

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 19

**Artikel:** Problemformulierung zur methodischen Entwicklung von strombegrenzenden Schnellschaltern

**Autor:** Tayefeh-Emamverdi, M.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904484>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

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

# Problemformulierung zur methodischen Entwicklung von strombegrenzenden Schnellschaltern

M. Tayefeh-Emamverdi

*Der Denkvorgang beim Lösen von Problemen besteht aus einer Reihe von analytischen und synthetischen Überlegungen. Die Synthese nimmt dabei die zentrale Stellung ein, denn es sollen optimale Lösungen für die vorgegebenen Aufgaben entwickelt werden. Von besonderer Bedeutung für die Synthese erweist sich die Problemformulierung, die vom Problemlösenden selbst zu erarbeiten ist. In diesem Aufsatz werden am Beispiel der strombegrenzenden Schnellschalter einige Methoden der Problemformulierung erläutert.*

*Pour résoudre un problème, on procède par une série d'analyses et de synthèses, celles-ci étant essentielles pour des solutions optimales des tâches prescrites. En synthèse, la formulation du problème est particulièrement importante, qui doit être élaborée par celui qui est chargé de la résoudre. En prenant comme exemple le disjoncteur rapide à limitation de courant, quelques méthodes de formulation du problème sont décrites.*

Herrn Professor H. Kern zum 70. Geburtstag gewidmet.

## Adresse des Autors

Dr. M. Tayefeh-Emamverdi, Professur für elektrotechnische Entwicklungen und Konstruktionen, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

## 1. Einführung

Am Anfang jeder technischen Entwicklung steht eine Aufgabenstellung, welche meistens, vor allem aber bei Neukonstruktionen, das zu erreichende Ziel in groben Zügen umschreibt. Aus diesem Grund beginnt der technische Problemlösungsprozess stets mit dem Klären, d. h. mit dem Präzisieren der Aufgabe (Fig. 1). Die geklärte Aufgabe, im technischen Bereich als Anforderungsliste bezeichnet, muss nicht notwendigerweise der Formulierung der zu lösenden Probleme entsprechen. Im Gegenteil kann die Vielfalt der gewonnenen Informationen, welche in der Regel die einzuhaltenden Restriktionen umfasst, durchaus zum Verdecken des eigentlichen Problems beitragen. Die effiziente Lösung eines Problems setzt aber zunächst seine Formulierung voraus. Diese Problemformulierung wird entgegen her-

kömmlich existierenden Vorstellungen nicht immer vorgegeben. Sie muss für viele Aufgaben vom Problemlösenden selbst erarbeitet werden, weshalb es sehr wesentlich ist, zwischen den Begriffen *Aufgabe* und *Problem* zu unterscheiden, auch wenn dies im üblichen Sprachgebrauch nicht immer gelingt.

Im technischen Problemlösungsprozess gibt es *gut-* und *schlechtstrukturierte* Probleme. Während sich gutstrukturierte Probleme meistens mathematisch formulieren lassen und vielfach eine Lösung besitzen, können schlechtstrukturierte Probleme entweder überhaupt nicht mathematisch formuliert werden (z. B. Entwickeln von Lösungen für technische Produkte oder Entwerfen von Software) oder müssen zuerst analysiert und strukturiert werden, um dann mathematisch formuliert werden zu können. Entsprechend der Natur der Probleme gibt es denn auch verschiedene Arten der Problemformulierung. In dieser Arbeit werden drei Methoden, nämlich verbale, Black-Box- und mathematische Problemformulierung kombiniert. Während die ersten beiden Methoden zur Formulierung des Gesamtproblems eingesetzt werden, wird die mathematische Problemformulierung beim Ableiten notwendiger Massnahmen für die Lösungskonzepte verwendet.

## 2. Strombegrenzende Schnellschalter

Die strombegrenzenden Schnellschalter werden als Niederspannungs-Leistungsschalter in verschiedenen Gebieten eingesetzt (Tab 1). Sie unterbrechen die Kurzschlussströme, bevor diese ihre volle Höhe erreicht haben. Da sowohl die thermischen als auch die dynamischen Belastungen der von Kurzschlussströmen durchflossenen Anlagenteile vom Quadrat des Stromes

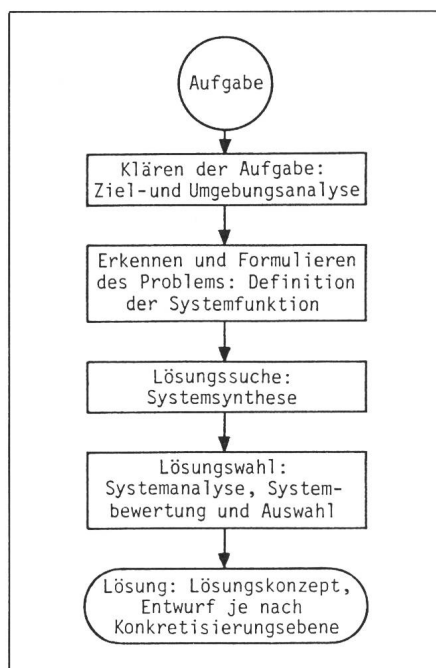


Fig. 1 Der Problemlösungsprozess in der Technik

Einsatzgebiet	Nennstrom A	Nennspannung V	Kurzschlussstrom kA
Hausinstallationen: als Leitungsschutzschalter ( $\approx$ )	0,2...63	220...380	13...3
Industrieanlagen: zum Schutz von thyristorgeregelten Hilfsantrieben in Walzwerken sowie von Antrieben in der chemischen Industrie ( $\approx$ )	160...800	380...600	100...50
Schiffsanlagen: zum Schutz der Anlagen und Motoren mit Leistungen von 500...1000 kW ( $\sim$ )	1000...5000	660	50
Bahnanlagen und Traktionsfahrzeuge: als Wagenhauptschalter zum Schutz von Motoren und zum Schutz von Anlagen mit Leistungshalbleitern ( $\approx$ )	1200...6000	1000...4000	125...135

