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: 72 (1981)

Heft: 17

Artikel: Methodische Konzeptentwicklung in der Elektrotechnik : Teil 2 : Konzipieren am Beispiel der Auslöser elektrischer Schaltgeräte

Autor: Tayefeh-Emamverdi, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905151

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: 08.07.2025

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

Methodische Konzeptentwicklung in der Elektrotechnik

Teil 2: Konzipieren am Beispiel der Auslöser elektrischer Schaltgeräte [1])

Von M. Tayefeh-Emamverdi

621.3:658.512.2;

Die im ersten Teil dargestellte Methode der minimal notwendigen Teilfunktionen wird am Beispiel der Auslöser elektrischer Schaltgeräte erläutert. Dabei wird insbesondere auch der einschränkende Einfluss der Vorschriften auf das Feld der möglichen Lösungen einer Aufgabe gezeigt.

La méthode générale du minimum de fonctions partielles décrite dans la première partie est expliquée ici en prenant comme exemples les déclencheurs d'appareils électriques de couplage. On montre notamment que les prescriptions restreignent le champ des solutions possibles d'un problème.

5. Beispiel: Auslöser

Der Gegenstand der Aufgabe sei die Entwicklung von Lösungsprinzipien für die Produktgruppe *Auslöser elektrischer Schaltgeräte*. Da diese Arbeit einen allgemein umfassenden Charakter haben soll, wird keine Spezifikation auf eine bestimmte Schalterart vorgenommen und auf Angabe von quantitativen Anforderungen verzichtet. In diesem Fall interessiert in erster Linie für die Suche nach Lösungsprinzipien die Funktion des Produktes. Sie ist in den zuständigen Vorschriften [17], denen das Produkt genügen muss, in § 7a definiert:

Auslöser sind Vorrichtungen, die bei Überschreiten oder Unterschreiten vorgegebener elektrischer Grössen die im Schalter gespeicherte Energie (z.B. gespannte Feder, Druckluft) mechanisch freigeben. Sie sind Bestandteile von Schaltern.

Zu dieser Obergruppe werden in [17] zwei Untergruppen definiert:

– Messauslöser sind Auslöser, die eine elektrische Wirkungsgrösse überwachen.
– Hilfsauslöser sind nichtmessende Auslöser, die bei ihrer Erregung oder Entregung den Schalter auslösen.

Der Begriff «Wirkungsgrösse» ist in § 16a festgelegt:

Wirkungsgrösse ist eine elektrische oder andere physikalische Grösse, die überwacht werden soll und die bei Über- und Unterschreiten eines gewissen Wertes eine Wirkung hervorruft, z.B. Auslösen, Warnen.

Die Gesamtheit dieser Definition soll – da sie sich nur mit dem Wesen dieser Produktgruppe befasst – funktionsbestimmend sein.

5.1 Analyse und Abstraktion der Aufgabe

Erkennen des Wesenskerns: Zu diesem Zweck wird die angegebene Definition der Obergruppe von Auslösern analysiert. Daraus folgt:

a) Es ist das Überschreiten oder Unterschreiten *eines bestimmten Wertes* vorgegebener elektrischer Grössen festzustellen.
b) Es muss im Schalter eine gespeicherte Energie existieren.
c) Die im Schalter gespeicherte Energie ist mechanisch freizugeben.

Die Analyse der Definition der Untergruppe ergibt:

d) Es gibt messende Auslöser.
e) Es gibt auch nichtmessende Auslöser, die zum Auslösen erregt werden (Hilfsauslöser).

Fragt man sich, ob alle diese Feststellungen wirklich den Wesenskern der Auslöser betreffen, so gelangt man zu dem Ergebnis:

ad a) Diese Feststellung gibt die auszuführende Funktion wieder.
ad b+c) Diese Feststellungen sagen nichts über die Funktion des Auslösers aus.
ad d) Es ist kein Unterschied zwischen der Definition der Auslöser als Oberbegriff und der Definition der Messauslöser als Unterbegriff zu finden. Daher können die Messauslöser nicht als eine Untergruppe der Auslöser angesehen werden.
ad e) Es ist nicht möglich, den definierten nichtmessenden Hilfsauslöser als Auslöser zu identifizieren:
– da der Hilfsauslöser nicht misst, kann er das Über- oder Unterschreiten eines bestimmten Wertes nicht feststellen und widerspricht somit der Begriffsbestimmung des Oberbegriffs;
– da der Unterbegriff «Messauslöser» bereits den Oberbegriff «Auslöser» voll erfüllt und somit keinen komplementären Unterbegriff zulässt.
Die Hilfsauslöser sind lediglich Wandler der Energieart und somit die Träger der entsprechenden Anpassungsfunktion (vgl. Teil 1).

Aus dieser Analyse geht hervor: Im untersuchten Fall ist das technische Gebilde nicht nur nach seiner Funktion, sondern auch nach gebräuchlichen Ausführungsformen definiert worden.

Erkennen der scheinbaren Einschränkungen: Nun seien die Feststellungen a...c hinsichtlich der in ihnen enthaltenen Einschränkungen betrachtet:

ad a) Wenn ein Auslöser Bestandteil eines elektrischen Schalters ist, so muss er nicht zwangsweise eine elektrische Grösse überwachen.
ad b) Diese Einschränkung liegt ausserhalb der Grenze des Auslösers. Trotzdem muss bemerkt werden, dass es eine quantitative Frage ist, ob es im Schalter einen Energiespeicher geben muss oder nicht.
ad c) Diese Forderung ist eine Einschränkung.

Im Zusammenhang mit «ad c» könnte eingewendet werden, dass die Vorschriften beispielsweise einen Auslöser mit elektrischem Ausgang als Relais bezeichnen. Demgegenüber wird hier festgestellt: Von der Funktion her ist kein Unterschied zwischen den Messauslösern und den Messrelais vorhanden. Aus der Sicht der Funktion ist es unwesentlich, sie wegen ihrer Ausgangsgrösse voneinander zu unterscheiden.

Die vorangegangene Analyse der Definition eines Produktes gemäss den Vorschriften zeigt: Die Vorschriften sind für die Sicherheit und ein Mindestmass an Qualität massgebend. Ihre Definitionen bezüglich der Funktion werden offensichtlich von den vorhandenen Geräten abgeleitet. Somit entsprechen sie dem Stand der Technik bei ihrem Erscheinen. Sie können aus diesem Grunde nicht innovativ wirken. Es ist daher notwendig, beim Entwickeln neuer Produkte die Definitionen der Vorschriften kritisch zu betrachten, um die Innovation durch sie nicht zu unterbinden.

Abstrakte Formulierung der Gesamtfunktion: Unter Berücksichtigung des Wesenskerns der Aufgabe und der Elimination

[1]) Teil 1: Methode der minimal notwendigen Teilfunktionen Bull. SEV/VSE 72(1981)13, S. 703...711.

der scheinbaren Einschränkungen ergibt sich die abstrakte Formulierung der Gesamtfunktion:

Auslösesysteme sind technische Systeme, die bei Überschreiten oder Unterschreiten eines bestimmten Wertes vorgegebener physikalischer Grössen durch Abgabe eines Signals ausreichender Leistung weitere Systeme betätigen.

Diese Funktionsformulierung ist in Fig. 6 dargestellt. Sie vermeidet im Gegensatz zur Definition der Vorschriften jede Vorfixierung auf bestimmte Lösungen und bringt lediglich die Funktion des Produktes zum Ausdruck.

5.2 Einteilung der bestimmenden Flüsse der Gesamtfunktion

Aus Fig. 6 sind erkennbar:

– als Hauptfluss ein Signalfluss, der sich von der zu überwachenden physikalischen Grösse zu weiteren zu betätigenden Systemen erstreckt und

– als Nebenfluss ein Signalfluss, der zum Festlegen eines bestimmten Wertes der zu überwachenden physikalischen Grösse dient (Schwellwertfestlegung).

