmassnahmen die Abfallverzögerung nicht wesentlich beeinflussen. Gesagtes gilt besonders dann, wenn die Steuerung durch Anlegen der Speisespannung — wie in Fig. 5 — erfolgt.

Muss man mit der Erscheinung des Durchzündens rechnen, was der Verzögerungszeit $t = 0$ entspricht, so wird der Einsatz fragwürdig.

2.3 Zeitbereiche

Eingangs wurden bereits gewisse Einschränkungen bei der Anwendung elektronischer Zeitrelais auf Grund der Verzögerungszeiten aufgezählt. Langen Verzögerungszeiten (wesentlich über 100 s) stellen sich bei zuverlässigen industriellen Ausführungen bedeutende Schwierigkeiten entgegen. Die Kondensatoren, die den hohen Anforderungen genügen müssen, werden gross und den Werten der Ladewiderstände mit Langzeitkonstanz sind bald obere Grenzen gesetzt, sollen nicht die Isolationswiderstände eine wichtige Rolle zu spielen beginnen. Umgekehrt müssen auch bei extrem kurzen Zeiten (Bruchteilen von Sekunden) einige zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden.

Nach erreichter Starterzündspannung tauchen bei genauen Untersuchungen noch folgende Verzögerungen auf:

Ansprechzeit =
= Ionisierungszeit + Übernahmezeit + Anzugverzögerung des mechanischen Relais

↓ statistischer Zündverzug

↓ Transferzeit auf die Hauptstrecke

Unter Ionisierungszeit versteht man die Zeitspanne vom Moment des Anlegens einer Spannung, die die Zündspannung überschreitet, bis zum Fliessen eines Anodenstromes. Die Ionisierungszeit der Starterstrecke ist abhängig von der Höhe des Startsignals und von einer eventuellen Vorionisierung durch eine Hilfsentladung. In jenen Anwendungsfällen, in denen es auf kurze Ionisierungszeit ankommt, verwendet man daher zweckmässigerweise Röhren mit Hilfsanode. Durch das Fliessen von ungefähr 30 µA als Hilfsentladung gelingt die Verminderung der Ionisierungszeit von mehreren 10 ms um 3 Zehnerpotenzen auf einige 10 µs, womit man eine regelmässige Ansprechzeit der Röhre erreicht.

Die Übernahmezeit umfasst die Zeitspanne vom Beginn des Fliessens eines Stromes in der Starterstrecke bis zum Auftreten eines Anodenstromes in der Hauptstrecke, in welcher als Arbeitswiderstand das elektromagnetische Relais liegt.

Bei unregelmässigen Pausenzeiten zwischen zwei Verzögerungsabläufen muss bei Steuerung durch die Speisespannung und verlangter guter Wiederholbarkeit darauf geachtet werden, dass die Ladung der Glättungskondensatoren sich nicht auf den Zeitkondensator überträgt.

Die Pausenzeiten dürfen übrigens nicht beliebig verkleinert werden. Abgesehen von der Abfallverzögerung des Relais braucht die Hauptstrecke Zeit, um sich nach Wegfall der Spannung zu neutralisieren (Deionisationszeit). Wird die minimale «Freiwerdezeit» nicht gewährt (≈ 2 ms je nach Anodenstrom), so erfolgt zwangsweise ein direktes Durchzünden beim Wiederanlegen der Anodenspannung (Verzögerung = 0!).

Damit ein Zeitrelais möglichst vielen Anwendungen zugänglich ist, soll es einen geeigneten Zeitbereich aufweisen. Es wäre sinnlos, würde man versuchen, mit einer einzigen Ausführung die verschiedenartigsten Anforderungen zu erfüllen.

Wird der Ladewiderstand im Zeitkreis durch ein Potentiometer realisiert, so kann unter den Gesichtspunkten der «worst case»-Dimensionierung und ohne die einzelnen Elemente auszusuchen (ausmessen) allerhöchstens ein Verhältnis der Einstellzeiten von 1:10 garantiert werden. Die Garantiedaten der Potentiometer-Hersteller bestimmen zur Hauptsache dieses Verhältnis (Anschlagwiderstand $\leq 1/5 \sqrt{\text{Gesamtwiderstand}}$, und das bei Lieferungstoleranzen des Gesamtwiderstandes von +30 bis −50 %). Werden aber grössere Bereiche gewünscht, so müssen sie schon mit hochwertigen Stufenschaltern verwirklicht werden (Fig. 6).

2.4 Zusammenfassung

Die beschriebene grundsätzliche Schaltung zur Zeitverzögerung gestattet nicht nur den Aufbau anzugverzögerter Geräte, sondern erlaubt auch — durch entsprechende Schaltungserweiterungen — die Ausführung eines ganzen Zeitrelais-Programmes.

3. Elektronische Zeitrelais mit Halbleitern

Grundsätzlich lassen sich analog zu den Kaltkathodenröhren auch mit Halbleiter-Bauelementen die entsprechenden Schaltungen lösen. Ein Mehraufwand ist aber immer dort zu beachten, wo solche Schaltungen als Einzelapparate im Starkstromnetz (220 V~) eingesetzt werden. Bis heute sind die mit Transistoren bestückten Schaltungen immer auf eine relativ

Fig. 7
Programmator für Gasfabrikation

niedrige Betriebsspannung angewiesen ($\leq$ 30 V inkl. Stabilisierung). Die steigenden Anforderungen an Lebensdauer, Betriebssicherheit und Schaltgeschwindigkeit einerseits und das Aufkommen der elektronischen kontaktlosen logischen Steuerungen, aufgebaut mit Halbleiterbauelementen, anderseits, liessen die entsprechenden Zeitschaltungen zum Bedürfnis werden. Denn da dienen sie nicht mehr als Einzelgerät, sondern erfüllen ihre Aufgabe im Verein mit anderen Funktionseinheiten und ermöglichen so im geschlossenen System die Lösung der vielfältigsten Probleme bei der Steuerung, Regelung und Überwachung des einfachsten Arbeitsablaufes bis zu schwer überblickbaren Prozessen (Fig. 7).