abhängen, bewirkt eine Begrenzung dieser Ströme eine starke Verminderung der genannten Belastungen. Damit lassen sich die Anlagenkosten senken, da die im Normalbetrieb verhältnismässig geringe Nennströme führenden Anlagen nicht für den Fehlerfall überdimensioniert werden müssen.

Um den Kurzschlussstrom zu begrenzen, muss unmittelbar nach dem Eintritt des Fehlers eine zusätzliche Impedanz in den Kurzschlusskreis eingeschaltet werden. Dies lässt sich durch den raschen Aufbau einer hohen Lichtbogenspannung beim Öffnen des Schnellschalters erreichen [1; 2]. Aus der Ersatzschaltung des Kurzschlusskreises (Fig. 2) folgt sowohl für Gleich- als auch für Wechselstrom:

$$u_N = R i_K + L di_K/dt + u_B \quad (1)$$

Mit dem Ansteigen der Lichtbogenspannung tritt ein Zeitpunkt ein, in dem die Summe aus der Lichtbogenspannung und den ohmschen Spannungsabfällen den Augenblickswert der Netzspannung erreicht. Die Bedin-

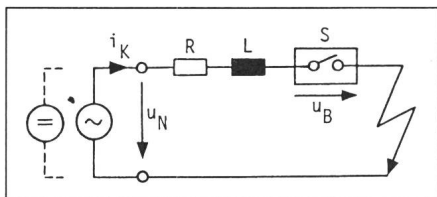


Fig. 2 Ersatzschaltbild des Kurzschlusskreises

$u_N$  Netzspannung  
 $u_B$  Lichtbogenspannung  
 $i_K$  Kurzschlussstrom  
 $L$  Induktivität der gesamten Kurzschlussbahn  
 $R$  Wirkwiderstand der gesamten Kurzschlussbahn  
 $S$  Schnellschalter

gung für das Wirksamwerden der Strombegrenzung ist somit:

$$u_N - (R i_K + u_B) = L di_K/dt = 0 \quad (2)$$

Bei weiterem Anstieg der Lichtbogenspannung über die Netzspannung wird  $L di_K/dt < 0$ , der Strom sinkt und wird ausgeschaltet.

Eine wirksame Strombegrenzung erfordert einen Kontaktöffnungsverzögerung in der Grössenordnung von Millisekunden, damit Gesamtschaltzeiten von 2 ms bei Wechsel- und 3...5 ms bei Gleichstrom erzielt werden.

### 3. Aufgabenstellung

Zur Entwicklung von strombegrenzenden Schnellschaltern ist eine system-

atische Untersuchung über die möglichen Systeme zur Bereitstellung mechanischer Antriebsenergie für den Kontaktöffnungsvorgang und über die Systeme zur Übertragung dieser Energie auf das Kontaktsystem durchzuführen.

## 4. Problemformulierung

Zu Beginn analysiert man beim Lösen technischer Probleme wenn immer möglich die bereits vorhandenen Lösungen eines Problems. Auf die Darstellung dieses Schrittes muss hier aus Platzgründen verzichtet werden. Wesentlich ist aber der Folgeschritt, nämlich am Anfang einer Entwicklung *nicht in Lösungen, sondern in Funktionen* zu denken und zu beachten, dass die vorhandene Lösung eines Problems nicht das Problem selbst ist. Im folgenden wird die Analyse und Abstraktion der Aufgabe dargestellt, wobei das Problem einerseits verbal und andererseits als Black Box formuliert wird.

### 4.1 Verbale Problemformulierung

Um unabhängig von vorhandenen Vorstellungen die Gesamtfunktion, für welche Lösungskonzepte gesucht werden, zu formulieren, wird die Aufgabe analysiert. Die ersten Vorstellungen, die aus der Aufgabenstellung folgen, zeigen die Figuren 3a und 3b. Ausser dem Eingang für den Energiefluss wird bei dieser allgemeinen Funktionsstruktur ein Eingang für den Signalfluss zur Energiefreigabe existieren.

