

**Physikalisch  
Technische  
Bundesanstalt**

**PTB-Bericht**

H.-D. Göldner, U. Johannsmeyer, F. Schebsdat u. H. Storck

**Zusammenschaltung nichtlinearer und linearer  
eigensicherer Stromkreise**

**PTB**

## Die Serien der PTB-Berichte:

Atomphysik	PTB-APh
Dosimetrie	PTB-Dos
Elektrizität	PTB-E
Elektronische Entwicklung	PTB-EW
Fertigungsmeßtechnik	PTB-F
Informationstechnik	PTB-IT
Literaturzusammenstellungen und Veröffentlichungshinweise	PTB-L
Mechanik und Akustik	PTB-MA
Medizinische Meßtechnik	PTB-MM
Neutronenphysik	PTB-N
Internationale Organisation für Gesetzliches Meßwesen	PTB-OIML
Optik	PTB-Opt
Physikalische Grundlagen	PTB-PG
Radioaktivität	PTB-Ra
Thermodynamik und Explosionsschutz	PTB-ThEx
Technisch-Wissenschaftliche Dienste	PTB-TWD

## Eingestellte Serien:

Akustik	(bis 1985)	PTB-Ak
Forschungs- und Meßreaktor Braunschweig	(bis 1988)	PTB-FMRB
Institut Berlin	(bis 1985)	PTB-IB
Mechanik	(bis 1985)	PTB-Me
Neutronendosimetrie	(bis 1988)	PTB-ND
Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle	(bis 1989)	PTB-SE
Wärme	(bis 4/97)	PTB-W

---

**Herausgeber:** Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (05 31) 592-93 12

Bundesallee 100

D-38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-0

Telefax: (05 31) 592-92 92

Telex: 95 28 22 ptd d

**Vertrieb:**

Wirtschaftsverlag NW

Verlag für neue Wissenschaft GmbH

Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76

D-27568 Bremerhaven

Telefon: (04 71) 9 45 44-0

Telefax: (04 71) 9 45 44-88

# Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Wärme

PTB-Bericht W-39

**Zusammenschaltung nichtlinearer und linearer  
eigensicherer Stromkreise**

von

H.-D. Göldner, U. Johannsmeyer, F. Schebsdat u. H. Storck



## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
  
2. Grundtypen nichtlinearer Stromkreise
  - 2.1 Kenngrößen
  - 2.2 Angaben in den Prüfbescheinigungen
  
3. Zusammenschaltung von eigensicheren Stromkreisen mit mehreren Quellen
  - 3.1 Ermittlung einer Summen-Ausgangskennlinie
  - 3.2 Sicherheitstechnische Beurteilung der Zusammenschaltung und Ermittlung der höchstzulässigen Kapazität und Induktivität
  - 3.3 Ergänzende Erläuterungen zum Kennlinienverfahren
  
4. Erläuterung des Kennlinienverfahrens anhand eines Beispiels
  
5. Zusammenfassung

**Bildteil**



## Zusammenschaltung nichtlinearer und linearer eigensicherer Stromkreise

### 1. Einleitung

Die VDE-Bestimmungen "Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen" (DIN VDE 0165/9.83 [1]) gestatten dem Betreiber einer elektrischen Anlage im explosionsgefährdeten Bereich, mehrere eigensichere Stromkreise zusammenzuschalten. Dies gilt auch für den Fall, daß mehrere "zugehörige" (d.h. im Normalbetrieb oder nur im Fehlerfall aktive) Betriebsmittel enthalten sind. Dabei darf auf die Beteiligung der Prüf- stelle oder eines Sachverständigen verzichtet werden, wenn ein rechnerischer oder meßtechnischer Nachweis über die Eigensicherheit der Zusammenschaltung geführt wird.

Der meßtechnische Nachweis muß mit Hilfe des genormten Funkenprüfgerätes gemäß DIN EN 50 020/VDE 0171 Teil 7 [2] unter Einbeziehung des Sicherheitsfaktors an den zusammenschalteten elektrischen Betriebsmitteln geführt werden. Da hierbei auch bestimmte Fehlerfälle, die zu den ungünstigsten Verhältnissen im Hinblick auf das Zündverhalten führen, eingebaut werden müssen ("worst case"-Betrachtung), stößt diese Form des Nachweises in der Praxis häufig auf Schwierigkeiten und bleibt in der Regel den Prüfstellen vorbehalten.

Ein rechnerischer Nachweis über die Zusammenschaltung läßt sich relativ einfach führen, wenn die beteiligten elektrischen Quellen einen linearen Innenwiderstand aufweisen, d.h. eine Ausgangskennlinie wie in Bild 1 a dargestellt ist. In diesem Fall sind die Zündgrenzkurven in [2] anwendbar und es kann die in [1] beschriebene Methode zugrundegelegt werden.

Hierzu sind im ersten Schritt die durch die Zusammenschaltung der zugehörigen Betriebsmittel sich ergebenden neuen Höchstwerte von Spannung und Strom zu ermitteln. Wenn die zugehörigen Betriebsmittel nach Bild 3 a zusammenschaltet sind, liegt eine Reihenschaltung vor. Es addieren sich die Höchstwerte der Spannungen der einzelnen zugehörigen Betriebsmittel, während als Höchstwert des Stromes der größte Strom-Höchstwert der einzelnen Betriebsmittel anzusetzen ist. Bei einer Zusammenschaltung gemäß Bild 3 c liegt eine Parallelschaltung vor. Es addieren sich die Ströme, während der größte Spannungs-Höchstwert zu nehmen ist. Sind die zugehörigen Betriebsmittel nicht eindeutig potentialmäßig miteinander verbunden (wie in Bild 3 e), dann kann sich je nach zu betrachtendem Fehler eine Reihenschaltung oder eine Parallelschaltung ergeben. In diesem Fall sind Spannungsaddition und Stromaddition getrennt zu behandeln. Die ungünstigsten Werte sind zugrunde zu legen.

Nach Ermittlung der neuen Höchstwerte von Strom und Spannung ist die Eigensicherheit der Zusammenschaltung anhand der Zündgrenzkurven in DIN EN 50 020 [2] unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors für den ohmschen Stromkreis zu überprüfen und die neuen höchstzulässigen Werte für äußere Induktivität und Kapazität zu ermitteln.

Dieses Vorgehen stößt jedoch auf Schwierigkeiten, wenn bei mehreren aktiven Stromkreisen mindestens eine Quelle eine nichtlineare Charakteristik aufweist. Häufig kommen dabei in der Praxis Quellen mit "trapezförmiger" Kennlinie vor (Bild 1 b) und auch Quellen mit "rechteckförmiger" Ausgangskennlinie (Bild 1 c) treten auf, wenn elektronische Strombegrenzungseinrichtungen verwendet werden. Für derartige Ersatzschaltungen sind die Zündgrenzkurven in [2] nicht anwendbar und es müssen deshalb andere Verfahren benutzt werden. Auf Anregung des zuständigen DKE-Komitees K 235 haben sich die Autoren mit der Entwicklung und Ausarbeitung einer Methode beschäftigt, die die sicherheitstechnische Beurteilung der Zusammenschaltung von Netzwerken mit nichtlinearen Stromkreisen anhand von Diagrammen erlaubt.

Das entwickelte Verfahren ist zunächst anwendbar für die Explosionsgruppen IIC und IIB. Es sollte betont werden, daß alle Zusammenschaltungen, die vom Betreiber vorgenommen werden, für den Gefahrenbereich Zone 1 gelten. Für Zone 0 gilt nach wie vor, daß alle Betriebsmittel und die jeweiligen Zusammenschaltungen speziell für den Einsatz in diesem Gefahrenbereich besonders bescheinigt sein müssen (vgl. 6.2.1 in [1]).

## 2. Grundtypen nichtlinearer Stromkreise

### 2.1 Kenngrößen

Zur Beurteilung der Eigensicherheit von aktiven Stromkreisen ist es erforderlich, den Innenwiderstand und die Quellenspannung zu kennen. Im einfachsten Fall läßt sich die Quelle mit zwei konstanten elektrischen Größen charakterisieren, entweder mit der Spannung  $U_0$  und dem Innenwiderstand  $R$ , oder mit  $U_0$  und dem Kurzschlußstrom  $I_K$  (s. Bild 1 a).  $U_0$  wird häufig durch Z-Dioden bestimmt.  $U_0$  und  $I_K$  sind Höchstwerte, die bei den in [2] definierten Fehlerfällen auftreten können. Im Fall von Bild 1 a liegt eine lineare Kennlinie vor. Leider sind in der Praxis nur wenige Stromkreise exakt in dieser einfachen Art darzustellen.

So weist z.B. eine Batterie mit einem externen Strombegrenzungswiderstand keinen konstanten Innenwiderstand auf. Ebenso ändert sich die Quellenspannung in Abhängigkeit des Ladezustandes. Um zu überschaubaren Verhältnissen zu kommen, vereinfacht man deshalb die praktischen Schaltungen zu Ersatzschaltungen. Diese Ersatzschaltungen dürfen natürlich nicht weniger zündfähig sein als der konkret vorliegende Stromkreis. Im Beispiel der Batterie würde man dann die maximale Leerlaufspannung als  $U_0$  und nur den externen Widerstand als  $R$  in Bild 1 a ansetzen. Diese Ersatzschaltung hat eine lineare Kennlinie.

Auch die nichtlinearen Schaltungen lassen sich in der Regel auf die beiden Grundtypen gemäß Bild 1 b und 1 c zurückführen. Die Quelle mit trapezförmiger Kennlinie gemäß Bild 1 b besteht aus Spannungsquelle, Widerstand und zusätzlichen spannungsbegrenzenden Schaltelementen (z.B. Z-Dioden) an den Ausgangsklemmen. Bei der rechteckförmigen Kennlinie (Bild 1 c) wird der Strom durch eine elektronische Stromregelung begrenzt.

Betrachtet man nun die Ausgangsleistung der unterschiedlichen Netzwerke, so wird unmittelbar deutlich, daß unterschiedliche Zündgrenzwerte gültig sein müssen, denn der Zündfunke ist ein "Verbraucher", mit dessen Anpassung an die speisende Quelle gerechnet werden muß.

Die Schaltung mit linearer Ausgangskennlinie gemäß Bild 1 a kann bei Anpassung maximal die Leistung

$$P_{\max} = \frac{1}{4} U_0 \cdot I_K$$

abgeben.

Bei der trapezförmigen Kennlinie (Bild 1 b) gilt:

$$P_{\max} = \frac{1}{4} U_0 \cdot I_K \quad (\text{für } U_D > 0,5 \cdot U_0)$$

oder

$$P_{\max} = \frac{U_0 - U_D}{R} \cdot U_D \quad (\text{für } U_D \leq 0,5 \cdot U_0).$$

Die trapezförmige Kennlinie geht für  $U_0$  gegen  $\infty$  in die rechteckförmige Kennlinie gemäß Bild 1 c über. Hier gilt:

$$P_{\max} = U_0 \cdot I_K.$$

Zur elektrischen Beschreibung einer Quelle sind für die lineare und die rechteckförmige Kennlinie zwei Größen und für die trapezförmige Kennlinie drei Größen erforderlich (Tabelle 1).

Tabelle 1            Parameter zur Beschreibung der Kennlinien

Kennlinie	erforderliche Parameter
linear Bild 1 a	$U_0, I_K$ oder $U_0, R$
trapezförmig Bild 1 b	$U_0, U_D, R$ oder $U_D, R, I_K$ oder $U_D, U_0, I_K$
rechteckförmig Bild 1 c	$U_0, I_K$

## 2.2 Angaben in den Prüfbescheinigungen

Da gemäß DIN VDE 0165 [1] Betriebsmittel mit aktiven eigensicheren Stromkreisen bescheinigt sein müssen (Ausnahme s. 6.1.1 in [1]), kann davon ausgegangen werden, daß für die einzelnen Betriebsmittel, die mit ihren eigensicheren Stromkreisen zusammengeschaltet werden sollen, jeweils eine Baumusterprüfbescheinigung vorliegt, die die entsprechenden elektrischen Größen enthält.

Der erste Schritt bei der sicherheitstechnischen Betrachtung muß darin bestehen, für die einzelnen Stromkreise die Art der Kennlinie und die zugehörigen elektrischen Größen zu ermitteln. Da dem Planer oder Betreiber normalerweise die Schaltung und der innere Aufbau der Betriebsmittel nicht bekannt sind, muß er sich auf die elektrischen Daten in den Baumusterprüfbescheinigungen stützen.

Die in den Bescheinigungen üblicherweise angegebenen Werte sind Leerlaufspannung (hier als  $U_0$  bezeichnet) und Kurzschlußstrom (hier als  $I_K$  bezeichnet) sowie in der Regel die maximal abgegebene Leistung  $P$ . Aus diesen Werten lassen sich bereits Rückschlüsse auf die Art der Kennlinie ziehen.

Beispiel (Höchstwerte):

$$U_0 = 12,5 \text{ V}$$

$$I_K = 0,1 \text{ A}$$

$$P = 313 \text{ mW}$$

Da  $P$  hier ein Viertel des Produktes aus Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom beträgt, kann geschlossen werden, daß es sich in diesem Beispiel um eine lineare Kennlinie (Bild 1 a) handelt.