Natürlich wird die herkömmliche Technik schon aus wirtschaftlichen Gründen für viele Anwendungen kaum verdrängt werden. (Es ist z. B. heute finanziell noch nicht vertretbar, eine Stern-Dreieck-Umschaltung vollständig kontaktlos auszuführen.) Deshalb werden Neuerungen in beiden Techniken gleichermassen auf bedeutendes Interesse stossen.

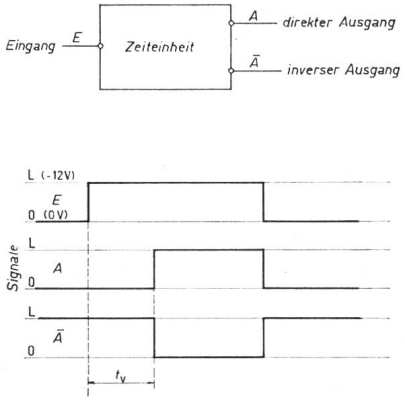


Fig. 8
Zeiteinheit als Baustein in einem logischen System
L und O sind die beiden Signalzustände
t_v Verzögerung zwischen Ein- und Ausgangssignal; $\bar{A}$ Signal am inversen Ausgang; A Signal am direkten Ausgang; E Verlauf des Eingangssignales

Die kontaktlosen logischen Einheiten können prinzipiell in der gleichen Unterteilung dargestellt werden, wie die Schaltungen mit Relaisausgängen. Hier werden aber die beiden stabilen Zustände nicht mehr durch die zwei möglichen Stellungen des mechanischen Relais markiert, sondern durch zwei festgelegte Spannungspotentiale. Das gilt sowohl für den Ausgang, wie auch für die Steuersignale des Einganges (Fig. 8). Dabei muss es sich nicht bei allen Einheiten um statische Eingangssignale handeln. Schaltungen mit dynamischen Gattern am Eingang reagieren ausschliesslich auf Steuerbefehle in Form von festgelegten Spannungssprüngen. Als Beispiel sei der monostabile Multivibrator erwähnt. Diese Schaltungsanordnung hat bekanntlich die Eigenschaft, auf dynamisch logische Befehle am Eingang Impulse von konstanter Breite am Ausgang abzugeben (Fig. 9). Die Zeitverzögerung auf kontaktloser Basis kann auf verschiedene Arten realisiert werden. Weitaus am häufigsten wird auch hier das Prinzip der Kondensatoraufladung angewendet.

3.1 Kurze Beschreibung der kontaktlosen Einheiten mit Zeitfunktion

Zusammen mit anderen Funktionseinheiten bilden die Zeitglieder ein kontaktloses, logisches Steuerungssystem für Kraftwerke, die Maschinen- und die Schwerindustrie. Aus dieser Be-

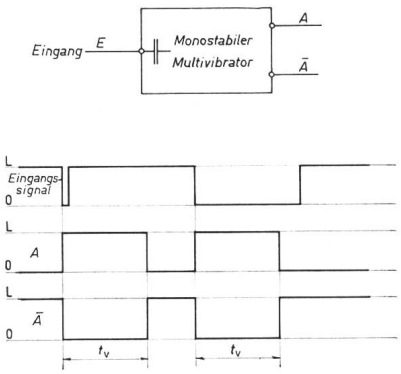


Fig. 9
Monostabiler Multivibrator als Baustein mit zugehörigem Diagramm
Bezeichnungen siehe Fig. 8

stimmung erklären sich alle Forderungen der Betriebssicherheit, der Lebensdauer und der robusten Konstruktion. Die Unempfindlichkeit gegen äussere Störeinflüsse wird durch ein relativ hohes Leistungsniveau der Einheiten erreicht. Diese Gesichtspunkte sind auch bei der Entwicklung der Zeiteinheiten richtungsweisend.

Zur Speisung der Einheiten werden in der Regel zwei stabilisierte Spannungen von $\pm$12 V benötigt. Die logischen Signale entsprechen:

Signal 0 = 0 V
Signal 1 oder L = –12 V

3.1.1 Verzögerungseinheit
(Fig. 11)

Dort, wo in konventionellen Steuerungen mit Schützen und Relais gewöhnliche Zeitrelais eingesetzt werden, übernimmt im kontaktlosen Steuerungssystem die Verzögerungseinheit die entsprechende Funktion. Das Hauptgewicht sei bei dieser Ausführung auf einen einfachen Schaltungsaufbau und nicht auf hohe Zeitgenauigkeit gelegt. Die Funktionsweise geht aus dem Schaltschema gemäss Fig. 11a hervor.

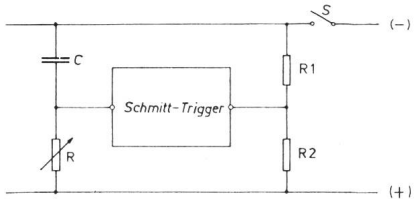


Fig. 10
Schaltung zur Unterdrückung von Spannungsschwankungen und Temperatureinflüssen
C Zeitkondensator; *R* Ladewiderstand; *R1, R2* Spannungsteilerwiderstände; *S* Schalter

Im Ruhezustand (Eingangssignal *0* an *E*) ist der Transistor *p2* gesperrt, da am Emitterfolger *p1* eine positive Vorspannung liegt. Somit erhält der inverse Ausgang A_i das Signal *1*, der direkte Ausgang A_d das Signal *0*. Wenn nun am Eingang *E* ein Signal *1* eingegeben wird, beginnt sich der Kondensator *k1* über den Spannungsteiler *r1*, *r2*, *r3* und *r6* aufzuladen. Nach einer gewissen Zeit durchläuft die Basisspannung von *p2* den Wert 0 V und wird dann negativ, *p2* wird leitend. Es erscheint nun an A_i ein Signal *0* und A_d ein Signal *1* mit der gewünschten Verzögerung. Dieser Zustand bleibt so lange erhalten, bis das Eingangssignal verschwindet.

Die Verzögerungseinheit hat keine Gedächtnisfunktion, d. h. der Kondensator wird sofort wieder entladen, wenn das Eingangssignal wieder *0* wird, bevor die Verzögerung abgelaufen ist. Bei Erscheinen eines neuen Eingangssignals wiederholt sich der Ladevorgang.