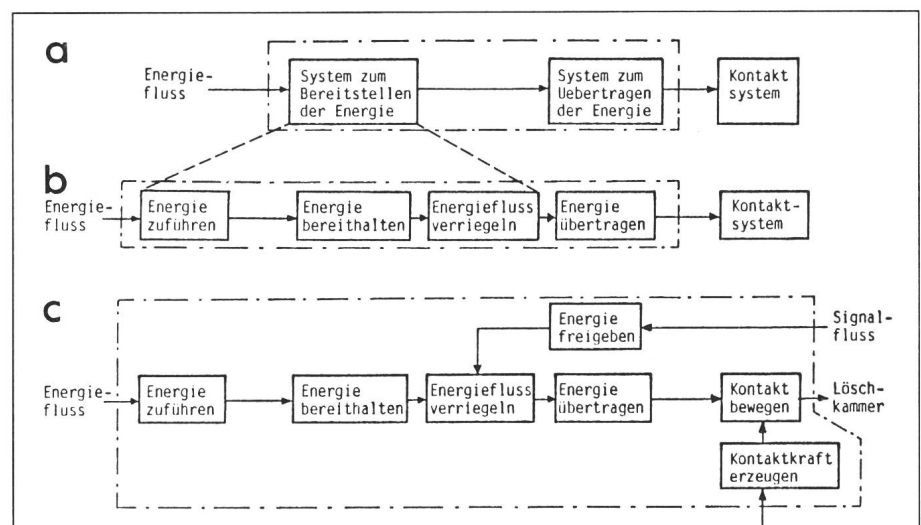


Fig. 3 Analyse der Aufgabe entsprechend vorhandener Lösungen

anhand der Funktionsstruktur auf drei Komplexitätsstufen

a Energiefluss, Grobstruktur

c Energie- und Signalfluss

b Energiefluss, Feinstruktur

stieren (Fig. 3c). Wesentlich aber ist die Erkenntnis, dass der Kern der Aufgabe nicht nur im Bereitstellen und Übertragen der Energie auf das Kontaktsystem liegt, sondern auch im Prinzip des Kontaktsystems selbst. Denn wesentlich für die strombegrenzende Ausschaltung ist, dass der bewegliche Kontakt des Schalters möglichst rasch den Öffnungsweg zurücklegt, der für den Start der Lichtbogenwanderung notwendig ist. Da der bewegliche Kontakt mit der Kontaktkraft  $F_K$  an den festen Kontakt ange-drückt wird, kann das Problem auf folgende Weise abstrakt formuliert werden:

Ein beweglicher Körper der Masse  $m$ , der durch die Kraft  $F_K$  an einen feststehenden Körper gepresst wird, muss durch eine Kraft  $F_A$  in der Zeit  $t_{min}$  um den Weg  $s_{min}$  bewegt werden.

Im allgemeinen Fall können gegen die Ausschaltkraft  $F_A$  ausser  $F_K$  auch die Reibungskraft  $F_R$  und das Gewicht  $F_G$  wirken. Der minimal notwendige Weg wird durch Integration der Bewegungsgleichung ermittelt:

$$s_{min} = \frac{1}{m} \int_0^{t_{min}} [F_A - (F_K + F_R + F_G)] dt \quad (3)$$

Daraus ist ersichtlich, dass befriedigende Lösungen für strombegrenzende Schnellschalter unter Einbezug des Kontaktsystems gesucht werden müssen, da die Kontaktkraft in der Anfangsphase der Öffnung stark verzögernd wirken kann.

#### 4.2 Problemformulierung mit Black Box

Die Figur 3c zeigt die vollständige Analyse der Aufgabe als Grundlage der Problemformulierung. Die in den Figuren 3b und 3c vorgenommene ex-

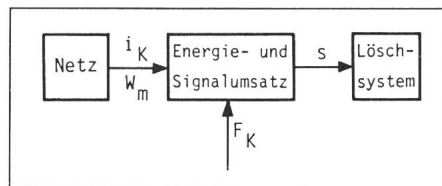


Fig. 4 Abstrakte Formulierung des Problems

$i_K$  Kurzschlussstrom: 10...100 kA  
 $W_{el}$  elektrische Energie des Kurzschlusskreises  
 $W_m$  magnetische Energie des Kurzschlusskreises  
 $F_K$  Kontaktkraft  
 $s$  Schaltweg: 5...20 mm

#### Am Kontaktsystem wirkende Kräfte

Tabelle II

Kräfte, die dem Öffnen entgegenwirken	Kräfte, die das Öffnen begünstigen
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trägheit des beweglichen Kontaktstückes</li> <li>- Trägheit des Antriebes</li> <li>- Trägheit des Auslösers (wenn Auslöser vorhanden)</li> <li>- Reibungskraft</li> <li>- Verschweissung der Kontakte</li> <li>- Kontaktkraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausschaltkraft (Antriebskraft)</li> <li>- Abstossende Kraft der Stromenge bei geschlossenen Kontakten</li> <li>- Impulskraft durch die Verdampfung der letzten Strombrücke im Augenblick der Öffnung</li> </ul>

plizite Berücksichtigung eines Energiebereitstellers ist selbstverständlich eine Einschränkung, da sie Lösungen ausschliesst, bei denen die benötigte Energie im Augenblick des Bedarfs erzeugt wird (z. B. Ausnützung der Energie des Kurzschlusskreises). Die Figur 4 zeigt eine Black Box, die diese Möglichkeit offenlässt, aber die Einschränkung macht, dass das Kontaktsystem mechanisch ist.

### 5. Ableitung notwendiger Massnahmen für die Lösungskonzepte

#### 5.1 Am Kontaktsystem wirksame Kräfte

Die auf die Kontakte zu Beginn der Öffnung wirkenden Kräfte sind in Tabelle II zusammengefasst. Zunächst seien die zusätzlich zur Ausschaltkraft die Öffnung begünstigenden Kräfte kurz betrachtet:

- Die abstossende Kraft der *Stromenge* (Einengung an der Kontaktstelle) kann zwar erhebliche Werte annehmen, ist aber, sobald die Kontakte abheben, wirkungslos. Sie darf daher in den Dimensionierungsüberlegungen nicht überbewertet werden, da nach ihrem Wegfall die Kontakte unter dem Einfluss der Kontaktkraft schliessen würden.
- Die Grösse des durch die *Verdampfung* der Strombrücke erzeugten Impulses ist von der Stromstärke und vom Kontaktwerkstoff abhängig. Über diesen Effekt kann lediglich ausgesagt werden, dass er innerhalb sehr kurzer Zeit dem beweglichen Schaltstück eine Anfangsgeschwindigkeit erteilt.

