

**EUR 2550.d**

ASSOZIATION

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM  
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH DES LANDES  
NORDRHEIN-WESTFALEN - e.V.

**CROWBAR- UND  
POWER-CROWBAR-SCHALTUNGEN  
UND IHRE BERECHNUNG**

von

H. J. BELITZ und E. KUGLER

1965



Bericht abgefasst beim  
Institut für Plasmaphysik  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen - e.V.,  
Deutschland

Assoziation Nr. 006-62-10 FUAD

## HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und die in deren Namen handelnden Personen :

keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind, oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen, oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt ;

keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen, oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird in den auf der vierten Umschlagseite genannten Vertriebsstellen

zum Preise von DM 4,80	FF 6	FB 60	Lit. 750	Fl. 4,30
------------------------	------	-------	----------	----------

verkauft.

**Es wird gebeten, bei Bestellungen die EUR-Nummer und den Titel anzugeben, die auf dem Umschlag jedes Berichts aufgeführt sind.**

Gedruckt von L. Vanmelle, S.A. - Gent  
Brüssel, November 1965

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

## EUR 2550.d

CROWBAR- UND POWER-CROWBAR-SCHALTUNGEN UND IHRE  
BERECHNUNG von H.J. BELITZ und E. KUGLER

*Assoziation* : Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-  
Westfalen - e.V.

Bericht abgefasst beim Institut für Plasmaphysik  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen - e.V.  
(Deutschland)

Assoziation Nr. 006-62-10 FUAD

Brüssel, November 1965 - 48 Seiten - 6 Abbildungen - FB 60

Der Crowbar ist ein Schaltelement, das gestattet, eine gezündete  
Kondensatorentladung durch externe Schaltauslösung so zu steuern,  
dass Hochstromimpulse gewünschter Form und Länge erhalten werden.

## EUR 2550.d

CROWBAR AND POWER CROWBAR SWITCHES AND THEIR  
CALCULATION by H.J. BELITZ and E. KUGLER

*Association* : European Atomic Energy Community - EURATOM  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-  
Westfalen - e.V.

Report prepared at the Institut für Plasmaphysik  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen - e.V.  
(Germany)

Association No. 006-62-10 FUAD

Brussels, November 1965 - 48 Pages - 6 Figures - FB 60

The crowbar is a switching element which makes it possible to  
control an ignited capacitor discharge by external trigger in such a way

## EUR 2550.d

CROWBAR AND POWER CROWBAR SWITCHES AND THEIR  
CALCULATION by H.J. BELITZ and E. KUGLER

*Association* : European Atomic Energy Community - EURATOM  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-  
Westfalen - e.V.

Report prepared at the Institut für Plasmaphysik  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen - e.V.  
(Germany)

Association No. 006-62-10 FUAD

Brussels, November 1965 - 48 Pages - 6 Figures - FB 60

The crowbar is a switching element which makes it possible to  
control an ignited capacitor discharge by external trigger in such a way

## EUR 2550.d

CROWBAR AND POWER CROWBAR SWITCHES AND THEIR  
CALCULATION by H.J. BELITZ and E. KUGLER

*Association* : European Atomic Energy Community - EURATOM  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-  
Westfalen - e.V.

Report prepared at the Institut für Plasmaphysik  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen - e.V.  
(Germany)

Association No. 006-62-10 FUAD

Brussels, November 1965 - 48 Pages - 6 Figures - FB 60

The crowbar is a switching element which makes it possible to  
control an ignited capacitor discharge by external trigger in such a way

Die beiden hier betrachteten Crowbar-Schaltungen führen den Anfangszustand der Entladung, der durch einen schnellen Stromanstieg charakterisiert ist, in einen anderen dynamischen Zustand über, dem eine langsame Abnahme des Stromes entspricht.

Es werden die Spannungen und Ströme in den einzelnen Zweigen eines Schwingkreises mit Crowbar berechnet und ein FORTRAN-Programm für numerische Rechnungen angegeben.

that high current impulses of the required form and length are obtained. The two crowbar switches considered here bring about the transition of the initial discharge state, which is characterized by a rapid current rise, into another dynamic state corresponding to a slow current drop.

The tensions and currents in the individual branches of an oscillation circuit with crowbar are calculated and a FORTRAN digital programme is given.

that high current impulses of the required form and length are obtained. The two crowbar switches considered here bring about the transition of the initial discharge state, which is characterized by a rapid current rise, into another dynamic state corresponding to a slow current drop.

The tensions and currents in the individual branches of an oscillation circuit with crowbar are calculated and a FORTRAN digital programme is given.

that high current impulses of the required form and length are obtained. The two crowbar switches considered here bring about the transition of the initial discharge state, which is characterized by a rapid current rise, into another dynamic state corresponding to a slow current drop.

The tensions and currents in the individual branches of an oscillation circuit with crowbar are calculated and a FORTRAN digital programme is given.

**EUR 2550.d**

ASSOZIATION

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM  
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH DES LANDES  
NORDRHEIN-WESTFALEN - e.V.

**CROWBAR- UND  
POWER-CROWBAR-SCHALTUNGEN  
UND IHRE BERECHNUNG**

von

H. J. BELITZ und E. KUGLER

1965



Bericht abgefasst beim  
Institut für Plasmaphysik  
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen - e.V.,  
Deutschland

Assoziation Nr. 006-62-10 FUAD

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Crowbar ist ein Schaltelement, das gestattet, eine gezündete Kondensatorentladung durch externe Schaltauslösung so zu steuern, dass Hochstromimpulse gewünschter Form und Länge erhalten werden. Die beiden hier betrachteten Crowbar-Schaltungen führen den Anfangszustand der Entladung, der durch einen schnellen Stromanstieg charakterisiert ist, in einen anderen dynamischen Zustand über, dem eine langsame Abnahme des Stromes entspricht.

Es werden die Spannungen und Ströme in den einzelnen Zweigen eines Schwingkreises mit Crowbar berechnet und ein FORTRAN-Programm für numerische Rechnungen angegeben.

## Einleitung

Die zur Zeit erfolgreichste Methode, ein sehr heißes Plasma zu erzeugen, ist die schnelle magnetische Kompression. Dabei wird in einer einwindigen Kompressionsspule ein Magnetfeld erzeugt, das innerhalb weniger Mikrosekunden von 0 auf etwa  $10^5$  Gauß ansteigt. Dem entspricht ein Anstieg des elektrischen Stromes von der Größenordnung  $10^{12}$  A/sec. Die Möglichkeit, so große Stromanstiege zu realisieren, beruht auf der gleichzeitigen, sehr schnellen Durchzündung zahlreicher Schaltfunkenstrecken. Dadurch wird eine sehr stromstarke Kondensatorentladung ausgelöst. Wegen der geringen Dämpfung und der niedrigen Induktivität des Entladungskreises verläuft die Entladung in erster Näherung sinusförmig. Das heißt aber, daß der Strom nicht nur sehr schnell ansteigt, sondern auch ebenso schnell abfällt. Auf diese Weise kann deshalb ein heißes Plasma zwar erzeugt, jedoch nur kurzfristig gehalten werden.

Um ein so erzeugtes heißes Plasma über längere Zeit zu halten, muß nach erfolgtem schnellen Stromanstieg die Halbwellendauer verlängert werden. Dazu gibt es z.Zt. zwei Möglichkeiten:

1. Man schaltet auf die Kompressionsspule zu einem geeigneten Zeitpunkt eine zusätzliche, stärkere (und langsamere) Kondensatorbatterie, die wegen ihrer längeren Halbwellendauer die Abnahme des Stromes zunächst verhindert (oder sogar noch einen Stromanstieg bewirkt); - das ist die sog. Power-Crowbar-Schaltung.
2. Man schließt (möglichst im Strommaximum) den Schwingkreis über geeignete Schaltfunkenstrecken in der Weise kurz, daß der Strom in der Kompressionsspule etwa exponentiell abnimmt; - das ist die sog. Crowbar-Schaltung.

Gemeinsam ist beiden Methoden, daß durch einen Schaltungsvorgang der ursprüngliche - sagen wir - "dynamische Zustand" des Systems (der die Aufheizung verursachte) in einen neuen Zustand übergeht (der das Halten des Plasmas bewirken soll). Sie unterscheiden sich aber insofern, als diese neuen Zustände prinzipi-

Manuskript erhalten am 25. August 1965.

ell verschieden sind; - im ersten Fall geht der ursprüngliche Schwingungszustand (mit hoher Frequenz) in einen anderen Schwingungszustand (mit geringer Frequenz) über, im zweiten Fall folgt auf den Anfangszustand ein Endzustand (im wesentlichen) nicht-periodischer Art.<sup>+</sup>)

Die Bedeutung der beiden Crowbar-Schaltungen erschöpft sich keineswegs in der Anwendung auf die schnelle magnetische Kompression. Das Wesen des Crowbars besteht vielmehr darin, daß er *e i n e n* (für einen bestimmten Effekt, Vorgang oder Zweck wesentlichen) *d y n a m i s c h e n* Zustand einer stromstarken Kondensatorentladung in einen *a n d e r e n* (für einen anderen Effekt, Vorgang oder Zweck wesentlichen) *d y n a m i s c h e n* Zustand überführt. (Hieraus mag sich der Name Crowbar-Brecheisen, Brechstange- erklären). Der Crowbar löst daher ein allgemeineres Problem der Steuer- bzw. Hochstromschaltungstechnik. - Nicht jeder Kurzschluß kann als Crowbar aufgefaßt werden. Entlädt man z.B. einen Kondensator über einen Erder, so handelt es sich nicht um Crowbar, da der entladene Zustand des Kondensators keinen *d y n a m i s c h e n* Zustand darstellt. Dagegen kann man einen Kurzschluß, der nach einem einmaligen Stromimpuls alle weiteren Schwingungen bis zu einem gewissen Grade unterdrückt, ebenfalls als Crowbar ansehen. - Zusammenfassend kann man sagen: Der Crowbar ist ein Schaltelement, das es gestattet, eine gezündete Kondensatorentladung durch externe Schaltauslösung so zu steuern, daß Hochstromimpulse gewünschter Form und Länge erhalten werden. Diese Definition umreißt zugleich auch das Anwendungsgebiet solcher Schaltungen.