Die Flankensteilheit der beschriebenen Schaltung ist bescheiden (am direkten Ausgang: $\geqq$ 0,07 V/ms), genügt aber völlig zur Ansteuerung weiterer Verknüpfungseinheiten. Die Verzögerungszeit kann in engen Grenzen korrigiert werden und ist in Varianten von 0,2 bis 2 s unterteilt. Der Zeitkreis ist niederohmig und bedingt deshalb zur Realisierung von 2 s eine hohe Kapazität. Bei der Verwendung von Elektrolytkondensatoren an dieser Stelle können bei Umgebungstemperaturen zwischen − 20 und + 55 °C keine Zeitgenauigkeiten besser ± 30 % garantiert werden. Weitere zusätzliche Zeitfehler ergeben zulässige Speisespannungsschwankungen um + 10 bis − 15 %. Auch kann bei dieser Schaltung die Pausenzeit ohne Einfluss auf die Zeitgenauigkeit nicht beliebig verkürzt werden. (Die Entladung des Zeitkondensators *k1* kann kontaktlos nicht mit $\tau = 0$ erfolgen!)

Mit gewöhnlichen Transistoren ist es schwierig, eine genügend grosse und genaue Zeitverzögerung zu erhalten, da sie eine geringe Eingangsimpedanz aufweisen. Alle Parameter sind zudem noch temperaturabhängig. Die Schwierigkeiten können teilweise mit einer Doppelbasisdiode oder Unijunctiontransistor zur Abtastung des Ladezustandes des Zeitkondensators umgangen werden. Kompensierend in Bezug auf Spannungsschwankungen und Temperatureinflüsse wirkt die in Fig. 10 dargestellte, stark vereinfachte Prinzipschaltung. Damit lassen sich die Auswirkungen auf die Zeitgenauigkeit der erwähnten Einflüsse auf einige Prozent beschränken.

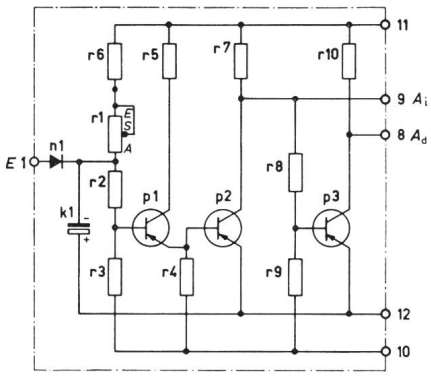
3.1.2 Einstellbare Zeiteinheit

(Fig. 12)

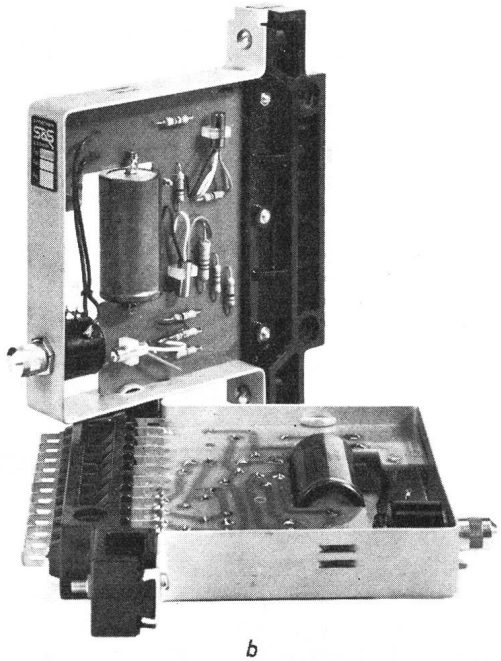
Diese Zeiteinheit besteht aus dem eigentlichen Zeitvorsatz (*Z*) und einem Flip-Flop (*FF*). Die folgende Betrachtung gilt lediglich der Funktion des Zeitvorsatzes.

Das Einschaltmoment der Einheit ist durch die Bedingung $E_1 = 1$ gegeben. Der Kondensator *k1* beginnt sich über die Widerstände *r12*, *r14* und die Potentiometer *r10* und *r13* aufzuladen. Beim Erreichen des «Zündpunktes» der Doppelbasisdiode *p4* entlädt sich *k1* über die nun niederohmig gewordene Emitter-Basisstrecke und den Widerstand *r15*, bis die «Löschbedingungen» erfüllt sind. Dann beginnt ein neuer Ladevorgang, so dass am Kondensator eine Sägezahnspannung und an *r15* durch die Entladestromstösse positive Spannungsimpulse erzeugt werden. Der erste Impuls an *r15* wird zum Schalten des dynamischen «Set»-Einganges (*S*) des nachgeschalteten Gedächtnisses (*FF*) verwendet und liefert demnach die Verzögerungszeit der Zeiteinheit. Der Silizium-npn-Transistor *p3* übernimmt die Schaltfunktion des Ladevorganges, der Silizium-*pnp*-Transistor *p2* dient zur Ansteuerung von *p3* und zur Erzeugung des Reset-Signales (*R*) für das Flip-Flop. *p1* als Vorverstärker und Umkehrstufe verringert die Belastung der Voreinheit und ermöglicht einen direkten Eingang (Beginn der Verzögerungszeit durch Signal *1*).

Sobald die Anfangsbedingung geändert wird (z. B. $E_1 = 0$), geht die Zeiteinheit in ihre Anfangslage zurück. Eine Zeit-



a



b

Fig. 11
Beispiel einer Verzögerungseinheit
a Prinzipschema
E Eingang; A_d direkter Ausgang; A_i inverser Ausgang; *r1...r10* Spannungsteiler; *p1...p3* p-d-n Transistoren; *A, S, E* Korrekturpotentiometer; *k1* Zeitkondensator; *n1* Diode zur Verriegelung weitere Eingänge;
b Ausführung
Das Funktionsdiagramm zeigt Fig. 8