Die Kräfte, die dem Öffnen entgegenwirken, sind für die strombegrenzenden Schnellschalter von grundlegender Bedeutung, weshalb die folgenden Punkte zu beachten sind:

- Die *Massen* der beim Abschalten in Bewegung zu setzenden Elemente sind so weit wie möglich zu reduzieren, um den für den Lichtgeneinsatz minimal not-

wendigen Schaltweg in sehr kurzer Zeit erreichen zu können. Die Verringerung der Masse des beweglichen Kontaktstückes hat ihre Grenzen einerseits im notwendigen Mindestmass an mechanischer Festigkeit und andererseits in der thermischen Belastbarkeit.

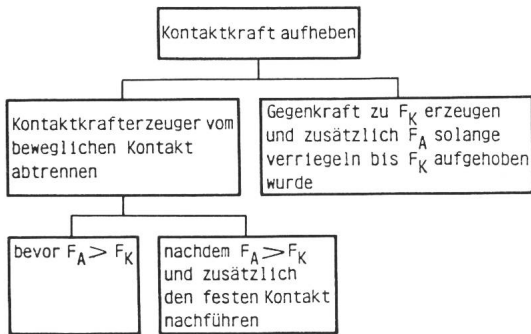
- Für anschauliche Betrachtungen wird häufig die *Reibung* vernachlässigt. Dies ist sinnvoll, darf aber konstruktiv nicht zu falschen Schlüssen führen. Gerade in den Ruhezuständen können hohe Reibungskoeffizienten existieren, deren Vernachlässigung zum vollständigen Versagen führt.
- Sowohl bei Nenn- und Betriebsströmen als auch bei Kurzschlussströmen kann es bei ungenügender Kontaktkraft infolge des Abhebens des beweglichen Schaltstückes zum *Verschweissen* kommen. Die Lösungen müssen daher die Eigenschaft haben, dass weder bei Nenn- und Betriebsströmen eine Schwächung der Kontaktkraft auftritt noch bei Kurzschlussströmen ein undefinierter Zustand (loses Aufeinanderliegen der Kontaktstücke) herrscht oder ein Abheben und Wiederschliessen möglich ist.
- Die wichtigste bremsende Kraft bei der Öffnung ist die *Kontaktkraft*. Daraus lässt sich die Forderung ableiten, den Kontaktkörper erst dann zu bewegen, wenn die Kontaktkraft nicht mehr wirksam ist. Dabei darf aber eine Trennung vom Gegenstück nicht vor der Abgabe der eigentlichen Ausschaltkraft erfolgen. Die abgeleiteten Massnahmen zeigt Figur 5.

#### 5.2 Das Abbrandproblem

Die zu suchenden Lösungskonzepte müssen für eine bestimmte Abbrandreserve geeignet sein. Daher muss der Kontaktkrafterzeuger eine gewisse Nachführung einer oder beider Kontakte ermöglichen.

#### 5.3 Das Selektivitätsproblem

Die Selektivität beinhaltet bekanntlich die Forderung, dass im Störfall nur der der Störung nächstgelegene Schalter unterbricht. Da die Selekti-



**Fig. 5**  
**Massnahmen zum**  
**Aufheben der**  
**Kontaktkraft**  
 $F_A$  Ausschaltkraft  
 $F_K$  Kontaktkraft

vität üblicherweise durch einen vom Verbraucher zur Einspeisestelle zunehmenden Zeitverzug der Schutzorgane erreicht wird, steht sie grundsätzlich im Widerspruch zum Gedanken des automatisch ansprechenden strombegrenzenden Schnellschalters. Als ein Kompromiss bei hintereinandergeschalteten Schnellschaltern wird die Kurzunterbrechungselektivität angesehen. Dabei werden im Falle des Kurzschlusses alle Schalter ausgeschaltet und dann alle bis auf den der Kurzschlussstelle nächstliegenden Schalter automatisch wieder eingeschaltet. Im Grenzfall besteht die Möglichkeit, dass der Schalter nur soweit öffnet, dass der Lichtbogen ins Löschsystem wandern kann und somit die Strombegrenzung stattfindet. Der bewegliche Kontakt wird aber nicht in die Aus-Stellung gebracht, sondern wieder geschlossen. Wenn der Kurzschluss noch vorhanden ist, wird der Schalter mittels einer Automatik endgültig ausgeschaltet.

Eine grundsätzlich andere Möglichkeit der Selektivität ergibt sich, wenn man vom Auslösekriterium «Momentanwert des Kurzschlussstromes» abgeht. Wird anstelle dieses Kriteriums eine Stromanstiegsauslösung angestrebt, dann muss jeder Schalter auf eine bestimmte Stromsteilheit  $di/dt$  und eine bestimmte Mindeständerung des Stromes reagieren.