Der vorliegende Bericht ist gegliedert in Teil I "Crowbar-Schaltung" und Teil II "Power-Crowbar-Schaltung". Diese Einteilung hat sich auch aus rechentechnischen Gründen als zweckmäßig erwiesen. Im Ersatzschaltbild unterscheidet sich der Power-Crowbar durch zwei zusätzliche Kapazitäten ( $C_2$  und  $C_3$ ) im Last- und Crowbar-Kreis vom einfachen Crowbar. Dadurch erhält man im Power-Crowbar-Fall eine Differentialgleichung 4. Ordnung, im Crowbar-Fall eine 3. Ordnung. Bei Behandlung dieser Gleichungen mittels Laplace-Transformation ergeben sich also beim Power-Crowbar bzgl.

---

<sup>+</sup>) Die folgenden Rechnungen zeigen, daß nicht nur *e i n* Endzustand existiert. Beim Power-Crowbar sind z.B. drei verschiedene Endzustände möglich. Das beeinträchtigt unsere Betrachtungsweise nicht, sondern verallgemeinert nur den Begriff "der Endzustand".

der Lösungen der charakteristischen Gleichung im Unterbereich 3 Fälle (alle Wurzeln reell, je zwei konjugiert-komplex, zwei reell und zwei komplex), beim einfachen Crowbar 2 Fälle. Ein gemeinsames Rechenmaschinenprogramm wird dadurch so umfangreich, daß bei kleineren Maschinen die vorhandenen Speicherplätze u.U. nicht ausreichen - insbesondere, wenn man durch Berechnung zusätzlicher Größen (z.B. Welligkeit der kurzgeschlossenen Entladung) das Programm noch erweitern möchte.

Die zugrunde gelegten Ersatzschaltbilder (s. Abb. 1.1 und 2.1) zeigen ausschließlich lokalisierte Schaltelemente. Das ist eine Näherung, durch die die Frequenz und die Amplitude der Grundschwingung richtig wiedergegeben werden. Sie folgt aus der strengeren Behandlung (bei der die Kabel oder Bänder durch die Kabelgleichungen charakterisiert werden) unter solchen Bedingungen, die bei den in der Plasmaphysik verwendeten Kondensatorbatterien immer gut erfüllt sind. Eine so strenge Behandlung der Crowbar-Schaltung kompliziert die Rechnung ungemein. Sie ist den realen Verhältnissen aber auch insofern gar nicht angemessen, als die Schaltelemente -- insbesondere die ohmschen Widerstände und ihre räumliche Verteilung -- nicht genau genug bekannt sind.

Die Ermittlung der Schaltelemente, z.B. für die Projektierung einer Kondensatorbatterie mit Crowbar, ist ohnehin ein Problem für sich. Während sich die Kapazitäten und Induktivitäten im allgemeinen leicht mit der notwendigen Genauigkeit direkt messen oder berechnen lassen, müssen die ohmschen Widerstände praktisch immer aus Dämpfungsmessungen, d.h. aus dem Abklingen der gedämpften Schwingung bestimmt werden. Die so erhaltenen ohmschen Widerstände sind aber wegen des Skineffektes größer als die tatsächlichen Widerstände im Crowbar-Fall, d.h. nach dem Kurzschließen. Dies führt z.B. dazu, daß man eine geringere Welligkeit berechnet als man beobachtet. - Für die ohmschen Widerstände der Schaltfunkenstrecken kann man ohnehin nur geeignete Mittelwerte wählen.

Die vorliegenden Rechnungen stellen also eine starke Vereinfachung der realen Verhältnisse dar; sie lassen sich aber leicht noch verbessern, wenn dies für spezielle Fragen notwendig erscheint.

Anlaß zu diesen Rechnungen war die Notwendigkeit, die recht kurze "Haltezeit" (d.h. Halbwellendauer) einer vorhandenen Kondensatorbatterie um einen Faktor 5...10 zu verlängern, wobei die Welligkeit des Stromes in der Lastspule einen gewissen Wert nicht übersteigern sollte. Die Fragen waren

1. läßt sich eine solche Verlängerung der Halbwelle<sup>+</sup>) mittels Crowbar-Schaltung überhaupt erreichen - und wenn ja,
2. wieviele Crowbar-Schalter sind hierzu erforderlich,
3. wo müssen diese Schalter angebracht werden, damit die Welligkeit hinreichend klein bleibt?

Diese und ähnliche bei der Projektierung einer Kondensatorbatterie mit Crowbar-Schaltung auftretenden Fragen lassen sich mit diesen Rechnungen hinreichend genau beantworten.

Die erhaltenen Ausdrücke für die einzelnen Ströme und Spannungen, sind sehr unübersichtlich. Der Versuch, einige grobe Näherungsausdrücke abzuleiten, ist naheliegend. Wir haben indes nur einen Ausdruck gefunden, der anscheinend schon unter sehr schwachen, anscheinend stets erfüllten Voraussetzungen gültig ist (s. die Punkte 1.7 und 1.11.2). Es ist die Zeit, nach der die Amplitude 1 auf den Wert  $1/e$  abgefallen ist:  $t \approx (L_2 + L_3)/R_2 + R_3$ ). Bzgl. der Werte  $L_2, L_3, R_2, R_3$  s. Abb. 1.1. In allen gerechneten Fällen stimmt diese Näherung bis auf ca. 1% mit dem exakten Wert überein. Andererseits ist der technische Aufwand für eine Crowbar-Schaltung doch so groß, daß sich die Mühe einer strengeren Rechnung immer lohnt. Aus diesem Grunde wurde auf ein systematisches Aufsuchen solcher Näherungen verzichtet.

Die Abschnitte im Teil I sind durch "I", die im Teil II durch "II" gekennzeichnet. Formeln und Abbildungen sind fortlaufend numeriert; die Numerierung beginnt im Teil II wieder mit 1.

---

<sup>+</sup>) Beim  $e^{-dt}$  - Verlauf soll die "Halbwellendauer" durch die Zeit bestimmt sein, nach der eine Amplitude 1 auf den Wert  $1/e$  abgefallen ist.

Teil I Crowbar

I.1 Ersatzbild

Das betrachtete Ersatzschaltbild zeigt Abb. 1. Bei  $t = -T$  erfolgt die "Draufschaltung" der Kondensatorbatterie ( $C_1, L_1, R_1$ ) auf den Lastkreis ( $L_2, R_2$ ) über den Schalter  $S_1$ . Die den Schalter charakterisierenden Schaltelemente (ohmscher Widerstand und Induktivität) seien in  $C_1, L_1$  und  $R_1$  bereits enthalten.

Bei  $t = 0$  erfolgt über den Schalter  $S_2$  die "Kurzschlußschaltung". Der Kurzschluß- oder Crowbar-Kreis bestehe aus  $L_3$  und  $R_3$ .

Der Fall, daß an Stelle eines Kurzschlusses eine neue Kapazität  $C_3$  über  $S_2$  auf den Kreis geschaltet wird, in der englischen Literatur Power-Crowbar genannt, wird im Teil II behandelt. Diese Schaltung erlaubt sowohl eine erhebliche Verlängerung des Pulses wie auch ein weiteres Ansteigen des Stromes.

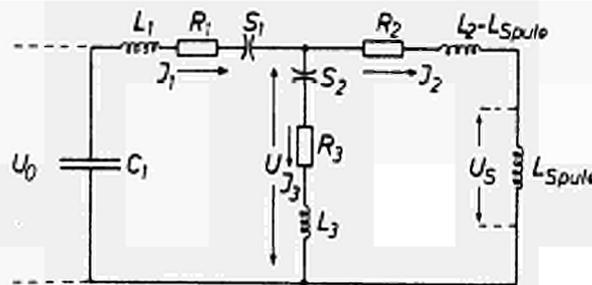


Abb. 1

I.2 Draufschaltung

Für  $-T \leq t \leq 0$  ist der Strom gegeben durch

$$\tilde{J}(t) = \frac{U_0}{\omega L_{12}} e^{-a(t+T)} \sin \omega(t+T). \quad (1)$$

Dabei ist

$$\left. \begin{aligned} L_{12} &= L_1 + L_2 \\ R_{12} &= R_1 + R_2 \\ a &= \frac{R_{12}}{2 \cdot L_{12}} \\ b &= \frac{1}{C_1 L_{12}} \\ \omega^2 &= b - a^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Wir normieren die Ladespannung durch

$$U_0 = 1 \quad (3)$$

und führen zur Vereinfachung der Schreibweise ein

$$\left. \begin{aligned} EST &= e^{-a T} \sin \omega \cdot T \\ ECT &= e^{-a T} \cos \omega \cdot T \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Dann ist

$$\tilde{J}(0) = \frac{1}{\omega \cdot L_{12}} EST, \quad (5)$$

und z.Zt.  $t = 0$ , d.h. im Augenblick der Kurzschlußschaltung, liegt über dem Crowbarzweig die Spannung

$$U(-0) = (R_2 - a L_2) \frac{1}{\omega L_{12}} EST + \frac{L_2}{L_{12}} ECT. \quad (6)$$

### I. 3 Kurzschlußschaltung

Für  $t \gg 0$  gelten die Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{d^2 J_1}{dt^2} + R_1 \frac{dJ_1}{dt} + \frac{J_1}{C_1} &= - \frac{dU}{dt} \\ L_2 \frac{d^2 J_2}{dt^2} + R_2 \frac{dJ_2}{dt} &= \frac{dU}{dt} \\ L_3 \frac{d^2 J_3}{dt^2} + R_3 \frac{dJ_3}{dt} &= \frac{dU}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

mit den Nebenbedingungen.