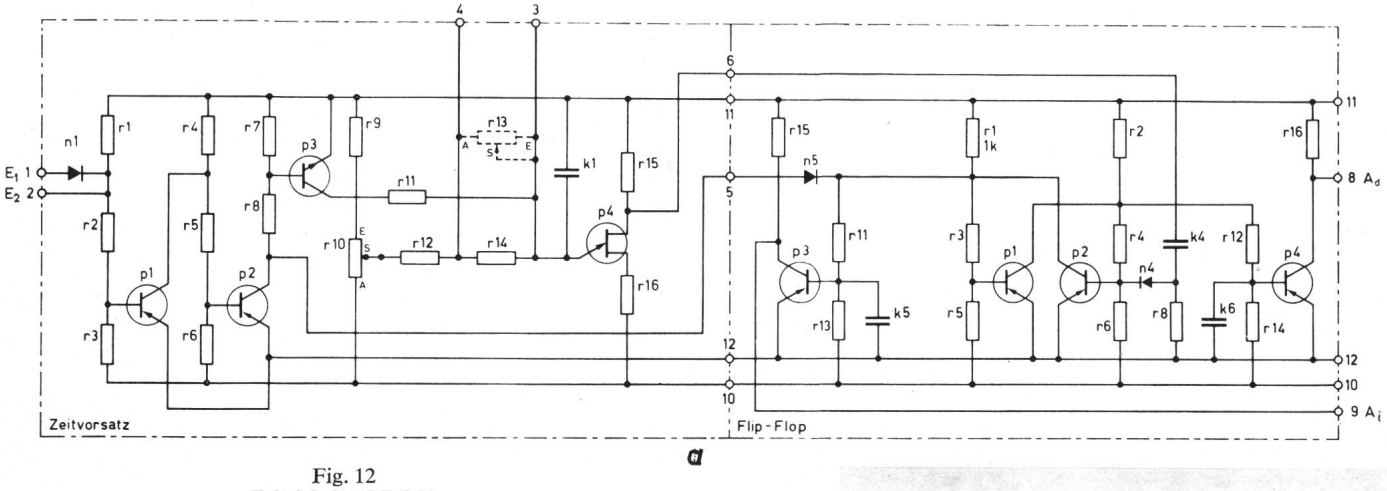


Fig. 12
Zeiteinheit ELZ 3.00

a Prinzipschema

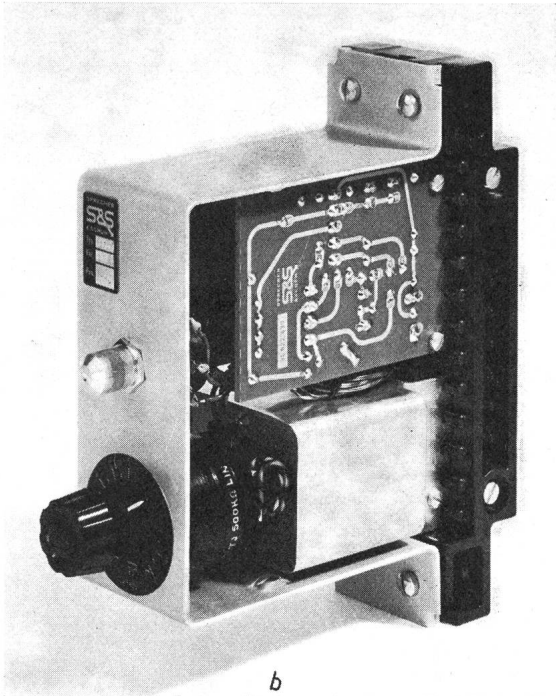
Der Eingang E_2 dient zum Starten der Zeiteinheit durch weitere «Und»-Bedingungen. Die Anschlüsse *3* und *4* ermöglichen den externen Anschluss des Einstellpotentiometers r13

r1...r16 Spannungsteilerwiderstände; *k1, k4, k5, k6* Zeit- und Kopplungs-Kondensatoren; *p1...p4* Transistoren; E_1, E_2 Eingänge zur Steuerung; *n1, n4, n5* Verknüpfungsdioden

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 11

b Ausführung

Das Funktionsdiagramm zeigt Fig. 9



b

bereichsvervielfachung ist durch Einschaltung von Untersetzerstufen zwischen Zeitvorsatz und Flip-Flop beliebig möglich.

Der maximale Zeitfehler durch Temperaturänderungen beträgt im Bereich von 0...55 °C : $\leqq \pm 5$ %, bezogen auf den bei 25 °C eingestellten Wert, der Zeitfehler durch Speisespannungsschwankungen $\leqq \pm 0{,}5$ % bei Verwendung der stabilisierten Speiseeinheiten.

Eng tolerierte Komponenten und ein zusätzliches Eichpotentiometer ermöglichen einen Einstellbereich von 1:25. Drei Varianten bedienen überlappend das Gebiet von 4 ms bis 10 s.

Häufig werden in elektronischen Steuerungen Impulsgeberschaltungen benötigt, sei es zur synchronen Verschiebung einer Information oder zur taktgebundenen Auslösung bestimmter Befehlsschritte. Grundsätzlich kann immer mit zwei Verzögerungszeitrelais durch geeignete Zusammenschaltung ein Impulsgeber realisiert werden.

