

J. SCHWARZ

## Selektivitätsprobleme in Thyristorstromrichteranlagen

Heute hat sich allgemein die Thyristortechnik im Stellglied für elektromotorische Antriebe bis zu größten Leistungen durchgesetzt. Durch den Einsatz der Halbleiterbauelemente, mit ihrer geringen Überlastfähigkeit gegenüber der herkömmlichen Technik, war ein völliges Überdenken der Schutzkonzeption für die Stromrichter erforderlich.

Die Erarbeitung der Schutzkonzeption ist eines der schwierigsten Probleme bei der Dimensionierung der Anlagenteile. Der Schutz der Bauelemente vor Überströmen ist ein wesentlicher Teil der Schutzkonzeption. Im Rahmen dieses Vortrages wird nur auf kurzschlußartige Vorgänge Bezug genommen, die die Ventile gefährden. Vorwiegend werden Stromrichter großer Leistung in Drehstrombrückenschaltung behandelt.

### 1. Dimensionierungsgesichtspunkte

Primäre Funktion der Überstromschutzkonzeption ist der Schutz der Thyristoren und Dioden im Leistungsteil der Thyristorstromrichteranlage vor Überströmen. Dabei kann die Schutzwirkung vor verschiedenen Störungen im Lastkreis verschieden weit getrieben werden (Störungen sollen Vorgänge im Leistungskreis sein, die Beanspruchungen an den Bauelementen hervorrufen, die über die normalen Beanspru-

chungen hinausgehen.

#### 1.1. Störungen im Lastkreis netzgelöschter Stromrichter

Als wesentliche Störungen sind die folgenden zu betrachten:

- innerer Kurzschluß (Durchbruch eines Ventils)
- äußerer Kurzschluß (Sammelschienenkurzschluß)
- äußerer Kurzschluß (Kurzschluß über den Motorklemmen)
- Wechselrichterkippen (bei Umkehrantrieben)
- Kreisstromkurzschluß

Die ersten drei Störungen sind im Bild angedeutet.

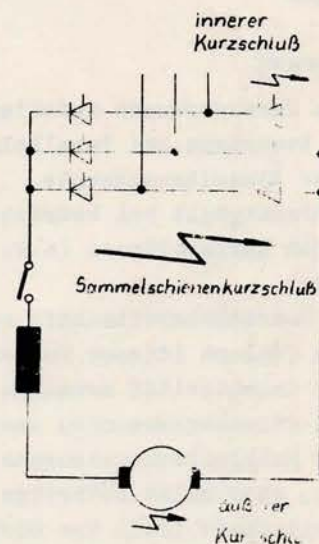


Bild 1 Kurzschlüsse in Stromrichteranlagen

## 1.2. Maßnahmen zur Strombegrenzung

Die Maßnahmen zur Verminderung der Auswirkungen der Störungen können sowohl auf der informationselektronischen Seite sein, als da sind

- Strombegrenzung
- Schutzimpulssperre
- Wechselrichterzangssteuerung

als auch auf der leistungselektronischen Seite sein, wie

- Gleichstromschnellschalter
- Sicherungen
- elektronische Löscheinrichtung
- gleichstromseitige Drosseln

(siehe Bild 2).

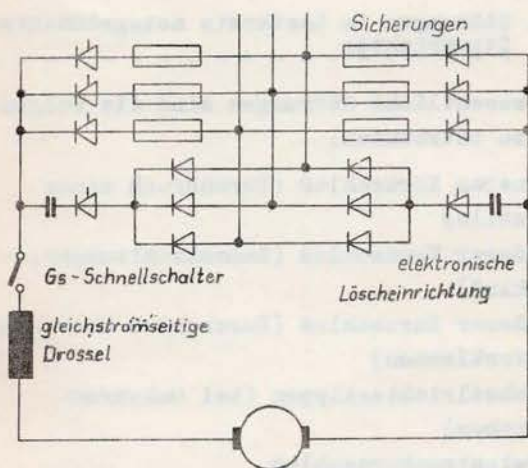


Bild 2 Schutzeinrichtungen in Stromrichteranlagen

## 1.3. Forderungen

- Selektives Heraustrennen defekter Bauelemente, besonders bei Parallelschaltung vieler Einzelbauelemente
- Kurzschlußfestigkeit bei betriebsmäßig auftretenden Kurzschlüssen (z.B. Elektrodenpeisung)
- sofortige Betriebsbereitschaft nach aufgetretenen Fehlern (dieser Forderung entspricht Selektivität zwischen Sicherungen und strombegrenzendem Bauelement)
- Schutz der Halbleiterbauelemente vor Zerstörung, aber keine sofortige Betriebsbereitschaft (Fall von Sicherungen).