5.3 Erkennen der minimal notwendigen Teilfunktionen

Um den Grundgedanken der angegebenen Methode zu veranschaulichen, sei vorerst das Erkennen der Teilfunktionen aufgrund der Analyse einer bekannten Lösung gezeigt. Dabei werde eine Spezialisierung auf Auslöser der FI-Schalter vorgenommen und das Prinzip des Magnetauslösers (Fig. 7) herangezogen. In diesem Auslöser teilt sich der Gesamtfluss Φ_M des Dauermagneten in die Teilflüsse Φ_{MN} und Φ_{ML}. Im fehlerfreien Betrieb ist die auf dem Nebenschluss angebrachte Wicklung (Sekundärseite eines Summenstromwandlers) nicht erregt, der Anker ist vom Dauermagneten angezogen und durch eine Zugfeder belastet. Wenn die Wicklung infolge eines Fehlers Strom führt, wird der Auslösefluss Φ_{WL} erzeugt. Unter der Voraussetzung der richtigen Polarität wirkt Φ_{WL} entgegen Φ_{ML}. Bei einem bestimmten Wert von Φ_{WL} wird der Anker durch die Feder vom Weicheisenjoch abgerissen und betätigt das Schaltschloss. Die aus der Analyse dieser Lösung erkannten Teilfunktionen sind in Fig. 8 zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich:

– Die Teilfunktionen sind teilweise lösungsspezifisch (z. B. die Teilfunktionen des Nebenschlusses)

– Gewisse Teilfunktionen sind für den Auslöser ohne Belang (z. B. «Ausgangssignal speichern», da es nach dem Auslösen nur mehr auf die Energie ankommt).

– Es kommen sowohl Teilfunktionen vor, die den Betriebszustand betreffen (z. B. «Energiespeicher verriegeln»), als auch solche, die den Auslösezustand betreffen (z. B. «Energiespeicher freigeben»).

Sieht man von den lösungsspezifischen Teilfunktionen ab, so können für die genannten Systemzustände die in Fig. 9 und 10 dargestellten Funktionsstrukturen angegeben werden. Trägt man alle diese Teilfunktionen – wie häufig üblich – in einen morphologischen Kasten ein (Fig. 11), dann vermengt man einerseits zwei Zustände des Systems und anderseits Teilfunktionen, die in verschiedenen Flüssen liegen. Die Synthese der Gesamtfunktion aus einem derartigen morphologischen Kasten ist nicht sinnvoll, da die Teilfunktionen nicht unabhängig voneinander sind. Sinnvoll ist es, vorerst die Lösungssuche für einen Zustand und für den Hauptfluss (für die Primärfunktionen) durchzuführen und schrittweise die Nebenflüsse (Sekundärfunktionen) zu berücksichtigen (Teil 1: Abschnitt 3.2).

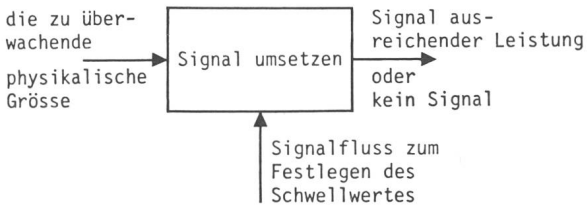


Fig. 6 Abstrakte Formulierung der Gesamtfunktion

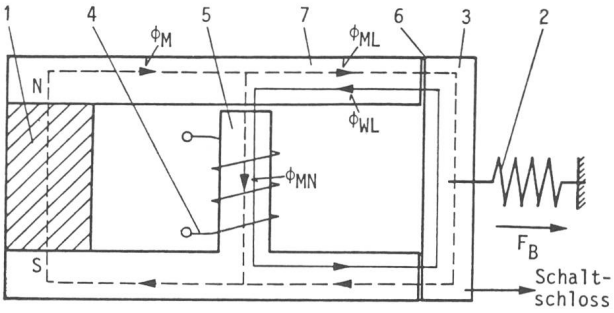


Fig. 7 Prinzip eines Magnetauslösers

1 Dauermagnet
2 Feder
3 Anker
4 Wicklung
5 Nebenschluss
6 Arbeitsluftspalt
7 Weicheisenjoch

Φ_M Magnetfluss
Φ_{ML} Magnetfluss über Luftspalt
Φ_{MN} Magnetfluss über Nebenschluss
Φ_{WL} Wicklungsfluss über Luftspalt
F_B Betätigungskraft

Funktionsträger	Funktion bezüglich Signalfluss	Funktion bezüglich Energiefluss
Dauermagnet (+ Arbeitsluftspalt)	Signalspeicher verriegeln	Energiespeicher verriegeln
Feder	Ausgangssignal speichern	Ausgangsenergie speichern
Anker (+ Feder)	Ausgangssignal übertragen	Ausgangsenergie übertragen
Wicklung	Eingangssignal leiten Signalträgerart wandeln	Eingangsenergie leiten
Nebenschluss	Signal leiten	Auslösefluss nur über Weicheisenjoch und Arbeitsluftspalt führen Rückschluss des Dauermagnetflusses beim abgefallenen Anker ermöglichen
Arbeitsluftspalt (+ Anker)	Soll- und Istwert vergleichen	Energiespeicher freigeben
Weicheisenjoch	Signal leiten	Energie leiten
Dauermagnet (+ Feder)	Auslöseschwelle festlegen (Sollwert geben)	

Fig. 8 Teilfunktionen des Magnetauslösers

Wenn nun statt von einer bekannten Lösung von der abstrakten Formulierung der Gesamtfunktion (Fig. 6) ausgegangen wird, dann folgt:

– Die im Hauptfluss zu erfüllende Funktion ist: «Wenn der Wert der Eingangsgrösse > als festgelegter Schwellwert, dann Signal abgeben.» Das ist eine logische Grundfunktion und soll im folgenden kurz als «entscheiden» bezeichnet werden, wobei jedes Entscheidungselement einen inhärenten Vergleich des Eingangswertes mit seinem Schwellwert vornimmt. Weitere Teilfunktionen sind im Hauptfluss aus der Formulierung der Gesamtfunktion nicht erkennbar.

– Da die Entscheidung aufgrund der Quantität der zu überwachenden Grösse gefällt werden muss, ist die im Nebenfluss zu erfüllende Funktion «Entscheidungsschwelle festlegen».

Somit ist die Gliederung in Teilfunktionen bis auf einen Punkt abgeschlossen: Gemäss der Formulierung der Gesamtfunktion muss am Ausgang ein *Signal ausreichender Leistung* abgegeben werden. Ist nun die Eingangsleistung P_E des Auslösers kleiner als die durch das zu betätigende System geforderte Ausgangsleistung P_A, dann muss eine Teilfunktion zur Vergrösserung der Signalleistung vorgesehen werden. Diese Notwendigkeit darf aber nicht von vornherein in die Funktion hineininterpretiert werden.

Ein Vergleich der hier angegebenen minimal notwendigen Teilfunktionen mit den in Fig. 8 zusammengestellten Teilfunktionen zeigt deutlich den Unterschied beider Vorgehensarten auf.

5.4 *Aufsuchen der Funktionsstruktur*

$P_E > P_A$: In diesem Fall gibt es eine Funktionsstruktur.

$P_E < P_A$: In diesem Fall gibt es drei Funktionsstrukturen (Fig. 12).

Nr.	Teilfunktion	Lösungsprinzipien
1	Energie speichern	1.1 1.2 1.3 ...
2	Energiespeicher verriegeln	2.1 2.2 2.3 ...
3	Energiespeicher freigeben	3.1 3.2 3.3 ...
4	Energie übertragen	4.1 4.2 4.3 ...
5	Signalträgerart wandeln	5.1 5.2 5.3 ...
6	Soll–Istwert vergleichen	6.1 6.2 6.3 ...
7	Sollwert geben	7.1 7.2 7.3 ...

Fig. 11 Morphologischer Kasten aufgrund der Analyse einer bekannten Lösung

5.5 *Auswahl der Funktionsstruktur*

Im Falle $P_E < P_A$ wird man im Sinne des geringsten Aufwandes nur die Strukturen a und b aus Fig. 12 weiterbetrachten. Um zwischen ihnen die günstigere Funktionsstruktur zu wählen, ist es bei diesem Beispiel notwendig, erst die Lösungen für die Teilfunktionen zu suchen.