$$J_1 = J_2 + J_3 \quad (8)$$

und 
$$\dot{J}_1 = \dot{J}_2 + \dot{J}_3. \quad (9)$$

Die Anfangswerte für die Ströme sind

$$\left. \begin{aligned} J_1(0) = J_2(0) = \tilde{J}(0) &= \frac{1}{\omega L_{12}} \text{ EST,} \\ J_3(0) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Die Anfangswerte für die  $\dot{J}_v(0)$  ( $v = 1, 2, 3,$ ) sind

$$\left. \begin{aligned} \dot{J}_1(0) &= \frac{1}{L_1} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{C_1} \int_{-T}^0 \tilde{J} dt - U(+0) - R_1 J_1(0) \right] = \\ &= \frac{1}{L_1} \cdot \left[ \text{ECT} + \left( \frac{a}{\omega} - \frac{R_1}{\omega L_{12}} \right) \text{ EST} - U(+0) \right], \\ \dot{J}_2(0) &= \frac{1}{L_2} \cdot \left[ U(+0) - \frac{R_2}{\omega L_{12}} \text{ EST} \right], \\ \dot{J}_3(0) &= \frac{1}{L_3} U(+0). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Die Unterscheidung zwischen  $U(-0)$  und  $U(+0)$  ist notwendig. Ersetzt man nämlich in (11)  $U(+0)$  durch  $U(-0)$  aus (6), so ist die Bedingung (9) nur erfüllt für  $U(0) = 0$ . D.h. im allgemeinen Falle springt beim Kurzschluß die Spannung von  $U(-0)$  auf  $U(+0)$ . Man erhält  $U(+0)$  aus (11) und (9) zu

$$U(+0) = \frac{L_2 L_3}{L_{123}} \left[ \text{ECT} + \frac{a}{\omega} \text{ EST} \left( 1 - \frac{R_1 L_2 - R_2 L_1}{a L_{12} L_2} \right) \right] \quad (12)$$

mit

$$L_{123} = L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_3 L_1. \quad (13)$$

#### I.4 Laplace - Transformation

Die Behandlung des Problems erfolgt mittels Laplace-Transformation, die durch

$$f(t) \doteq \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt = f(p) \quad (14)$$

definiert ist.

Aus (7) und (8) erhält man im Unterbereich das Gleichungssystem

$$\left. \begin{aligned} (L_1 p^2 + R_1 p + \frac{1}{C_1}) J_1 + (L_2 p^2 + R_2 p) J_2 &= L_{12} p J_1(0) + R_{12} J_1(0) + \\ &+ L_1 \dot{J}_1(0) + L_2 \dot{J}_2(0), \end{aligned} \right\} (15)$$

$$\left. \begin{aligned} (L_1 p^2 + R_1 p + \frac{1}{C_1}) J_1 + (L_3 p^2 + R_3 p) J_3 &= L_1 p J_1(0) + R_1 J_1(0) + \\ &+ L_1 \dot{J}_1(0) + L_3 \dot{J}_3(0), \end{aligned} \right\} (16)$$

$$J_1 - J_2 - J_3 = 0. \quad (17)$$

Die Ströme ergeben sich daraus im Unterbereich zu

$$J_1 = \frac{G_{12} p^2 + G_{11} p + G_{10}}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (18)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} G_{12} &= J_1(0) \\ G_{11} &= \frac{1}{L_{123}} (L_1 R_{23} + L_2 R_{31} + L_3 R_{12}) J_1(0) + \dot{J}_1(0) \\ G_{10} &= \frac{1}{L_{123}} [R_{123} J_1(0) + L_1 R_{23} \dot{J}_1(0) + L_2 R_3 \dot{J}_2(0) + \\ &+ L_3 R_2 \dot{J}_3(0)] \end{aligned} \right\} (19)$$

und

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= \frac{1}{L_{123}} [L_1 R_{23} + L_2 R_{31} + L_3 R_{12}] , \\ a_1 &= \frac{1}{L_{123}} [R_{123} + \frac{L_{23}}{C_1}] , \\ a_0 &= \frac{1}{L_{123}} \cdot \frac{R_{23}}{C_1} . \end{aligned} \right\} (20)$$

Dabei ist

$$R_{123} = R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 . \quad (21)$$

Für den Strom im Lastkreis ergibt sich

$$J_2 = \frac{G_{22} p^2 + G_{21} p + G_{20}}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} + \frac{G_{23}}{p(p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0)} \quad (22)$$

mit

$$\left. \begin{aligned}
 G_{22} &= J_1(0) \\
 G_{21} &= \frac{1}{L_{123}} \left[ L_1 R_{23} + L_2 R_{31} + L_3 R_{12} \right] J_1(0) + \dot{j}_2(0) \\
 G_{20} &= \frac{1}{L_{123}} \left[ \left( R_{123} + \frac{L_2}{C_1} \right) J_1(0) + L_1 R_3 \dot{j}_1(0) + L_2 R_{31} \dot{j}_2(0) - L_3 R_1 \dot{j}_3(0) \right] \\
 G_{23} &= \frac{1}{L_{123}} \cdot \frac{R_2 J_1(0) + L_2 \dot{j}_2(0) - L_3 \dot{j}_3(0)}{C_1}
 \end{aligned} \right\} (23)$$

Für den Crowbarstrom folgt

$$J_3 = \frac{G_{31} p + G_{30}}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} + \frac{G_{33}}{p(p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0)} \quad (24)$$

mit

$$\left. \begin{aligned}
 G_{31} &= \dot{j}_3(0) \\
 G_{30} &= \frac{1}{L_{123}} \cdot \left[ -\frac{L_2}{C_1} J_1(0) + R_2 L_1 \dot{j}_1(0) - R_1 L_2 \dot{j}_2(0) + R_{12} L_3 \dot{j}_3(0) \right] \\
 G_{33} &= -G_{23}
 \end{aligned} \right\} (25)$$

Man zeigt leicht, daß die Bedingung (8) erfüllt ist.

### I.5 Rücktransformation in den Oberbereich

Der Nenner von Gl. (18) kann durch

$$(p - p_1) (p - p_2) (p - p_3) \quad (26)$$

dargestellt werden. Dabei sind entweder alle  $p_i$  reell (und  $< 0$ ) oder es sind zwei konjugiert - komplex (mit negativem Realteil). Es muß vorausgesetzt werden, daß alle  $p_i$  verschieden sind. Anderenfalls ergibt die Rücktransformation ungedämpfte Schwingungen, und es liegt kein Crowbarfall vor.

Eine (bzw. die) reelle Wurzel von

$$p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0 \quad (27)$$

kann leicht numerisch oder graphisch bestimmt werden. Da alle  $a_i$  reell und  $> 0$ , haben die Funktionen

$$y = p^2 (p + a_2) \quad (28)$$

und

$$\tilde{y} = -a_1 \left( p + \frac{a_0}{a_1} \right) \quad (29)$$

die in Abb. 2 skizzierte Gestalt. Zur Bestimmung der Schnittpunkte der Kurven  $y$  und  $\tilde{y}$  sind die Fälle zu unterscheiden

$$\frac{a_0}{a_1} > a_2 \quad \text{dann ist} \quad \tilde{y} = \tilde{y} \text{ (I),}$$

$$\frac{a_0}{a_1} = a_2 \quad \text{dann ist} \quad \tilde{y} = \tilde{y} \text{ (II) und } p_1 = -a_2,$$

$$\frac{a_0}{a_1} < a_2 \quad \text{dann ist} \quad \tilde{y} = \tilde{y} \text{ (III).}$$

(Eine eingehendere Betrachtung zeigt, daß nur der 3. Fall realisiert sein kann. Sonst treten negative Dämpfungen auf).

Die Schnittpunkte lassen sich z.B. durch Intervallteilung leicht in vorgegebene Grenzen einschließen.

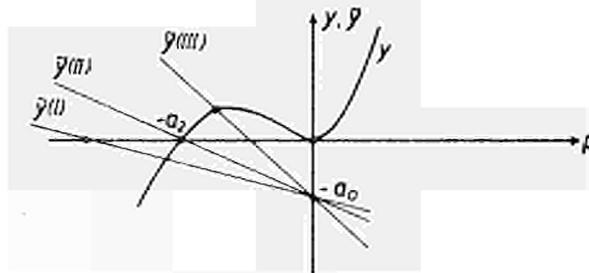


Abb. 2

Die beiden restlichen Wurzeln ergeben sich in bekannter Weise durch Reduktion der Gl. (27) auf eine quadratische Gleichung. Damit sind alle notwendigen Größen bestimmt, um mit Hilfe des Heaviside'schen Entwicklungssatzes die Lösung im Oberbereich anschreiben zu können.

I. 6 Der Batteriestrom  $J_1$

1. Alle Wurzeln reell

Seien die Wurzeln von (27)

$$p_\nu = -d_\nu \quad (d_\nu \text{ reell, } > 0)$$

und

$$\Psi'(p_\nu) = 3 d_\nu^2 - 2 a_2 d_\nu + a_1, \quad (30)$$

dann erhält man aus (18)

$$J_1(t) = F_{111} e^{-d_1 t} + F_{112} e^{-d_2 t} + F_{113} e^{-d_3 t} \quad (31)$$

mit

$$F_{11\nu} = \frac{1}{\Psi'(p_\nu)} (G_{12} d_\nu^2 - G_{11} d_\nu + G_{10}). \quad (32)$$

2. Zwei Wurzeln komplex

Seien die Wurzeln von (27)

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -d_1 \\ p_2 &= -d_2 + i\omega_2 \\ p_3 &= -d_2 - i\omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Ersetzt man in (30), (31) und (32)  $d_2$  durch  $-p_2$  und  $d_3$  durch  $-p_3$  (jeweils aus (33)), so folgt mit

$$\left. \begin{aligned} M &= 3 (d_2^2 - \omega_2^2) - 2a_2 d_2 + a_1 \\ N &= 2\omega_2 (a_2 - 3d_2) \\ P &= M (d_2^2 - \omega_2^2) - 2 N d_2 \omega_2 \\ Q &= 2 M d_2 \omega_2 + N (d_2^2 - \omega_2^2) \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

und

$$\left. \begin{aligned} F_{121} &= \frac{1}{\Psi'(p_1)} (G_{12} d_1^2 - G_{11} d_1 + G_{10}) \\ F_{122} &= \frac{2}{M^2 + N^2} (G_{12} P + G_{11} (N\omega_2 - M d_2) + G_{10} M) \\ F_{123} &= \frac{2}{M^2 + N^2} (G_{12} Q - G_{11} (M\omega_2 + N d_2) + G_{10} M) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

für den Batteriestrom

$$J_1(t) = F_{121} e^{-d_1 t} + F_{122} e^{-d_2 t} \cos \omega_2 t + F_{123} e^{-d_2 t} \sin \omega_2 t \quad (36)$$

### I. 7 Der Laststrom $J_2$

Laststrom  $J_2(t)$  und Crowbarstrom  $J_3(t)$  lassen sich bei Kenntnis von  $J_1(t)$  mit dem Faltungsintegral aus relativ einfachen Beziehungen zwischen  $J_2(p)$  resp.  $J_3(p)$  und  $J_1(p)$  ermitteln. Hierbei treten aber Terme der Form  $\frac{1}{r-d_1}$  auf, die für  $r \approx d_1$  Schwierigkeiten bei der numerischen Rechnung bereiten können.