Diese Forderungen werden in der Regel nicht generell erhoben, sondern nach den Fehlerarten aufgeschlüsselt.

## 2. Schutzwirkungen

Einen Überblick über die verschiedenen Schutzwirkungen gibt Bild 3.

### 2.1. Informationselektronische Schutzwirkungen

Informationselektronische Schutzeinrichtungen haben den Vorteil eines kleinen Realisierungsaufwandes, weil nur wenige zusätzliche Bauelemente benötigt werden.

#### 2.1.1. Strombegrenzung

Die Strombegrenzung des Reglers bietet einen unverzögerten Kurzzeit- und Langzeitschutz für den Thyristorstromrichter, allerdings im allgemeinen keinen Kurzschlußschutz. Ihre Wirkung besteht darin, die Ausgangsspannung des Drehzahlreglers und damit den Sollwert des Stromreglers auf einen einstellbaren Wert zu begrenzen.

#### 2.1.2. Schutzimpulssperre

Von der Schutzimpulssperre werden bei Überschreiten eines eingestellten Stromwertes die Zündimpulse für die Thyristoren gesperrt.

Damit wird ein Kurzschlußstrom auf den momentan stromführenden Thyristor, der nicht mehr gesperrt werden kann, begrenzt, und ein Zünden weiterer Thyristoren wird verhindert.

#### 2.1.3. Wechselrichterzangssteuerung

Die Wechselrichterzangssteuerung bewirkt bei Überschreiten eines eingestellten Stromwertes die Verschiebung der Zündimpulse in den Wechselrichterbereich ( $\alpha \approx 150^\circ$  el.).

Die Wechselrichterzangssteuerung hat im ersten Moment ähnliche Wirkung wie die Schutzimpulssperre, bewirkt jedoch eine gleichmäßigere Verteilung der Strombelastung auf die einzelnen Brückenarme. Durch die abgegebene negative Spannung wird der Kurzschlußstrom vermindert.

### 2.2. Schutzeinrichtungen der Leistungskreise

Schutzmaßnahme Fehlerfall	informationselektronische			leistungselektronische			
	Strombegrenzung	Schutzimpuls-sperre	Wechselrichter-zwangssteuern	Schnellschalter	Sicherungen	elektronische Löscheinrichtung	Drosseln
innerer Kurzschluß	unwirksam	unwirksam	unwirksam	unwirksam	Schutz der Bauelemente	Schutz der Bauelemente	unwirksam
Sammelschienen kurzschluß	unwirksam	bedingt wirksam	bedingt wirksam	unwirksam	Schutz der Bauelemente	Schutz der Bauelemente	unwirksam
Kurzschluß hinter der Glättungsdrossel	bei geeigneter Drosseldimensionierung Schutz der Sicherungen (Selektivität)	bedingt wirksam	bedingt wirksam	Schutz der Sicherungen	Schutz der Bauelemente	Schutz der Bauelemente	Schutz der Sicherungen (mit SS)
Wechselrichterkippen	unwirksam	bedingt wirksam	bedingt wirksam	Schutz der Sicherungen	Schutz der Bauelemente	Schutz der Bauelemente	Schutz der Sicherungen (mit SS)
Kreisstromkurzschluß	unwirksam	bedingt wirksam	bedingt wirksam	Schutz der Sicherungen	Schutz der Bauelemente	Schutz der Bauelemente	Schutz der Sicherungen (mit SS)

**Bild 3** Schutzmöglichkeiten für netzgelöschte Stromrichter

Diese Schutzvorrichtungen bewirken meist die endgültige Abschaltung der aufgetretenen Störungen. Sie sind gerätemäßig aufwendig.

**2.2.1. Gleichstromschnellschalter**

Der Gleichstromschnellschalter dient zum Abschalten von äußeren Kurzschlüssen, Wechselrichterkippen und Kreisstromkurzschlüssen. Innere Kurzschlüsse werden von ihm nicht erfaßt.