5.6 *Aufsuchen von Lösungsprinzipien*

Die Suche nach Lösungsprinzipien erfolgt diskursiv, d.h. nach einem bewusst schrittweisen Vorgehen.

5.6.1 Lösungsprinzipien für die Teilfunktion «entscheiden»

Für diese Teilfunktion sind in bezug auf die Eingangsgrösse ein Schwellwert und hinsichtlich der Ausgangsgrösse zwei definierte Zustände zu realisieren. Als Oberbegriff für die Lösungsprinzipien wird «Entscheidungselemente» gewählt. Die Teilbegriffe sind in der ersten Ebene nach dem Gesichtspunkt Über- oder Unterschreiten des Schwellwertes und in der zweiten Ebene nach der Art des Zustandswechsels der Ausgangsgrösse festgelegt (Fig. 13). In der dritten Ebene werden *ein-*

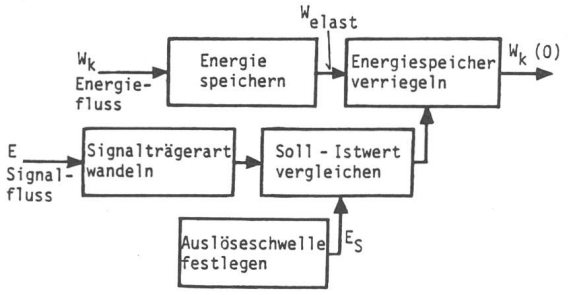


Fig. 9 Funktionsstruktur des Magnetauslösers für den Fall $E < E_S$
Teilfunktion «leiten» überall weggelassen
E_S Schwellwert
W_{elast} Elastische Energie
E Die zu überwachende Eingangsgrösse
W_k Kinetische Energie

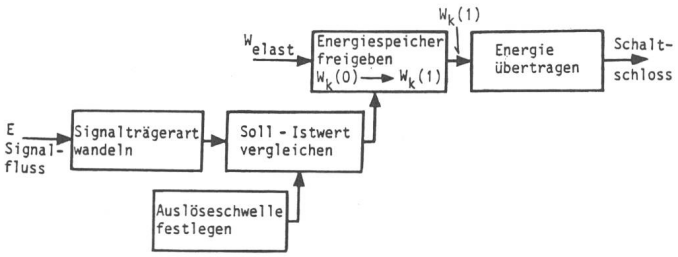


Fig. 10 Funktionsstruktur des Magnetauslösers für den Fall $E > E_S$

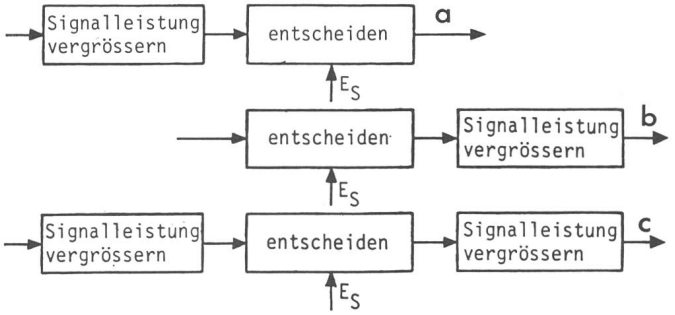


Fig. 12 Verschiedene Funktionsstrukturen der Auslösesysteme infolge der Teilfunktion «Signalleistung vergrössern»
E_S Schwellwert

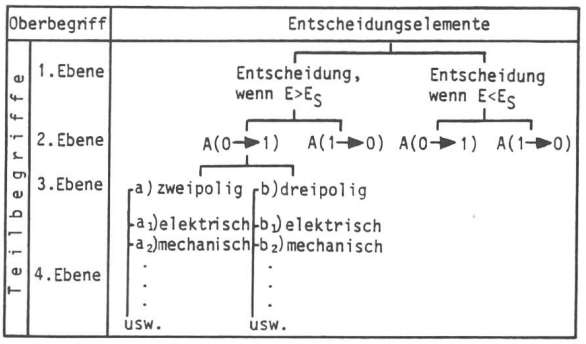


Fig. 13 Systematik der Entscheidungselemente
E Eingangsgrösse E_S Schwellwert
A Ausgangsgrösse → Zustandswechsel

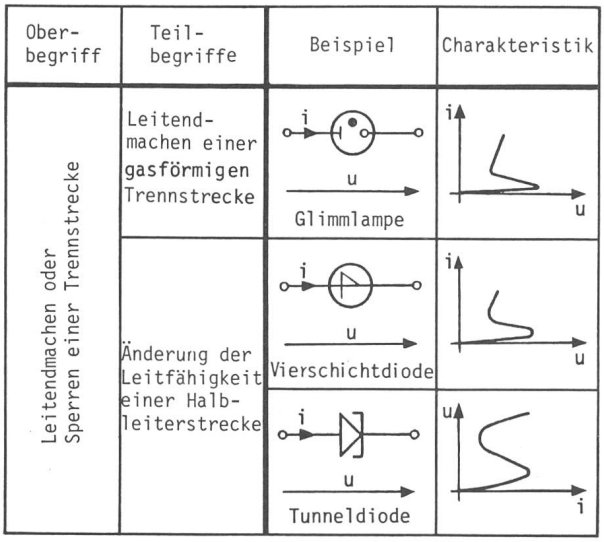


Fig. 14 Beispiele für elektrische Lösungsprinzipien der zweipoligen Entscheidungselemente

schränkend nur für solche Elemente Teilbegriffe aufgesucht, bei denen die Ausgangsgrösse den Zustand 1 annimmt. Während in der ersten und zweiten Ebene die Teilbegriffe nur aufgrund logischer Überlegungen festgelegt wurden, erfolgt die Festlegung der Teilbegriffe in der dritten Ebene aufgrund des Abstrahierens von aus der Erfahrung bekannten Entscheidungselementen:

– zweipolige Entscheidungselemente entscheiden aufgrund des Betrags eines Signals, wobei das Ausgangssignal demselben Energiefluss angehört wie das Eingangssignal (z. B. eine Kippdiode)

– dreipolige Entscheidungselemente entscheiden aufgrund des Betrags eines Signals, wobei das Ausgangssignal einem anderen Energiefluss angehört als das Eingangssignal (z. B. ein Thyristor).

In der vierten Ebene sind die Teilbegriffe nach dem Gesichtspunkt der Energiearten gewählt worden (Fig. 13). Die diskursive Lösungssuche bringt Verästelungen, die zu verschiedenen Lösungen führen können. In der Praxis wird man infolge Zeitmangels einen Ast weiterverfolgen. Es könnte dagegen eingewendet werden, wozu überhaupt diskursive Lösungssuche betrieben werden soll, wo die Zeit fehlt. Dem muss entgegengestellt werden, dass dieser Sachverhalt gerade den besonderen Vorteil des systematischen Vorgehens dokumentiert. Denn durch die Erkenntnis von Verzweigungspunkten der Lösungssuche ist die Möglichkeit der Rückkehr zum Entscheidungspunkt jederzeit gegeben, so dass – wenn notwendig – andere Wege beschritten werden können.