#### 1. Alle Wurzeln reell

Der 1. Term von (22) ergibt bei der Rücktransformation formal den gleichen Ausdruck wie in Gl. (31), - die  $G_{12}$ ,  $G_{11}$ ,  $G_{10}$  sind nur durch die Größen  $G_{22}$ ,  $G_{21}$ ,  $G_{20}$  zu ersetzen. Der 2. Term von (22) liefert bei Verwendung des Faltungsintegrals Ausdrücke der Form

$$\frac{1}{\psi'(p_\nu)} \frac{G_{23}}{d_\nu} (1 - e^{-d_\nu t}), \quad \nu = 1, 2, 3.$$

Damit folgt für den Laststrom

$$J_2(t) = F_{211} e^{-d_1 t} + F_{212} e^{-d_2 t} + F_{213} e^{-d_3 t} + F_{214}, \quad (37)$$

wobei

$$\left. \begin{aligned} F_{21\nu} &= \frac{1}{\psi'(p_\nu)} \left( G_{22} d_\nu^2 - G_{21} d_\nu + G_{20} - \frac{G_{23}}{d_\nu} \right) \\ F_{214} &= G_{23} \left( \frac{1}{\psi'(p_1) d_1} + \frac{1}{\psi'(p_2) d_2} + \frac{1}{\psi'(p_3) d_3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

#### 2. Zwei Wurzeln komplex

$$J_2(t) = F_{221} e^{-d_1 t} + F_{222} e^{-d_2 t} \cos \omega_2 t + F_{223} e^{-d_2 t} \sin \omega_2 t + F_{224}, \quad (39)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{221} &= \frac{1}{\psi'(p_1)} \left( G_{22} d_1^2 - G_{21} d_1 + G_{20} - \frac{G_{23}}{d_1} \right) \\ F_{222} &= \frac{2}{M^2 + N^2} \left[ G_{22} p + G_{21} (N \omega_2 - M d_2) + G_{20} M - \frac{G_{23}}{d_2^2 + \omega_2^2} (M d_2 + N \omega_2) \right] \end{aligned} \right\} \quad (40a)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{223} &= \frac{2}{M^2+N^2} \left[ G_{22}^Q - G_{21} (M\omega_2 + Nd_2) + G_{20}N + \right. \\ &\quad \left. + \frac{G_{23}}{d_2^2 + \omega_2^2} (M\omega_2 - Nd_2) \right] \\ F_{224} &= \frac{1}{\Psi'(p_1)} \frac{G_{23}}{d_1} + \frac{2}{M^2+N^2} \frac{G_{23}}{d_2^2 + \omega_2^2} (Md_2 + N\omega_2) \end{aligned} \right\} \quad (40b)$$

### I. 8 Der Crowbarstrom $J_3(t)$

Auf die gleiche Weise wie in Abschnitt I.7 erhält man den Crowbarstrom  $J_3(t)$  aus den Gl. (24) und (25).

#### 1. Alle Wurzeln reell

$$J_3(t) = F_{311}e^{-d_1 t} + F_{312}e^{-d_2 t} + F_{313}e^{-d_3 t} + F_{314} \quad (41)$$

$$F_{31\nu} = \frac{1}{\Psi'(p_\nu)} \left[ -G_{31} d_\nu + G_{30} - \frac{G_{33}}{d_\nu} \right] \quad \nu = 1, 2, 3 \quad (42)$$

$$F_{314} = -F_{214}$$

#### 2. Zwei Wurzeln komplex

$$J_3(t) = F_{321}e^{-d_1 t} + F_{322}e^{-d_2 t} \cos \omega_2 t + F_{323}e^{-d_2 t} \sin \omega_2 t + F_{324} \quad (43)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{321} &= \frac{1}{\Psi'(p_1)} \left( -G_{31}d_1 + G_{30} - \frac{G_{33}}{d_1} \right) \\ F_{322} &= \frac{2}{M^2+N^2} \left[ G_{31} (N\omega_2 - Md_2) + G_{30}M - \right. \\ &\quad \left. - \frac{G_{33}}{d_2^2 + \omega_2^2} (Md_2 + N\omega_2) \right] \\ F_{323} &= \frac{2}{M^2+N^2} \left[ -G_{31} (M\omega_2 + Nd_2) + G_{30}N + \right. \\ &\quad \left. + \frac{G_{33}}{d_2^2 + \omega_2^2} (M\omega_2 - Nd_2) \right] \\ F_{324} &= -F_{224}. \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

I. 9 Die Spannung über der Lastspule  $U_s(t)$

Die Lastspule stelle einen rein induktiven Widerstand dar.

Dann ist

$$U_s = L_{\text{spule}} \cdot \frac{dJ_2}{dt} \quad (45)$$

1. Alle Wurzeln reell

Aus (45) folgt mit (37) und (38)

$$U_s(t) = F_{411} e^{-d_1 t} + F_{412} e^{-d_2 t} + F_{413} e^{-d_3 t}, \quad (46)$$

mit

$$F_{41\nu} = -L_{\text{spule}} \cdot d_\nu \cdot F_{21\nu} \quad (\nu = 1, 2, 3). \quad (47)$$

2. Zwei Wurzeln komplex

Aus (45) folgt mit (39) und (40)

$$U_s(t) = F_{421} e^{-d_1 t} + F_{422} e^{-d_2 t} \cos \omega_2 t + F_{423} e^{-d_2 t} \sin \omega_2 t. \quad (48)$$

Dabei ist

$$\left. \begin{aligned} F_{421} &= -L_{\text{spule}} \cdot d_1 \cdot F_{221} \\ F_{422} &= -L_{\text{spule}} (d_2 \cdot F_{222} - \omega_2 \cdot F_{223}) \\ F_{423} &= -L_{\text{spule}} (\omega_2 \cdot F_{222} + d_2 \cdot F_{223}). \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

I. 10 Die Spannung über dem Crowbar- bzw. Lastkreis  $U_{\text{Cr}}$

Die Spannung  $U_{\text{Cr}}$  über dem Crowbarkreis (das ist die Spannung  $U$  in Abb. 1) hat praktische Bedeutung nur bei  $t=0$  für die Triggerrung der Schaltfunkenstrecke  $S_2$ . Da ihre Kenntnis bei der Entwicklung bzw. Erprobung von Crowbarschaltern nützlich sein kann, soll sie hier angeschrieben und (im FORTRAN-Programm) mit berechnet werden. Es ist

$$U_{\text{Cr}} = L_3 \frac{dJ_3}{dt} + R_3 J_3. \quad (50)$$

1. Alle Wurzeln reell

Es folgt aus (50) mit (41) und (42)

$$U_{Cr} = F_{511}e^{-d_1 t} + F_{512}e^{-d_2 t} + F_{513}e^{-d_3 t} + F_{514}, \quad (51)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} F_{51\nu} &= (R_3 - L_3 d_\nu) F_{31\nu} \\ &\quad (\nu = 1, 2, 3), \\ F_{514} &= R_3 F_{314}. \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

2. Zwei Wurzeln komplex

Aus (50), (43) und (44) folgt

$$U_{Cr} = F_{521}e^{-d_1 t} + F_{522}e^{-d_2 t} \cos \omega_2 t + F_{523}e^{-d_2 t} \sin \omega_2 t + F_{524}, \quad (53)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} F_{521} &= (R_3 - L_3 d_1) F_{321} \\ F_{522} &= R_3 F_{322} - L_3 (F_{322} d_2 - F_{323} \omega_2) \\ F_{523} &= R_3 F_{323} - L_3 (F_{322} \omega_2 + F_{323} d_2) \\ F_{524} &= R_3 F_{324}. \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

I. 11 FORTRAN-Programm

1. Eingabe

Eingegeben werden die Größen  $F_1 (C_1)$ ,  $H_1 (L_1)$ ,  $H_2 (L_2)$ ,  $H_3 (L_3)$ ,  $HSP (L_{Last})$ ,  $R_1 (R_1)$ ,  $R_2 (R_2)$ ,  $R_3 (R_3)$ ,  $FT$ ,  $HW$ . Die in Klammern stehenden Größen bezeichnen die Schaltelemente in Abb. 1, - Kapazität in  $\mu F$ , Induktivitäten in  $\mu Henry$ , Widerstände in Ohm.

$FT$  und  $HW$  bestimmen den Zeitpunkt  $TAUO (T)$  für die Kurzschlußschaltung über  $S_2$ . Dabei ist  $FT$  eine Zahl zwischen  $-1$  und  $+1$ ,

HW eine ganze Zahl  $\geq 0$ . Der Zeitpunkt der Kurzschlußschaltung bestimmt sich für  $FT > 0$  nach

$$TAUO = TMAX + FT \cdot (TNULL - TMAX) + HW \cdot TNULL,$$

für  $FT < 0$  nach

$$TAUO = TMAX + FT \cdot TMAX + HW \cdot TNULL$$

gemäß Abb. 3.