Die Ausschaltverzugszeit der Schnellschalter liegt zwischen 0,5 ms mit elektronischer Auslösung und 7 ms bei herkömmlicher Bauart. Sie ist von ausschlaggebender Bedeutung für eine kostengünstige Realisierung der strombegrenzenden Einrichtungen.

**2.2.2. Überflinke Thyristorsicherungen**

Die Thyristorsicherungen sind sehr schnelle Sicherungen, die nach verschiedenen Gesichtspunkten den Thyristoren angepaßt werden:

- selektives Heraustrennen eines defekten Bauelementes aus einer parallelgeschalte-

ten Gruppe

- Gewährleistung eines Kurzschlußschutzes bei Verwendung sowohl im Kurzzeitbereich als auch im Langzeitbereich angepaßter Sicherungen

**2.2.3. Elektronische Löscheinrichtungen /1/**

Mittels elektronischer Löscheinrichtungen, die auf dem Prinzip der Kondensatorlöschung beruhen, wird eine Zwangslöschung der stromführenden Ventile durchgeführt.

Die Hauptvorteile liegen im erhöhten Schutzzumfang und in größerer Verfügbarkeit der Anlage, sie müssen aber mit beachtlichem Aufwand erkauft werden.

**2.2.4. Gleichstromseitige Drosseln**

Die gleichstromseitigen Drosseln bewirken eine Verringerung der Stromanstiegs-geschwindigkeit und des Maximums des Stromes in bestimmten Fehlerfällen. Gleichzeitig bewirken sie die Herabsetzung der Stromwelligkeit und damit eine Verbesserung der Kommutierungseigenschaften der gespeisten Maschinen. Hauptnachteil ist die Verschlechterung der dynamischen Eigenschaften des Antriebes und der beträchtliche Aufwand.

### 3. Überstromschutzkonzeptionen

Bild 3 stellt eine tabellarische Übersicht zu den Überstromschutzkonzeptionen dar.

#### 3.1. Innerer Kurzschluß

Bei innerem Kurzschluß wird im allgemeinen mit einem Abschmelzen der Thyristorsicherung gerechnet, da mit einem defekten Bauelement ohne Parallelschaltung nur bedingt gearbeitet werden kann /5/.

Bei Parallelschaltung von Thyristoren mit zugeordneten Zellsicherungen ist der innere Kurzschluß selbst dann unkritisch, wenn die Sicherung für den einzelnen Thyristor keinen Kurzschlußschutz bietet. Der defekte Thyristor wird dann von der Zellsicherung in etwa 1 ms selektiv herausgetrennt, während die auf den Kurzschluß speisende Parallelschaltung nicht gefährdet wird.

Ohne Parallelschaltung muß die Sicherungskennlinie zum Schutz der anderen Bauelemente kurzschlußmäßig angepaßt sein.

Eine Schutzvorrichtung, die die Zerstörung der Sicherung verhindert bzw. ohne Sicherungen nur mit einer Zwangslöscheinrichtung arbeitet, ist aufwendig /1/.

#### 3.2. Sammelschienenkurzschluß

Beim Sammelschienenkurzschluß wird auch mit einem Abschmelzen der Thyristorsicherungen gerechnet.

Eine Zwangslöschung könnte hier eine längere Havarie verhindern /1/.

Bauliche Maßnahmen innerhalb der Anlage sollten gewährleisten, daß dieser Fehlerfall weitestgehend ausgeschlossen werden kann.

#### 3.3. Kurzschluß hinter der Glättungsdrossel

Hier können alle unter 2. genannten Schutzmaßnahmen wirksam werden.

Sofern Kurzschlüsse dieser Art betriebmäßig auftreten, wird die Glättungsdrossel so ausgelegt, daß allein die Strombegrenzung die Kurzschlußfestigkeit bewirkt. Mit Hilfe eines Schnellschalters kann Selektivität zwischen Schnellschalter und Sicherungen durch entsprechende Drosselauslegung erreicht werden.

Auch hier kann die elektronische Löscheinrichtung ohne Glättungsdrossel arbeiten.

#### 3.4. Wechselrichterkippen

Mit Hilfe eines Schnellschalters bzw. einer Löscheinrichtung ist die Beherrschung dieses Fehlerfalls ohne Bauelementzerstörung erreichbar.