Bei der Zusammenstellung der Lösungsprinzipien steht im folgenden nicht die Vollständigkeit, sondern das Vorgehen im Vordergrund. *Einschränkend* werden aus Fig. 13 nur elektrische und mechanische Lösungsprinzipien gesucht, bei denen die Ausgangsgrösse den Zustand 1 annimmt:

a) Zweipolige Entscheidungselemente

a_1) Elektrische Lösungsprinzipien: Sie sollen einen Schwellwert für elektrische Spannung bzw. Strom festlegen. Dies entspricht der Erzeugung einer Isoliertrennstrecke. Daher kann als Oberbegriff der Lösungssuche «Leitendmachen einer Isoliertrennstrecke» gewählt werden. Mögliche Teilbegriffe und Beispiele hiezu zeigt Fig. 14.

a_2) Mechanische Lösungsprinzipien: Im Gegensatz zu elektrischen Lösungsprinzipien, die im allgemeinen als Elemente bekannt sind, muss man die mechanischen Lösungsprinzipien selbst entwickeln. Zum Finden des Oberbegriffs der Lösungssuche kann man die elektrische Spannung in Analogie zur mechanischen Kraft bei festen Körpern setzen. Ein fester Körper muss sich in einer stabilen Gleichgewichtslage befinden, und diese Lage muss einen Schwellwert vorschreiben. Nimmt man ein System mit einem Freiheitsgrad s an, dann sind die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für die Stabilität

$$\mathrm{d}W_p/\mathrm{d}s = 0 \quad \mathrm{d}^2 W_p/\mathrm{d}s^2 = 0 \tag{3}$$

Aus diesen Bedingungen, in denen W_p die potentielle Energie des Systems bezeichnet, folgt, dass der feste Körper Kräften unterworfen sein muss, die zu keinem Leistungsumsatz führen. Daher wird als Oberbegriff der Lösungssuche «Vorgabe einer Kraft» gewählt. Die grundsätzlichen Möglichkeiten hiezu zeigt Fig. 15:

– Zweipolige Entscheidungselemente aufgrund des Kraftschlusses und des Reibschlusses ergeben sich, wenn im ersten Fall F_v und im zweiten Fall N (Fig. 15) mittels verschiedener physikalischer Effekte erzeugt werden.

– Zweipolige Entscheidungselemente aufgrund des Formschlusses sind für solche feste Körper zu realisieren, bei denen das mechanische Durchschlagen auftritt. Auf diesem Prinzip beruhen auch die Kniehebelkonstruktionen (Fig. 16).

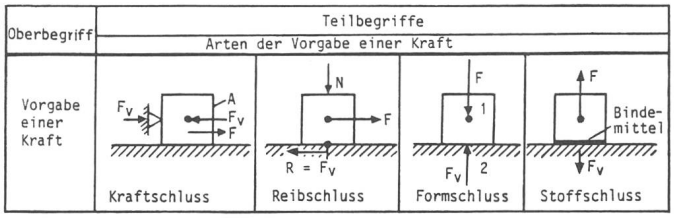


Fig. 15 Mechanische Lösungsprinzipien der zweipoligen Entscheidungselemente

Kraftschluss: A Angriffsfläche der Kräfte
F_v Vorgegebene Kraft
F Kraft als Eingangsgrösse

Reibschluss: R Reibungskraft
N Normalkraft zur Erzeugung von R

Formschluss: 1 Der zu bewegende Körper
2 Körper, dessen Festigkeit F_v ersetzt

Stoffschluss: F_v Die durch das Bindemittel vorgegebene Kraft

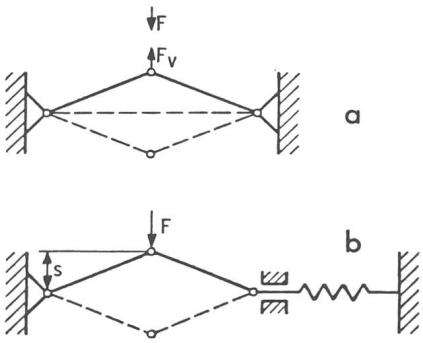


Fig. 16 Beispiele für zweipolige Entscheidungselemente aufgrund des Formschlusses

F_v durch elastischen Körper vorgegebene Kraft
F Kraft als Eingangsgrösse
a Prinzip des mechanischen Durchschlagens
b Prinzip des Kniehebels

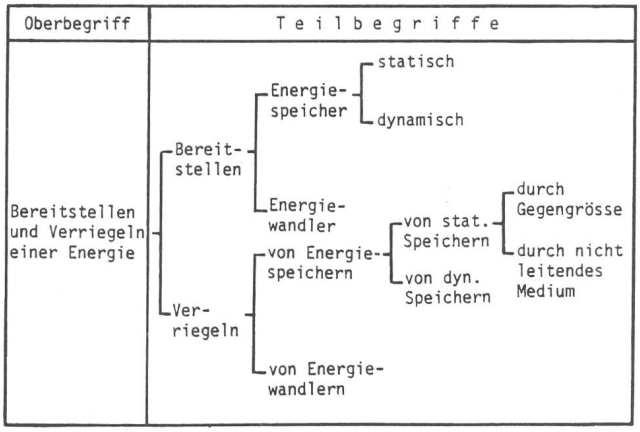


Fig. 17 Systematik der Lösungsprinzipien der dreipoligen Entscheidungselemente

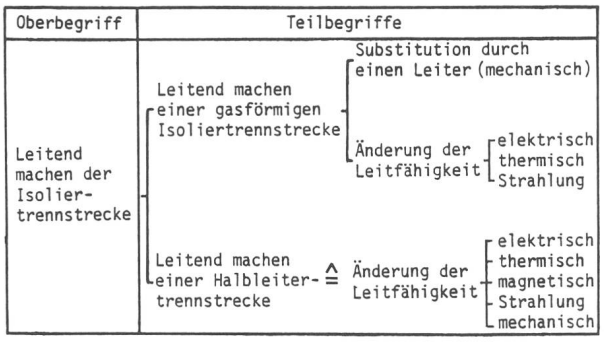


Fig. 18 Systematik der elektrischen dreipoligen Entscheidungselemente

– Zweipolige Entscheidungselemente aufgrund des Stoffschlusses können nicht realisiert werden, da die Kraft F (Fig. 15) nur durch die Zerstörung der Bindung eine Bewegung des Körpers aus dem Gleichgewichtszustand bewirken kann.

b) Dreipolige Entscheidungselemente

Das Ausgangssignal wird hier in Form einer Hilfsenergie bereitgehalten. Folglich beruht der gesuchte Oberbegriff für diese Lösungsprinzipien in «Bereitstellen und Verriegeln einer Energie beliebiger Art». Die Teilbegriffe hiezu sind in Fig. 17 zusammengestellt.

b_1) Elektrische Lösungsprinzipien: Sowohl Speicher der elektrischen Energie als auch Wandler einer beliebigen Energieart in elektrische Energie sind «Spannungserzeuger». Der Oberbegriff und die Teilbegriffe der Lösungssuche zeigt Fig. 18. Beispiele hiezu sind in Fig. 19 zusammengestellt.

b_2) Mechanische Lösungsprinzipien: Sowohl Speicher der mechanischen Energie als auch Wandler einer beliebigen Energieart in mechanische Energie sind «Krafterzeuger». Die Lösungsprinzipien beruhen daher darauf, dass die von einem Krafterzeuger auf einen festen Körper wirkende Kraft (Betätigungskraft F_B) durch eine Gegenkraft (Haltekraft F_H) am Leistungsumsatz gehindert wird. F_H muss um den Schwellwert F_B überwiegen. Der Oberbegriff der Lösungssuche besteht somit in «Vorgabe einer Haltekraft», wofür wiederum die Prinzipien von *Kraft-, Reib-, Form-* und *Stoffschluss* in Frage kommen. Im folgenden wird die Lösungssuche für dreipolige Entscheidungselemente aufgrund des Kraftschlusses gezeigt:

Das Grundprinzip dieser Lösungen zeigt Fig. 20. Zur Erzeugung der Halte- und Betätigungskraft können theoretisch alle Effekte der Krafterzeugung herangezogen werden. In [14] sind z. B. 38 Effekte zusammengestellt, so dass im vorliegenden Fall theoretisch $38 \times 38 = 1444$ Kombinationen möglich wären. Da aber nicht jeder physikalische Effekt sich für Auslöser eignet, lässt sich diese Zahl reduzieren, so dass beispielsweise die in Fig. 21 angegebenen Effekte für die weitere Betrachtung übrigbleiben. Aus Fig. 21 sind $6 \times 5 = 30$ Kombinationen ableitbar. Jede dieser Kombinationen führt zu einer Anzahl von Lösungsprinzipien, da es mehrere Möglichkeiten der Beeinflussung des jeweiligen Kräftegleichgewichtes gibt (Fig. 22).