3.1.3 Umschaltzeiteinheit

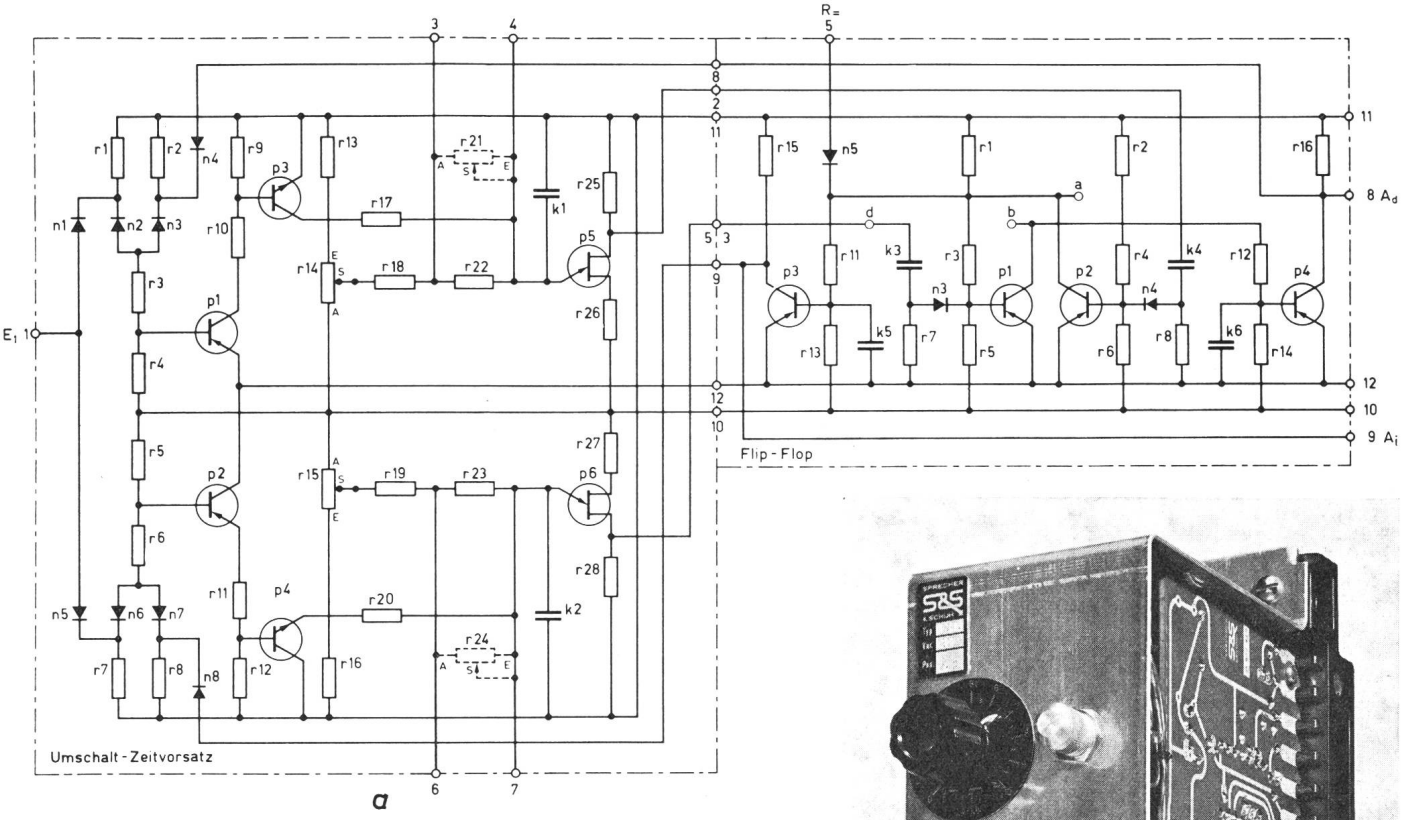
(Fig. 13)

Die Umschaltzeiteinheit stellt in der Regel einen kontaktlosen Präzisionsimpulsgeber dar. Die Ein- und Ausschaltzeiten (Impulsbreite und Pausenzeit) lassen sich dabei unabhängig voneinander stetig einstellen.

Die Umschaltzeiteinheit besteht aus dem Umschaltzeitvorsatz (*UZ*) und einem Flip-Flop (*FF*). Die elektronische Zeitverzögerungsschaltung arbeitet nach dem bei der Zeiteinheit beschriebenen Prinzip. Der Umschaltzeitvorsatz entspricht zwei einfachen Zeitvorsätzen, deren Eingänge über ein geeignetes ODER-Gatter miteinander verknüpft sind. Es wurde jedoch bewusst auf einen Vorverstärker verzichtet, so dass das erforderliche Eingangssignal an E_1 invers gegenüber dem zur Steuerung der einfachen Zeiteinheit benötigten Signal ist. Beim Start der Umschaltzeiteinheit liegt also E_1 an *0*, zusätzlich muss *R* auf 1 liegen (Freigabe des *FF*). Gleichzeitig befindet sich der Ausgang A_d noch auf *0*, A_i hingegen auf *1*. Es beginnt jetzt die erste Verzögerungszeit (t_1) zu laufen. Nach Ablauf derselben wird das *FF* durch den positiven Impuls an *r25* in den EIN-Zustand gekippt. Dadurch werden die Startbedingungen für die beiden Zeitvorsätze vertauscht: der obere wird blockiert und bei dem unteren beginnt die 2. Verzögerungszeit (t_2) zu laufen. Nach deren Beendigung wird das *FF* über *r28* wieder in den Aus-Zustand gekippt. Das Spiel geht so lange weiter, bis E_1 wieder auf *1* und *R* auf *0* gelegt werden. Die Möglichkeit, durch Zwischenschalten von Untersetzern längere Zeiten zu erhalten, ist auch bei der Umschaltzeiteinheit gegeben.

Das über Genauigkeit und Zeitbereich bei der Zeiteinheit Gesagte gilt analog für die Umschaltzeiteinheit (entsprechend den Arbeits- und Pausenzeiten).

In einem Überblick über elektronische Zeitrelais darf die Schaltung des monostabilen Multivibrators (*MMV*) nicht unerwähnt bleiben. Überall dort, wo auf einen Befehl ein Impuls von bestimmter Dauer abgegeben werden muss, findet der *MMV* seine Anwendung. Die in der Folge beschriebene Schaltung ist ein Beispiel einer kondensatorgekoppelten Einheit, welche zur Ansteuerung einen dynamisch logischen Befehl erfordert.



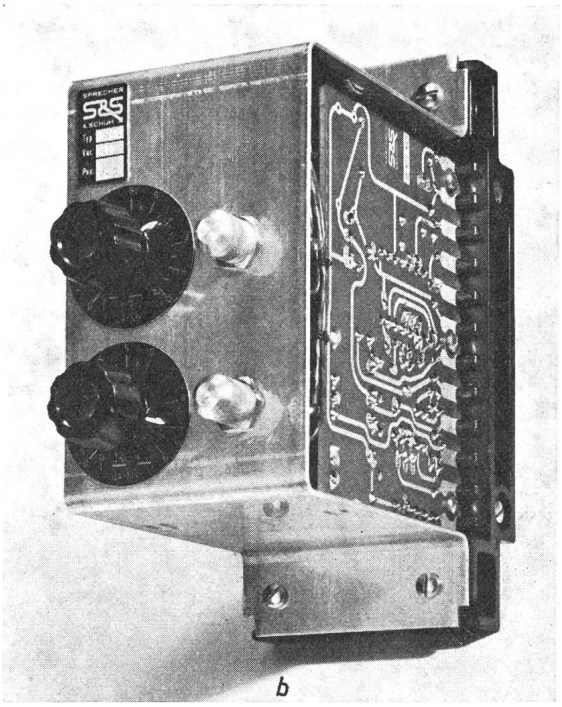


Fig. 13
Umschaltzeiteinheit ELZ 4.00

a Prinzipschema
r1...r28 Spannungsteiler und Vorwiderstände; *n1...n8* Verknüpfungsdioden; *k1...k6* Zeit- und Kopplungskondensatoren; *p1...p6* Transistoren
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 11 und 12
b Ausführung

3.1.4 Der monostabile Multivibrator
(Fig. 14)

Wie der Name sagt, weist die Einheit nur *einen* stabilen Zustand auf. Sie kann durch einen dynamischen Befehl vom stabilen in den quasistabilen Zustand gekippt werden. Die Schaltung bleibt eine vorbestimmte Zeit in diesem Zustand, um dann auf die stabile Seite zurückzukippen. Fig. 15 zeigt in zweckmässiger Vereinfachung die interne Schaltung und die Potentiale der Punkte *B* und *C* vor und nach dem logischen Befehl.