Beispiel (Höchstwerte):

$$U_0 = 20,5 \text{ V}$$

$$I_K = 35 \text{ mA}$$

$$P = 718 \text{ mW}$$

Hier ergibt sich  $P$  als Produkt von Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom, es liegt also eine rechteckförmige Kennlinie vor (Bild 1 c).

Im Falle einer trapezförmigen Kennlinie reichen die Angaben in der Prüfbescheinigung nicht aus, um die Kennlinie zu konstruieren. Hier fehlt die dritte Größe (vgl. Tabelle 1), entweder  $U_0$  oder  $R$ .

Da bei Angabe von  $R$  als zusätzlicher Größe die geringste Gefahr der Verwechslung besteht, soll künftig in den Prüfbescheinigungen  $R$  angegeben werden. Die Größe  $U_0$  (Bild 1 b) läßt sich dann durch  $U_0 = I_K \cdot R$  ableiten. Auf diese Verfahrensweise haben sich die Bergbau-Versuchsstrecke (BVS) und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) geeinigt.

Weiterhin werden die BVS und die PTB bei nichtlinearen Kreisen auch die Kennlinienform angeben.

Ein Beispiel kann wie folgt aussehen:

Höchstwerte (trapezförmige Kennlinie):

$$U_0 = 13,7 \text{ V}$$

$$I_K = 105 \text{ mA}$$

$$R = 438 \text{ } \Omega$$

$$P = 1010 \text{ mW}$$

Die zugrundeliegende Kennlinie zeigt Bild 2 a; in Bild 2 b ist die sicherheitstechnische Ersatzschaltung dargestellt. Es errechnen sich:

$$\begin{aligned}U_o &= I_K \cdot R \\ &= 46 \text{ V} \quad \text{und} \\ P &= \frac{U_o - U_-}{R} \cdot U_- \\ &= 1010 \text{ mW}\end{aligned}$$

Auf diese Weise sind die für die Zusammenschaltung benötigten Daten aus den Informationen zu erhalten, die in der Prüfbescheinigung aufgeführt sind. Fehlen in älteren Bescheinigungen Daten, so müssen die Werte vom Hersteller des Betriebsmittels oder von der Prüfstelle erfragt werden.

Bei der Planung eigensicherer Stromkreise ist stets anzustreben, die Vermaschung und die Anzahl der zusammengeschalteten Betriebsmittel klein zu halten. Insbesondere Stromkreise mit nur einer aktiven Quelle sind problemlos sicherheitstechnisch zu beurteilen. Häufig läßt sich dieses Ziel in der Praxis nicht erreichen, da nicht nur diejenigen Betriebsmittel als Quelle anzusehen sind, die betriebsmäßig als Speisegeräte dienen. Auch betriebsmäßig passive Eingänge von z. B. Meßumformern, Schreibern usw. können bei sicherheitstechnischer Betrachtung als aktive Quellen wirken und die in der Prüfbescheinigung angegebenen Höchstwerte müssen beachtet werden. So kann die betriebsmäßige Kennlinie eines Stromkreises erheblich von der sicherheitstechnischen Kennlinie abweichen. Die in der Prüfbescheinigung angegebenen Höchstwerte für Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom werden in einigen Fällen von dem jeweiligen Stromkreis nur kurzzeitig abgegeben. Der Leistungswert gilt dagegen normalerweise für stationäre Verhältnisse wie sie z. B. bei der Erwärmung angeschlossener Bauteile zu betrachten sind.

### 3. Zusammenschaltung von eigensicheren Stromkreisen mit mehreren Quellen

#### 3.1 Ermittlung einer Summen-Ausgangskennlinie

Für die Zusammenschaltung wird davon ausgegangen, daß die Ausgangskennlinien für die als Quelle zu betrachtenden Stromkreise bekannt sind (vgl. Abschnitt 2). Es ist nun anhand der Schaltung zu überprüfen, ob im Normalbetrieb und auch im Fehlerfall nur mit einer Spannungsaddition, einer Stromaddition oder mit Spannungs- und Stromaddition gerechnet werden muß.

Sind die zusammengeschalteten Quellen in Reihe geschaltet und potentialfrei in Bezug auf nichteigensichere Stromkreise (Bild 3 a), so ist unabhängig von der Polarität der Quellen nur die Spannungsaddition möglich. Die Summenausgangskennlinie gewinnt man zweckmäßigerweise durch graphische Addition, indem für jeden Stromwert  $I$  die Spannungswerte der einzelnen Quellen addiert werden. Die gestrichelte Kurve in Bild 3 stellt jeweils die Summenkennlinie dar.

Bei der Reihenschaltung wie in Bild 3 b, wo der gemeinsame Pol beider Spannungsquellen mit zum Verbraucher geführt wird, ist eine Stromaddition nur dann auszuschließen, wenn die Polarität beider Quellen in der hier vorgegebenen Richtung sicherheitstechnisch festliegt (z.B. bei bestimmten Sicherheitsbarrieren). Bei Quellen, deren Polarität sich betriebmäßig oder im Störfall (z.B. durch falschen Anschluß am eigensicheren Betriebsmittel) verändern kann, ist sowohl die Spannungs- als auch die Stromaddition zu betrachten (vgl. Bild 3 e).

Bei der Parallelschaltung gemäß Bild 3 c ist nur eine Stromaddition möglich, wenn bei zweipoligen Quellen jeweils zwei Anschlüsse miteinander verbunden werden. Eine Spannungsaddition ist in diesem Fall nicht möglich und die Summenkennlinie wird durch graphische Addition der Einzelstromwerte erzeugt.

Wird von jeder Quelle nur ein Pol mit dem der anderen Quelle verbunden (Bild 3 d), so ist eine Spannungsaddition nur dann auszuschließen, wenn die Polarität der Quellen wie hier dargestellt sicherheitstechnisch festliegt (z.B. bei Sicherheitsbarrieren). Andernfalls muß sowohl die Spannungs- als auch die Stromaddition betrachtet werden (vgl. Bild 3 e).

Führen schließlich mehrere Stromkreise in einen Schaltungsbereich, in dem beliebige Verknüpfungen angenommen werden müssen (Bild 3 e), so kann je nach zu betrachtendem Fehlerfall eine Reihen- oder Parallelschaltung auftreten, so daß sowohl Strom- als auch Spannungsaddition zu betrachten sind. Da beide Fälle jedoch nicht gleichzeitig möglich sind, müssen in zwei Arbeitsschritten die Summenkennlinie für Stromaddition und die Summenkennlinie für Spannungsaddition konstruiert werden. Dieses Vorgehen ist auch in allen Zweifelsfällen bei den Bildern 3 b und 3 d erforderlich sowie allgemein bei unklaren Verhältnissen oder bei Stromkreisen mit mehr als zwei Leitern, da das so gewonnene Ergebnis immer auf der sicheren Seite liegt.

### 3.2 Sicherheitstechnische Beurteilung der Zusammenschaltung und Ermittlung der höchstzulässigen Kapazität und Induktivität

Nachdem nun gemäß Abschnitt 3.1 die Summen-Ausgangskennlinie der Zusammenschaltung ermittelt worden ist, kann im nächsten Schritt die Analyse der Eigensicherheit beginnen. Hierfür eignen sich die Diagramme der Bilder 4 a bis 4 j. Die Diagramme enthalten für die neuen Höchstwerte von Stromstärke und Spannung im zusammengeschalteten Stromkreis bei vorgegebener Induktivität die zulässigen Grenzkurven für den ohmschen Stromkreis (Grenzkurve 2) und für den induktiv beschalteten Stromkreis (Grenzkurve 1) sowie auch Kurvenscharen zur Ermittlung der höchstzulässigen äußeren Kapazität. Eine Zusammenstellung zeigt Tabelle 2. Für die Beurteilung der Eigensicherheit wird nun zunächst die Explosionsgruppe und dann die angestrebte Gesamtinduktivität für die Zusammenschaltung gewählt. Ist nur mit kleinen Induktivitäten (keine konzentrierten Induktivitäten, kurze Leitungslängen) zu rechnen, so ist das Diagramm mit der kleinsten Induktivität (d.h. Bild 4 a für Gruppe IIC und Bild 4 f für Gruppe IIB) zu wählen.

In das jeweilige Diagramm wird nun die Summen-Ausgangskennlinie eingezeichnet. Wenn gemäß Abschnitt 3.1 Strom- und Spannungsaddition zu betrachten sind, so sind beide Summen-Ausgangskennlinien einzutragen.

Nun ist unmittelbar abzulesen, ob die Zusammenschaltung mit der dem Diagramm zugrundeliegenden Induktivität und in der gewählten Explosionsgruppe eigensicher ist. Die Summenkennlinie darf die Grenzkurve 1 im Diagramm an keiner Stelle schneiden.

Die höchstzulässige Kapazität des resultierenden Stromkreises ergibt sich aus der  $C_a$ -Grenzkurve mit dem höchsten  $C_a$ -Wert, die von der Summen-Ausgangskennlinie noch nicht geschnitten wird.

Wird eine größere zulässige Kapazität  $C_a$  gewünscht, so kann dies durch Zugrundelegung eines Diagramms für eine kleinere Induktivität erreicht werden. Das gilt auch für den Fall, daß die Summen-Ausgangskennlinie die Grenzkurve 1 schneidet (jedoch unter der Grenzkurve 2 bleibt). Wird auch die Grenzkurve 2 überschritten, so ist bei Anwendung der Bilder 4 a bis 4 e der Übergang auf die Bilder 4 f bis 4 j erfolgversprechend. Wird auch hier die Grenzkurve 2 überschritten, so ist die Zusammenschaltung auch für die Explosionsgruppe IIB nicht eigensicher.

Das beschriebene Verfahren erfüllt die Forderung in DIN VDE 0165 [1], einen rechnerischen Nachweis über die Eigensicherheit einer Zusammenschaltung mit nichtlinearen Quellen zu führen.

Tabelle 2 Zuordnung der Diagramme zu den Explosionsgruppen und Induktivitäten

Bild	Explosionsgruppe	zulässige Induktivität $L_a$
4 a	IIC	0,15 mH
4 b		0,5 mH
4 c		1 mH
4 d		2 mH
4 e		5 mH
4 f	IIB	0,5 mH
4 g		1 mH
4 h		5 mH
4 i		10 mH
4 j		25 mH

### 3.3 Ergänzende Erläuterungen zum Kennlinienverfahren

Das in den Abschnitten 3.1 und 3.2 beschriebene Verfahren zur sicherheitstechnischen Beurteilung von Zusammenschaltungen basiert auf Grundlagenuntersuchungen der PTB. Die Grenzkurven 1 und 2 in den Bildern 4 a bis 4 j für das ohmsche und induktive Zündverhalten von Quellen mit rechteckförmiger Ausgangskennlinie wurden experimentell mit dem genormten Funkenprüfgerät ermittelt.

Hierbei wurden die gemessenen Zündgrenzstromstärken (für die Zündwahrscheinlichkeit  $w = 10^{-3}$ ) durch den in EN 50 020 [2] geforderten Sicherheitsfaktor 1,5 dividiert. Die Kurvenscharen für die Kapazitäten  $C_a$  sind auf der Basis der PTB-Berichte W-11 [3] und W-16 [4] berechnet worden [5] und enthalten ebenfalls bereits den Sicherheitsfaktor 1,5.

Bei Anwendung der Bilder 4 a bis 4 j wird stets das Zusammenwirken von Induktivität und Kapazität (gemischter Stromkreis) berücksichtigt. Auch bei der Zusammenschaltung rein linearer Stromkreise (Ausgangskennlinie gemäß Bild 1 a) kann das Verfahren angewandt werden.

Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß alle Informationen bezüglich der sicherheitstechnischen Daten aus einem Diagramm entnommen werden können. Die Benutzung eines Rechners oder zusätzlicher Tabellen ist nicht erforderlich. So ist z. B. die gemäß Bild 4 ermittelte Kapazität  $C_a$  stets ohne weitere Überprüfung mit der maximalen Spannung der Zusammenschaltung verträglich. Eine zusätzliche Überprüfung der Zuordnung maximale Leerlaufspannung - Kapazität entfällt daher.

Die erhaltenen Werte für die höchstzulässige äußere Induktivität und Kapazität gelten stets für die gesamte Zusammenschaltung, d. h. es sind auch die an den äußeren Klemmen wirksamen Induktivitäten und Kapazitäten der einzelnen Geräte zu berücksichtigen. Leitungen mit Längen unter 1000 m sind dabei als konzentrierte Kapazitäten zu betrachten, indem man den Leitungsbelag mit der jeweiligen Leitungslänge multipliziert.

Bei rein ohmschen Stromkreisen (konzentrierte Induktivität unter 10  $\mu$ H) dürfen die Grenzkurven 1 in den Bildern 4 a bis 4 j überschritten werden, jedoch darf die Grenzkurve 2 von der Summen-Ausgangskennlinie nicht geschnitten werden.