#### 5.4 Übertragung der Ausschaltkraft auf das Kontaktsystem

Die verbale Problemformulierung der Aufgabe (siehe 4.1) besagt, dass einer Masse  $m$  eine Kraft  $F_A$  zu erteilen ist, unter deren Wirkung diese Masse in der Zeit  $t_{min}$  um den Weg  $s_{min}$  bewegt wird. Da es bei der Übertragung der Kraft auf eine möglichst geringe Beschleunigungszeit ankommt, wird der Impulssatz herangezogen, dessen Integration zur Impulsgleichung führt:

$$\int_0^{t_{min}} F_A(t) dt = m(V_{min} - V_0) \quad (4)$$

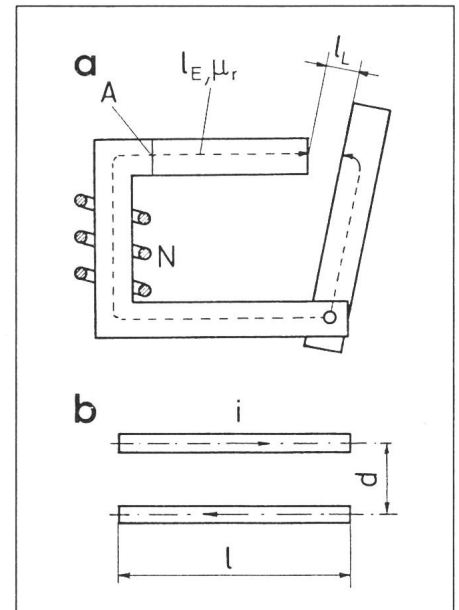
Unter Annahme einer mittleren Kraft:

$$\bar{F}_A = \frac{1}{t_{min}} \int_0^{t_{min}} F_A(t) dt \quad (5)$$

und mit  $v_0 = 0$  ergibt sich:

$$\bar{F}_A \cdot t_{min} = m \cdot v_{min} \quad (6)$$

Aus (6) folgt, dass die Zeit  $t_{min}$  zum Erreichen der Geschwindigkeit  $v_{min}$  um so kleiner sein wird, je grösser die Ausschaltkraft ist. Zur Übertragung der Ausschaltkraft gibt es grundsätzlich die zwei physikalischen Alternativen *kontinuierliche* und *impulsartige* Kraftübertragung. Wenn nun ausgesagt werden kann, welche der beiden Möglichkeiten zu kürzeren Schaltzeiten führt, dann kann man von vornherein gewisse Lösungen aus der Synthese ausklammern. Das ist aber nur möglich, wenn das Problem mathematisch formuliert werden kann bzw. wenn irgendwie quantitative Aussagen möglich sind. Soll ein solcher Vergleich zuverlässige Antworten liefern, so müssen die Voraussetzungen, die ihm zugrunde liegen, mit einbezogen werden. Es wird hier angenommen, dass die Ausschaltkraft durch den Kurzschlusskreis erzeugt wird. Diese Annahme entspricht den praktischen Bedürfnissen, denn man möchte den Antrieb des Schalters einfach halten und die vom Netz im Kurzschlussfall gelieferte Energie benutzen. In diesem Fall wird das Prinzip der elektromagnetischen Krafterzeugung benutzt, wobei sowohl die magnetische Anziehung als auch die magnetische Abstossung in Frage kommen (Fig. 6). Die



**Fig. 6** Elektromagnetische Kräfte in Kontaktsystemen

a elektromagnetische Anziehung  
b elektromagnetische Abstossung

wesentlichen Eigenschaften dieser Krafterzeuger sind im Zusammenhang mit den genannten Kraftübertragungsarten in der Tabelle III zusammengefasst. Vernachlässigt man für beide Arten der Krafterzeugung für die Anfangsphase der Bewegung die Wegabhängigkeit, dann gelten:

$$F_{an} = \mu_0 A \left( \frac{N}{l_E/\mu_r + l_L} \right)^2 i^2 = \gamma_{an} \cdot i^2 \quad (7)$$

$$F_{ab} = \frac{\mu_0 l}{2\pi d} \cdot i^2 = \gamma_{ab} \cdot i^2 \quad (8)$$

Jeder Effekt kann sowohl für ein kontinuierliches System als auch für ein Impulssystem verwendet werden, so dass für die Ausschaltkraft gilt:

$$F_A = \gamma \cdot i^2 \quad (9)$$

Für den Vergleich betrachten wir nun die Strukturmodelle der Kraftübertragung (Fig. 7) und nehmen zusätzlich an, dass zu Beginn der Bewegung die Kontaktkraft  $F_K$  nicht mehr wirksam ist (eine der unter 5.1 abgeleiteten Massnahmen).

*Kontinuierliches System:* Die Ausschaltkraft  $F_A$  greift an der Masse  $m$  an, und die Masse  $m$  legt in der Zeit  $t_a$  den Weg  $s_a$  zurück (Fig. 7a). Für die Anfangsphase des Kurzschlusses kann man sowohl für den Gleich- als auch für den Wechselstrom einen linear mit