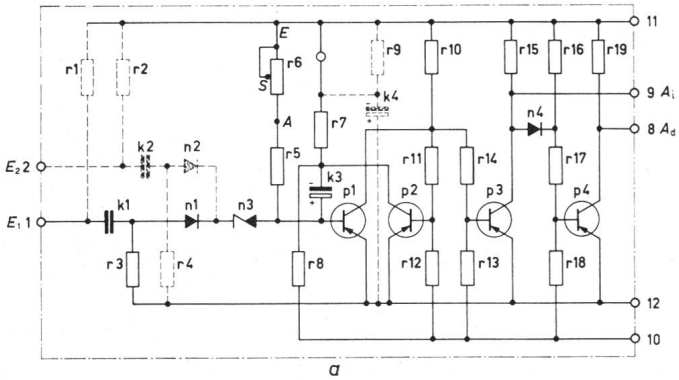
Im stabilen Zustand leitet die Basis von *T1* über *R2* und *R3*. Der Transistor *T2* wird gesperrt. Der Kondensator *C2* lädt sich praktisch auf 12 V. Der Punkt *B* liegt beinahe an 0 V, nur vermindert um den kleinen Spannungsabfall über der Basis-Emitterstrecke von *T1* und der Punkt *C* kann −12 V erreichen. Ein dynamischer Befehl sperrt *T1* und macht *T2* leitend. Die Spannung im Punkt *C* erreicht plötzlich 0 V und Punkt *B* ca. +12 V. Dieser Zustand bleibt stabil, bis *C2* sich entladen hat. Der Kondensator versucht sich umzuladen, d. h. der Punkt *B* strebt danach, eine Spannung von −12 V zu erreichen. Sobald aber das Potential des Punktes *B* einige hundert mV negativ wird, leitet *T1* wieder und sperrt *T2*. Punkt *C* gelangt wieder in seine ursprüngliche Lage, worauf *C2* sich über den relativ niederohmigen Widerstand *R5* und die Basis-Emitterstrecke des *T1* aufladen kann. Der Punkt *C* entspricht dem inversen Ausgang der Schaltung. Der direkte Ausgang kann mittels einer Umkehrstufe realisiert werden.

Es kommt in der Praxis oft vor, dass man einen monostabilen Multivibrator von mehreren Einheiten aus steuern will. Dazu versieht man den Multivibrator mit mehreren aus *C1*, *R1* und *D1* bestehenden Gattern. Die Katoden der Dioden (*D1*) werden alle an *B*, die Widerstände (*R1*) an 0 V angeschlossen.

Zur konstruktiven Ausführung sämtlicher kontaktloser Einheiten ist folgendes zu sagen:

Die elektronischen Schaltelemente sind auf einer Hartpapierplatte mit gedruckter Schaltung montiert. Diese Platte ist mit der Steck-Lötanschlussleiste verschraubt und verlötet. Ein Abdeckbügel aus eloxiertem Peraluman gewährt einen zusätzlichen Schutz. Die Anschlüsse können durch vibrations- und rüttelsichere Stecker oder durch Lötverbindungen hergestellt werden.

Genügen die Zeitgenauigkeiten derart analoger Schaltungen jedoch nicht, so muss mit aufwendigen digitalen Prinzipien gearbeitet werden. Die Zeitbasis wird hierbei aus hochgezüchteten, präzisen Oszillatoren gewonnen. Um die Genauigkeiten abermals zu steigern, werden die Schwingungen genauer Hochfrequenz-Oszillatoren mit Hilfe von Untersetzern auf die Bezugsfrequenz geteilt. Über geeignete Schaltmittel (Flip-Flop-



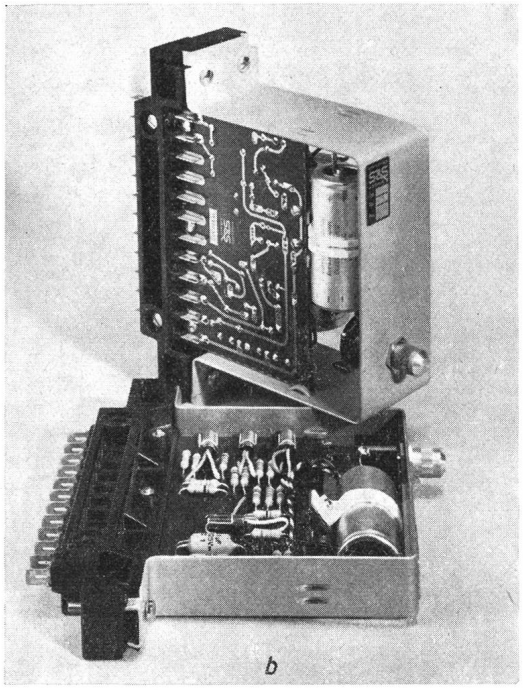


Fig. 14
Monostabiler Multivibrator ELZ 2.00

a Prinzipschema

Bezeichnungen siehe Fig. 11 und 12

b Ausführung

Kombinationen) werden sodann die vorgewählte Anzahl Impulse ausgezählt. Mit derartigen digitalen Methoden kann man bei entsprechendem Aufwand praktisch unbegrenzte Genauigkeiten erreichen.