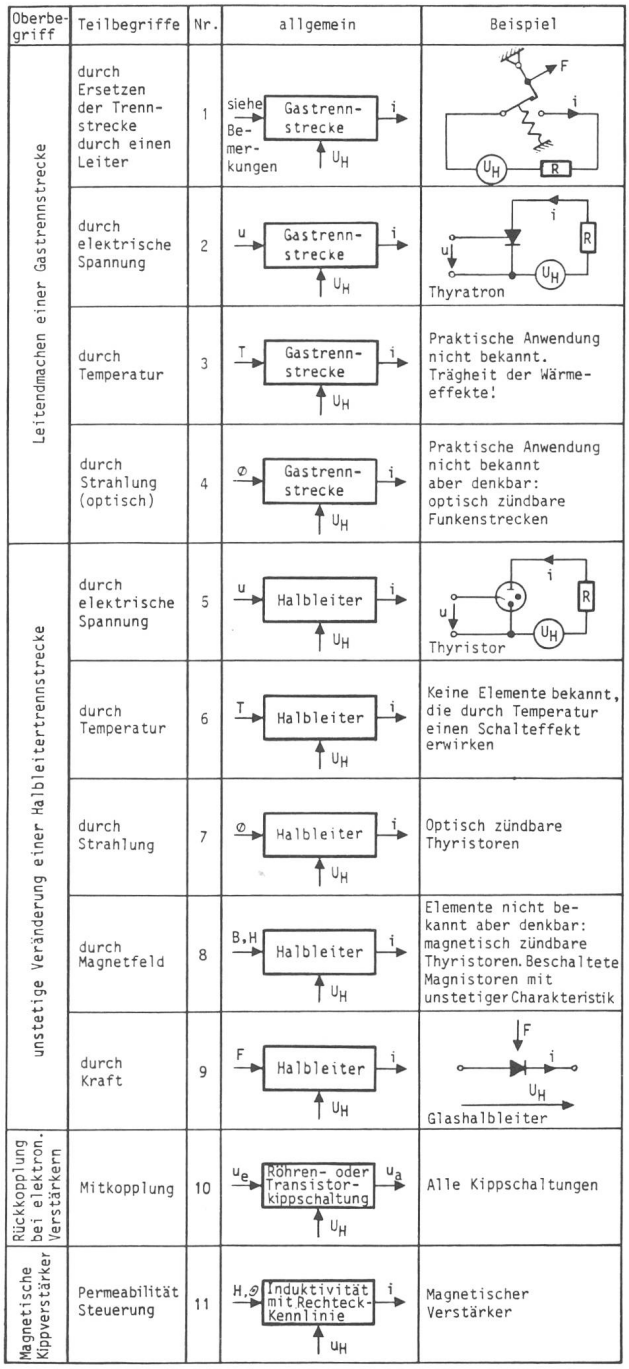


Fig. 19 Elektrische Lösungsprinzipien der dreipoligen Entscheidungselemente

U_H, u_H Hilfsspannung (elektrische Hilfsenergie)
Bemerkung zur Nr. 1: Entscheidung beim Schliessen des Schalters, elektrisches System wirkt als Verstärker. Hier alle mechanischen Lösungsprinzipien der dreipoligen Entscheidungselemente verwendbar. Eingangsgrösse nach verwendetem Prinzip (im Beispiel: Kraft)

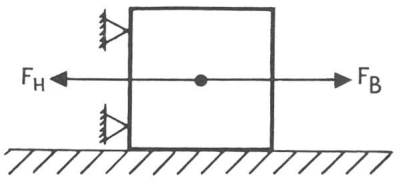


Fig. 20 Grundprinzip der dreipoligen Entscheidungselemente aufgrund des Kraftschlusses

Nr.	Kraftart	F_H	F_B	Gleichung	Kraft-Weg-Kennlinie
1	Johnson-Rahbeck-Effekt	x		$F = kU^2 A$	F, s
2	dauermagnetische Anziehung	x	x	$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0}$	F, s
3	dauermagnetische Abstossung	x	x	$F = kB_1B_2$	F, s
4	elektromagnet. Anziehung	x	x	$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0}$	F, s
5	Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld	x	x	$F = I l B$	F, s
6	Federkraft	x	x	$F = cs$	F, s

Fig. 21 Einige Effekte der Krafterzeugung zum Bilden der mechanischen Lösungsprinzipien der dreipoligen Entscheidungselemente aufgrund des Kraftschlusses

× möglich

Fig. 23 zeigt einige Lösungsprinzipien, die sich aus der Analyse der Beeinflussungsmöglichkeiten der Parameter der Effekte Nr. 1, 2 und 4 ergeben, wenn diese Effekte zur Erzeugung der Haltekraft benützt werden.

5.6.2 Lösungsprinzipien für die Teilfunktion «Signalleistung vergrössern»

Naheliegend wäre, den Oberbegriff der Lösungssuche mit «Verstärker» festzusetzen. Aber schon durch diese Festsetzung würde man einige Lösungen ausschliessen, und es ist ratsam, sich bei eigenen Aufgaben davon zu überzeugen, ob nicht durch die blosse Benennung eines Objektes das mögliche Lösungsfeld unnötig eingeengt wird. Führt man nämlich statt «ver-

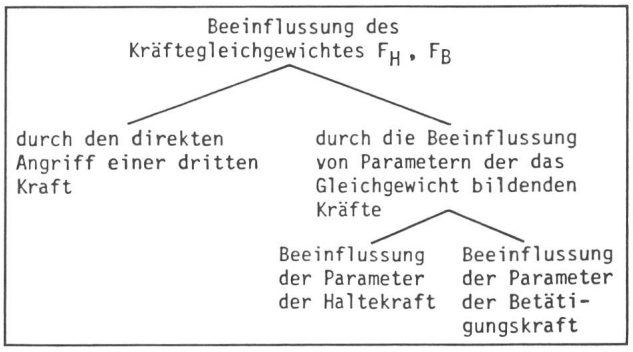
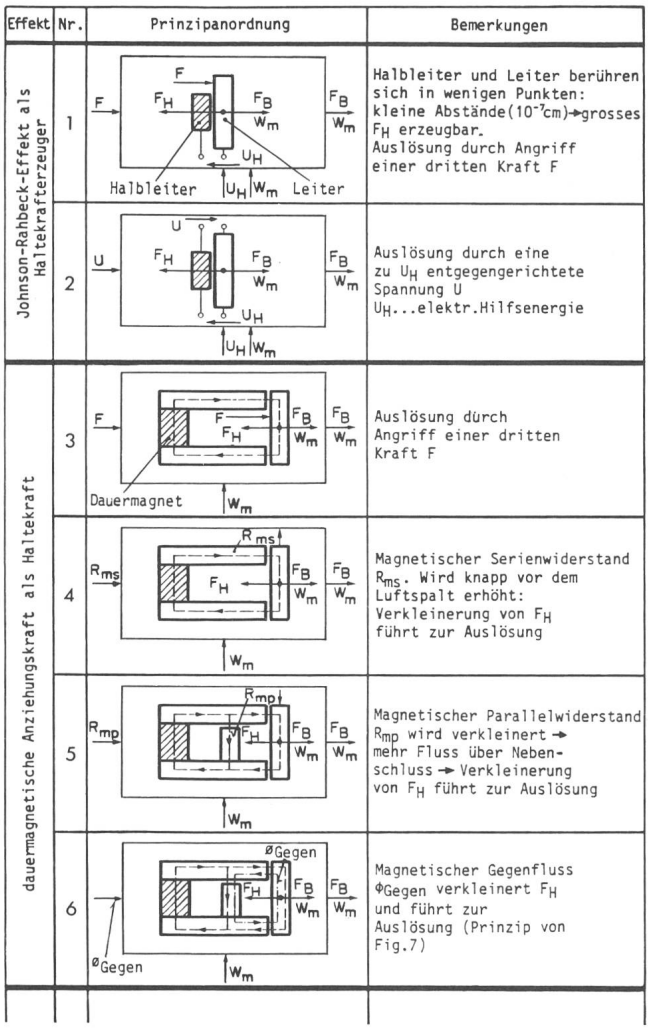


Fig. 22 Möglichkeiten der Beeinflussung eines durch Kraftschluss gebildeten Kräftegleichgewichtes