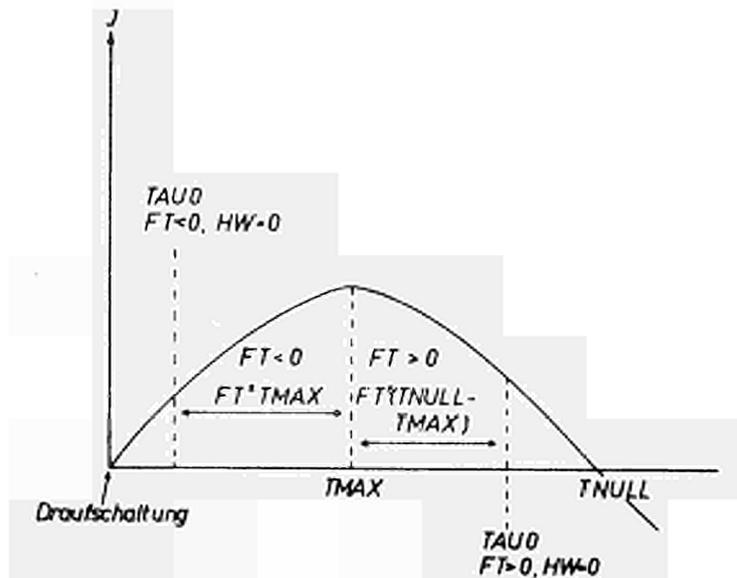


Abb. 3

## 2. Ausgabe über Schreibmaschine

Zur Kennzeichnung werden zunächst die Eingabedaten herausgeschrieben. Danach werden berechnet und geschrieben die Größen A (=a in Gl. (1)), FRQ (=  $\omega$  in Gl. (1)) und TAUO (=T, der Zeitpunkt der Kurzschlußschaltung); weiter die Größen UMIN (=U(-0) in Gl. (6)), UPLUS (=U(+0) in Gl. (12)) und UDIF = UMIN - UPLUS; in der nächsten Zeile stehen  $\dot{J}_1(0)$ ,  $\dot{J}_2(0)$ ,  $\dot{J}_3(0)$  (ohne Benennung) und SUM. IPUNKT (=  $\dot{J}_1(0) - \dot{J}_2(0) - \dot{J}_3(0)$ ); danach stehen die Koeffizienten der kubischen Gleichung (27).

In der folgenden Zeile steht zunächst eine 1 (wenn alle Wurzeln reell) oder eine 2 (wenn zwei Wurzeln komplex). Im Falle "1" folgen als DPFGN (=Dämpfungen) die Größen  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , im

Falle "2" die Größen  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $\omega_2$ . Die Größe RL bedeutet  $(R_2+R_3)/(L_2+L_3)$  (sie stimmt erfahrungsgemäß sehr gut mit  $d_1$  überein).

Reduziert man mit Hilfe von  $d_1$  Gl. (27) auf eine quadratische Gleichung, so bleibt im allgemeinen ein Rest, der in der nächsten Zeile als REST KUB. Gl. bezeichnet ist.

Der größte Wert von  $1/d$  ergibt die Zeit, nach der der bei TAUO vorhandene Stromwert auf den e-ten Teil abgefallen ist. Diese Zeit "EXP. ABFALL NACH ..." wird nur dann in  $\mu$ sec angegeben, wenn die Größen in der Eingabe in den vorgeschriebenen Einheiten angegeben sind.

CUR10 und USPO sind der Laststrom und die Spulenspannung zum Kurzschlußzeitpunkt (berechnet aus Gl. (1)).

Die letzten 5 Zeilen geben für die Ströme CUR1 ( $=J_1$ ), CUR2 ( $=J_2$ ), CUR3 ( $=J_3$ ) und die Spannungen USP ( $=U_s$ ) und UCR ( $=U_{Cr}$ ) die Komponenten F111, F112 ... aus den Abschnitten 6...10 und die Momentanwerte für den Kurzschlußzeitpunkt an. (Es müssen deshalb CUR10 = CUR1 = CUR2 und CUR3 = 0 sein. Im allgemeinen ist USPO  $\neq$  USP, s. Abschnitt I.3). Alle Werte gelten für die Ladespannung  $U_0 = 1$  V.

### 1.3 Ausgabe über Lochkarten

Über Lochkarten werden ausgegeben die Größen TXPL, CUR2T, USPT (für das Zeitintervall von der Draufschaltung bis zur Kurzschlußschaltung) und die Größen TXPL, CUR1T, CUR2T, CUR3T, USPT, UCRT (für das Zeitintervall von der Kurzschlußschaltung bis zum  $1/e$  - Abfall des Laststromes). TXPL = 1 entspricht der Summe dieser beiden Zeitintervalle.

Das FORTRAN-Programm für die IBM 1620 findet sich im Anhang.

### I. 12 Beispiel

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen Oszillogramme und berechnete Kurven für  $U_s(t)$  und  $J_2(t)$ . (Dabei wurde nur ein relativ hochinduktiver Bandschalter als Crowbarschalter benutzt). Die Werte für die Entladungsapparatur waren hierbei:

$$C_1 = 18 \mu\text{F}, L_1 = 8,67 \text{ nH}, L_2 = 65 \text{ nH}, L_3 = 20 \text{ nH},$$

$$L_{\text{spule}} = 60 \text{ nH}, R_1 = 4,92 \text{ m}\Omega, R_2 = 0,98 \text{ m}\Omega, R_3 = 2,42 \text{ m}\Omega$$

Dabei konnte nur die Summe  $R_1 + R_2 = 5,9 \text{ m}\Omega$  aus der Dämpfung ziemlich genau bestimmt werden. Die einzelnen Werte  $R_1, R_2, R_3$  sind mit einem Fehler von ca. 10-15% behaftet. Der Zeitpunkt für die Triggerung des Crowbarschalters lag in der 1. Halbwelle (HW = 0) bei  $\text{TAUO} = \text{TMAX} + 0,6 (\text{TNULL} - \text{TMAX})$ , (d.h. etwa bei  $\text{TAUO}$  für  $\text{FP} > 0$ , HW = 0 in Abb. 3).

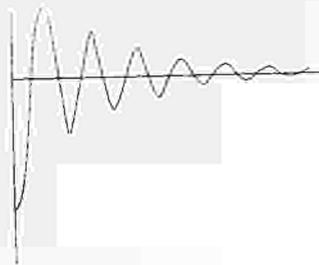
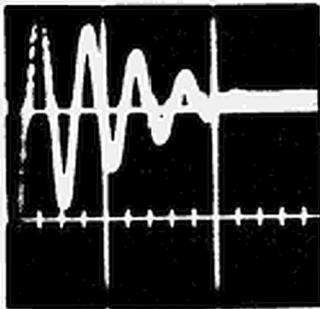


Abb. 4

Spulenspannung  $U_s(t)$   
(oszillographierte und  
berechnete Kurve).

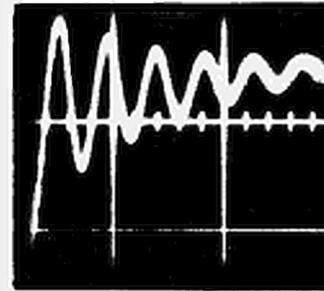


Abb. 5

Laststrom  $J_2(t)$   
(oszillographierte und  
berechnete Kurve).

Schreibmaschinenausgabe:

CROWBAR

1.800E+01 8.670E-03 6.500E-02 2.000E-02 6.000E-02  
4.920E-03 9.800E-04 2.420E-03 .60 0.

A= .04004343 FRQ= .867 TAU0= 2.875

UMIN= -.6411 UPLUS= -.4637 UDIF= -.1773

-30.4504410 -7.2617004 -23.1887400 SUM. IPUNKT= -.0000010

KOEFF. KUB. GL.= 3.066E-01 2.327E-00 9.273E-02  
2 DPFGN 40.022E-03 13.330E-02 15.163E-01 RL= 40.000E-03  
REST KUB. GL.= .19000000E-07

EXP. ABFALL NACH 25.00 MIKROSEK.

CUR10= 8.403 USPO= -.599

-7.253E-03 8.411E-00-1.934E+01 CUR1= 8.403  
6.189E-00 2.214E-00-4.430E-00 0.000E-99CUR2= 8.403  
-6.196E-00 6.196E-00-1.491E+01-0.000E-99CUR3= 0.000  
2.476E-01 7.014E-00 2.767E-00 USP= -.435  
-1.003E-02-4.537E-01-1.842E-01 0.000E-99 UCR= -.463