3.2 Beschreibung eines elektronischen Programmschalters (Fig. 16)

Die sinusförmige 50-Hz-Netzspannung, welche hier als Zeitbasis herangezogen wird, gelangt über einen Brückengleichrichter an eine Schmitt-Triggerschaltung (*ST 14*). Am Ausgang erscheint somit eine fortlaufende 100-Hz-Rechteck-Impulsreihe mit einer Zeitgenauigkeit entsprechend der Netzfrequenz. Nach dem Durchlaufen der zusätzlichen Steuereinheiten erreicht die Impulsreihe den Eingang des ersten Flip-Flop (*F 18*) einer Flip-Flop-Schaltanordnung zur binären Zählung der an-

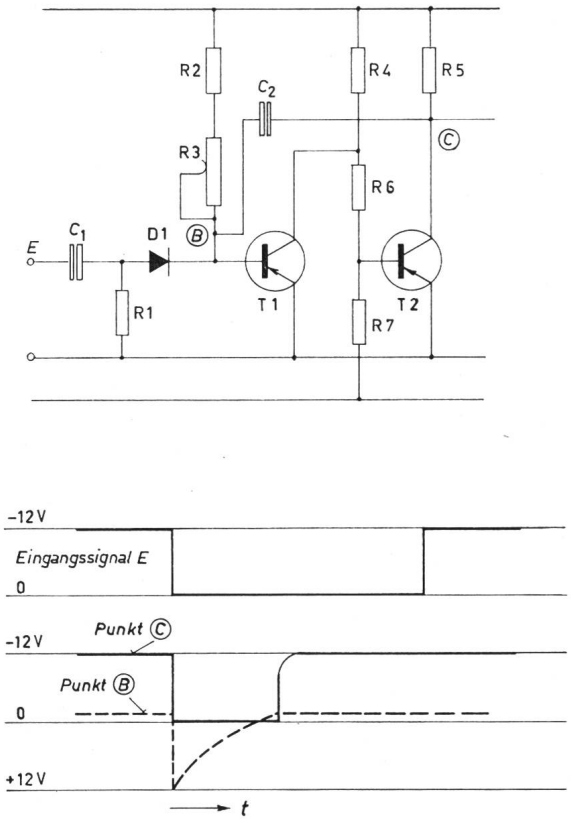


Fig. 15
Vereinfachte Darstellung der MMV-Schaltung mit dem Potentialverlauf der Kipp-Punkte

R1...R7 Spannungsteiler und Vorwiderstände; *T1, T2* Transistoren; *D1* Ankopplungsdiode; C_1, C_2 Kopplungs- und Zeitkondensator; *E* Eingang; *t* Zeit

Ⓑ Basispunkt von T1; Ⓒ Kollektorpunkt von T2

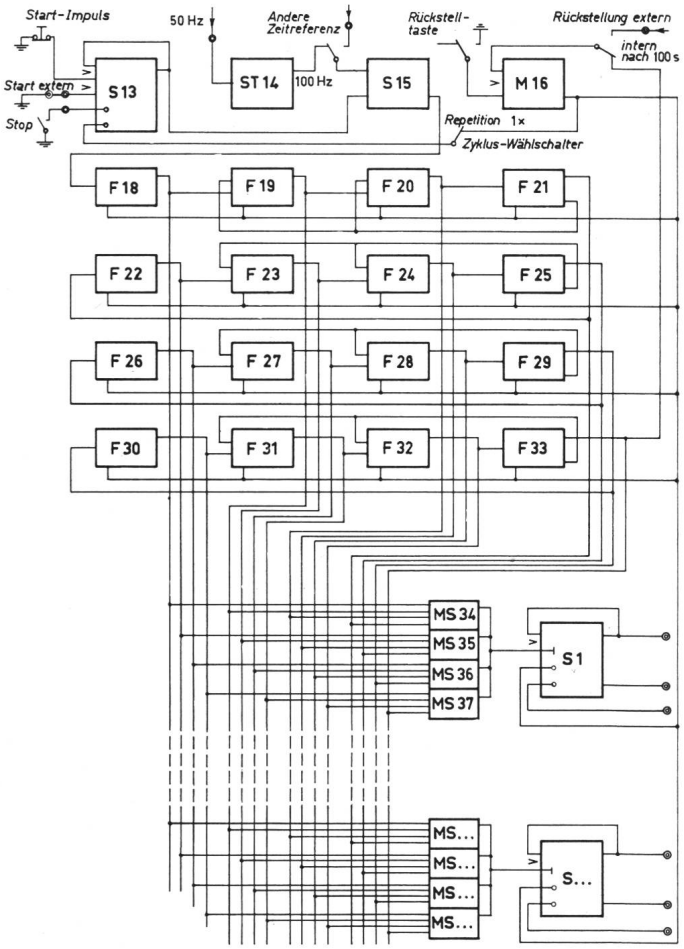


Fig. 16
Blockschema zu elektronischem Programmschalter

S1...S15 Schalteinheiten zum Teil mit Gedächtnisfunktion; *ST 14* Schmitt-Trigger; *MS 34...MS...* codierte Multiswitch; *M 16* monostabiler Multivibrator; *F 18...F 33* Flip-Flopeinheiten

laufenden Impulse. Mit 4 Dekaden lässt sich bis 9999 zählen. Entsprechend der Eingabe von 100 Hz kann bei der beschriebenen Ausrüstung eine Auszählung von max. 99,99 s realisiert werden. In der 1. Dekade (*F 18...F 21*) werden die Ziffern der 1/100-Sekunden, in der 2. Dekade (*F 22...F 25*) die 1/10-Sekunden, in der 3. Dekade (*F 26...F 29*) diejenigen der Einer und in der 4. Dekade (*F 30...F 33*) schliesslich die Zehner ausgezählt. Auf dem codierten Multiswitch werden nun sämtliche *FF*-Ausgänge einer Dekade zusammengefasst; und zwar auf *MS 34* der 1. Dekade (1/100-Sekunden), auf *MS 35* der 2. Dekade (1/10-Sekunden), auf *MS 36* der 3. Dekade (1/1-s), und auf *MS 37* die Ausgänge der *FF* der 4. Dekade (10/1 s). Stimmen die entsprechenden *FF*-Signale mit der Vorwahl am Multiswitch sämtlicher Dekaden überein, wird eine Einheit *S1* mit Selbsthaltung eingeschalten. Somit halten die dualen Ausgänge von *S1* ihr logisches Signal bis zur Rückstellung und erneutem Zählbeginn bei. Die zuletzt beschriebene Ausrüstung der 4 Multiswitch plus Gedächtniseinheit kann so oft von der Grundschaltung angespiesen werden, wie es die Belastung der *FF*-Ausgänge erlaubt. Die Rückstellung des Zählers kann wahlweise intern nach 100 s oder extern mit jeder beliebigen Zeiteinstellung automatisch oder manuell erfolgen. Zudem ist es möglich, ausser der Netzspannung (100 Hz) extern eine andere Zeitreferenz einzuspeisen. Die Zusatzeinrichtungen ermöglichen ausserdem jederzeit das Anlegen eines Start- und Stop-Befehls.