Im Grenzbereich der Diagramme 4 a bis 4 j für kleine Stromwerte ergeben sich insbesondere für die Gruppe IIB beim Übergang auf eine größere Induktivität auch größere zulässige Kapazitäten. So läßt sich z.B. bei  $L = 0,5$  mH und Gruppe IIB (Bild 4 f) für 30 V etwa 50 nF ablesen (Stromstärke vernachlässigbar klein), während sich bei 1 mH aus Bild 4 g für 30 V etwa 100 nF ergeben.

Diesen zunächst widersprüchlich erscheinenden Resultaten wurde anhand von Zündversuchen nachgegangen. Die Meßergebnisse zeigen, daß die berechneten Werte für kleine Induktivitäten und kleine Stromwerte im Bereich der höheren Spannungen konservativ sind. Das bedeutet, daß die bei größeren Induktivitäten gefundenen Werte für die zulässige Kapazität auch dann noch eigensicher sind, wenn kleinere Werte als die zugrundegelegte Induktivität verwendet werden. Die Anwendung der Diagramme führt stets zu sicherheitstechnisch zuverlässigen Ergebnissen. Im Falle von Summenmenkennlinien mit kleinen Stromwerten und höheren Spannungen kann es zweckmäßig sein, im Interesse möglichst großer äußerer Induktivitäten und Kapazitäten das Diagramm mit der größten Induktivität zu wählen, bei dem noch kein Schnittpunkt der Kennlinie mit der Grenzkurve 1 auftritt.

#### **4. Erläuterung des Kennlinienverfahrens anhand eines Beispiels**

Im Beispiel gemäß Bild 5 wird ein Analysengerät mit Verstärker innerhalb des explosionsgefährdeten Bereiches aus einem Netzgerät (I) eigensicher gespeist. Das eigensichere Verstärker-Ausgangssignal (0 ... 20 mA-Einheitssignal) wird auf einen Anzeiger (II) und auf einen Schreiber (III) geführt. Das Analysengerät ist ein eigensicheres Betriebsmittel, das Netzgerät, der Anzeiger und der Schreiber sind zugehörige Betriebsmittel im Sinne der EN 50 020. Im Normalbetrieb ist nur das Netzgerät als aktive Quelle wirksam, während Anzeiger und Schreiber passiv sind. Für die sicherheitstechnische Analyse müssen jedoch die im Fehlerfall möglichen Höchstwerte der drei Geräte zugrundegelegt werden, die aus den Prüfbescheinigungen hervorgehen.

Es liegen folgende Angaben vor:

I. Netzgerät

Ausgang in Zündschutzart EEx ib IIB

Höchstwerte:  $U_o = 15,7 \text{ V}$   
 $I = 100 \text{ mA}$   
 $P = 1,57 \text{ W}$   
 $L_a = 1 \text{ mH}$   
 $C_a = 650 \text{ nF}$

rechteckförmige Ausgangskennlinie (Bild 1 c)

II. Anzeiger

Eingang in Zündschutzart EEx ib IIC

Höchstwerte:  $U_o = 12 \text{ V}$   
 $I = 133 \text{ mA}$   
 $P = 0,4 \text{ W}$   
 $L_a = 1,8 \text{ mH}$   
 $C_a = 1,7 \text{ }\mu\text{F}$

lineare Ausgangskennlinie (Bild 1 a)

III. Schreiber

Eingang in Zündschutzart EEx ib IIC

Höchstwerte:  $U_o = 1 \text{ V}$   
 $I = 31 \text{ mA}$   
 $P = 10 \text{ mW}$   
 $L_a = 36 \text{ mH}$   
 $C_a = 200 \text{ }\mu\text{F}$

lineare Ausgangskennlinie (Bild 1 a)

Bei der Zusammenschaltung in Bild 5 können sich je nach betrachtetem Fehlerfall im Analysengerät wie in Bild 3 e Spannungen oder Ströme addieren. Die Einzelkennlinien und die beiden Summenkennlinien für Spannungs- und Stromaddition sind in Bild 6 gezeigt. Zur Überprüfung der Eigensicherheit werden die beiden Summenkennlinien in Bild 4 g (Explosionsgruppe IIB,  $L = 1 \text{ mH}$ ) eingezeichnet (Bild 7).

Der Knickpunkt mit 18,7 V und 100 mA ist hier offensichtlich der kritische Punkt, er liegt am nächsten an der Grenzkurve 1, erreicht diese jedoch nicht. In diesem Punkt wird auch die theoretisch höchste Leistung von etwa 1,9 W erreicht.

Da die Summenkennlinien der Zusammenschaltung die Grenzkurve 1 in Bild 7 an keiner Stelle schneiden, ist die sicherheitstechnische Prüfung hier positiv ausgefallen. Für die maximale Spannung der Summenkennlinie (28,7 V) ergibt sich im vorliegenden Beispiel die höchstzulässige Kapazität der Zusammenschaltung zu 120 nF aus der Kurvenschar in Bild 7.

Die resultierenden Werte der Zusammenschaltung sind nun:

Explosionsgruppe IIB

Höchstwerte:	$U_o = 28,7 \text{ V}$
	$I = 264 \text{ mA}$
	$P = 1,9 \text{ W}$
	$L_a = 1 \text{ mH}$
	$C_a = 120 \text{ nF}$

Da im vorliegenden Beispiel die zugehörigen Betriebsmittel (Netzgerät, Anzeiger und Schreiber) keine wirksamen Induktivitäts- und Kapazitätswerte an den Ausgängen aufweisen, dürfen die Höchstwerte für Induktivität und Kapazität für das eigensichere Betriebsmittel (Analysengerät) und für die Leitungen ausgeschöpft werden.

## 5. Zusammenfassung

Bei der Planung und Errichtung meß- und prozeßtechnischer Anlagen in der chemischen und petrochemischen Industrie ergibt sich häufig die Notwendigkeit, mehrere einzeln bescheinigte Betriebsmittel mit eigensicheren Stromkreisen zusammenzuschalten.

Dem Planer, Errichter oder Betreiber einer elektrischen Anlage im explosionsgefährdeten Bereich gestattet die nationale Errichtungsbestimmung DIN VDE 0165, solche Zusammenschaltungen in eigener Verantwortung vorzunehmen, sofern ein rechnerischer oder meßtechnischer Nachweis über die Sicherheit der Zusammenschaltung geführt wird. Da der Betreiber in der Regel nicht die Möglichkeit eines meßtechnischen Nachweises hat (die erforderlichen Geräte stehen ihm nicht zur Verfügung), bleibt die Nachweismöglichkeit durch ein geeignetes Berechnungsverfahren. Die DIN VDE 0165 gab bisher nur ein Verfahren an, das ausschließlich für Quellen mit rein linearem Innenwiderstand angewandt werden konnte. In der Praxis treten jedoch häufig Quellen mit nichtlinearem Verhalten auf, deren Zusammenschaltung bisher ohne die Hilfe der Prüfstelle oder eines Sachverständigen nicht oder nur in sehr geringem Umfang möglich war.

Auf Anregung des zuständigen DKE-Komitees K 235 wurde deshalb eine Methode entwickelt, die die sicherheitstechnische Beurteilung der Zusammenschaltung von Netzwerken mit nichtlinearen Stromkreisen anhand von Diagrammen erlaubt.

Das hier beschriebene Kennlinienverfahren ist anwendbar für die Explosionsgruppen IIB und IIC und für den Gefahrenbereich Zone 1.

Kern des Verfahrens ist die graphische Summation der Ausgangskennlinien der beteiligten eigensicheren Quellen. Die Summen-Ausgangskennlinien werden dann in ein geeignetes Diagramm eingetragen, aus dem schließlich die Eigensicherheit des ohmschen, induktiven, kapazitiven und gemischten (d.h. bei gleichzeitiger induktiver und kapazitiver Beschaltung) Stromkreises abgelesen werden kann. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß alle Informationen und Randbedingungen bezüglich der sicherheitstechnischen Daten aus einem Diagramm entnommen werden können. Der erforderliche Sicherheitsfaktor von 1,5 ist bereits in die Diagramme eingearbeitet.

Abschließend wird anhand eines ausführlichen Beispiels die Anwendung des Verfahrens erläutert.

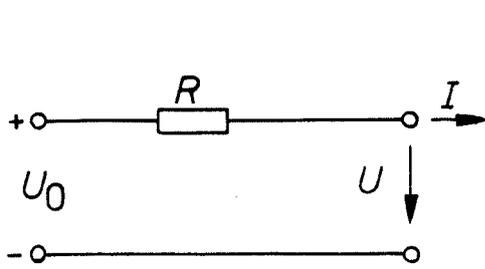
## Literatur

- [1] DIN VDE 0165/9.83: Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen
  
- [2] DIN EN 50 020/VDE 0170/0171 Teil 7 mit Änderungen A1 und A2/1.87
  
- [3] Schebsdat, F.: Zündverhalten von Netzwerken eigensicherer Stromkreise mit konzentriert auftretender Kapazität und Induktivität bei Gleichstrom.  
PTB-Bericht W-11, 1978
  
- [4] Johannsmeyer, U.: Zündverhalten von Netzwerken eigensicherer Stromkreise mit elektronischen Strombegrenzungseinrichtungen.  
PTB-Bericht W-16, 1979
  
- [5] Thies, W.: Zündgrenzkurvendiagramme für elektronische Strombegrenzungseinrichtungen.  
Interner Bericht der Hartmann & Braun AG, 1987.

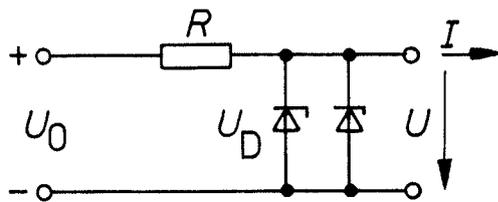
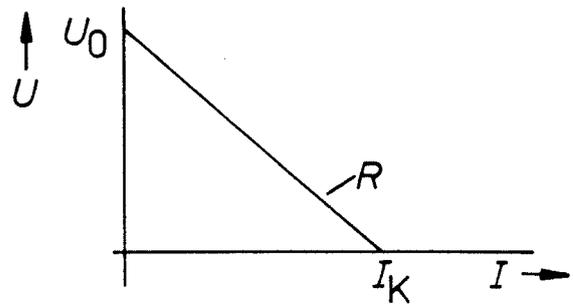


B I L D T E I L

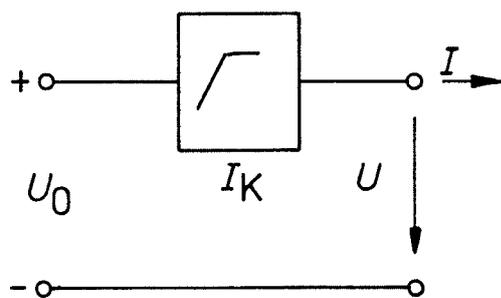
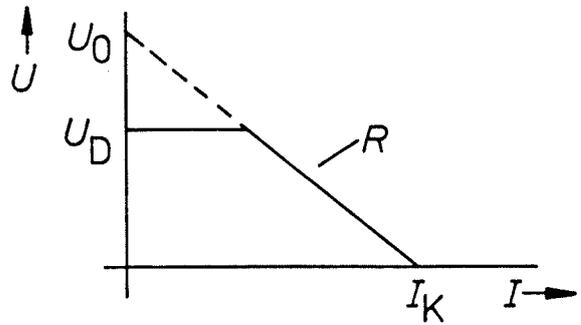




1a



1b



1c

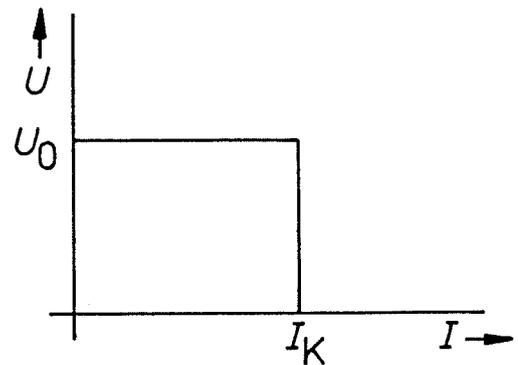
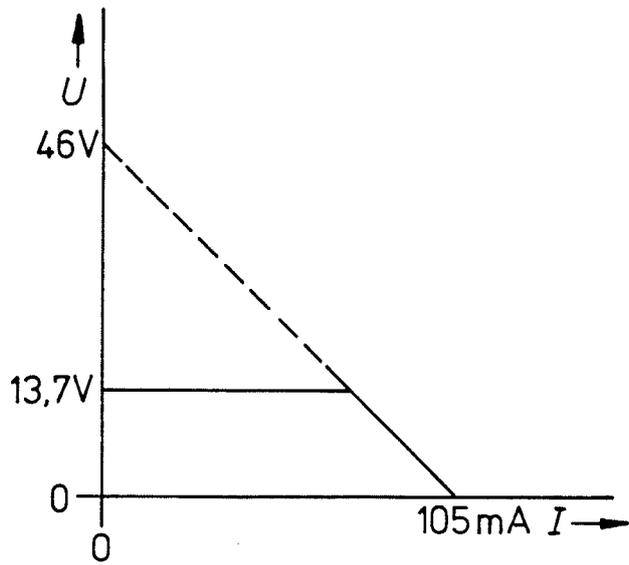
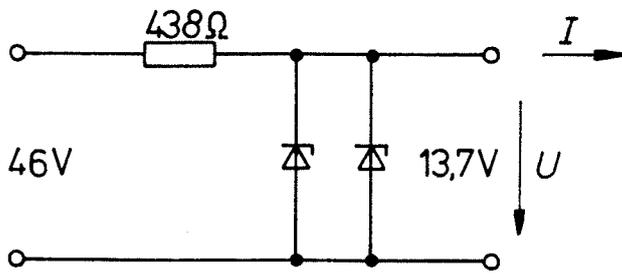