Dies ist wichtig, da Wechselrichterkippen auch durch netzseitige Störungen (z.B. Spannungsabsenkung) hervorgerufen werden können, ohne daß Fehler in der Anlage vorliegen. Sofortige Weiterarbeit ist dann möglich.

#### 3.5. Kreisstromkurzschluß

Ursachen eines Kreisstromkurzschlusses sind Versagen der Informationselektronik bei kreisstromfreien Umkehrschaltungen oder Zündungen durch Überschreiten der kritischen Spannungsanstiegsgeschwindigkeit der nicht benutzten Stromrichtergruppe. Hier kann die Abschaltung mittels Schnellschalter bzw. elektronischer Löscheinrichtung vorgenommen werden.

Bei kreisstromfreien Schaltungen sollte aus Sicherheitsgründen eine Kreisstrombegrenzungsdrossel vorgesehen werden.

### 4. Gestaltung des Systems Gleichstromschnellschalter-Drossel

Bei Einsatz von nichtlinearen Drosseln kann durch Variation des Luftspaltes eine Optimierung des Systems Gleichstromschnellschalter - Drossel erzielt werden.

#### 4.1. Verhalten des Schnellschalters

Der Verlauf der Bremsspannung des Schnellschalters ist in dem Bild 4 dargestellt. Die einzelnen Zeiten und Spannungen sind vom Schnellschalterttyp und von den Schaltungsparametern abhängig /2/.

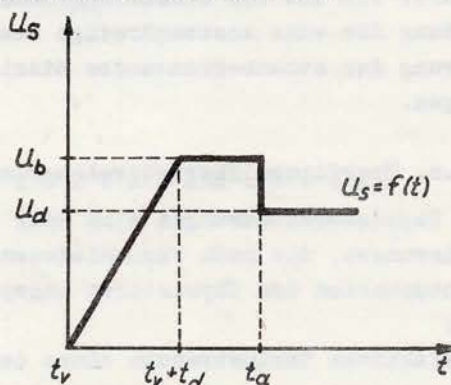


Bild 4 Schnellschalerverhalten

#### 4.2. Verhalten der Drossel

Die Induktivität von Eisendrosseln ist durch die Nichtlinearität des Eisenkreises nicht konstant. Als geeignete Näherung für DMLWX-Drossel von TRO hat sich folgendes erwiesen:

$$L = \frac{\psi}{I} = \begin{cases} \alpha + b & \text{für } \frac{i}{I_N} \leq 1 \\ \alpha + \frac{b}{I_N} & \text{für } \frac{i}{I_N} > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi(i) = L \cdot i = \begin{cases} (\alpha + b)i & \text{für } \frac{i}{I_N} \leq 1 \\ \alpha i + b I_N & \text{für } \frac{i}{I_N} > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$L_{dyn} = \frac{d\psi}{di} = \begin{cases} \alpha + b & \text{für } \frac{i}{I_N} \leq 1 \\ \alpha & \text{für } \frac{i}{I_N} > 1 \end{cases} \quad (3)$$

(Darstellung der Verläufe in den Bildern 5 ... 7.)

Durch Vergrößerung des Luftspaltes kann der Knickpunkt der Kennlinie der Drossel in höhere Strombereiche verschoben werden. Bei sehr hoher Eisenpermeabilität geschieht dies linear mit der Luftspaltvergrößerung. Gleichzeitig verringert sich aber die Induktivität im stromlosen Zustand.

