

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	76 (1985)
<b>Heft:</b>	9
<b>Artikel:</b>	Umrichtersystem mit höherem Grundschwingungsgehalt für die Drehstromtraktion
<b>Autor:</b>	Alexa, D. / Turic, L. / Stiurc, D.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-904597">https://doi.org/10.5169/seals-904597</a>

### **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:** 26.01.2026

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

# Umrichtersystem mit höherem Grundschwingungsgehalt für die Drehstromtraktion

D. Alexa, L. Turic und D. Stiurcă

In der Arbeit wird das Prinzip eines Umrichtersystems mit Gleichspannungs-Zwischenkreis beschrieben, das nur einen einzigen Kommutierungskondensator und eine reduzierte Anzahl von Thyristoren bzw. Dioden enthält. Der Pulswechselrichter liefert an seinen Ausgang entweder eine impulsamplitudenmodulierte Spannung oder eine treppenförmige 12-Puls-Spannung mit höherem Grundschwingungsgehalt.

Dans cet article on présente le principe d'un convertisseur de fréquence statique avec un circuit intermédiaire à tension continue ayant un seul condensateur de commutation et un nombre réduit de thyristors et de diodes. L'onduleur fournit, soit une tension modulée en impulsion et amplitude, soit une tension échelonnée à 12 impulsions contenant une part élevée en harmonique fondamentale.

## 1. Einleitung

Die verlustarme Drehzahlverstellung von asynchronen Drehstrom-Fahrmotoren erfordert ein Drehspannungsnetz veränderlicher Spannungsamplitude und Frequenz. Als verbindende Stellglieder zwischen den Bahnnetzen und den Fahrmotoren müssen deshalb Umrichter vorgesehen werden. In den meisten Anwendungsfällen werden Umrichtersysteme benutzt, die aus einem netzseitigen und einem maschinenseitigen Stromrichter bestehen. Beide sind über einen Zwischenkreis verbunden, wobei sich Systeme mit Gleichspannungs- und solche mit Gleichstrom-Zwischenkreis unterscheiden lassen [1; 2; 3].

Das Umrichtersystem mit Gleichspannungs-Zwischenkreis arbeitet mit fester Gleichspannung und Polarität am Eingang des maschinenseitigen Stromrichters. Um hieraus entsprechend den Drehzahlanforderungen ein Drehsystem veränderlicher Spannung und Frequenz zu erzeugen, wird ein Pulswechselrichter verwendet. Die Vorteile des Pulswechselrichters sind: hohe Stellgeschwindigkeit und sehr guter Netzeistungsfaktor [4; 5].

Im folgenden wird eine Variante eines statischen Frequenzumrichters

mit Gleichspannungs-Zwischenkreis vorgestellt, der zur Speisung eines oder mehrerer Wechselstrom-Fahrmotoren bestimmt ist. Charakteristisch für diese Variante ist die reduzierte Anzahl von LC-Kommutierungskreisen und Thyristoren oder Dioden im Vergleich mit dem in [6] vorgeschlagenen Wechselrichter.

## 2. Funktionsprinzip

Der Wechselrichter in Figur 1 erlaubt, die Grundschwingungsamplitude der Ausgangsspannung  $U_1$  zu variieren, solange die Ausgangsfrequenz  $f_1$  kleiner als die Nennfrequenz  $f_{IN}$  des Motors ist. Bei Frequenzen, die größer als  $f_{IN}$  sind, behält der Wechselrichter den konstanten Wert  $U_1$  bei.

Für  $f_1 < f_{IN}$  geschieht die Modifikation der Ausgangsspannung und -frequenz durch Variation der Impulsfrequenz  $f_p$  des Wechselrichters. Zwischen den beiden Frequenzen besteht ein Verhältnis  $m$ , welches für verschiedene Einstellbereiche der Frequenz  $f_1$  konstant bleibt und die Werte  $m = 144, 96, 48, 24$  und  $12$  annehmen kann, während die Ausgangsfrequenz zwischen  $1\text{ Hz}$  und  $f_{IN}$  schwankt.