Bild 1: Sicherheitstechnische Ersatzschaltung und Ausgangskennlinie ohmscher Stromkreise

- a) lineare Ausgangskennlinie
- b) trapezförmige Ausgangskennlinie
- c) rechteckförmige Ausgangskennlinie

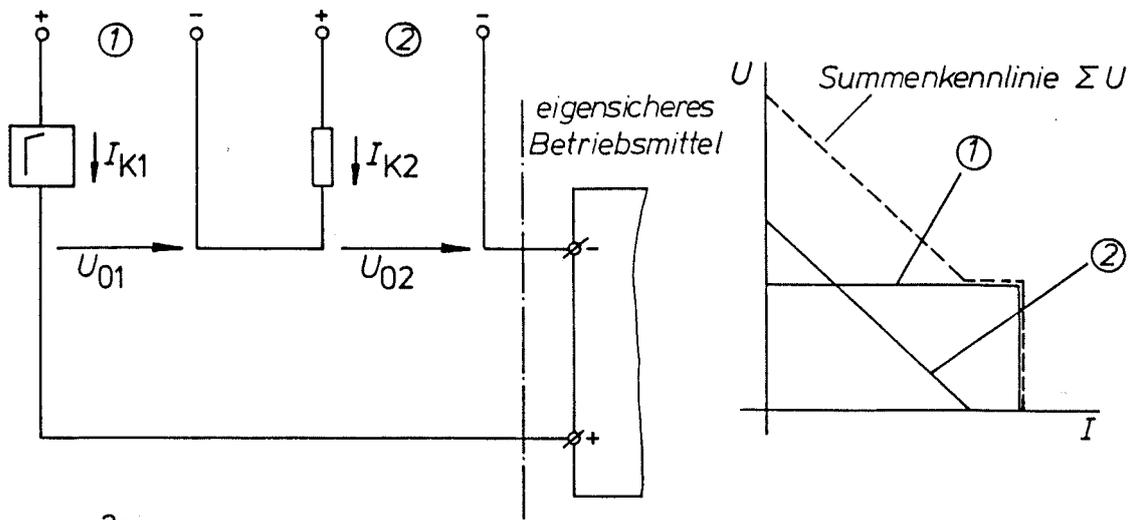


2a

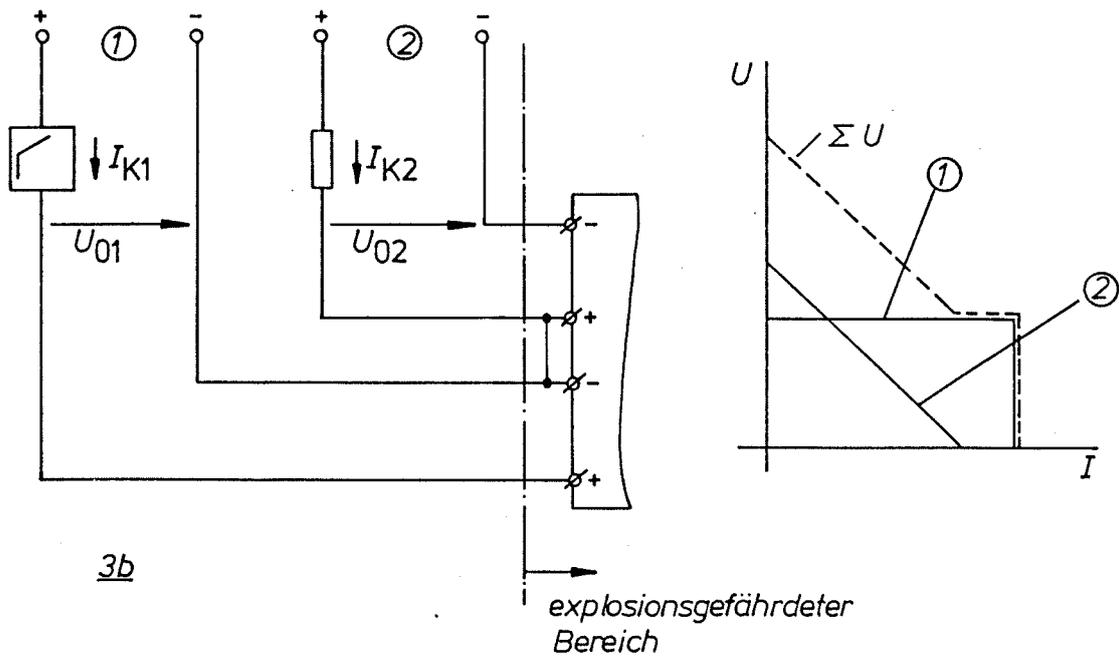


2b

Bild 2: Ausgangskennlinie und Ersatzschaltung einer Quelle mit trapezförmiger Kennlinie

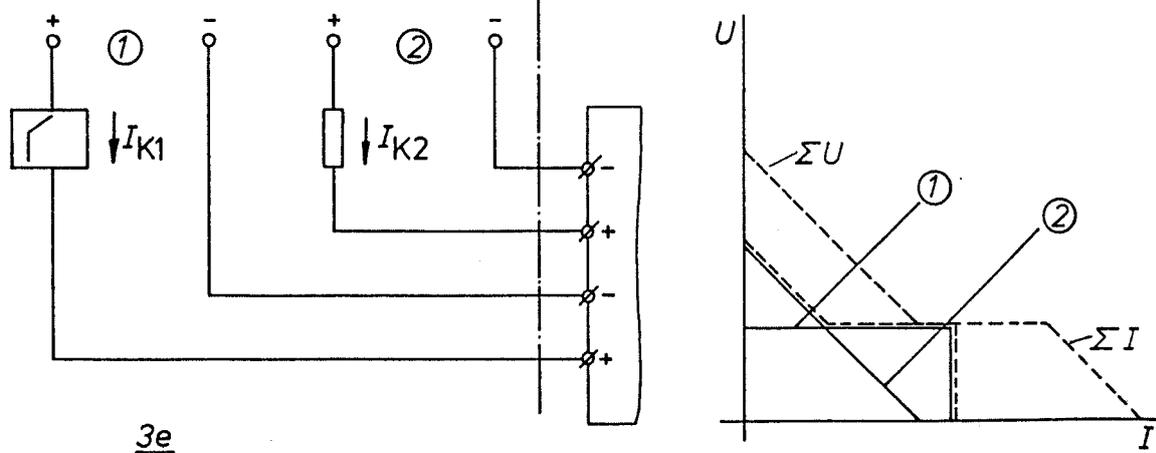
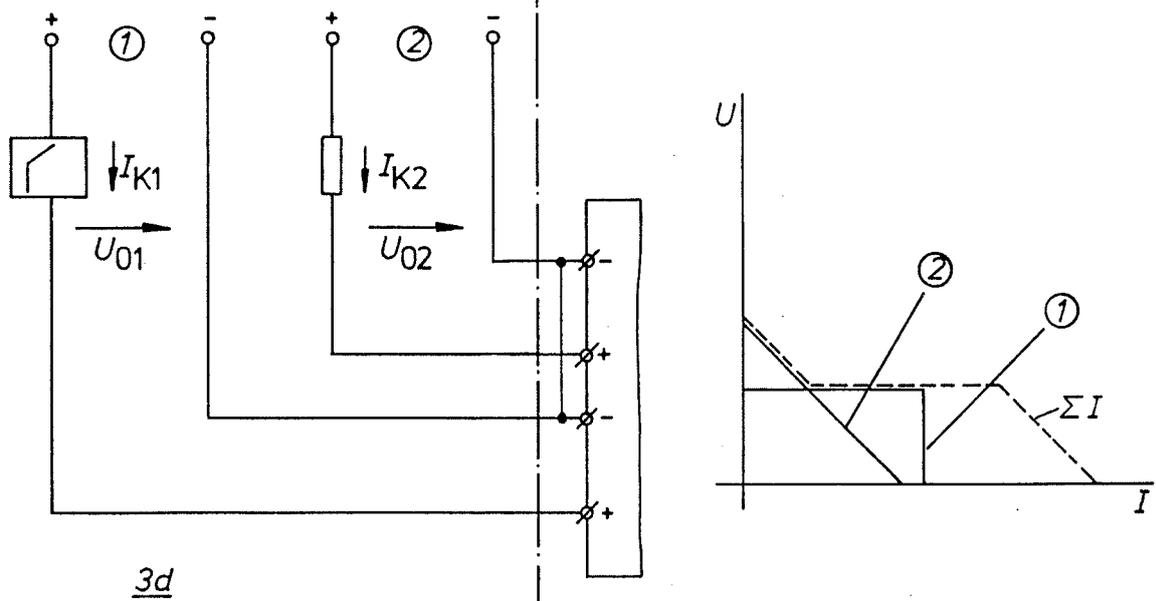
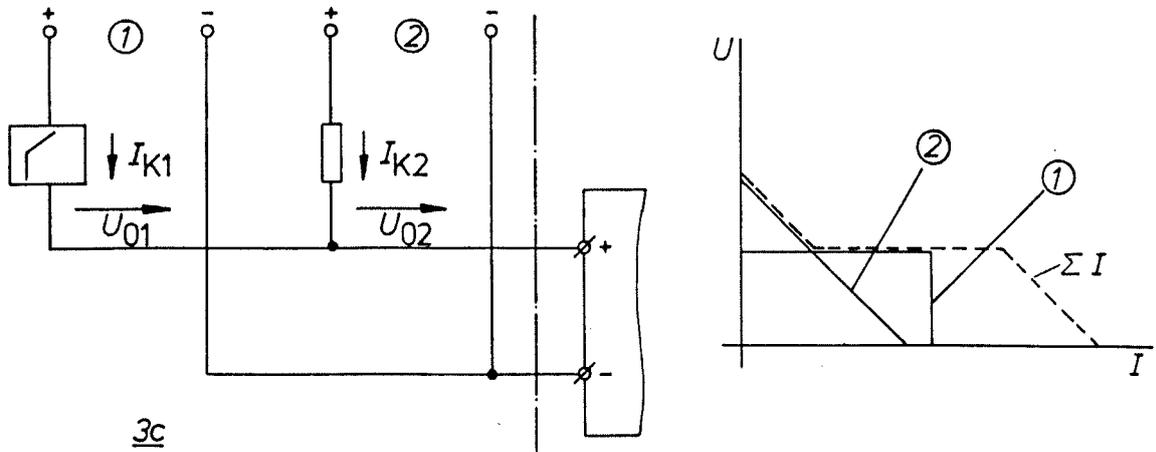


3a



3b

**Bild 3:** Strom- und/oder Spannungsaddition bei Zusammenschaltungen  
 a) Reihenschaltung : Spannungsaddition  
 b) Reihenschaltung : Spannungsaddition und ggf. Stromaddition



- c) Parallelschaltung : Stromaddition
- d) Parallelschaltung : Stromaddition und ggf. Spannungsaddition
- e) Reihen- oder Parallelschaltung : Strom- und Spannungsaddition (je nach Fehlerfall) (jeweils getrennt zu betrachten)

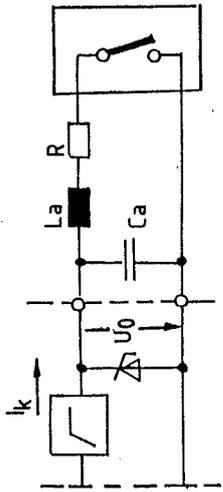
Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )

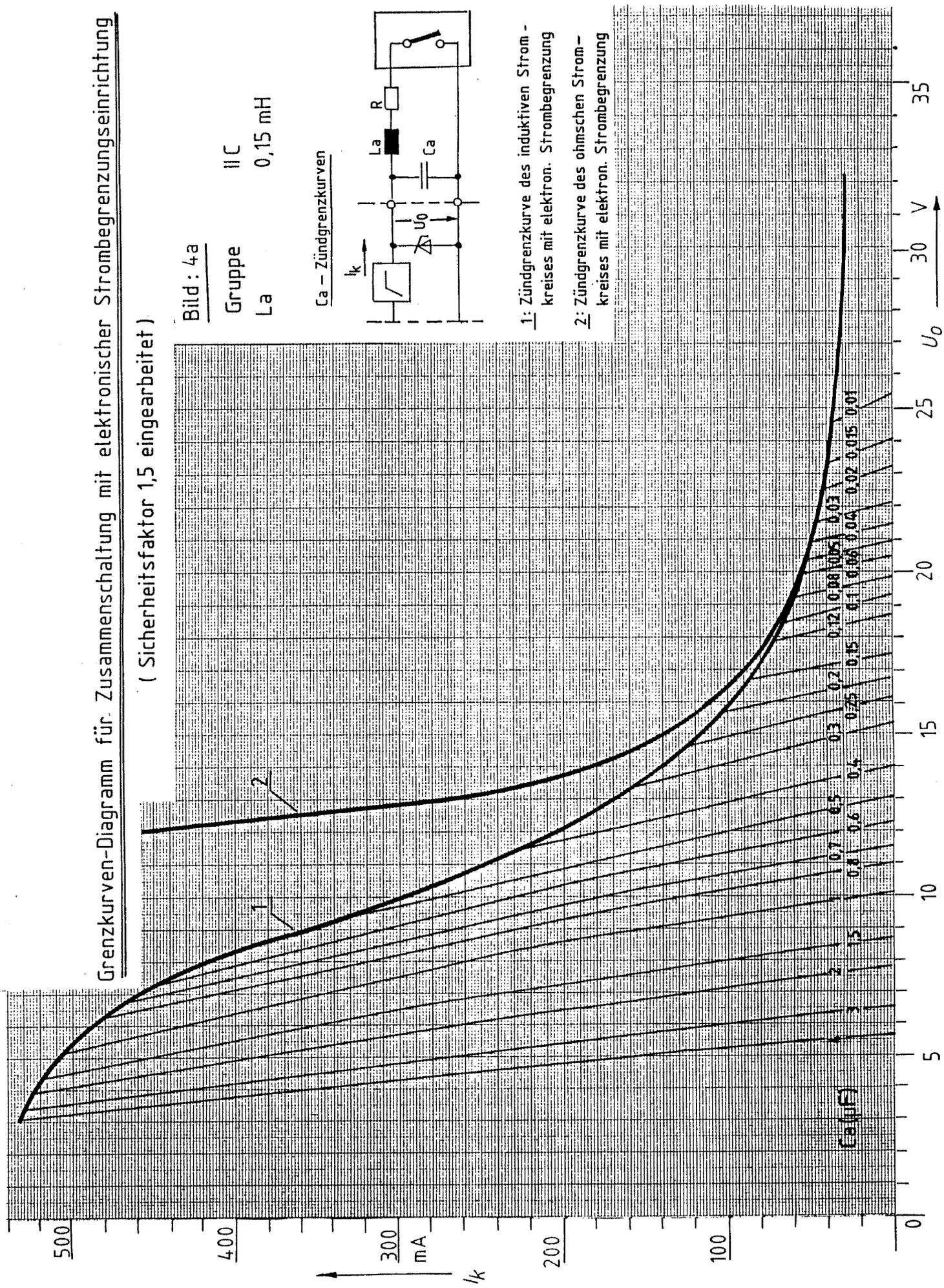
Bild : 4a

Gruppe II C  
 $L_a$  0,15 mH

$C_a$  - Zündgrenzkurven



- 1: Zündgrenzkurve des induktiven Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung
- 2: Zündgrenzkurve des ohmschen Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung



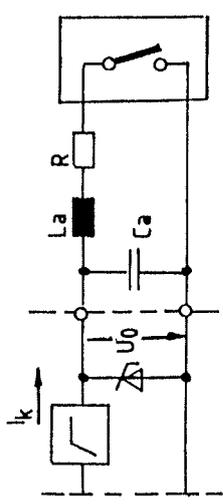
# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )

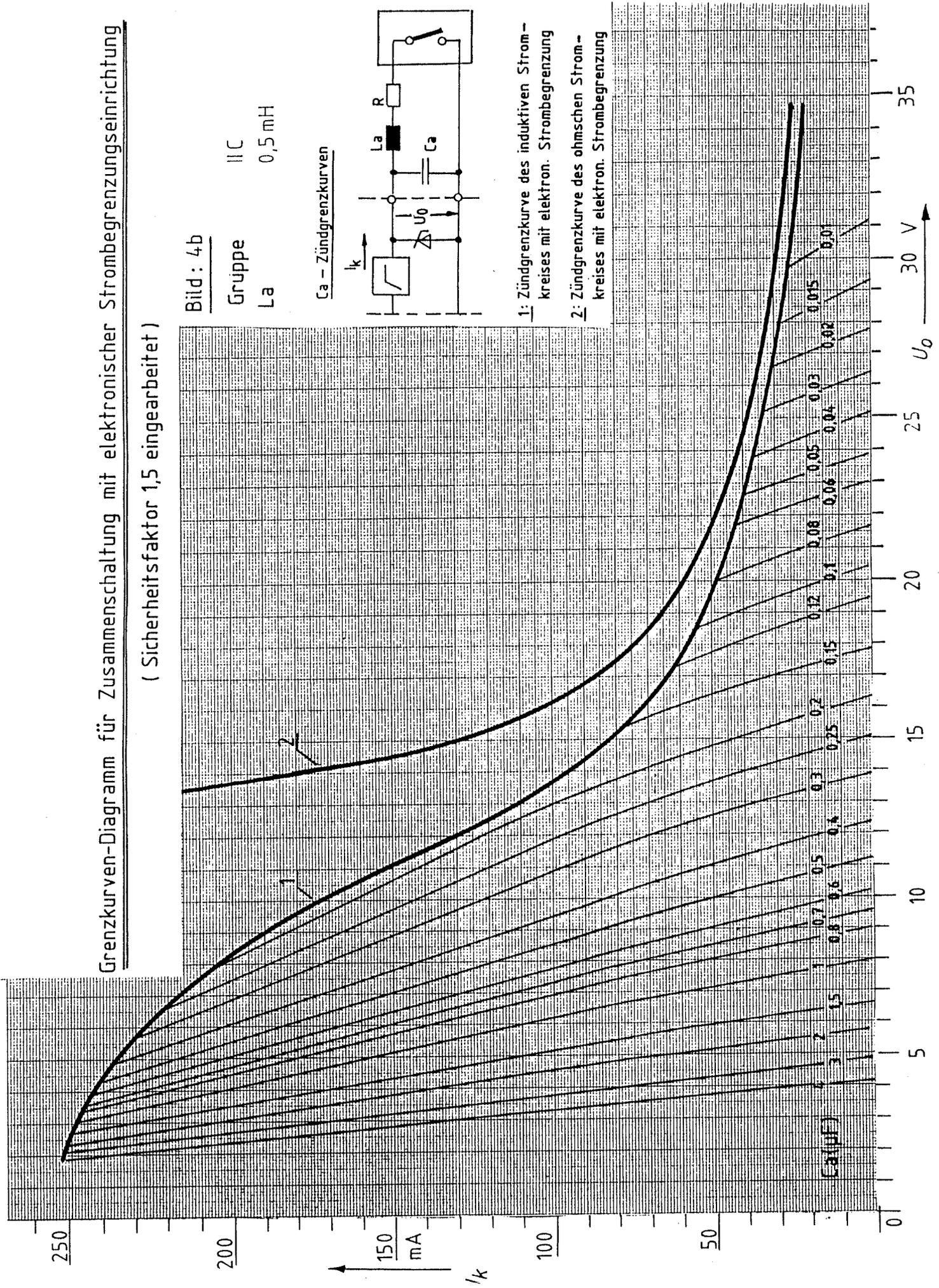
Bild : 4b

Gruppe IIC  
 $L_a$  0,5 mH

$C_a$  - Zündgrenzkurven

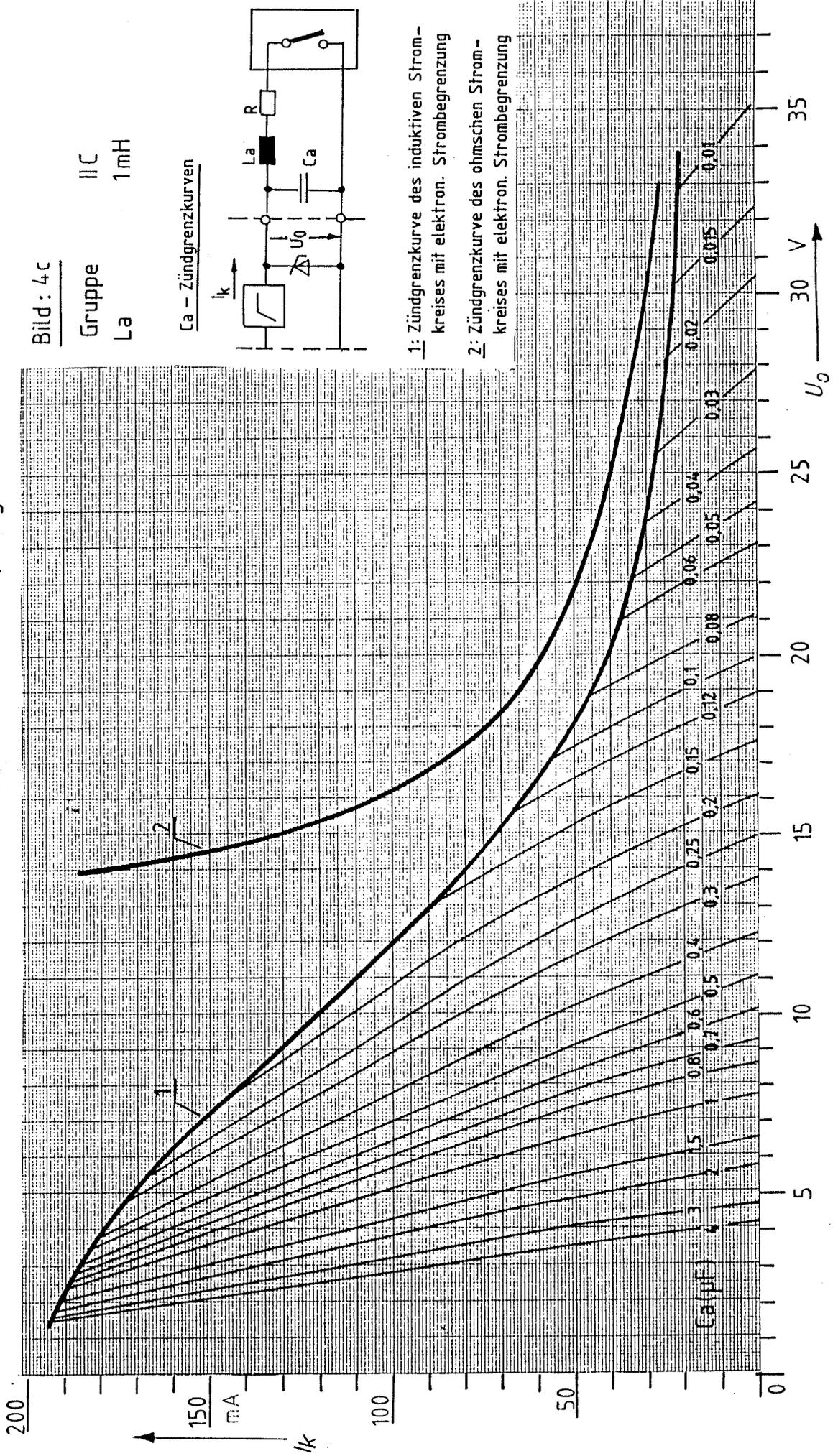


- 1: Zündgrenzkurve des induktiven Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung
- 2: Zündgrenzkurve des ohmschen Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung



# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )



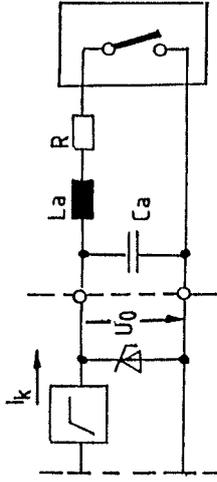
# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )

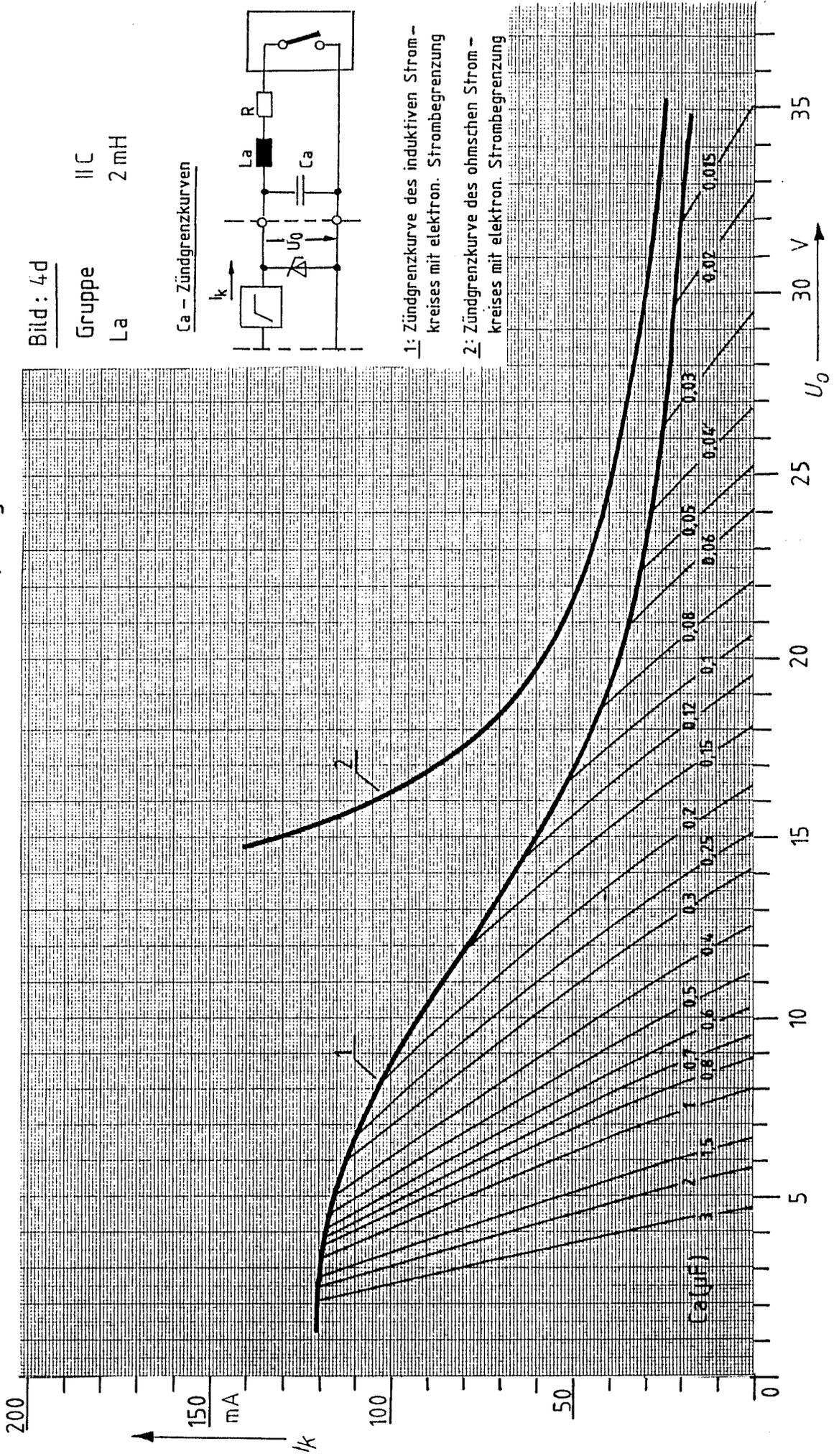
Bild : 4d

Gruppe IIC  
La 2 mH

Ca - Zündgrenzkurven



- 1: Zündgrenzkurve des induktiven Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung
- 2: Zündgrenzkurve des ohmschen Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung

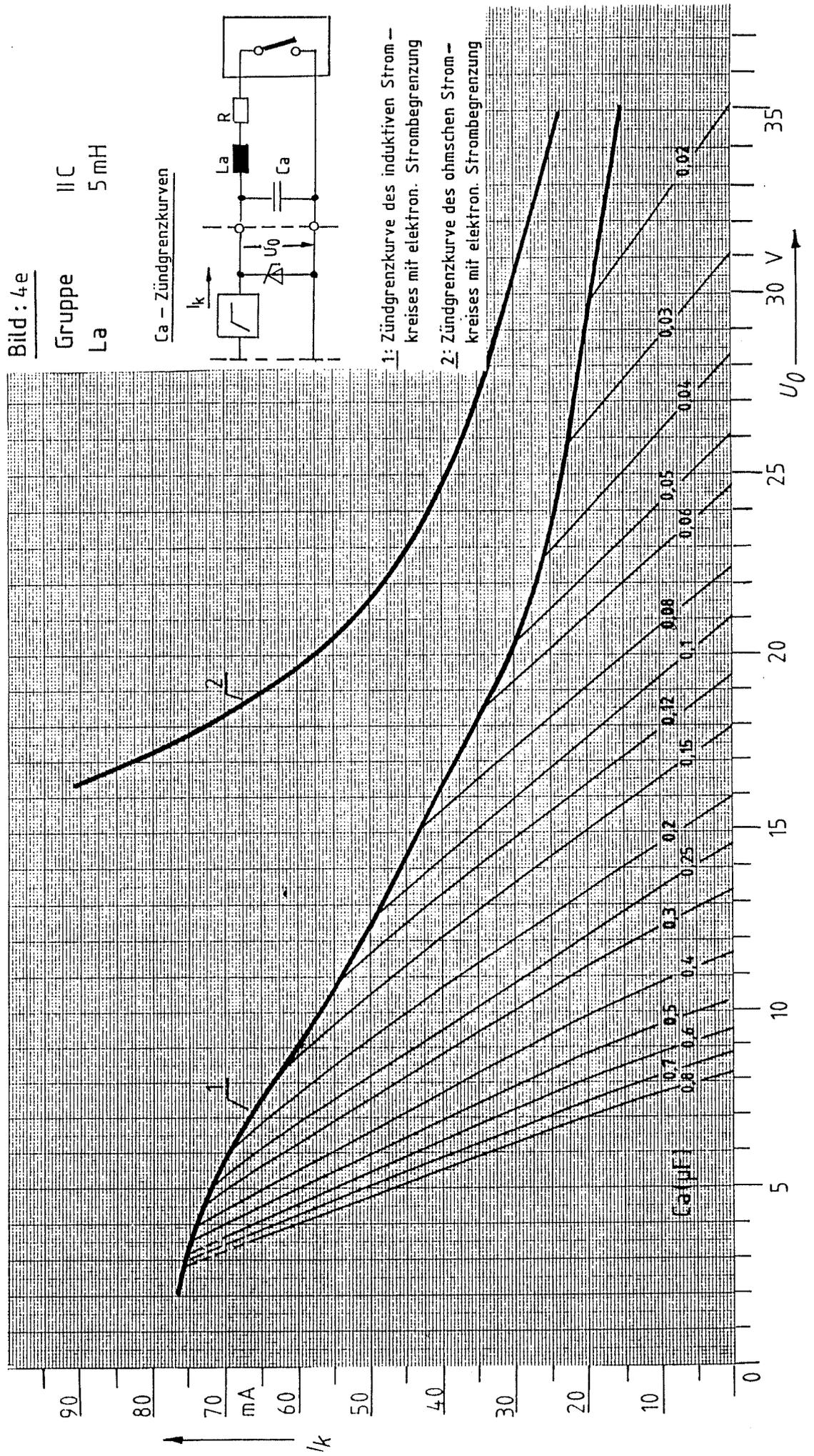






# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )



# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

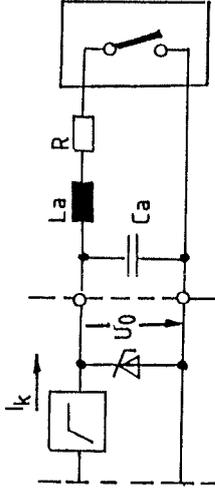
( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )

Bild : 4f

Gruppe II B

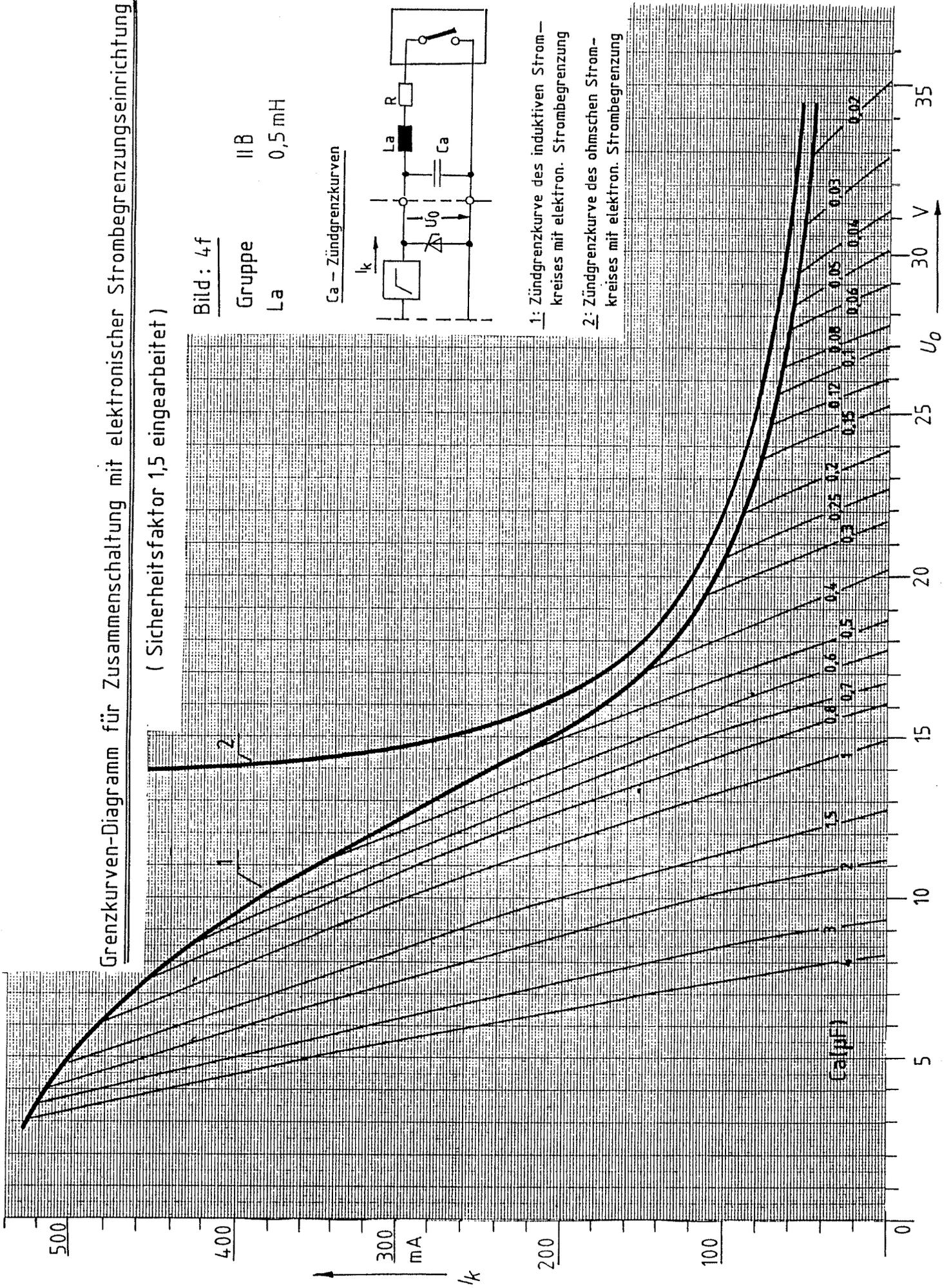
La 0,5 mH

Ca - Zündgrenzkurven



1: Zündgrenzkurve des induktiven Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung

2: Zündgrenzkurve des ohmschen Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung



# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )

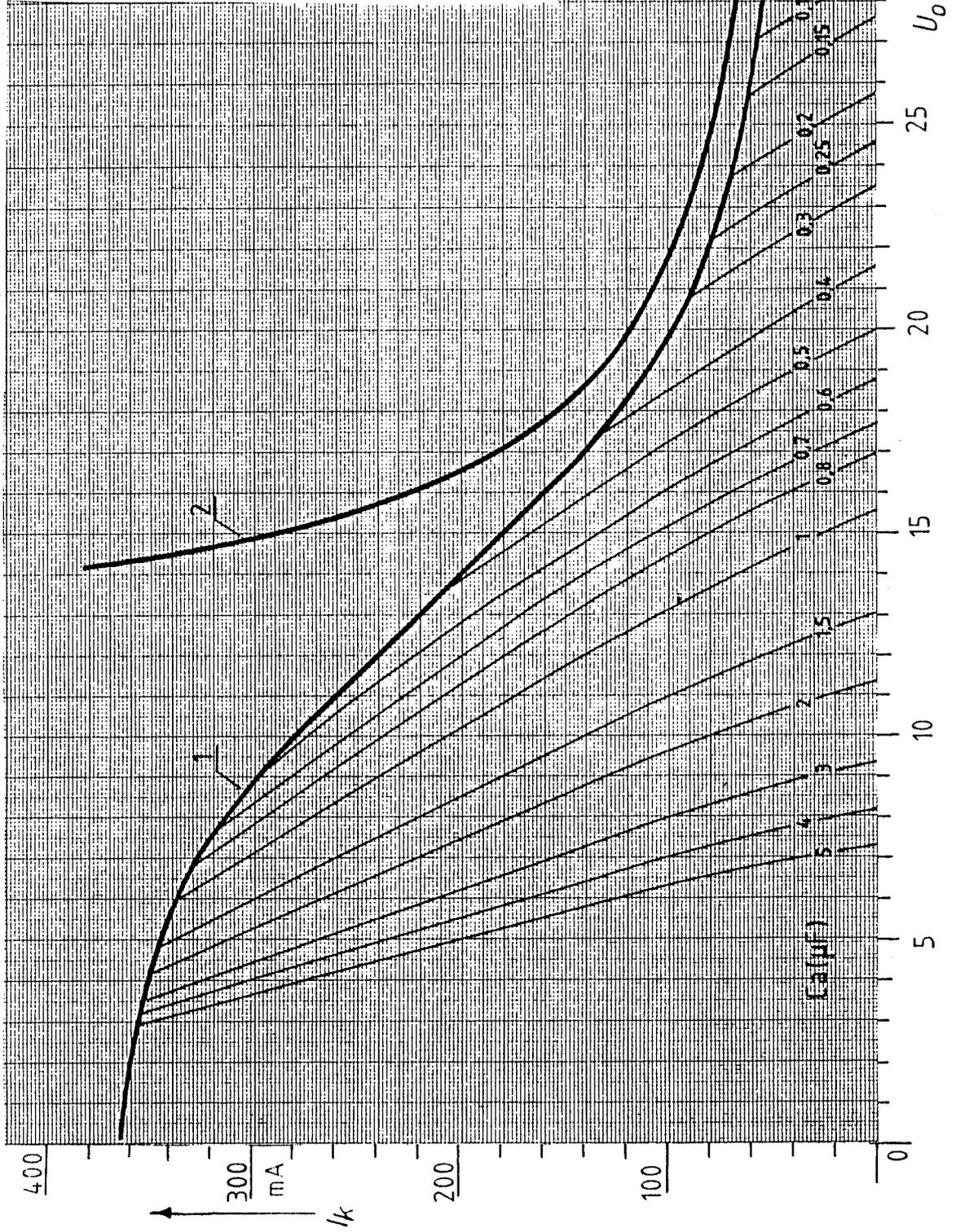
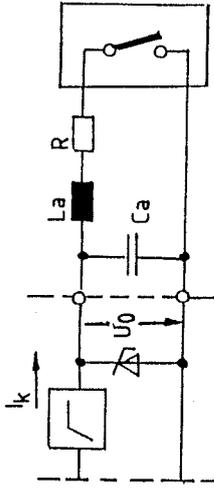