Übertragung \ Effekt	Elektromagnetische Anziehungskraft	Elektromagnetische Abstossungskraft
kontinuierlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kraft zu Beginn der Bewegung klein, mit zunehmendem Bewegungsweg ansteigend</li> <li>- Anfangsgeschwindigkeit des öffnenden Kontaktes Null</li> <li>- Zusätzlicher Eisenkreis zur Krafterzeugung notwendig</li> <li>- Wirkung am Kontaktsystem auch im Betriebsfall vorhanden</li> <li>- Bei hohen Nennströmen (grosse Kontaktmassen, hohe Kontaktkräfte) Erregerwicklung mit grossen Windungszahlen erforderlich, grosse Verluste im Betrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kraft zu Beginn der Bewegung gross, mit zunehmendem Bewegungsweg abnehmend</li> <li>- Anfangsgeschwindigkeit des öffnenden Kontaktes Null</li> <li>- Krafterzeugung direkt an den Schaltstücken</li> <li>- Wirkung am Kontaktsystem auch im Betriebsfall vorhanden</li> <li>- Krafterzeugung mit einer Windung (Schleife)</li> <li>- Wirkung erst bei grösseren Kurzschlussströmen</li> </ul>
impulsartig	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kraft zu Beginn der Bewegung (im Augenblick des Stosses) gross</li> <li>- Keine schleichende Schaltstücktrennung (Anfangsgeschwindigkeit des öffnenden Kontaktes ungleich Null)</li> <li>- Zusätzlicher Eisenkreis zur Krafterzeugung notwendig</li> <li>- Keine Wirkung am Kontaktsystem im Betriebsfall</li> <li>- Bei hohen Nennströmen (grosse Kontaktmassen, hohe Kontaktkräfte) Erregerwicklung mit grossen Windungszahlen erforderlich, grosse Verluste im Betrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kraft zu Beginn der Bewegung (im Augenblick des Stosses) klein</li> <li>- Keine schleichende Schaltstücktrennung (Anfangsgeschwindigkeit des öffnenden Kontaktes ungleich Null)</li> <li>- Zusätzlicher Kreis zur Krafterzeugung notwendig</li> <li>- Keine Wirkung am Kontaktsystem im Betriebsfall</li> <li>- Krafterzeugung mit einer Windung (Schleife)</li> <li>- Wirkung erst bei grösseren Kurzschlussströmen</li> </ul>

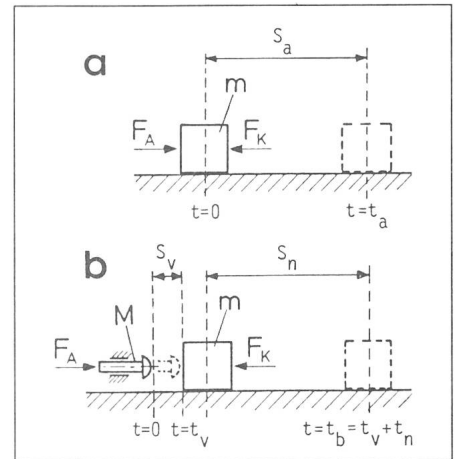


Fig. 7 Modelle der Kraftübertragung

- a kontinuierliche Kraftübertragung
- b impulsartige Kraftübertragung
- M Masse des stossenden Körpers
- m Masse des gestossenen Körpers
- FA Ausschaltkraft
- FK Kontaktkraft
- sa Notwendiger Weg zum Start der Lichtbogenwanderung beim System a
- sb Notwendiger Weg zum Start der Lichtbogenwanderung beim System b
- ta Zeit, in der System a den Weg sa zurücklegt
- tb Zeit, in der System b den Weg sb zurücklegt
- sv Weg des stossenden Körpers vor Stoss
- sn Weg des gestossenen Körpers nach Stoss

sowie unter der Berücksichtigung von  $t_n = s_n/v_n$  und  $t_v$  entsprechend der Beziehung (12) ergibt sich:

$$t_b = \sqrt[4]{\frac{12 M}{\gamma_b \alpha^2} s_v} \left( 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{1 + \frac{m}{M}}{1 + k} \cdot \frac{s_n}{s_v} \right) \quad (15)$$

Dabei ist  $k$  die Stossziffer ( $0 \leq k \leq 1$ );  $k = 0$  stellt den Fall des unelastischen und  $k = 1$  den Fall des elastischen Stosses dar.

Zum Vergleich wird das Verhältnis aus (12) und (15) gebildet:

$$\tau = t_b/t_a \quad (16)$$

Durch Einführen des Wegverhältnisses  $x = s_v/s_n$  und des Massenverhältnisses  $\beta = m/M$  sowie des aus (7..9) gewonnenen Konstruktionsparameterverhältnisses  $\delta = \gamma_b/\gamma_a$  erhält man aus (16):

$$\tau = \sqrt[4]{\frac{x}{\delta \cdot \beta}} \left( 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{1 + \beta}{1 + k} \cdot \frac{1}{x} \right) \quad (17)$$

Diese Beziehung ist die *mathematische Problemformulierung* und stellt im  $\tau/x$ -Koordinatensystem eine Kurvenschar dar, welche  $\beta$ ,  $k$  und  $\delta$  als Para-

der Zeit ansteigenden Strom annehmen:

$$i = at \quad (10)$$

und damit

$$F_A = \gamma \alpha^2 t^2 \quad (11)$$

Wird die Relation (11) in die Bewegungsgleichung eingesetzt, so ergibt sich:

$$t_a = \sqrt[4]{\frac{12 m}{\gamma_a \cdot \alpha^2} s_a} \quad (12)$$

den Körpers an, und die Masse  $M$  legt in der Zeit  $t_v$  (vor dem Stoss) den Weg  $s_v$  zurück und trifft dann die ruhende Masse  $m$  (Fig. 7b). Nach dem Stoss legt der gestossene Körper der Masse  $m$  den Weg  $s_n$  (gleich gross wie  $s_a$  beim kontinuierlichen System) in der Zeit  $t_n$  (nach dem Stoss) zurück. Die Gesamtzeit ist:

$$t_b = t_v + t_n \quad (13)$$

Unter der Annahme eines zentralen unvollkommen elastischen Stosses

$$v_n = \frac{(1 + k) M}{M + m} v_v \quad (14)$$

*Impulssystem:* Die Ausschaltkraft  $F_A$  greift an der Masse  $M$  des stossen-