FORTRAN - Programm

```
CRCWBAR
DIMENSION H41(3),F51(3)
PI=3.141593
PIH=PI/2.
DIMENSION D(3),CD(3),PSIS(3),DT(3),EDT(3),F11(3),F21(3),F31(3)
1 REAC 2,F1,H1,H2,H3,HSP
2 FCRMAT (5E10.3)
  IF(F1) 9,106,9
9 REAC 3,R1,R2,R3,FT,HW
3 FCRMAT (3E10.3,F6.2,F3.0)
  PRINT 54
54 FCRMAT(36HSIMPLE CROWBAR  PROGRAMM VCM 7.10.64//)
  PRINT 2,F1,H1,H2,H3,HSP
  PRINT 3,R1,R2,R3,FT,HW
  PUNCH 8
8 FCRMAT (1HN)
  PUNCH 2,F1,H1,H2,H3,HSP
  PUNCH 3,R1,R2,R3,FT,HW
  III=1
  H12=H1+H2
  H23=H2+H3
  H31=H3+H1
  R12=R1+R2
  R23=R2+R3
  R31=R3+R1
  RQU=R23/H23
  A=0.5*R12/H12
  B=1./(F1*H12)
  FRQC=B-A*A
  FRQ=SQRTF(FRQC)
  TMAX=ATANF(FRQ/A) /FRQ
  TNULL=PI/FRQ
  IF(FT)200,200,201
200 TAUC=TMAX+FT*TMAX+HW*TNULL
  GC TC 202
201 TAUC=TMAX+FT*(TNULL-TMAX)+HW*TNULL
202 PRINT 5,A,FRQ,TAUC
5 FCRMAT (/2HA=,F13.8,2X4HFRQ=,F6.3,2X5HTAUO=,F6.3)
  ET=EXPF(-A*TAUC)
  ST=SINF(FRQ*TAUC)
  CT=CCSF(FRQ*TAUC)
  EST=ET*ST
  ECT=ET*CT
  CUR10=EST/(F12*FRQ)
  USPC=-HSP*(A*EST-FRQ*ECT)/(FRQ*F12)
  HIRJK=H1*R23+H2*R31+H3*R12
  HIJ=H1*H2+H2*H3+H3*H1
  RIJ=R1*R2+R2*R3+R3*R1
  UMIN=((R2-A*H2)*EST/FRQ+H2*ECT)/H12
  UPLUS=H2*H3*(ECT+A*EST*(1.-(R1*H2-R2*H1)/(A*H12*H2)))/FRQ/HIJ
  UDIF=UMIN-UPLUS
  PRINT 6,UMIN,UPLUS,UDIF
6 FCRMAT (/5HUMIN=,F8.4,2X6HUPLUS=,F8.4,2X5HUDIF=,F8.4)
  S10=(EST*(A-R1/H12)/FRQ+ECT-UPLUS)/H1
  S20=(UPLUS-R2*EST/(FRQ*H12))/H2
  S30=UPLUS/H3
  SUM=S10-S20-S30
  PRINT 7,S10,S20,S30,SUM
7 FCRMAT (/3F14.7,2X12HSUM. 1PUNKT=,F14.7)
  A2=HIRJK/HIJ
```

```
A1=(RIJ+F23/F1)/HIJ
AO=R23/(F1*HIJ)
PRINT 4,A2,A1,AC
4  FCRMAT (/16HKCEFF. KUB. GL.=,3E1C.3)
   G12=CUR1C
   G11=HIRJK*G12/HIJ+S10
   G10=(RIJ*G12+H1*R23*S1C+H2*R3*S20+H3*R2*S3C)/HIJ
   G22=G12
   G21=HIRJK*C22/HIJ+S20
   G20=((RIJ+H2/F1)*G22+H1*R3*S10+H2*R31*S20-H1*H3*S3C)/HIJ
   G23=(R2*G22+H2*S20-H3*S30)/(HIJ*F1)
   G31=S3C
   G30=(-H2*G22/F1+H1*R2*S10-R1*H2*S20+H3*R12*S3C)/HIJ
   G33=-G23
   AA=AO/A1
   IF(AA-A2)10,11,12
11  X1=-.2
   GC TO 13
10  XQ=-A2
   XR=-AA
18  XC=ABSF(XC-XR)
   XM=C.5*(XC+XR)
   XQT=-XC/XM
   IF(XQT-1.E-C6)14,15,15
15  XM2=XM*XM
   Y1=XM2*(XM+A2)
   Y2=-A1*(XM+AA)
   IF(Y1-Y2)16,16,17
16  XC=XM
   GC TO 18
17  XR=XM
   GC TO 18
14  X1=XM
   GC TO 13
12  XQ=-AA
   XR=-A2
   GO TO 18
13  REST=AO+X1*(A1+X1*(A2+X1))
   B1=A2+X1
   BC=A1+X1*(A2+X1)
   IF(B1)20,20,21
20  PRINT 22
22  FCRMAT (//28HKCEFFIZIENT B1 NICHT NEGATIV//)
   GC TO 1
21  DISKR=B1*B1/4.-BC
   IF(DISKR)23,24,25
24  PRINT 26
26  FORMAT (//39HDISKRIMINANTE IST NULL,NUK ZWEI WURZELN//)
   GC TO 1
25  K=1
   X2=-0.5*B1+SQRTF(DISKR)
   X3=-0.5*B1-SQRTF(DISKR)
   D(1)=-X1
   E(2)=-X2
   D(3)=-X3
30  PRINT 29,K,C(1),C(2),D(3),RQU
29  FCRMAT (12,2*5HDPFCN,3E11.3,2X3HRL=,D11.3)
   PRINT 19, REST
19  FCRMAT (14HREST KUB. GL.=,E14.8)
   GC TO (27,7C),K
```

```
23      K=2
        D(1)=-X1
        D(2)=0.5*B1
        D(3)=SQRTF(-DISKR)
        GC TO 30
27      DC 28 L=1,3
        DD(L)=D(L)*C(L)
        PSIS(L)=3.*CD(L)-2.*A2*D(L)+A1
        F11(L)=(G12*DD(L)-G11*D(L)+G10)/PSIS(L)
        F21(L)=(G22*DD(L)-G21*D(L)+G20)/PSIS(L)
        F31(L)=(-G31*D(L)+G30-G33/D(L))/PSIS(L)
        F41(L)=F21(L)*D(L)
28      F51(L)=(R3-H3*D(L))*F31(L)
        F214=G23*(1./(D(1)*PSIS(1))+1./(D(2)*PSIS(2))+1./(D(3)*PSIS(3)))
        F314=-F214
        F514=R3*F314
        CUR1=F11(1)+F11(2)+F11(3)
        CUR2=F21(1)+F21(2)+F21(3)+F214
        CUR3=F31(1)+F31(2)+F31(3)+F314
        USP=F41(1)+F41(2)+F41(3)
        UCR=F51(1)+F51(2)+F51(3)+F514
        PRINT 32,F11(1),F11(2),F11(3),CLR1
        PRINT 34,F21(1),F21(2),F21(3),F214,CUR2
        PRINT 33,F31(1),F31(2),F31(3),F314,CUR3
        PRINT 35,F41(1),F41(2),F41(3),USP
        PRINT 31,F51(1),F51(2),F51(3),F514,UCR
32      FORMAT(/3E10.3,10X5HCUR1=,F8.3)
34      FCRMAT(4E10.3,5HCUR2=,F8.3)
33      FCRMAT(4E10.3,5HCUR3=,F8.3)
35      FCRMAT(3E10.3,11X4HUSP=,F8.3)
31      FORMAT(4E10.3,1X4HUCR=,F8.3//)
        PRINT 55
55      FCRMAT (46(/))
70      IF(C(1)-C(2))36,36,37
36      DX=C(1)
        GC TO 38
37      DX=C(2)
38      IF(K-1) 39,39,40
39      IF(CX-C(3)) 41,42,43
42      PRINT 44
44      FCRMAT (//23HZwEI IDENTISCHE WURZELN//)
        GC TO 1
41      DY=DX
        GC TO 45
43      DY=C(3)
45      IF(CY-RQU) 46,46,47
46      TEXP=1./DY
        GO TO 49
47      TEXP=1./RQU
        GC TO 49
40      DY=CX
        GC TO 45
49      PRINT 50,TEXP
50      FCRMAT(/16HEXP. ABFALL NACH,F8.2,1X9HMIKROSEK.)
        PRINT 71,CUR10,USPO
71      FORMAT(/6HCUR1C=,1XF7.3,2X5HUSPC=,1XF7.3)
        TAU=TAU0+TEXP
        T=0.
        TXPL=0.
        TCIF=TAU/50C.
```

```
DXPL=1./500.
CURCO=1./(FRQ*H12)
USPCO=-HSP*CURCO
108 IF(T-TAU0)109,110,110
109 I=1
    AT=A*T
    FRQT=FRQ*T
    EAT=EXPF(-AT)
    ESFT=EAT*SINF(FRQT)
    ECFT=EAT*CCSF(FRQT)
    CURCOT=CURCO*ESFT
    USPCOT=USPCO*(A*ESFT-FRQ*ECFT)
    PUNCH 111, TXPL, CURCOT, USPCOT
111 FORMAT(F7.4,10XF10.4,10XF10.4)
112 IF(TXPL-1.)112,1,1
    T=T+TDIF
    TXPL=TXPL+DXPL
    GO TO (108,114),I
110 I=2
    T=T-TAUC
114 GC TO(63,100),K
    63 DC 65L=1,3
    DT(L)=D(L)*T
    65 EDT(L)=EXPF(-DT(L))
    CUR1T=0.
    CUR2T=0.
    CUR3T=0.
    USPT=0.
    UCRT=0.
    GO TO (64,107),K
    64 DO 51L=1,3
    CUR2T=CUR2T+F21(L)*EDT(L)
    USPT=USPT+F41(L)*EDT(L)
    CUR3T=CUR3T+F31(L)*EDT(L)
    CUR1T=CUR1T+F11(L)*EDT(L)
    51 UCRT=UCRT+F51(L)*EDT(L)
    CUR2T=CUR2T+F214
    CUR3T=CUR3T+F314
    USPT=-HSP*USPT
    UCRT=UCRT+R*F514
    52 PUNCH 53, TXPL, CUR1T, CUR2T, CUR3T, USPT, UCRT
    53 FCMAT (F7.4,5H10.4)
    GC TO 113
    100 GC TO(120,63),111
    120 DD(1)=D(1)*D(1)
    DD(2)=D(2)*D(2)
    DD(3)=D(3)*D(3)
    PHM=3.*(DD(2)-DD(3))-2.*A2*D(2)+A1
    PHN=2.*D(3)*(A2-3.*D(2))
    PHNEN=PHM*PHM+PHN*PHN
    PHP=PHM*(DD(2)-DD(3))-2.*PHN*D(2)*D(3)
    PHQ=2.*PHM*D(2)*D(3)+PHN*(DD(2)-DD(3))
    G12=CUR10
    G11=HIRJK*G12/HIJ+S10
    G10=((R1*R2+R12*R3)*G12+H1*R23*S10+H2*R3*S20+H3*R2*S30)/HIJ
    G22=G12
    G21=HIRJK*C22/HIJ+S20
    G20=((RIJ+H2/F1)*C22+H1*R3*S10+H2*R31*S20-R1*H3*S3C)/HIJ
    G23=(R2*G22+H2*S20-H3*S30)/(HIJ*F1)
    G31=S3C
```

```
G3C=(H1*R2*S10-H2*R1*S20+H3*R12*S30-H2*G12/F1)/HIJ
G33=-G23
PSIS(1)=3.*CC(1)-2.*A2*D(1)+A1
DDD=1./(DD(2)+CC(3))
QMN=2./PHNEA
F121=(G12*DC(1)-G11*D(1)+G1C)/PSIS(1)
F122=QMN*(G12*PHP+G11*(PHN*C(3)-PHM*D(2))+G10*PHM)
F123=QMN*(G12*PHQ-G11*(PHM*C(3)+PHN*D(2))+G10*PHN)
F221=(G22*DC(1)-G21*D(1)+G2C-G23/C(1))/PSIS(1)
F222=QMN*(G22*PHP+G21*(PHN*C(3)-PHM*D(2))+G20*PHM)
F223=QMN*(G22*PHQ-G21*(PHM*C(3)+PHN*D(2))+G20*PHN)
F224=G23*(1./(PSIS(1)*D(1))+QMN*DCU*(PHM*D(2)+PHN*C(3)))
F321=(-G31*D(1)+G3C-G33/D(1))/PSIS(1)
F322=QMN*(G31*(PHN*D(3)-PHM*D(2))+G30*PHM)
F323=QMN*(-G31*(PHM*D(3)+PHN*D(2))+G30*PHN)
F324=-F224
F421=F221*D(1)
F422=F222*D(2)-F223*D(3)
F423=F222*D(3)+F223*D(2)
F521=(R3-H3*D(1))*F321
F522=R3*F322-H3*(D(2)*F322-D(3)*F323)
F523=R3*F323-H3*(D(3)*F322+D(2)*F323)
F524=R3*F324
CUR1=F121+F122
CUR2=F221+F222+F224
CUR3=F321+F322+F324
USP=-HSP*(F421+F422)
UCR=F521+F522+F524
PRINT 102,F121,F122,F123,CUR1
PRINT 104,F221,F222,F223,F224,CUR2
PRINT 103,F321,F322,F323,F324,CUR3
PRINT 105,F421,F422,F423,USP
PRINT 101,F521,F522,F523,F524,UCR
PRINT 130
130 FCRMAT (48(/))
    I11=2
102 FCRMAT (/3E10.3,1CX5HCUR1=,F8.3)
104 FCRMAT (4E10.3,5HCUR2=,F8.3)
103 FCRMAT (4E10.3,5HCUR3=,F8.3)
105 FCRMAT (3E10.3,11X4HUSP=,F8.3)
101 FCRMAT (4E10.3,1X4HLCR=,F8.3)
GC TO 63
107 ESTT=ECT(2)*SINF(DT(3))
    ECTT=ECT(2)*CCSF(DT(3))
    CUR1T=F121*EDT(1)+F122*ECTT+F123*ESTT
    CUR2T=F221*EDT(1)+F222*ECTT+F223*ESTT+F224
    CUR3T=F321*EDT(1)+F322*ECTT+F323*ESTT+F324
    USPT=F421*EDT(1)+F422*ECTT+F423*ESTT
    USPT=-HSP*USPT
    UCRT=F521*EDT(1)+F522*ECTT+F523*ESTT+F524
GC TO 52
106 CALL EXIT
END
```