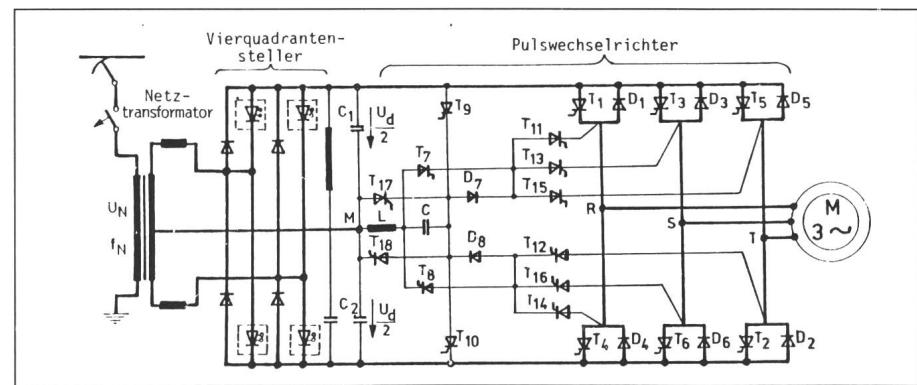


Fig. 1 Prinzipielles Schema des statischen Frequenzumrichters

### Adresse der Autoren

Prof. Dr.-Ing. D. Alexa, Prof. Dr.-Ing. L. Turic und Dipl.-Ing. D. Stiurcă, Lehrstuhl für Elektronik und Rechenanlagen am Polytechnischen Institut Iassy, Strada 23 August Nr. 22, Iassy, Rumänien.

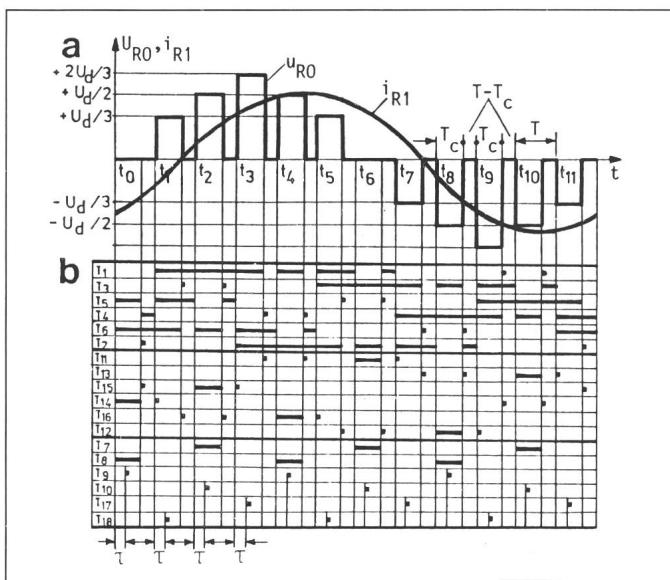


Fig. 2  
 a Ausgangsspannung  $u_{R0}$  für  $m = 12$   
 b Programm der Einschaltzeitpunkte der Thyristoren

In Figur 2a sind die Wellenformen der Phasenausgangsspannung  $u_{R0}$  und der Grundschwingung des Phasenstromes  $i_{R1}$  dargestellt, im Beispiel für  $m = 12$ . Das Steuerprogramm der Thyristoren für diesen Fall ist in Figur 2b wiedergegeben. Im folgenden wird die Funktionsweise des Wechselrichters im Zeitintervall ( $t_2$  bis  $t_4$ ) beschrieben (Fig. 2a-4).

Vor dem Zeitpunkt  $t_2$  sind die Thyristoren  $T_1$  und  $T_5$  und die Diode  $D_3$  eingeschaltet, demzufolge sind die Spannungen an den Klemmen R, S und T gleich Null. Im Zeitpunkt  $t_2$  wird  $T_5$  durch Zünden der Thyristoren  $T_7$  und  $T_{15}$  gelöscht. Der Kondensator C, aufgeladen auf eine Spannung nahe  $-U_{max} \approx -U_d$  mit der in Figur 3 angegebenen Polarität, entlädt sich in den Schwingkreis  $L-C-D_7-T_{15}-D_5-C_1$ . Wenn der Strom, der durch den Kondensator fließt, den Wert des Laststromes  $I_T$ , im Kommutierungsprozess praktisch als konstant angenommen, erreicht, wird der Laststrom vollständig von Thyristor  $T_5$  auf den Kreis