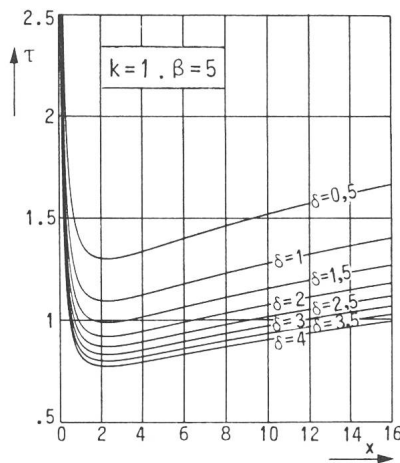
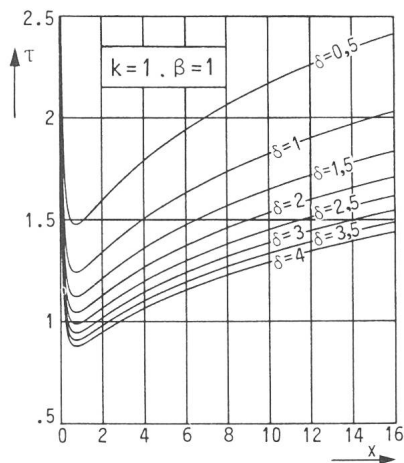


Fig. 8 Verhältnis  $t_b/t_a$  in Abhängigkeit vom Wegverhältnis  $s_v/s_n$  bei elastischem Stoss

$\tau = t_b/t_a$  Verhältnis der zum Start der Lichtbogenwanderung notwendigen Zeiten der Systeme b und a

$x = s_v/s_n$  Verhältnis der Wegstrecken «vor Stoss» zu «nach Stoss» im System b

$\beta = m/M$  Verhältnis der gestossenen zur stossenden Masse im System b

$k$  Stossziffer

$\delta = \gamma_b/\gamma_a$  Verhältnis der Konstruktionsparameter der Systeme b und a

meter besitzt. Sie hat bezüglich  $x$  ein Minimum mit folgenden Koordinaten:

$$x_{\min} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1 + \beta}{1 + k} \quad (18)$$

$$\tau_{\min} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{3}{4} \cdot \frac{1 + \beta}{\delta \cdot \beta (1 + k)}}$$

Die Figur 8 zeigt die grafischen Darstellungen der Gleichung (17), für  $\beta = 1$  und  $\beta = 5$ , wobei  $k = 1$  gewählt wurde. In Wirklichkeit erreicht man  $k$ -Werte in der Grössenordnung von 0,85...0,9, so dass sich die Kennlinien in Richtung von höheren  $\tau$ -Werten verschieben.  $\beta$  wird praktisch immer grösser als 1 sein, da die Masse des stossenden Körpers in der Regel kleiner als die Masse des gestossenen Körpers ist. Bei der Untersuchung der Figur 8 interessiert der Bereich, in dem  $\tau_{\min} < 1$  wird. In diesem Gebiet erreicht man mit der impulsartigen Kraftübertragung kürzere Zeiten für den Start der Lichtbogenwanderung. Wie aus Figur 8 hervorgeht, wird  $\tau_{\min} < 1$  bei  $\beta = 1$  etwa ab  $\delta = 2,5$  und bei  $\beta = 5$  etwa ab  $\delta = 1,5$  erreicht. Das bedeutet, dass durch Vergrösserung des Faktors, der die geometrischen und stofflichen Konstruktionsparameter beinhaltet,  $t_b$  kleiner wird als  $t_a$ . Für  $\delta = 4$  erzielt man theoretisch eine Verbesserung von etwa 47%.

Aus Figur 9 ist weiterhin ersichtlich, dass eine Vergrösserung von  $\beta$  über 5 – wenn praktisch überhaupt sinnvoll – keine wesentliche Verbesserung des  $\tau$ -Minimums bringt.

Da die Zeit nach dem Impuls relativ klein ist, ist die Brenndauer des Lichtbogens zu Beginn der Öffnung geringer als bei der kontinuierlichen Kraftübertragung. Das zeigt die Betrachtung der Abbrandverhältnisse. Um

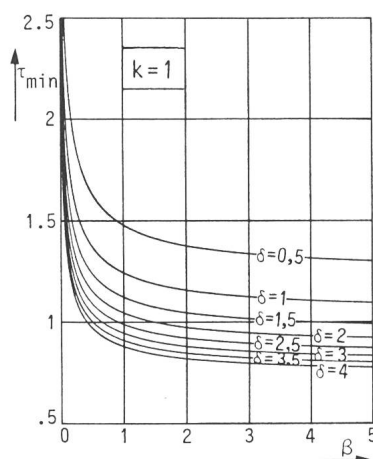


Fig. 9 Einfluss der Konstruktionsparameter und des Massenverhältnisses  $\beta$  auf das Minimum von  $\tau$

$\tau = t_b/t_a$  Verhältnis der zum Start der Lichtbogenwanderung notwendigen Zeiten der Systeme b und a

$\beta = m/M$  Verhältnis der gestossenen zur stossenden Masse im System b

$\delta = \gamma_a/\gamma_b$  Verhältnis der Konstruktionsparameter der Systeme b und a

diese zu charakterisieren, werden für beide Fälle die Stromzeitintegrale als Mass für den Abbrand ermittelt. Für die kontinuierliche Kraftübertragung erhält man:

$$\int_0^{t_a} i dt = \sqrt{3m \cdot s_a/\gamma_a} \quad (19)$$

Für die impulsartige Kraftübertragung ergibt sich:

$$\int_0^{t_b} i dt = \sqrt{3M s_v/\gamma_b} \left[ \left( 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{1 + \beta}{1 + k} \cdot \frac{s_n}{s_v} \right)^2 - 1 \right] \quad (20)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{x}{\delta \cdot \beta} \left[ \left( 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{1 + \beta}{1 + k} \cdot \frac{1}{x} \right)^2 - 1 \right]} \quad (21)$$