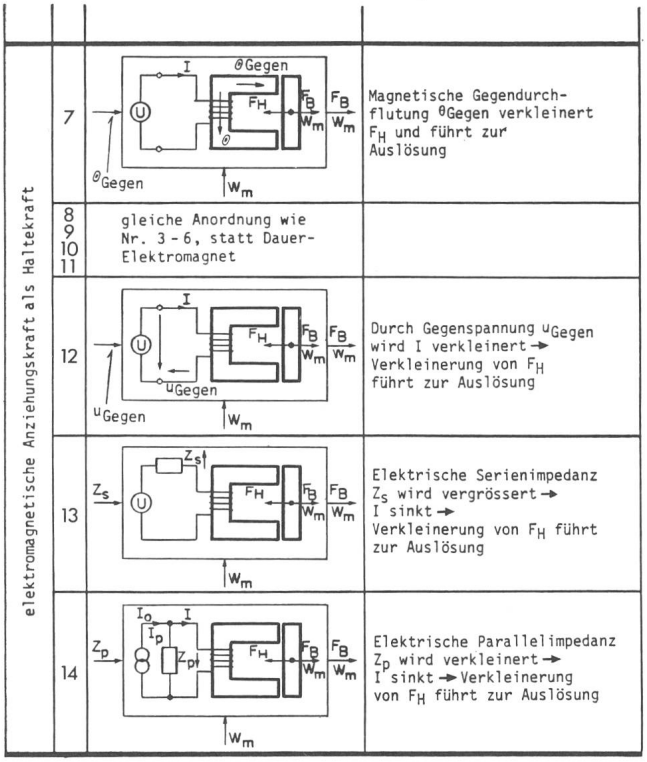


Fig. 23 Zusammenstellung einiger mechanischer Lösungsprinzipien der dreipoligen Entscheidungselemente

(Kraftschluss; vorgegebene Haltekraft, beliebige Betätigungskraft)

W_m Mechanische Hilfsenergie (zugehörig zur Betätigungskraft)

stärken» den Begriff «Signalleistung vergrössern» ein, dann ergibt sich aus der Relation der Leistung P mit der Energie W

$$W = \int P \mathrm{d}t \tag{4}$$

dass eine Leistungsvergrösserung ohne Hilfsenergie durch Integration der Signalleistung über ein bestimmtes Zeitintervall erreicht werden kann (Fig. 24). Ausser einfachen Speichern, welche eine Energieart statisch oder dynamisch speichern, kommen auch Oszillatoren zur Leistungsvergrösserung in Frage, wenn sie wiederholt in Resonanz angestossen werden (Fig. 25). Somit können der Oberbegriff und Teilbegriffe für die Lösungsprinzipien dieser Teilfunktion wie in Fig. 26 zusammengefasst werden.

a) Speicher zur Signalleistungsvergrösserung

Diese Prinzipien sind im Teil 1 in der Tabelle VI zusammengefasst.

b) Verstärker zur Signalleistungsvergrösserung

Zur systematischen Erfassung der Verstärker sind die Teilbegriffe *stetige Verstärker* und *unstetige Verstärker* gut geeignet. Sie beziehen sich auf die Übertragungskennlinie des Verstärkers, unabhängig von der Art der Hilfsenergie:

b_1) Stetige Verstärker: Um alle Lösungsprinzipien der stetigen Verstärkung zu erfassen, ist es erforderlich, die in Frage kommenden Hilfsenergiearten festzulegen und dann nach allen stetig veränderbaren Widerständen zu suchen, die die Steuerung des jeweiligen Energieflusses erlauben. Für einen elektrischen Schalter kann ein Kriterium zur Reduktion der möglichen Lösungen die Einschränkung auf die elektrische Energie sein. Einige Effekte mit elektrischer Hilfsenergie sind in Tab. IV (Teil 1) zu finden.

b_2) Unstetige Verstärker sind Systeme, in denen der Eingangssignalträger eine verriegelte Energiemenge als Träger des Ausgangssignals freigibt. Somit können alle dreipoligen Entscheidungselemente als unstetige Verstärker wirken. Daher erfüllen alle in Fig. 19 und 23 angegebenen Lösungsprinzipien sowohl die Teilfunktion «entscheiden» als auch die Teilfunktion «unstetig verstärken». Man spricht bei derartigen Elementen von der integralen Funktionsausnützung.

5.7 Auswahl von Lösungsprinzipien

Dieser Schritt entfällt hier, da das Beispiel unter Weglassen von speziellen Forderungen durchgeführt wurde.

5.8 Bilden der Lösungskonzepte

$P_E > P_A$: In diesem Fall ist keine Kombinationsmatrix notwendig. Alle Lösungsprinzipien der zweipoligen und der dreipoligen Entscheidungselemente sind Auslöser-Lösungsprinzipien. Man sieht, dass eine Kippdiode grundsätzlich als ein Auslöser funktionieren kann, obwohl sie keineswegs der Begriffsbestimmung der Vorschriften entspricht.

$P_E < P_A$: Nachdem die Lösungsprinzipien der in Funktionsstrukturen a und b beteiligten Teilfunktionen (Fig. 12) bekannt sind, kann untersucht werden, welche Funktionsstruktur weiter zu betrachten ist:

– Für die Funktionsstruktur a (Fig. 12) kann die Möglichkeit der Speicherung der Signalenergie eingesetzt werden. Man muss aber beachten, dass die Ausgangsgrösse eines Speichers nicht immer in einem eindeutigen Verhältnis zu dessen Eingangsgrösse steht. Betrachtet man z. B. einen Kondensator, so ist

$$U = Q/C = I \cdot t/C \tag{5}$$

Soll U aufgrund eines bestimmten Wertes von I auslösen, dann muss man durch Hilfsmassnahmen den Einfluss von t eliminieren, damit diese Lösung eindeutig ist.

– Für die Funktionsstruktur a (Fig. 12) ist die stetige Verstärkung vor der Entscheidung grundsätzlich gut geeignet. Die unstetige Verstärkung dagegen scheidet aus, da jeder unstetige Verstärker selbst ein Entscheidungselement ist.

– Für die Funktionsstruktur b (Fig. 12) ist es nicht sinnvoll, nach der Abgabe des Auslösebefehls die Signalleistung zu speichern oder stetig zu verstärken, so dass hier nur unstetige Verstärker in Frage kommen.

Nach diesen Betrachtungen ergehen sich drei Funktionsstrukturen (Fig. 27) für die je eine Kombinationsmatrix zu erstellen wäre. Als Beispiel sei für die Funktionsstruktur II ein

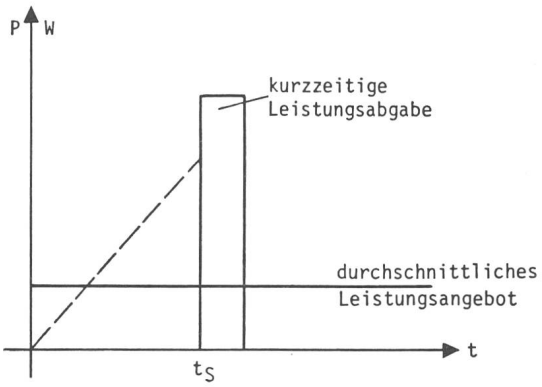


Fig. 24 Leistungsvergrösserung durch Energiespeicherung
W Energie im Speicher
t_S Speicherungsdauer

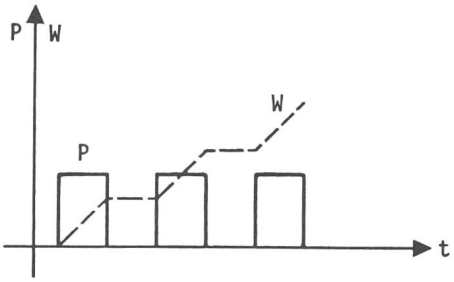


Fig. 25 Leistungsvergrösserung durch Anstossen eines Oszillators in Resonanz
P Impuls (Leistung), mit dem der Oszillator in Resonanz angestossen wird
W Energie im Oszillator ohne Berücksichtigung der Verluste