$C_1-L-C-D_7-T_{15}$  umgeschaltet (Fig. 3). Weil der durch die Diode  $D_5$  fließende Strom Null wird, behält der Strom durch den Kondensator den Wert  $I_T$  bis zum Zeitpunkt  $t_2 + \Delta t$  bei, bei dem der Kondensator vollständig entladen ist. Zu diesem Zeitpunkt wird der Thyristor  $T_7$  leitend, und der Laststrom der Phase T fließt durch  $C_1$ , L,  $T_7$  und  $T_{15}$ . Ungefähr zum Zeitpunkt  $t_2 + \Delta t$  ( $\Delta t$  stellt die Dauer des Kommutierungsprozesses von etwa 100...150  $\mu s$  dar) werden Zündimpulse für  $T_1$  und  $T_6$  gegeben, und die Diode  $D_3$  wird blockiert. Im Zeitintervall ( $t_2 + \Delta t$  bis  $t_2 + T_c$ ) betragen die Spannungen an den Klemmen R, S und T gleich  $+U_d/2$ ,  $-U_d/2$  und Null. Ebenfalls in diesem Zeitintervall wird der Laststrom  $I_T$ , der durch den Kreis  $L-T_7-T_{15}$  fließt, von  $C_1$  auf den Leiter, der die Klemme M mit dem Mittelabgriff des Speise- transformators verbindet, umgeschaltet [7; 8].

Im Zeitpunkt  $t_2 + \tau$ , wobei  $\Delta t < \tau < T_c$  ist, wird das Zünden des Thyristors  $T_{10}$  gesteuert, und der Kondensator C wird auf eine Spannung von  $U_d$  aufgeladen; dann wird  $T_{10}$  blockiert. Weiter wird im Zeitpunkt  $t_2 + T_c$   $T_6$  durch Zünden von  $T_{16}$  und Entladung des Kondensators C über den Kreis  $L-C_2-D_6-T_{16}-D_8-C$  gelöscht. Nach Beendigung des Löschprozesses bleibt der Kondensator entladen, und ungefähr im Zeitpunkt  $t_2 + T_c + \Delta t$  werden die Thyristoren  $T_1$ ,  $T_3$  und  $T_5$  gezündet. Dadurch werden die Thyristoren  $T_7$  und  $T_{15}$  blockiert, und der Kondensator C über den Kreis + Klemme  $-T_3-T_{16}-D_8-C-L-M$  auf eine Spannung von ungefähr  $-U_d$  aufgeladen. Danach sind die Thyristoren  $T_1$  und  $T_5$

und die Diode  $D_3$  bis zum Zeitpunkt  $t_3$  leitend, während die Spannungen an den Klemmen R, S und T gleich Null sind.

Im Zeitpunkt  $t_3$  wird durch Zünden von  $T_{15}$  das Löschen von  $T_5$  gesteuert. Nach Beendigung dieses Löschprozesses wird ungefähr im Zeitpunkt  $t_3 + \Delta t$  die Zündung von  $T_2$  veranlasst, worauf sich C auf eine Spannung von etwa  $+U_d$  auflädt. Ebenfalls zu diesem Zeitpunkt werden Zündimpulse für  $T_1$  und  $T_6$  gegeben und die Diode  $D_3$  blockiert. Zwischen  $t_3 + \Delta t$  und  $t_3 + T_c$  sind die Thyristoren  $T_1$  und  $T_6$  und die Diode  $D_2$  leitend, und demzufolge sind die Spannungen an den Klemmen R, S und T jeweils  $+2U_d/3$ ,  $-U_d/3$  und  $-U_d/3$ . Im Zeitpunkt  $t_3 + \tau$  wird der Thyristor  $T_{17}$  gesteuert, und der Kondensator C wechselt seine Polarität durch Umladung über den Schwingkreis  $C-L-T_{17}$ . Die neue Polarität des Kondensators ermöglicht diesem das Löschen von  $T_1$  im Zeitpunkt  $t_3 + T_c$ .