Literatur

[1] *R. Hübner:* Kaltkatodenrelaisröhren und Dekadenzählröhren, Eigenschaften und praktische Anwendungen. Hüthig Heidelberg, 1965.

[2] *M. Vollenweider:* Stabilisierungsröhren. Elektroniker 2(1963)3, S. 25...28.

Adresse des Autors:
U. Zahn, dipl. Fernmeldetechniker, Sprecher & Schuh AG, 5034 Suhr.

Beleuchtungsstärken für Arbeitsräume

Von *W. Riemenschneider,* Buchs

628.977

Die zur Verrichtung einer Arbeit notwendigen Beleuchtungsstärken waren seit jeher ein ausgiebiges Diskussionsthema. Sehr viele Untersuchungen sind zur Ermittlung der notwendigen, oder auch optimalen Beleuchtungsstärken durchgeführt und bekannt geworden. Die Ergebnisse sind zum Teil sehr unterschiedlich, wohl deshalb, weil einerseits die Versuchsanordnung einen grossen Einfluss auf das Ergebnis haben kann und anderseits nur eine genügend grosse Anzahl Versuchspersonen die Sicherheit geben, dass das Ergebnis nicht durch die individuellen Unterschiede in der Empfindung beeinflusst wird. Auch durch die Gewohnheiten grösserer Personengemeinschaften können unterschiedliche Ansprüche, die meistens unbewusst sind, an die Beleuchtung gestellt werden. Ja sogar der Breitengrad des Wohnortes wirkt sich in dieser Hinsicht aus, hängt doch von ihm die Dauer des Tageslichtes, wie auch seine Intensität und der zeitliche Verlauf ab. Aber auch die jeweiligen technischen Erkenntnisse der Beleuchtungsindustrie und der Lampen- und Leuchtenhersteller scheint sich auf die Versuchsergebnisse auszuwirken. Ist doch bis heute keine Untersuchung bekannt bei der Beleuchtungsstärken von z. B. 20 000 lx als optimaler Wert gefunden wurde, obwohl diese Beleuchtungsstärke bei Arbeiten im Freien, also mit Tageslicht, als sehr angenehm empfunden werden. So ist es kein Wunder, dass es der CEI (Internationale Beleuchtungskommission) noch nicht gelungen ist, einheitliche Richtlinien für die Innenraumbeleuchtung aufzustellen, und dass die einzelnen Nationalkomitees in ihren Leit-

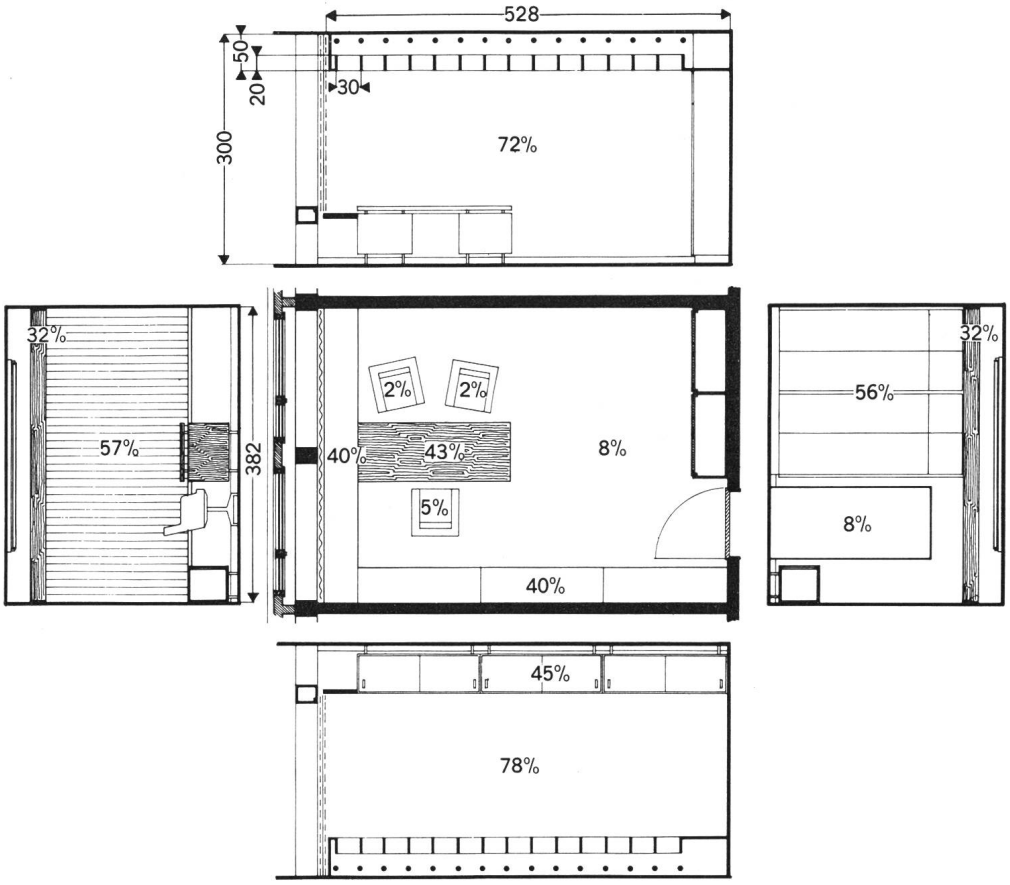


Fig. 2
Versuchsraum für den 1. Versuch mit Angabe der Abmessungen und den mittleren Reflexionsgraden der sichtbaren Flächen