## Teil II. Power-Crowbar

### II. 1 Ersatzschaltbild

Das betrachtete Ersatzschaltbild zeigt Abb. 1. Bei  $t = -T$  erfolgt die "Draufschtaltung" der Kondensatorbatterie ( $C_1, L_1, R_1$ ) auf den Lastkreis ( $C_2, L_2, R_2$ ) über den Schalter  $S_1$ . Bei  $t = 0$  erfolgt über den Schalter  $S_2$  die "Kurzschlußschaltung". Der Kurzschluß- oder Crowbarkreis bestehe aus  $C_3, L_3, R_3$ . Die die Schalter  $S_1$  und  $S_2$  charakterisierenden Schaltelemente (ohmscher Widerstand und Induktivität) seien in  $L_1, R_1$  resp.  $L_3, R_3$  mit einbezogen.

Bei der hier betrachteten "Power-Crowbar"-Schaltung wird also z.Zt.  $t = 0$  die Energie des Kondensators  $C_3$  auf einen bereits schwingenden elektrischen Kreis geschaltet. Sind dagegen im Last- und Crowbarkreis keine Kapazitäten vorhanden, wird also z.Zt.  $t = 0$  durch  $S_2$  nur ein Kurzschluß im Schwingkreis erzeugt, so soll von einer einfachen "Crowbar"-Schaltung gesprochen werden, wie sie in Teil I behandelt wurde.

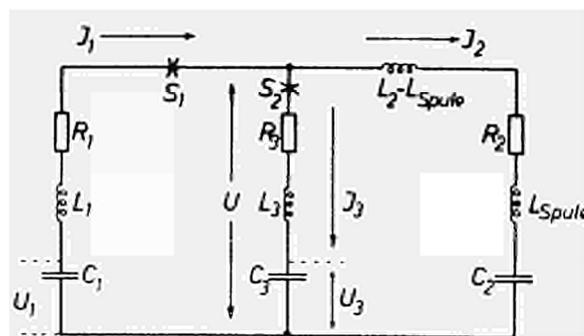


Abb. 1

II. 2 Draufschtaltung

Für  $-T \leq t \leq 0$  ist der Strom gegeben durch

$$\tilde{J}(t) = \frac{U_1}{\omega L_{12}} e^{-a(t+T)} \sin \omega \cdot (t+T), \quad (1)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} L_{12} &= L_1 + L_2 \\ R_{12} &= R_1 + R_2 \\ C_{12} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \\ a &= \frac{R_{12}}{2 L_{12}} \\ b^2 &= \frac{C_{12}}{L_{12}} \\ \omega^2 &= b^2 - a^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Führt man zur Vereinfachung der Schreibweise die Bezeichnungen ein

$$\left. \begin{aligned} EST &= e^{-aT} \sin \omega T \\ ECT &= e^{-aT} \cos \omega T, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

dann ist

$$\tilde{J}(0) = \frac{U_1}{\omega L_{12}} EST. \quad (4)$$

Die z.Zt.  $t = 0$  über Crowbar- bzw. Lastkreis liegende Spannung ist

$$\left. \begin{aligned} U(-0) &= U_1 \frac{a}{\omega} EST \left( \frac{R_2}{a L_{12}} - \frac{L_2}{L_{12}} - \frac{1}{C_{12} C_2} \right) + \\ &+ U_1 ECT \left( \frac{L_2}{L_{12}} - \frac{1}{C_{12} C_2} \right) + \frac{U_1}{C_{12} C_2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

II. 3 Crowbarschaltung

Für  $t \geq 0$  gelten die Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{d^2 J_1}{dt^2} + R_1 \frac{dJ_1}{dt} + \frac{J_1}{C_1} &= - \frac{dU}{dt} \\ L_2 \frac{d^2 J_2}{dt^2} + R_2 \frac{dJ_2}{dt} + \frac{J_2}{C_2} &= \frac{dU}{dt} \\ L_3 \frac{d^2 J_3}{dt^2} + R_3 \frac{dJ_3}{dt} + \frac{J_3}{C_3} &= \frac{dU}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

mit den Nebenbedingungen

$$J_1 = J_2 + J_3 \quad (7)$$

und 
$$\dot{J}_1 = \dot{J}_2 + \dot{J}_3. \quad (8)$$

Die Anfangswerte für die Ströme sind

$$\left. \begin{aligned} J_1(0) = J_2(0) = \tilde{J}(0) &= \frac{U_1}{\omega L_{12}} \text{ EST,} \\ J_3(0) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Die Anfangswerte für die  $\dot{J}_\nu$  ( $\nu = 1, 2, 3$ ) sind

$$\left. \begin{aligned} \dot{J}_1(0) &= \frac{1}{L_1} \left[ U_1 - U(+0) - R_1 J_1(0) - \frac{1}{C_1} \int_{-T}^0 \tilde{J} dt \right] = \\ &= \frac{U_1}{L_1} \left[ \frac{C_1}{C_1 + C_2} + \frac{1}{C_1 C_{12}} \text{ EST} + \left( \frac{a}{\omega C_{12} C_1} - \frac{R_1}{\omega L_{12}} \right) \text{ EST} \right] - \frac{U(+0)}{L_1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{J}_2(0) &= \frac{1}{L_2} \left[ U(+0) - R_2 J_2(0) - \frac{1}{C_2} \int_{-T}^0 \tilde{J} dt \right] = \\ &= \frac{U_1}{L_2} \left[ \left( \frac{a}{\omega C_2 C_{12}} - \frac{R_2}{\omega L_{12}} \right) \text{ EST} + \frac{1}{C_2 C_{12}} \text{ ECT} - \frac{1}{C_2 C_{12}} \right] + \\ &\quad + \frac{U(+0)}{L_2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\dot{j}_3(0) = \frac{U(+0)}{L_3} - \frac{U_3}{L_3}. \quad (12)$$

Setzt man in (10) und (11) für  $U(+0)$  den Ausdruck  $U(-0)$  aus (5) ein, so erkennt man leicht, daß  $\dot{j}_1(0) = \dot{j}_2(0)$ , und es ist mithin die Bedingung (8) nur erfüllt, wenn gilt  $U(-0) = U_3$ . Das ist aber im allgemeinen, d.h. bei beliebiger Wahl des Zeitpunktes für die Schaltung des Crowbarschalters  $S_2$ , nicht erfüllt. Im allgemeinen Fall ergibt sich deshalb beim Einschalten des Crowbarkreises ein Spannungssprung  $U(-0) \rightarrow U(+0)$ . Die Spannung  $U(+0)$  erhält man aus (10), (11), (12) zu

$$U(+0) = \frac{U_1}{L_{123}} \left\{ \frac{C_1 L_{12} L_3}{C_1 + C_2} + \text{ECT} \frac{L_3}{C_{12}} \cdot \left( \frac{L_2}{C_1} - \frac{L_1}{C_2} \right) + \right. \\ \left. + \text{EST} \frac{L_3}{C_{12}} \left[ \frac{a}{C_{12}} \left( \frac{L_2}{C_1} - \frac{L_1}{C_2} \right) - \frac{1}{L_{12}} (R_1 L_2 - R_2 L_1) \right] \right\} + \\ \left. + \frac{L_1 L_2}{L_{123}} U_3 \right\} \quad (13)$$

mit

$$L_{123} = L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_3 L_1. \quad (14)$$

## II. 4 Laplace-Transformation

Die Behandlung des Problems erfolgt mittels Laplace-Transformation, die durch

$$f(t) \doteq \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt = f(p) \quad (15)$$

definiert ist.