Im weiteren funktioniert der Wechselrichter auf der Basis der weiter oben beschriebenen Kommutierungsprozesse, entsprechend dem in Figur 2b wiedergegebenen Steuerungsprogramm. Aus der Beschreibung des Funktionsprinzips des Wechselrichters kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- In den Zeitpunkten  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  usw. und in  $t_0 + T_c$ ,  $t_1 + T_c$ ,  $t_2 + T_c$  usw. wird ein Hauptthyristor gelöscht, während in den Zeitpunkten  $t_0 + \Delta t$ ,  $t_1 + \Delta t$ ,  $t_2 + \Delta t$  usw. und in  $t_0 + T_c + \Delta t$ ,  $t_1 + T_c + \Delta t$  usw. drei Haupt- und ein Nebenthyristor ( $T_7$  oder  $T_8$ ) gezündet werden.

- Der Kondensator C wird auf eine Maximalspannung von ungefähr  $\pm U_d$  aufgeladen, was ein Vorteil gegenüber dem McMurray-Wechselrichter darstellt, dessen drei Kondensatoren eine

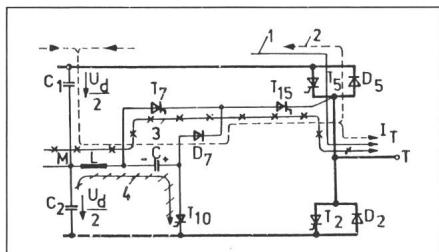


Fig. 3 Die Ströme für verschiedene Zeitintervalle  
 1 vor dem Zeitpunkt  $t_2$   
 2 im Löschprozess  
 3 im Zeitintervall  $t_2 + \Delta t < t < t_2 + T_c$   
 4 Entladestrom des Kondensators C im Zeitpunkt  $t_2 + \tau$

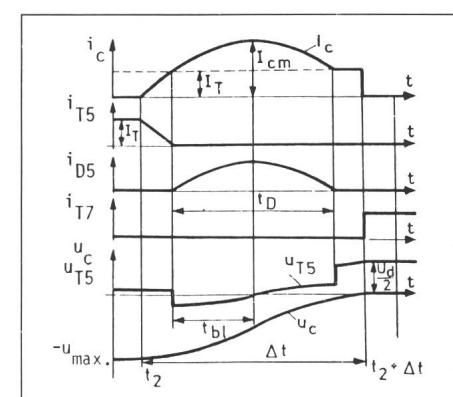


Fig. 4 Spannungs- und Stromverläufe beim Ausschaltvorgang für den Thyristor T5  
 Schaltung nach Figur 3

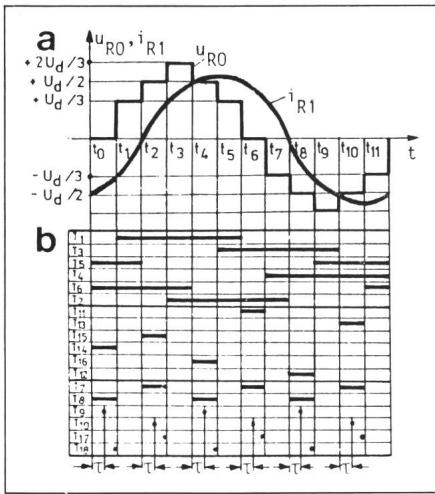


Fig. 5 Vollsteuerung des Wechselrichters

Kapazität von  $C/2$  haben und sich bei gleicher Nennleistung des Wechselrichters auf Spannungen aufladen, die 2...2,5mal grösser als  $U_d$  sind. Aus diesem Grunde sind die Thyristoren  $T_{11}$ – $T_{16}$  des Wechselrichters in Figur 1 weniger spannungsbelastet.

– Die Thyristoren  $T_9$  und  $T_{10}$  werden  $m/4$ -mal in einer Ausgangsspannungsperiode gezündet, um den Kondensator C von Null auf  $\pm U_d$  aufzuladen. Über die Nennfrequenz  $f_{IN}$  des Motors kann man mit Hilfe des Steuerungsschemas (Fig. 5) eine 12-Puls-Wellenform der Ausgangsspannung erzeugen.

Die Thyristoren  $T_{17}$  und  $T_{18}$  werden für die Umkehrung der Polarität des Kondensators C nur dreimal pro Ausgangsspannungsperiode gezündet, unabhängig davon, ob der Wechselrichter komplett nach Figur 5 gesteuert wird oder ob er durch Impulse gesteuert arbeitet.