Bild : 4g

Gruppe II B

$L_a$  1 mH

$C_a$  - Zündgrenzkurven



1: Zündgrenzkurve des induktiven Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung

2: Zündgrenzkurve des ohmschen Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung

# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

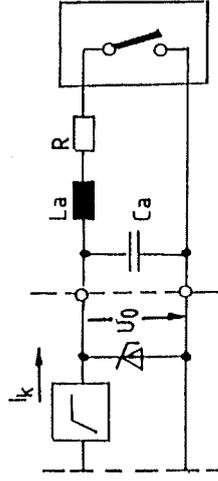
( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )

Bild: 4h

Gruppe II B

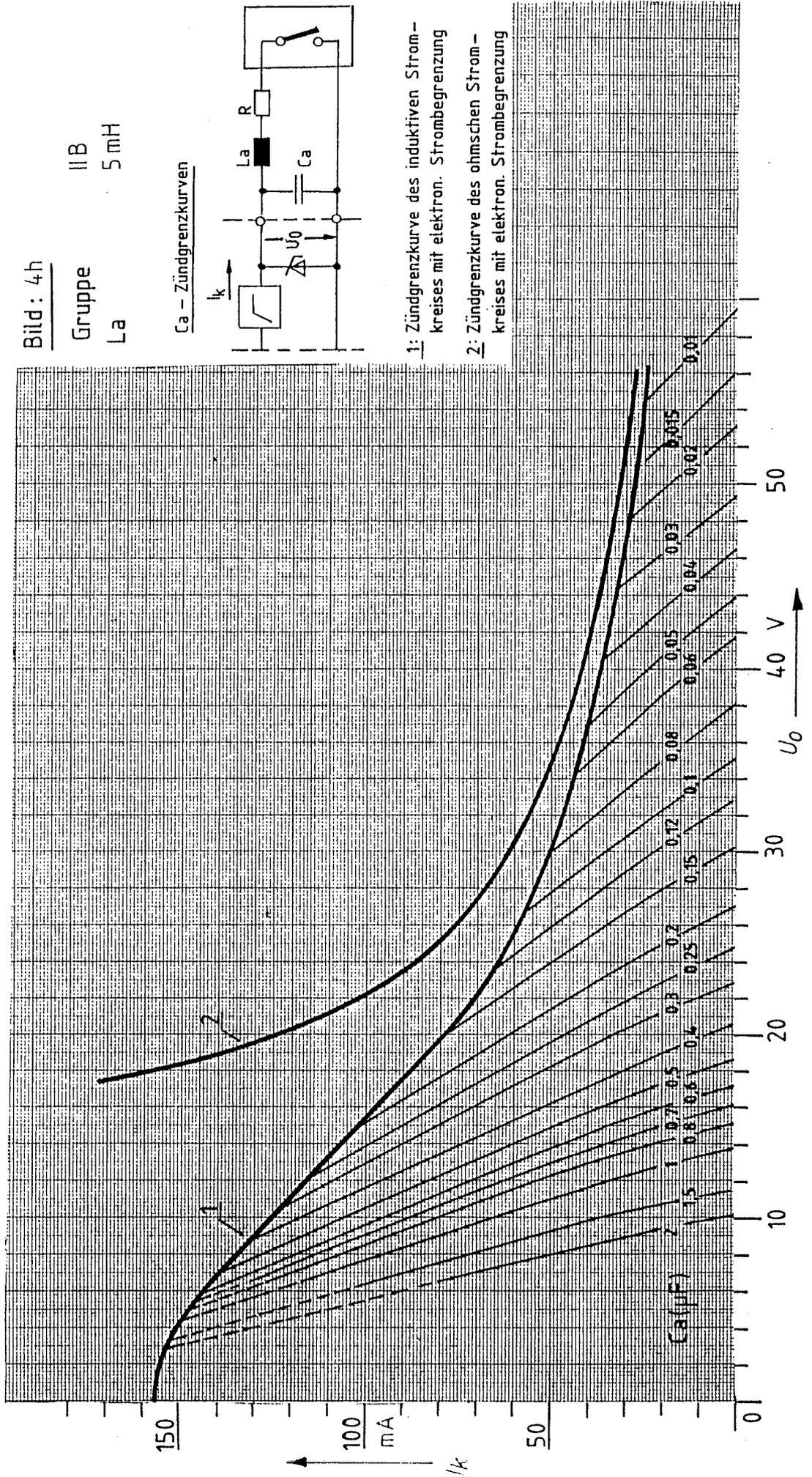
La 5 mH

Ca - Zündgrenzkurven



1: Zündgrenzkurve des induktiven Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung

2: Zündgrenzkurve des ohmschen Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung



# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

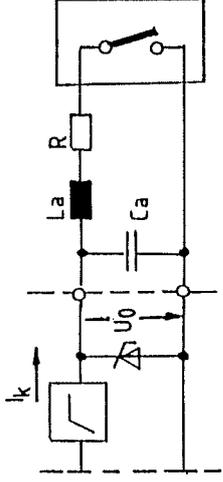
( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )

Bild : 4i

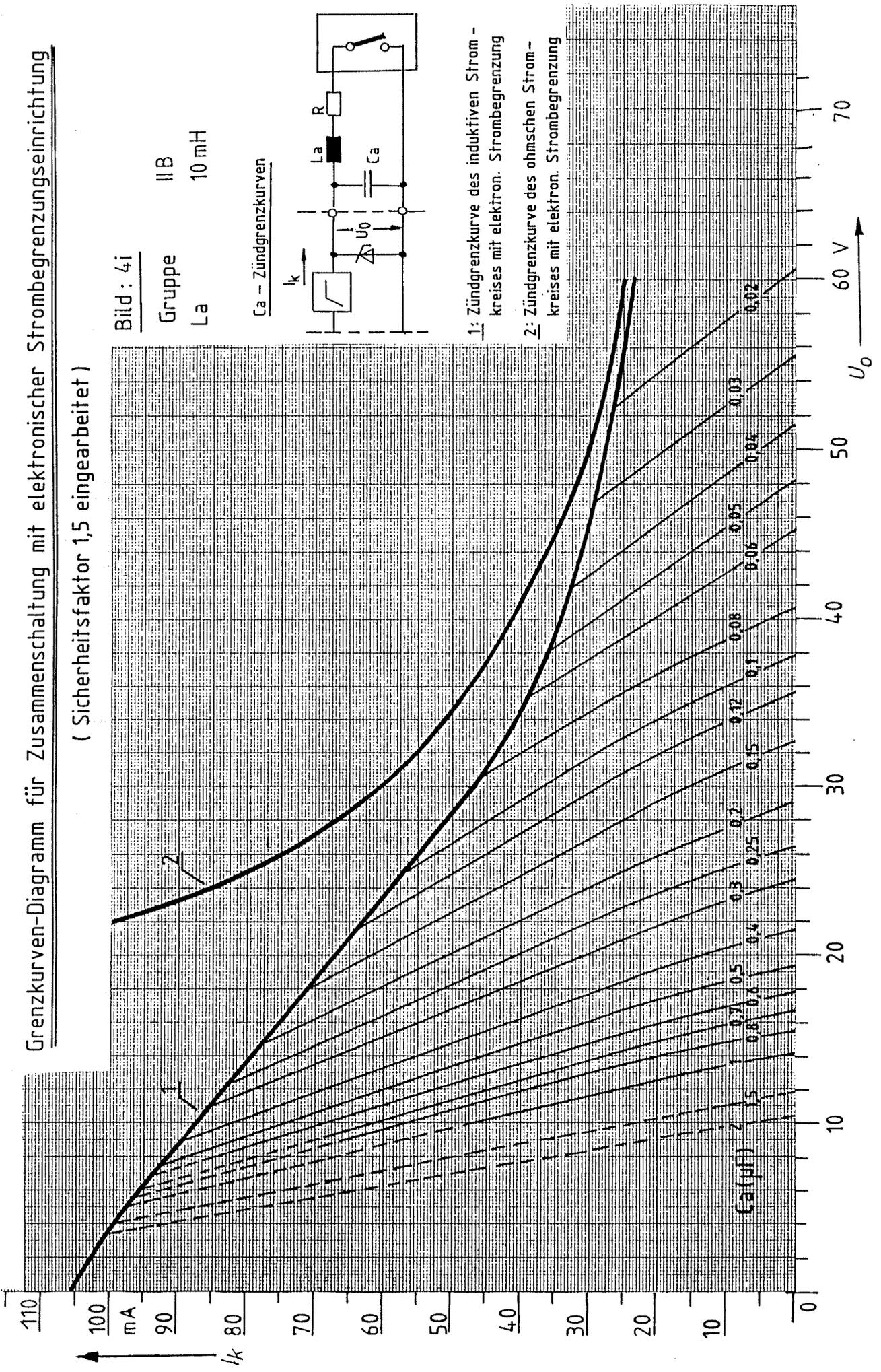
Gruppe IIB

La 10 mH

Ca - Zündgrenzkurven

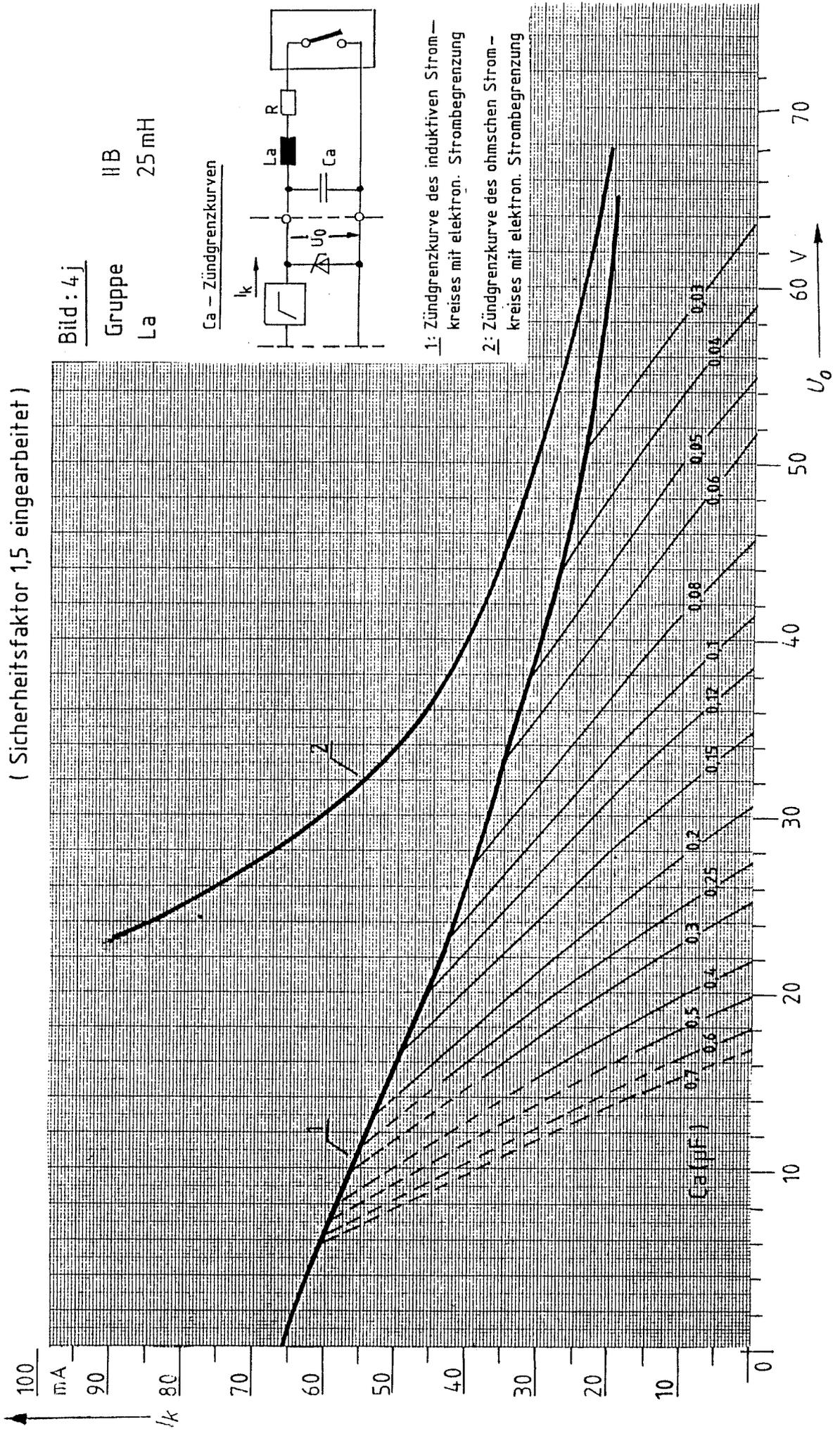


- 1: Zündgrenzkurve des induktiven Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung
- 2: Zündgrenzkurve des ohmschen Stromkreises mit elektron. Strombegrenzung



# Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )



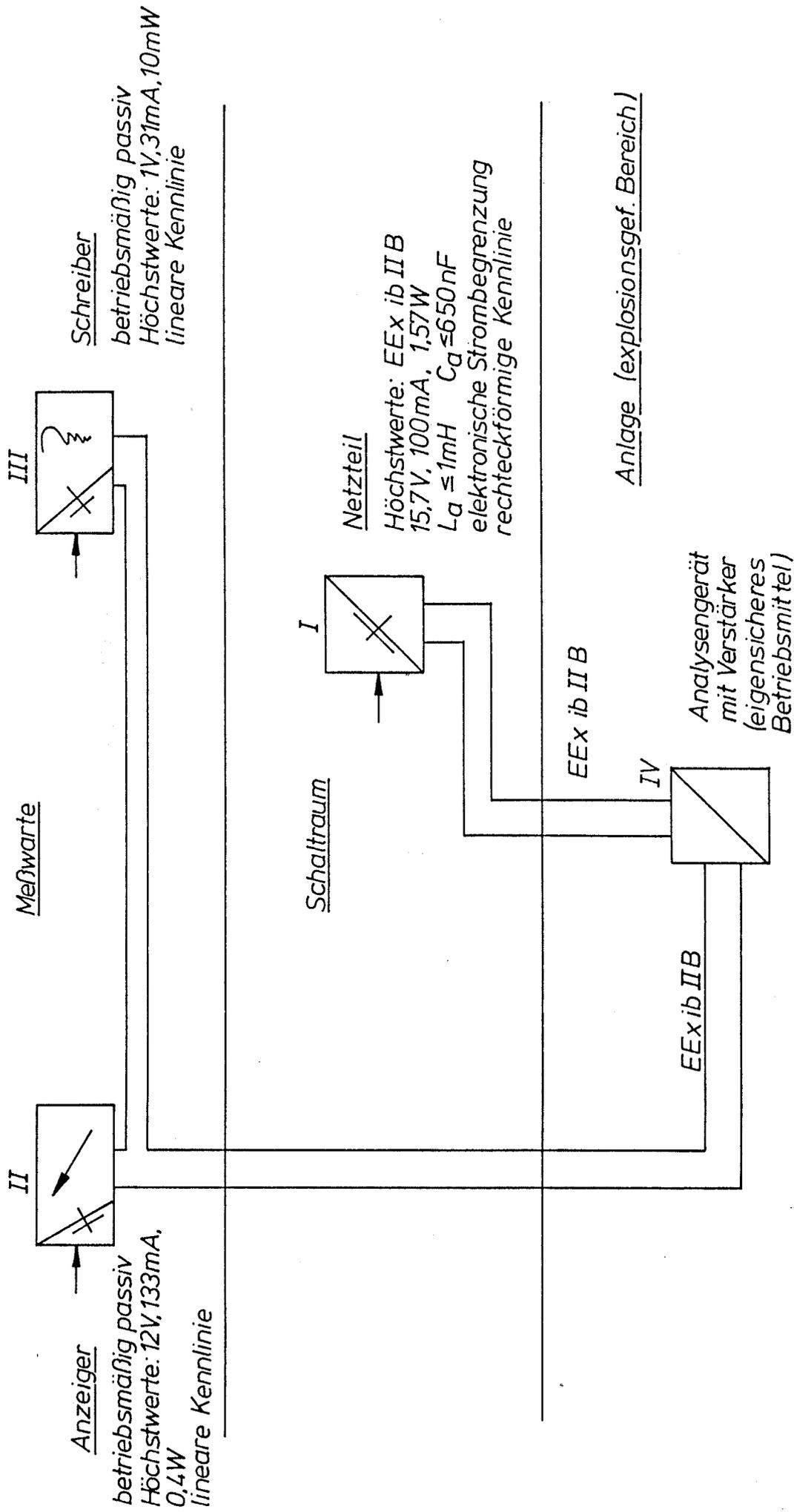


Bild 5: Beispiel einer Zusammenschaltung

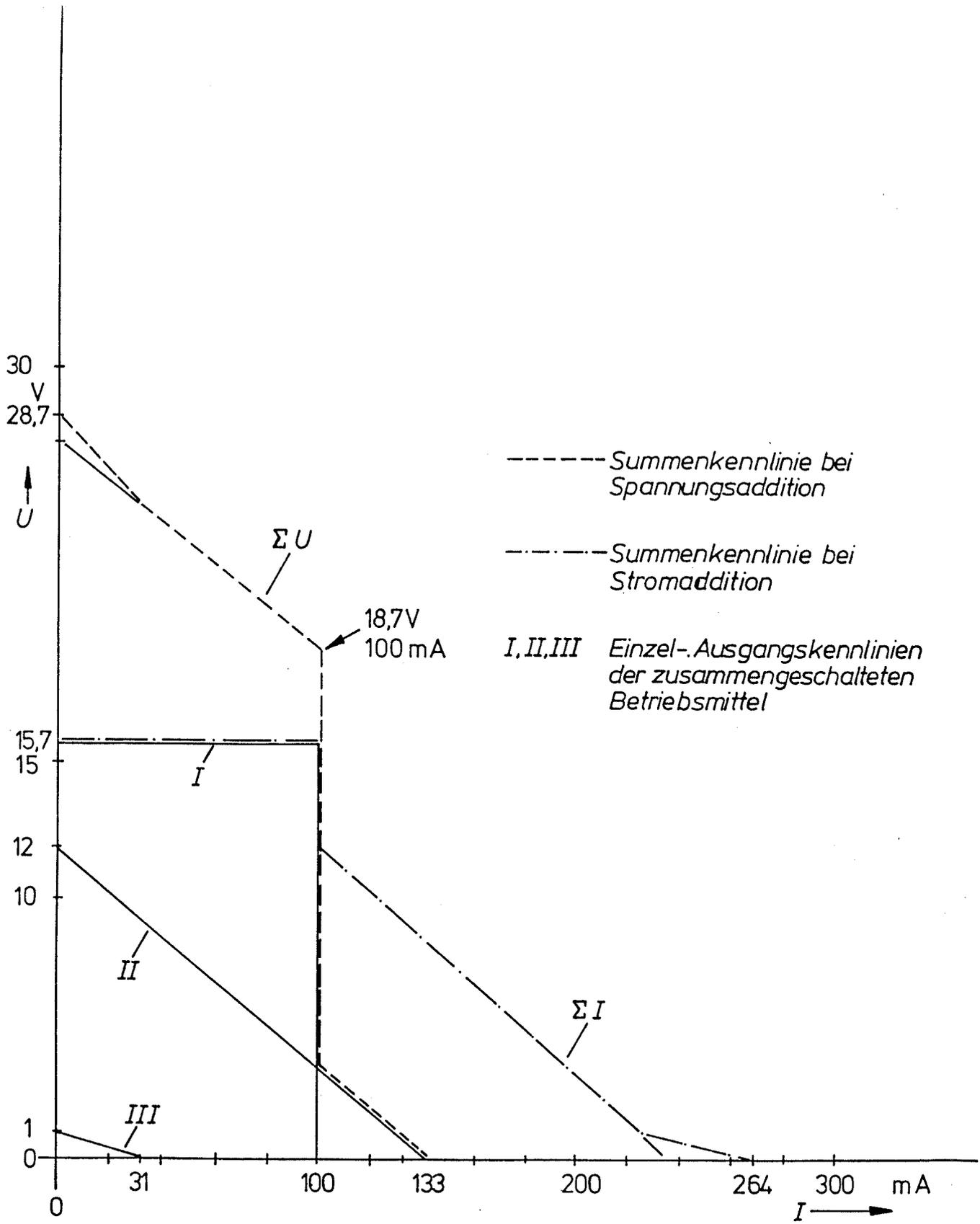


Bild 6: Summenkennlinien zum Stromkreis nach Bild 5

Grenzkurven-Diagramm für Zusammenschaltung mit elektronischer Strombegrenzungseinrichtung

( Sicherheitsfaktor 1,5 eingearbeitet )

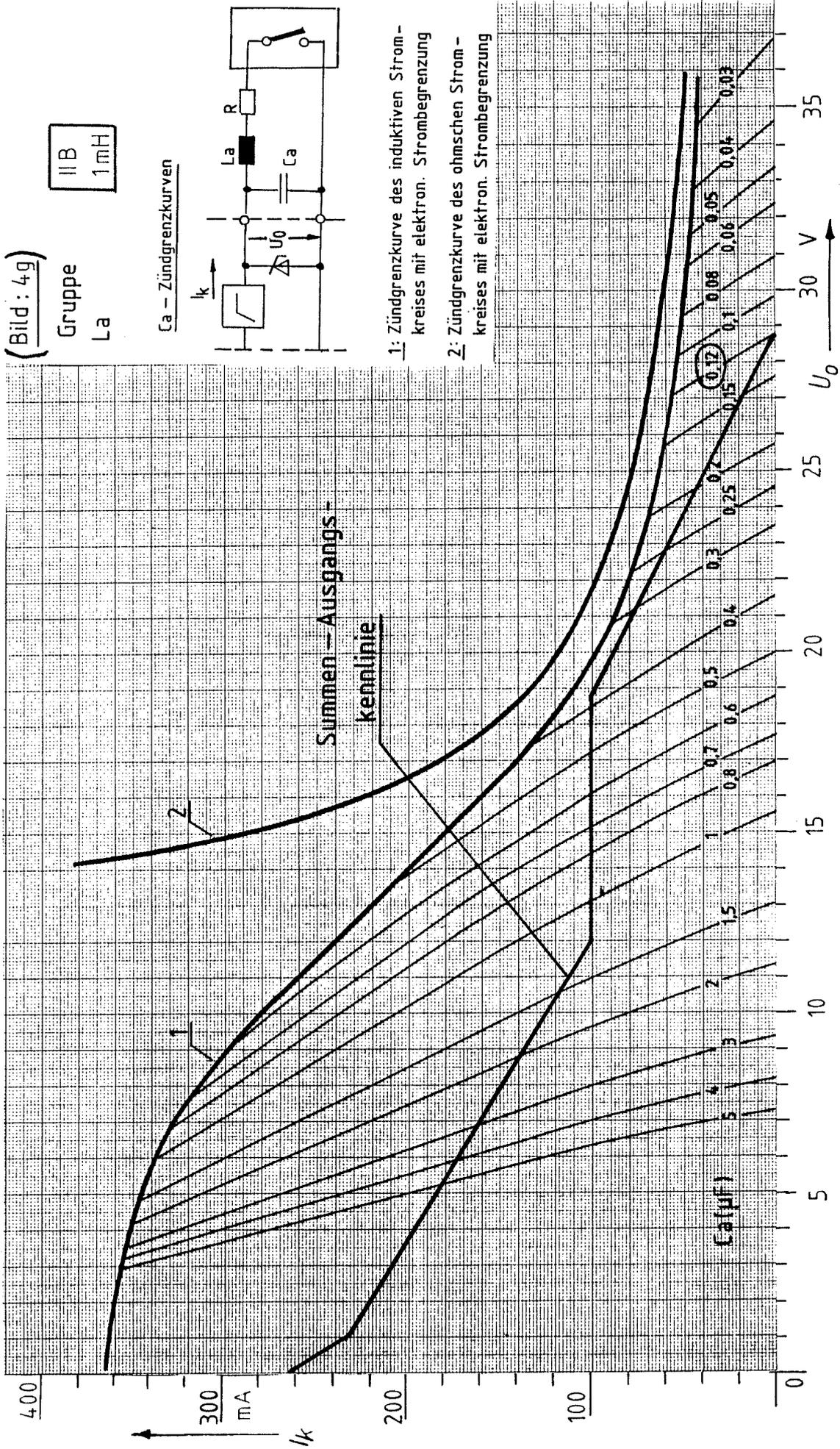


Bild 7: Überprüfung der Zusammenschaltung des Stromkreises nach Bild 5 mittels Summenkennlinie und Kurvenschar (Summenkennlinien aus Bild 6 eingetragen im Diagramm aus Bild 4g)