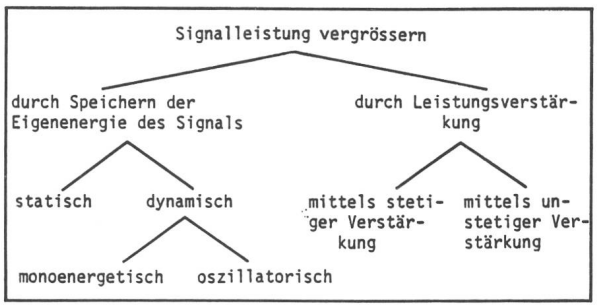


Fig. 26 Möglichkeiten der Signalleistungsvergrösserung

Ausschnitt der zugehörigen Kombinationsmatrix in Fig. 28 dargestellt. Die Lösungsprinzipien in Fig. 28 sind für «stetig verstärken» der Tabelle IV (Teil 1) und für «entscheiden» den Fig. 19 und 23 entnommen. Folgende Konzepte können qualitativ unmittelbar aus diesem Ausschnitt gebildet werden: 1.1+2.1 / 1.1+2.3 / 1.2+2.2 / 1.3+2.2. Ob diese Konzepte mit den Grenzen des Systems verträglich sind oder nicht, hängt bei diesem Beispiel von den Merkmalen der zu überwachenden Grösse und von dem vom Auslöser zu betätigenden System ab. Es sei vorausgesetzt, dass ein elektrischer Strom überwacht und ein Schaltschloss betätigt wird. In diesem Fall wird bei allen vier Konzepten sowohl am Eingang als auch am Ausgang eine Anpassung der Grössenart benötigt.

5.9 Bilden der Lösungskonzepte mit Hilfe der Anpassungsfunktionen

Anpassung an Grenzen des Systems: Als Beispiel sei das Konzept (1.1+2.1) nach Fig. 28 betrachtet. Um den zu überwachenden Strom dem Eingang dieses Lösungsprinzips anzupassen, wird bei rein qualitativer Betrachtung ein Strom in eine Spannung umzuwandeln sein. Dazu können die Tabellen II, III und IV (Teil 1) herangezogen werden. Man sucht in diesen Tabellen vorerst einstufig und dann mehrstufig nach den Lösungsmöglichkeiten. Einige Beispiele hiezu zeigt Fig. 29. Die Anpassung des Ausganges des Konzeptes (1.1+2.1) an das Schaltschloss erfolgt aufgrund ähnlicher Überlegungen, so dass mehrere Lösungskonzepte gebildet werden können. Im fol-

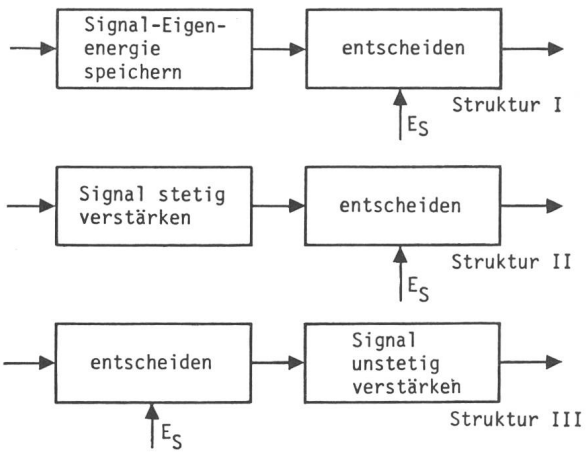


Fig. 27 Ausgewählte Funktionsstrukturen

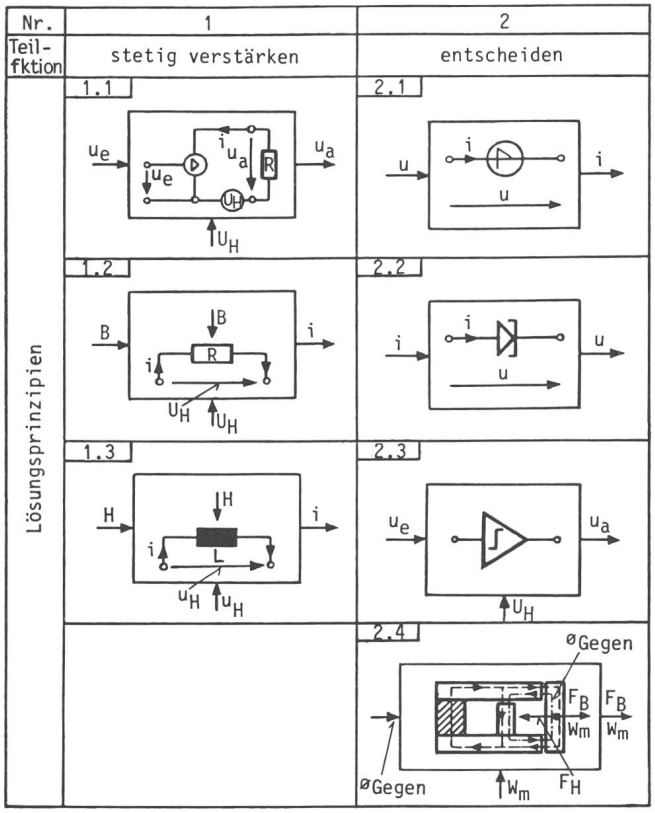


Fig. 28 Ausschnitt aus Kombinationsmatrix der Funktionsstruktur mit stetiger Verstärkung

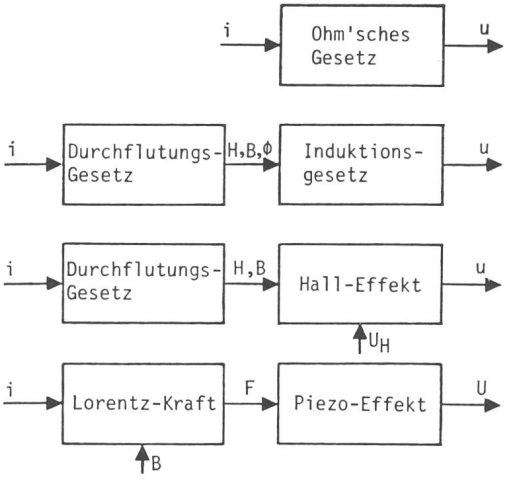


Fig. 29 Einige Beispiele der Anpassung durch Signalträgerartwandlung

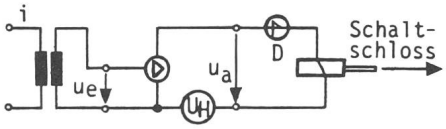


Fig. 30 Auslöserkonzept mit Vierschichtdiode
i Eingangssignal

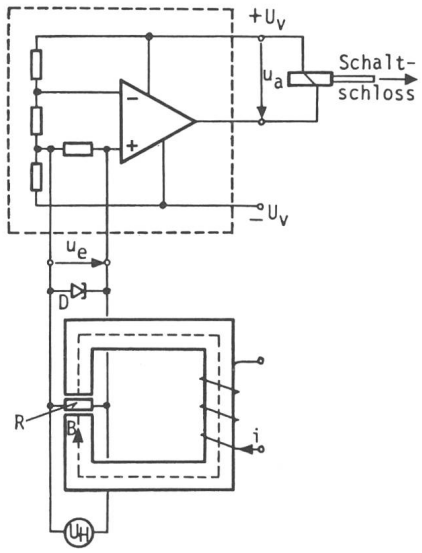


Fig. 31 Auslöserkonzept mit Tunneldiode (+ Kippschaltung)
i Eingangssignal
U_V Versorgungsspannung der Kippschaltung

genden wird die Funktion von zwei Konzepten erläutert, die sich aus der Matrix der Fig. 28 ergeben:

– Das Konzept in Fig. 30 geht aus der Synthese (1.1+2.1) hervor. Das Eingangssignal wird transformatorisch umgewandelt. Beim Überschreiten eines bestimmten Wertes der Ausgangsspannung des Verstärkers kippt die Vierschichtdiode. Der durch die Diode fliessende Strom wird magnetisch in eine Kraft ungewandelt, die das Schaltschloss freigibt. Im konkreten Fall muss quantitativ untersucht werden, ob die heute zur Verfügung stehenden Dioden die Realisation des Konzeptes ermöglichen.