### 3. Spektrumanalyse der Ausgangsspannung

Der Verlauf der Phasenausgangsspannung  $u_{R0}$  für eine ganze Periode der Ausgangsspannung ist in Figur 6 dargestellt. Diese Treppenform gilt für die rein resistive oder induktiv-resistive Last, sie hat Sinuscharakter. Die Entwicklung dieser Spannung in einer Fourierreihe ergibt:

$$u_{R0}(t) = \sum_{p=1}^{p=m/12} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{8U_d}{3n\pi} \cdot \sin n \frac{\pi}{2} \cdot (1 + \cos n \frac{\pi}{3}) \cdot (1 + \cos n \frac{\pi}{6}) \\ \cdot \sin n \frac{\pi\lambda}{m} \cdot \sin n \left[ \omega_1 t - \left( p-1 + \frac{\lambda}{2} \right) \frac{2\pi}{m} \right]$$

Hierin sind  $\omega_1 = 2\pi f_1$  die Ausgangskreisfrequenz,  $n$  die Ordnung der Harmonischen und  $\lambda = m T_c f_1$  die relative Einschaltzeitdauer des Wechselrichters.

Die Ausgangsspannung des Wechselrichters enthält keine höhere Harmonische paariger oder dritter sowie mehrfachdritter Ordnung. Die Harmonischen 5ter und 7ter Ordnung weisen Werte auf, die vernachlässigt werden können.

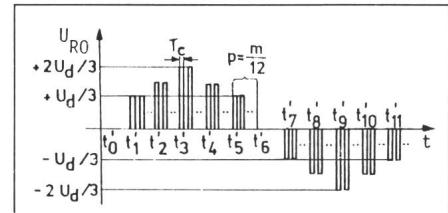


Fig. 6 Ausgangsspannung  $u_{R0}$  für  $m > 12$

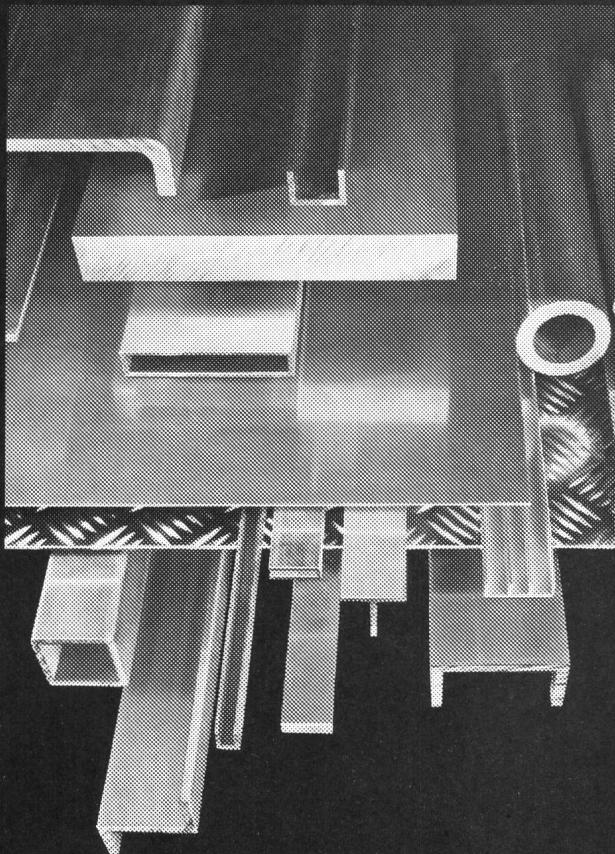
Fällt die Ausgangsfrequenz  $f_1$  auf 0, so muss die Einschaltzeitdauer  $T_c$  genügend gross sein, um den Spannungsabfall auf dem Statorwiderstand ausgleichen zu können. Deswegen fällt der Wert der Einschaltzeitdauer nie unter den Wert  $T_{cmin} = 200 \mu s$  bis  $250 \mu s$ .