$\sigma$  sei die relative Vergrößerung des Luftspaltes

$$\sigma = \frac{\sigma_{neu}}{\sigma_{alt}} \quad (4)$$

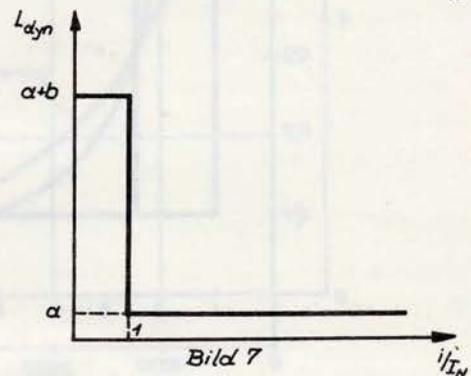
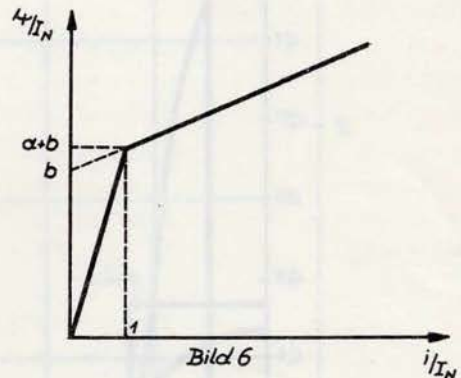
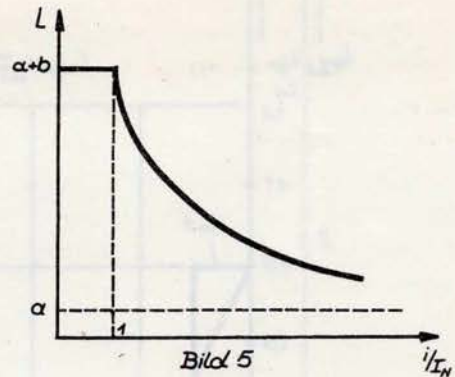
Für die Induktivität gilt

$$L(i) = \begin{cases} \alpha + \frac{b}{\sigma} & \text{für } \frac{i}{I_N} \leq \sigma \\ \alpha + \frac{b}{I_N} & \text{für } \frac{i}{I_N} > \sigma \end{cases} \quad (5)$$

Das Bild 8 zeigt für ein ausgewähltes Beispiel gemessene und berechnete Werte.

#### 4.3. Optimierung

Mit Hilfe eines Rechenprogramms, dessen Programmablaufplan in Bild 9 dargestellt ist, erfolgte eine Optimierung des Drosselluftspaltes. Das Ergebnis, eine optimale Anpassung des Drosselluftspaltes der DMLWX-Drosseln an den EAW-Schnellschalter in Abhängigkeit von dem Überlastfaktor, ist in Bild 10 aufgezeigt. Die Berechnung der Kurzschlußströme erfolgte nach /3/ und /4/.



#### 4.4. Praktische Nutzung

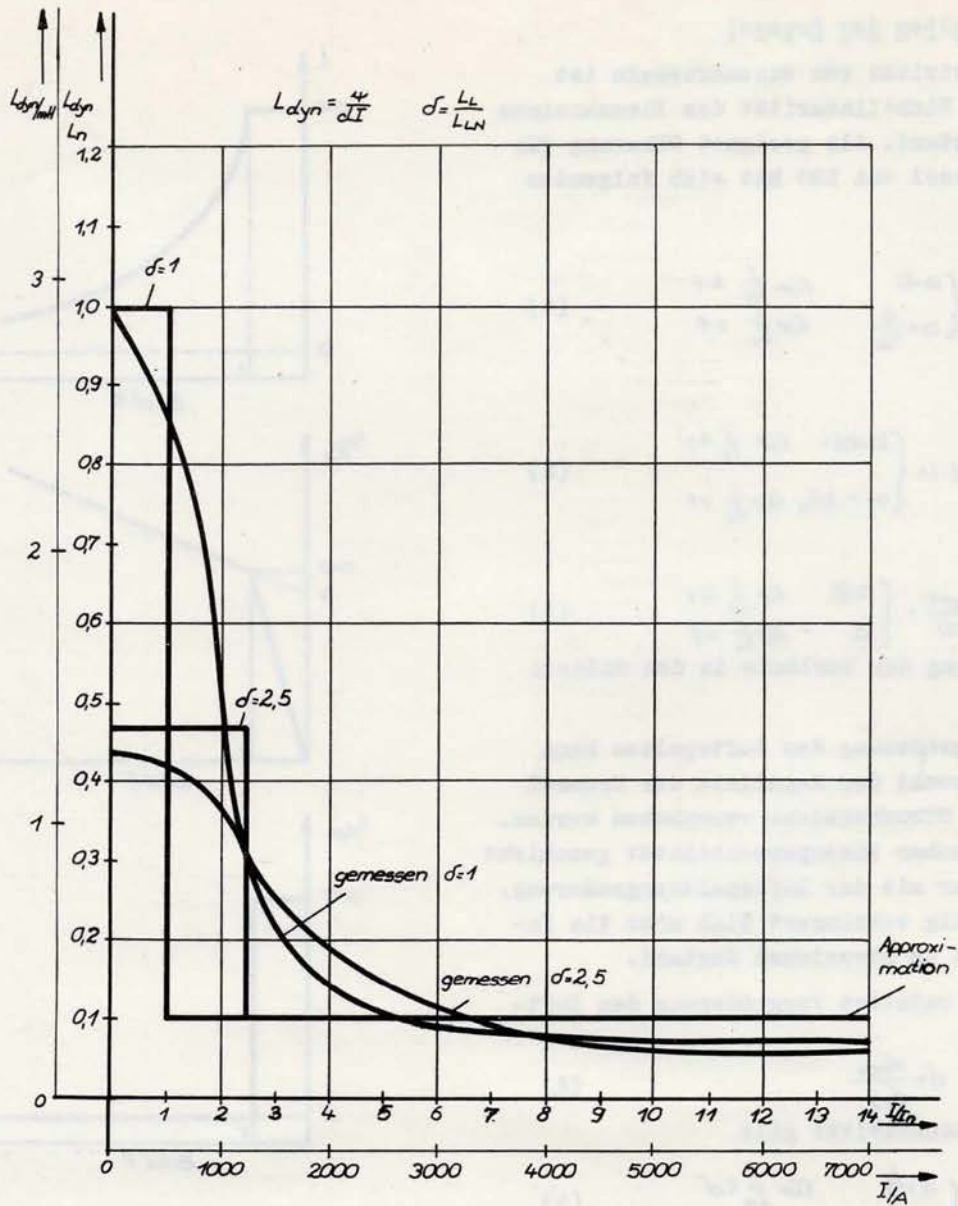
Um die Projektierung von Stromrichterantrieben zu rationalisieren, wurde ein Rechenprogramm erstellt, das praktischen Gesichtspunkten angepaßt ist.