– Das in Fig. 31 gezeigte Konzept geht aus der Synthese (1.2+2.2) hervor. Vorerst sei der gestrichelt umrandete Teil nicht betrachtet. Das Eingangssignal wird in magnetische Induktion umgewandelt. Ein magnetfeldempfindlicher Bauteil (hier z. B. eine Feldplatte) ändert seinen Widerstand unter dem Einfluss der magnetischen Induktion. Durch Erhöhen des Widerstandes kippt bei einem bestimmten Wert des Stromes die stromempfindliche Diode, und die dabei entstehende Spannung führt zur Auslösung. Da aber die heute vorhandenen Tunneldioden Ausgangsspannungen von einigen Zehntel Volt haben, ist die Zwischenschaltung einer Kippschaltung notwendig, die in Fig. 31 gestrichelt umrandet ist. Ob in diesem Fall dann die Diode notwendig ist oder nicht, ist eine quantitative Frage (wie beim Zünden eines Thyristors). Auf diese Weise kann man das Konzept schrittweise entwickeln.

Anpassung zwischen Teilfunktionen: Folgende Konzepte können durch Anpassungsfunktionen innerhalb der in Fig. 28 dargestellten Matrix gebildet werden: 1.1+?+2.2 / 1.1+?+2.4 / 1.2+?+2.1 / 1.2+?+2.3 / 1.2+?+2.4 / 1.3+?+2.1 / 1.3+?+2.3 / 1.3 +?+2.4. Die Lösungsmöglichkeiten für das Fragezeichen sind mit Hilfe der Tabellen II, III und IV (Teil 1) zu finden. Im folgenden wird die Funktion von zwei solchen Konzepten erläutert:

– Das Konzept in Fig. 32 geht aus (1.3+?+2.1) hervor, wenn das Fragezeichen durch einen Widerstand ersetzt wird. Bei diesem Konzept wird das Eingangssignal in das magnetische Feld umgewandelt. Dieses Feld steuert die Permeabilität des Kernes. Beim steigenden Strom werden die Schenkel 1 und 2 gesättigt, wodurch die entsprechenden Induktivitäten absinken. Durch Vergrösserung des Stromes im Sekundärkreis kippt bei einer bestimmten Spannung die Diode und führt zur Auslösung.

– Das in Fig. 33 gezeigte Konzept geht aus (1.1+?+2.4) hervor, wenn das Fragezeichen durch die Wicklung des Nebenschlusses ersetzt wird. Bei diesem Konzept wird das Eingangssignal in eine Spannung u_e umgewandelt und verstärkt. Die Ausgangsspannung u_a des Verstärkers wird der Wicklung des Nebenschlusses zugeführt. Die weitere Funktionsweise entspricht der des Prinzips von Fig. 7. Somit stellt sich die Frage, ob es nicht überflüssig ist, einem unstetigen Verstärker (Prinzip der Fig. 7) einen stetigen Verstärker vorzuschalten. Die Beantwortung ist nur beim Vorliegen konkreter Randbedingungen möglich. Wird z. B. das Prinzip der Fig. 7 in einem FI-Schalter eingesetzt, dann muss es entsprechend den sehr geringen zur Verfügung stehenden Auslöseleistungen als ein sog. hochempfindlicher Auslöser konstruiert werden. Steht aber durch die Verstärkung eine grössere Leistung zur Verfügung, dann kann das Entscheidungselement unempfindlicher konstruiert werden. Somit kann beim Vorhandensein billiger elektronischer Teile das Konzept der Fig. 33 zwar mehr Teile besitzen, aber wirtschaftlicher sein als das Konzept der Fig. 7, welches für die Empfindlichkeit entsprechend teure Herstellung und Montage erforderlich macht.

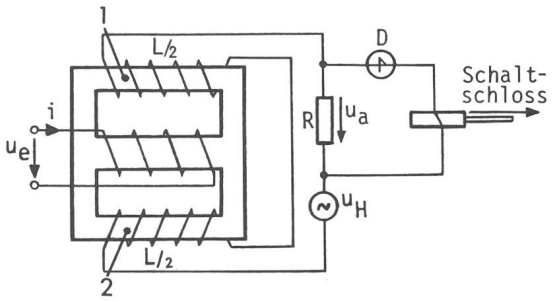


Fig. 32 Auslöserkonzept mit Permeabilitätssteuerung und Vierschichtdiode
i Eingangssignal

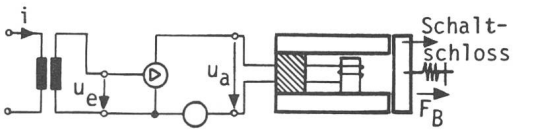


Fig. 33 Auslöserkonzept mit elektronischem Verstärker und unempfindlichem Magnetauslöser
i Eingangssignal

Die Wahl des endgültigen Lösungskonzeptes benötigt konkrete Randbedingungen. In vielen Fällen in der Elektrotechnik zeigt es sich, dass eine optimale Entscheidung erst dann vorgenommen werden kann, wenn mehrere Konzepte weiterverfolgt und durch Modellbau gegeneinander abgewogen werden.

6. Schlussbemerkungen

Eine intuitiv gefundene Lösung eines Problems entsteht vielfach durch die Synthese bekannter Elemente zu einer Kombination, die bisher nicht bekannt war. Bei diesem Vorgehen können andere, evtl. wertvollere Lösungen ausbleiben. Diese Unwägbarkeit und Unsicherheit muss in der technischen Produktentwicklung so gering als möglich gehalten werden. Daher sollte man vermehrt die Probleme systematisch lösen, ohne dabei die Intuition einzuschränken.

Zur systematischen Lösung technischer Probleme wird häufig die Methode des morphologischen Kastens in der Form eingesetzt, dass als Parameter des Problems die Teilfunktionen des betreffenden Produktes definiert werden. Dabei ist man bestrebt, durch Analyse vorhandener Produkte die grösstmögliche Anzahl von Teilfunktionen zu finden und sie sowie ihre willkürlich aufgezählten Lösungsprinzipien in einem morphologischen Kasten einzuordnen. Dies soll die Bildung möglichst vieler Kombinationen ermöglichen. Ein derartiger morphologischer Kasten ist aber ein Ordnungsschema, in dem eine gewisse Unordnung herrscht, da darin verschiedene Funktionsstrukturen sowie notwendige und nicht notwendige Teilfunktionen vermengt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde dagegen ein Vorgehen vorgeschlagen, das vorerst die Suche nach Lösungskonzepten aufgrund der minimal notwendigen Teilfunktionen zum Ziel hat. Ausserdem ist aus der Sicht dieser Arbeit nicht das Kombinieren selbst das Wesentliche des methodischen Vorgehens, sondern das diskursive Finden der nötigen Elemente der Kombination.

Unabhängig von verschiedenen Methoden verlangt die *disziplinierte Kreativität* eine gewisse Flexibilität der Denkart, die teilweise durch Schulung erreicht werden kann [18]. Am zweckmässigsten ist es, die verschiedenen Methoden durch Erprobung im eigenen Arbeitsgebiet zu erlernen. Denn wie immer gilt es, dass die Mühe der eigenen Arbeit zum Aneignen verschiedener Denk- und Vorgehensweisen durch nichts ersetzt werden kann.

Literatur

[17] Bestimmungen für Niederspannungsschaltgeräte. Teil 1: Bestimmungen für Schalter mit Nennspannungen bis 1000 V Wechselspannung und bis 3000 V Gleichspannung, für Steuerschalter und Schütze bis 10000 V Wechselspannung. VDE-Vorschrift 0660, Teil 1/8.69

[18] *M. Tayefeh-Emamverdi:* Design and methodology of technical developments in the department of electrical engineering at ETH Zürich. Seminar «Industrial design and the training of engineers» from first to third april 1981 at Université de Technologie, Compiègne.

Adresse des Autors

Dr. *M. Tayefeh-Emamverdi,* Apparatebau der Elektrotechnik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.