### Literatur

- [1] G. Ciessow, G. Götz und P. Grumbrecht: Drehstrom-Antriebssysteme für Bahnfahrzeuge. Techn. Mitt. AEG-Telefunken 67(1977)1, S. 35...43.
- [2] E. Kill: Elektrische Bahnsysteme – heute und morgen. ETZ 101(1980)16/17, S. 938...943.
- [3] P. Bowier and C. Couto: PWM inverter optimisation for a high speed traction drive. International IEE Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1...4 May 1984, London.
- [4] K. Heumann: Grundlagen der Leistungselektronik. Stuttgart, Teubner-Verlag, 1975.
- [5] R. Jäger: Leistungselektronik. Grundlagen und Anwendungen. 2. Auflage. Berlin, VDE-Verlag, 1981.
- [6] D. Alexa: Umrichtersystem mit Pulswechselrichter und einem höheren Grundschwingungsgehalt der Ausgangsspannung. ETZ-Archiv 3(1981)12, S. 435...436.
- [7] D. Alexa und L. Turic: Statische Frequenzumrichter für Speisung von Wechselstrommotoren mit Phasenausgangsspannung in Treppenform mit 12 Pulsen. ETZ-Archiv 2(1980)10, S. 291...293.
- [8] D. Alexa: Eine andere Variante des Umrichtersystems mit Gleichspannungs-Zwischenkreis und einem höheren Grundschwingungsgehalt der Ausgangsspannung. ETZ-Archiv 5(1983)6, S. 203...205.

# Profile, Bleche, Platten

Bei uns am Lager!



Die Wahrscheinlichkeit ist gross, unter 1300 Profil- und 500 Blechsorten Ihren Aluminium-Bedarf direkt ab Lager ALLEGA zu decken. – Bleche, Platten, Bänder, Warzenbleche, Verbundplatten (Alucopan und Alucobond), Stangen, Rohre, Standard- und Spezialprofile, Systemprofile für Innen- und Außenarchitektur sowie für den Nutzfahrzeugbau lagern wir in genügenden Mengen für Sie. Dadurch sparen Sie Lagerraum und bewirtschaften Ihren Betrieb kostengünstig. Unser Lager – Ihr Vorrat!

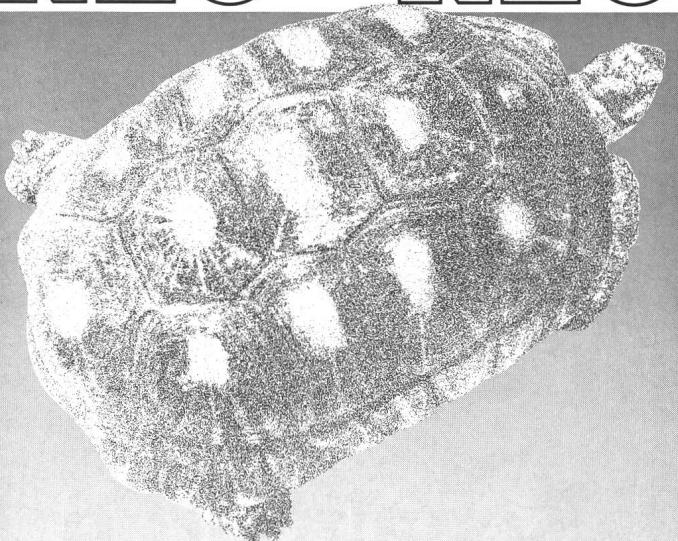
ALLEGA AG  
Buckhauserstrasse 5, 8048 Zürich  
Tel. 01/497 4111, Telex 822 339