Die grafische Darstellung der Gleichung (21) zeigt Figur 10. Für die entsprechenden Minimumwerte der Figur 8 folgt aus Figur 10, dass Stromzeitintegral bei der kontinuierlichen Kraftübertragung im Durchschnitt 50% grösser als für die impulsartige Kraftübertragung ist. Die Gleichungen (17) und (21) können unter Beachtung der gemachten Voraussetzungen zum Abschätzen der Verhältnisse dienen. Die Entscheidung, welche Art der Kraftübertragung in Frage kommt, wird im konkreten Fall wesentlich vom Kraft-Weg-Verhalten der magnetisch erzeugten Kräfte beeinflusst. Dieses Verhalten wurde aber in der mathematischen Problemformulierung nicht berücksichtigt. Deshalb ist es notwendig die entsprechenden Eigenschaften aus der Tabelle III zu beachten.

## 6. Schlussfolgerungen

1. Impulsartige Kraftübertragung führt bei entsprechender Bemessung des magnetischen Krafterzeugers zu kürzeren Schaltzeiten und somit zur wirksamen Strombegrenzung durch die Schnellwechsler. Diese Aussage hat ihre Gültigkeit für Schaltgeräte mit kleinen Nennströmen in der Grössenordnung von 100 A, da die Grösse der Nennströme die Masse der beweglichen Schaltglieder festlegt.
2. Für grössere Nennströme (500...2000 A) wird die Realisierung eines magnetischen Krafterzeugers mit impulsartiger Kraftübertragung durch hohe  $\delta$ -Werte ungünstig. Hier werden Lösungen mit kontinuierlicher Kraftübertragung in Frage kommen, wobei keine zusätzli-

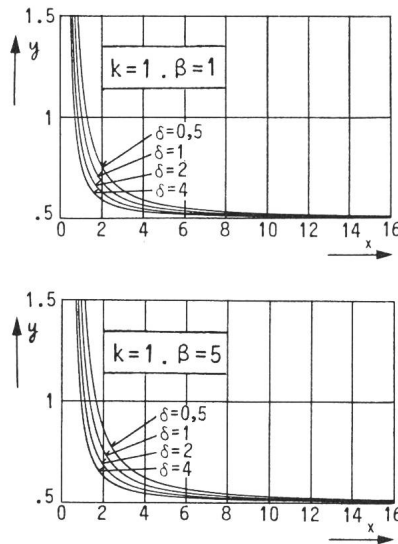
**Fig. 10 Verhältnis der Elektrodenabbrände in Abhängigkeit vom Wegverhältnis bei elastischem Stoss**

$$y = Q_b / Q_a$$

$$x = s_v / s_n$$

$$Q_a = \int_0^{t_a} i dt \quad \text{Stromzeitintegral bei kontinuierlicher Kraftübertragung}$$

$$Q_b = \int_0^{t_b} i dt \quad \text{Stromzeitintegral bei impulsartiger Kraftübertragung}$$



chen Schaltwege (z. B. Klinkenüberdeckungen) eingebaut werden dürfen.

3. Während im geschlossenen Zustand des Schalters eine genügend hohe Kontaktkraft herrschen muss, ist im allgemeinen die Lösung so zu gestalten, dass im Augenblick der Öffnung die Kontaktkraft durch eine konstruktive Massnahme vollständig beseitigt wird. Dies ist sowohl bei kontinuierlicher als auch bei impulsförmiger Kraftübertragung zu beachten.

3. Für höhere Nennströme sollen Lösungskonzepte erarbeitet werden, bei welchen die Anfangsgeschwindigkeit des öffnenden Schaltstückes einen Wert ungleich Null hat, ohne deshalb für die Erzeugung der Ausschaltkraft hohe thermische Verluste im fehlerfreien Betrieb in Kauf zu nehmen.
5. Es ist nicht möglich, mit der konstruktiven Verwirklichung eines Kräfteerzeugungs- und Übertragungssystems verschieden grosse vorkommende Kurz-

schlussströme abzuschalten. Zu diesem Zweck müssen die kontinuierliche und impulsartige Kraftübertragung kombiniert werden.

Diese aus der Problemformulierung und Problemanalyse abgeleiteten Bedingungen bilden die Grundlage der methodischen Konzeptentwicklung, die beispielsweise mit Hilfe der Methode des morphologischen Kastens bzw. der Methode der minimal notwendigen Teilfunktionen [3] durchgeführt werden kann.

#### Literatur

- [1] A. Erk: Strombegrenzende Schnellschalter für Starkstromanlagen. ETZ-B 14(1962)7, S. 169...174.
- [2] L. Niemeyer: Berechnung des Schaltverhaltens von strombegrenzenden Selbstschaltern. ETZ Archiv 1(1979)6, S. 191...196.
- [3] M. Tayefeh-Emamverdi: Methodische Konzeptentwicklung in der Elektrotechnik. Teil 1: Methode der minimal notwendigen Teilfunktionen. Bull. SEV/VSE 72(1981)13, S. 703...711.