Die Rechnung erfolgt im IEA Berlin. Zur Datenübertragung wird das Fernschreibnetz genutzt.

Durch Eingabe einer Programmkennzahl kann mit verschiedenen Bauelementetypen gerechnet werden (verschiedene Drosseltypen, Sicherungstypen, Thyristortypen usw.).

#### 5. Zusammenfassung

Durch geeignete Dimensionierung der Anlagenteile, auch mittels EDVA, ist ein siche-



rer Schutz vor Überströmen in Thyristorstromrichteranlagen zu erreichen.

Folgende Systeme haben sich als die günstigsten für die Dimensionierung normaler Antriebe erwiesen:

- System Schnellschalter - angepasste Drossel
- System elektronische Löscheinrichtung
- System elektronischer ausgelöster Schnellschalter ohne bzw. mit sehr kleiner Luftdrossel.

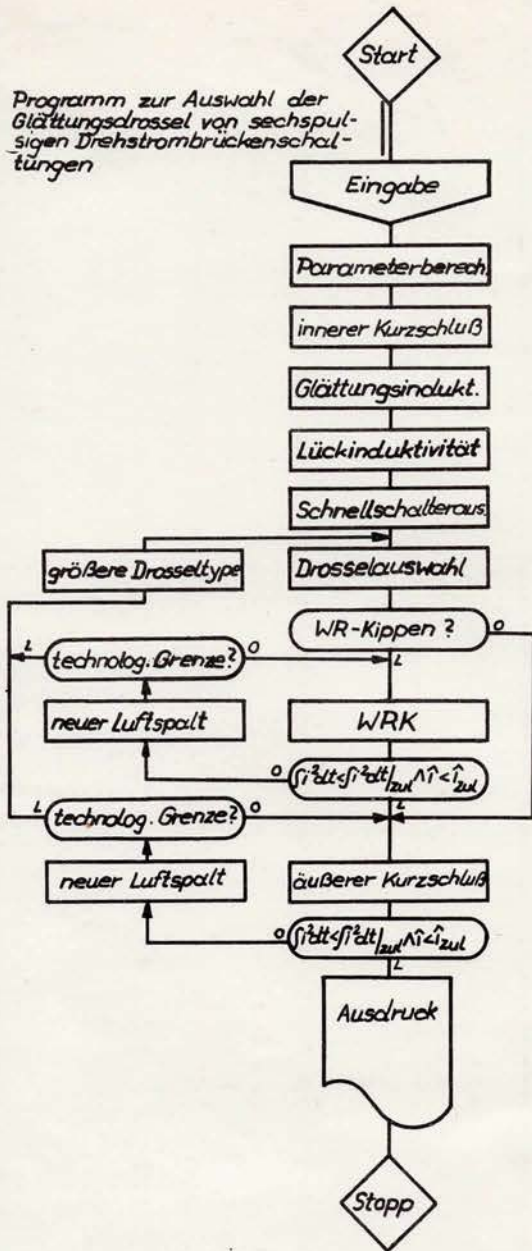
Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen

a, b	Drosselparameter
i	Strom
$I_N$	Nennstrom
L	Induktivität

Bild 8 dynamische Induktivität

$L_{dyn}$	dynamische Induktivität
$t_a$	Abschaltzeit
$t_d$	Öffnungszeit
$t_v$	Verzögerungszeit
$U_b$	Brennspannung
$U_d$	Gleichspannung
$U_s$	Brennspannungsverlauf
$\sigma$	relativer Luftspalt
$\sigma_{alt}$	alter Luftspalt
$\sigma_{neu}$	neuer Luftspalt
$\psi$	Flußverknüttung

Programm zur Auswahl der Glättungsdrossel von sechspul-sigen Drehstrombrückenschal-tungen



/5/ Schwarz: Simulation von Störungen in netzgelöschten Stromrichter-schaltungen  
Diplomarbeit TU Dresden 1970

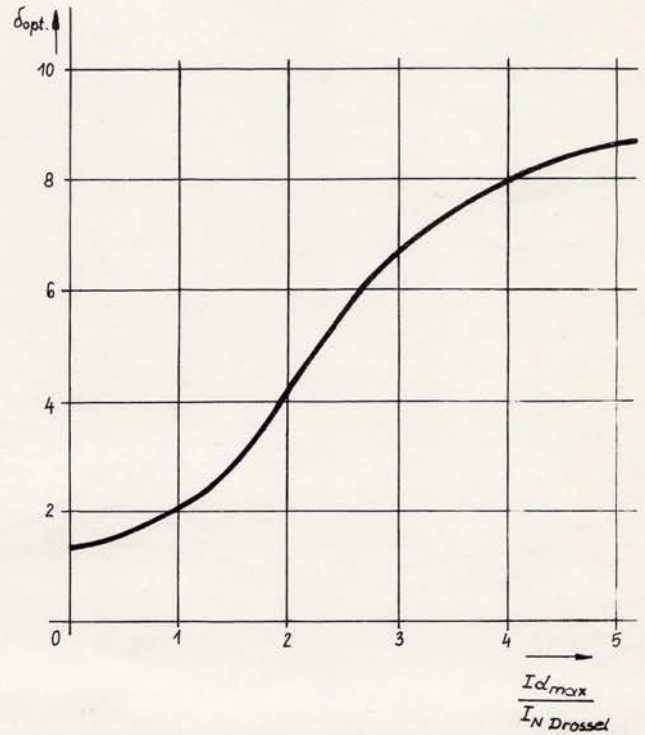


Bild 10 Luftspalt = f (Überlastfaktor)

Bild 9 Programmablaufplan Optimierung

Literaturverzeichnis:

- /1/ Hädrich : Elektronische Schutzeinrich-tung für netzgelöschte Stromrichter  
Hiller  
Bericht der THK vom 8.4.74
- /2/ Stade: Kurzschlußabschaltvorgänge im Gleichstromkreis von Stromrichteranlagen in Dreh-strombrückenschaltung  
Elektrie 23 (1969) 8, S. 312
- /3/ Pfeiler: Bestimmung der Stromspan-nungsverhältnisse durch ein digitales Rechenprogramm nach Kurzschlußmessungen  
Streuber  
Stade  
Elektrie 24 (1970) 12, S.450
- /4/ Richter: Maschinelle Berechnung des Überstromschutzes einer Drehstrombrückenschaltung  
Elektrie 27 (1973) 1 S. 23

Verfasser: Dipl.-Ing. Jürgen Schwarz  
Entwicklungsingenieur  
VEB Kombinat Elektroprojekt  
und Anlagenbau Berlin  
DDR - 1134 Berlin  
Hirschberger Str. 4