**ALLEGA**  
für Aluminium

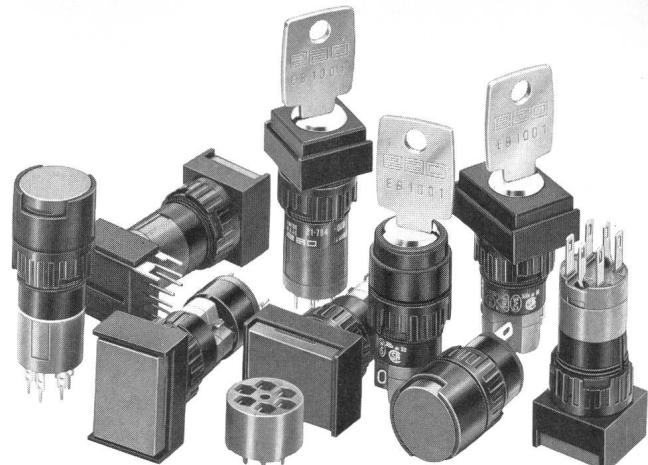


2/84

NEU NEU



**Der gemeinsame Vorteil:  
IP 65  
Strahlwassergeschützte Front!**



Die neuen Drucktasten der Baureihe 51 mit seitlich hochgezogenen Frontrahmen. Die Frontabmessungen 18 x 24, 18 x 18 und Ø 18 mm sowie die Montagebohrung Ø 16 mm entsprechen den Baureihen 01 und 31, wie auch die hohen Ansprüchen genügenden Sprung-, Low Level- und Hallschaltelelemente. Leistungsbe-  
reich: einige  $\mu$ A/  $\mu$ V bis 5 A/250 V.

Strahlwassergeschützte Meldeleuchten, -Leuchtdrucktasten und -Sicherheits-Schlüsselschalter.



**Elektro-Apparatebau  
Olten AG**  
Tannwaldstrasse 88  
4601 Olten  
Telefon 062/25 22 50  
Telex 981 602

**Serie 51**

Wir wünschen ausführliche technische  
Unterlagen

Firma \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_

zuständig \_\_\_\_\_



## Schaltuhren

(und Stundenzähler)

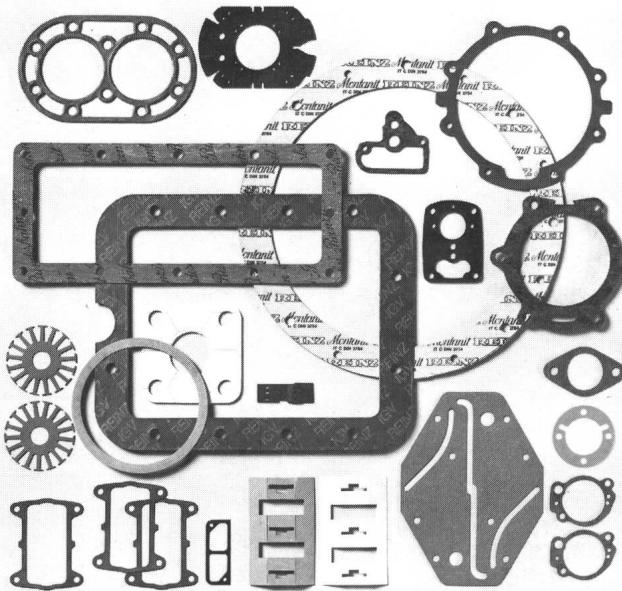
sind unsere Spezialität  
e.o.bär

3000 Bern 13  
Postfach 11  
Wasserwerksgasse 2  
Telefon 031/22 76 11

8000 Zürich  
Ankerstrasse 27  
Telefon 01/242 85 13

1200 Genève  
16, rue Ed.-Rod  
Tél. 022/44 74 67

Wachendorf AG, Technischer Grosshandel, 4002 Basel



## Stanzteile

für viele Anwendungsbereiche, in jeder beliebigen Form aus Gummi, Kunststoff, IT-Materialien, Öl-papier, Elektro-isolierstoffen und Weichmetall.

Unser modern eingerichtetes Stanzwerk (vormals Pitschen AG ZH/BS) fertigt für Sie Normdichtungen sowie Dichtungen und andere Stanzteile nach Ihren Angaben.

Nennen Sie uns den Anwendungsbereich; wir beraten Sie gerne bei der Wahl des geeigneten Materials.

Filiale in 8404 Winterthur  
Frauenfelderstrasse 21a  
Tel. 052 27 20 22

# Wachendorf

Tel. 061 42 90 90

**Raychem**

**Wärme-schrumpfendes Kabelzubehör**

Für Innenraum, Freiluft und Bodenverlegung, Nieder- und Hochspannung.

Produkte aus 25 Jahren Forschung und Erfahrung.

Raychem AG  
Postfach 229, 6340 Baar  
Tel. 042/31 81 31  
Telex 868 704