Aus (6) und (7) erhält man im Unterbereich das Gleichungssystem

$$\left. \begin{aligned} (L_1 p^2 + R_1 p + \frac{1}{C_1}) J_1 + (L_2 p^2 + R_2 p + \frac{1}{C_2}) J_2 &= L_{12} p J_1(0) + R_{12} J_1(0) + \\ &+ L_1 \dot{j}_1(0) + L_2 \dot{j}_2(0) \end{aligned} \right\} (16)$$

$$\left. \begin{aligned} (L_1 p^2 + R_1 p + \frac{1}{C_1}) J_1 + (L_3 p^2 + R_3 p + \frac{1}{C_3}) J_3 = L_1 p J_1(0) + R_1 J_1(0) + \\ + L_1 \dot{J}_1(0) + L_3 \dot{J}_3(0) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$J_1 - J_2 - J_3 = 0, \quad (18)$$

dessen Lösungen die Ströme im Unterbereich darstellen.

Es ist

$$J_1 = \frac{G_{13} p^3 + G_{12} p^2 + G_{11} p + G_{10}}{p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (19)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} G_{13} &= J_1(0) \\ G_{12} &= \frac{1}{L_{123}} (L_1 R_{23} + L_2 R_{31} + L_3 R_{12}) J_1(0) + \dot{J}_1(0) \\ G_{11} &= \frac{1}{L_{123}} \left[ (R_{123} + \frac{L_{12}}{C_3} + \frac{L_1}{C_2}) J_1(0) + \right. \\ &\quad \left. + L_1 R_{23} \dot{J}_1(0) + L_2 R_3 \dot{J}_2(0) + L_3 R_2 \dot{J}_3(0) \right] \\ G_{10} &= \frac{1}{L_{123}} \left[ (\frac{R_{12}}{C_3} + \frac{R_1}{C_2}) J_1(0) + \right. \\ &\quad \left. + L_1 C_{23} \dot{J}_1(0) + \frac{L_2}{C_3} \dot{J}_2(0) + \frac{L_3}{C_2} \dot{J}_3(0) \right] \end{aligned} \right\} \quad (20a)$$

$$\left. \begin{aligned} a_3 &= \frac{1}{L_{123}} (L_1 R_{23} + L_2 R_{31} + L_3 R_{12}) \\ a_2 &= \frac{1}{L_{123}} (R_{123} + L_1 C_{23} + L_2 C_{31} + L_3 C_{12}) \\ a_1 &= \frac{1}{L_{123}} (R_1 C_{23} + R_2 C_{31} + R_3 C_{12}) \\ a_0 &= \frac{C_{123}}{L_{123}} \end{aligned} \right\} \quad (20b)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{123} &= R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 \\ C_{123} &= \frac{1}{C_1 C_2} + \frac{1}{C_2 C_3} + \frac{1}{C_3 C_1} \end{aligned} \right\} \quad (20b)$$

Für den Laststrom ergibt sich

$$J_2 = \frac{G_{23} p^3 + G_{22} p^2 + G_{21} p + G_{20}}{p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (21)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} G_{23} &= J_1(0) \\ G_{22} &= \frac{1}{L_{123}} (L_1 R_{23} + L_2 R_{31} + L_3 R_{12}) J_1(0) + \dot{J}_2(0) \\ G_{21} &= \frac{1}{L_{123}} \left[ \left( R_{123} + \frac{L_{12}}{C_3} + \frac{L_2}{C_1} \right) J_1(0) + \right. \\ &\quad \left. + L_1 R_3 \dot{J}_1(0) + L_2 R_{31} \dot{J}_2(0) - L_3 R_1 \dot{J}_3(0) \right] \\ G_{20} &= \frac{1}{L_{123}} \left[ \left( \frac{R_{12}}{C_3} + \frac{R_2}{C_1} \right) J_1(0) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{L_1}{C_3} \dot{J}_1(0) + L_2 C_{31} \dot{J}_2(0) - \frac{L_3}{C_1} \dot{J}_3(0) \right] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Der Crowbarstrom ist

$$J_3 = \frac{G_{32} p^2 + G_{31} p + G_{30}}{p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (23)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} G_{32} &= \dot{J}_3(0) \\ G_{31} &= \frac{1}{L_{123}} \left[ \left( \frac{L_1}{C_2} - \frac{L_2}{C_1} \right) J_1(0) + L_1 R_2 \dot{J}_1(0) - \right. \\ &\quad \left. - L_2 R_1 \dot{J}_2(0) + L_3 R_{12} \dot{J}_3(0) \right] \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$G_{30} = \frac{1}{L_{123}} \left[ \left( \frac{R_1}{C_2} - \frac{R_2}{C_1} \right) J_1(0) + \frac{L_1}{C_2} \dot{J}_1(0) - \right. \\ \left. - \frac{L_2}{C_1} \dot{J}_2(0) + L_3 C_{12} \dot{J}_3(0) \right] \quad (24)$$

Man zeigt leicht, daß die Bedingung (7) erfüllt ist.

## II. 5 Rücktransformation in den Oberbereich

Für die Rücktransformation mit Hilfe des Heaviside'schen Entwicklungssatzes ist die Kenntnis der Wurzeln von

$$p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0 \quad (25)$$

erforderlich. Drei Fälle sind zu unterscheiden:

- 1) alle Wurzeln  $p_\nu$  ( $\nu = 1, 2, 3, 4$ ) sind reell,
- 2) zwei Wurzeln sind reell, zwei konjugiert-komplex,
- 3) je zwei Wurzeln sind konjugiert-komplex.

Die Realteile der Wurzeln müssen in allen drei Fällen  $< 0$  sein.

Im Falle 1) und 2) lassen sich die reellen Wurzeln graphisch ermitteln. Um auch den Fall 3) zu erfassen, erscheint es uns für die numerische Rechnung einfacher, den Ausdruck (25) in ein Produkt von zwei quadratischen Ausdrücken umzuwandeln (s.R. Zurmühl, Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker, Springer-Verlag, 1957, S. 59 ff).

## II. 6 Der Batteriestrom $J_1(t)$

### 1. Alle Wurzeln reell

Seien die Wurzeln von (25)

$$p_\nu = -d_\nu, \quad d_\nu \text{ reell, } > 0 \\ \nu = 1, 2, 3, 4$$

und

$$\Psi'(p_\nu) = 4p_\nu^3 + 3a_3 p_\nu^2 + 2a_2 p_\nu + a_1 = \\ = -4d_\nu^3 + 3a_3 d_\nu^2 - 2a_2 d_\nu + a_1, \quad (26)$$

dann erhält man aus (19)

$$J_1(t) = F_{111}e^{-d_1 t} + F_{112}e^{-d_2 t} + F_{113}e^{-d_3 t} + F_{114}e^{-d_4 t} \quad (27)$$

mit

$$F_{11\nu} = \frac{1}{\psi'(\rho_\nu)} (-G_{13}d_\nu^3 + G_{12}d_\nu^2 - G_{11}d_\nu + G_{10}) \quad (28)$$

$$\nu = 1, \dots, 4$$

## 2. Zwei Wurzeln komplex

Seien die Wurzeln von (25)

$$p_1 = -d_1$$

$$p_2 = -d_2$$

$$p_3 = -d_3 + i\omega_3$$

$$p_4 = -d_3 - i\omega_3.$$

Dann ist

$$J_1(t) = F_{121}e^{-d_1 t} + F_{122}e^{-d_2 t} + \left. \begin{aligned} &+ F_{123}e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{124}e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t \end{aligned} \right\} (29)$$

Dabei ist

$$F_{121} = F_{111}$$

$$F_{122} = F_{112}$$

$$F_{123} = \frac{2}{\psi_3^2 + \psi_4^2} (\Phi_3 \psi_3 + \Phi_4 \psi_4)$$

$$F_{124} = \frac{2}{\psi_3^2 + \psi_4^2} (\Phi_3 \psi_4 - \Phi_4 \psi_3)$$

$$\Phi_3 = G_{13}d_3(3\omega_3^2 - d_3^2) + G_{12}(d_3^2 - \omega_3^2) - G_{11}d_3 + G_{10}$$

(30a)

$$\begin{aligned}
 \bar{\Phi}_4 &= \omega_3 \left[ G_{13} (3d_3^2 - \omega_3^2) - 2d_3 G_{12} + G_{11} \right] \\
 (\text{also: } G_{13} p_3^3 + G_{12} p_3^2 + G_{11} p_3 + G_{10} &= \\
 &= \bar{\Phi}_3 + i \bar{\Phi}_4, \\
 G_{13} p_4^3 + G_{12} p_4^2 + G_{11} p_4 + G_{10} &= \bar{\Phi}_3 - i \bar{\Phi}_4) \\
 \Psi_3 &= 4d_3 (3\omega_3^2 - d_3^2) + 3a_3 (d_3^2 - \omega_3^2) - \\
 &\quad - 2a_2 d_3 + a_1 \\
 \Psi_4 &= 2\omega_3 (6d_3^2 - 2\omega_3^2 - 3a_3 d_3 + a_2) \\
 (\text{also: } \Psi'(p_3) &= \Psi_3 + i\Psi_4; \Psi'(p_4) = \Psi_3 - i\Psi_4).
 \end{aligned}
 \tag{30b}$$

### 3. Alle Wurzeln komplex

Seien die Wurzeln von (25)

$$\begin{aligned}
 p_1 &= -d_1 + i\omega_1 \\
 p_2 &= -d_1 - i\omega_1 \\
 p_3 &= -d_3 + i\omega_3 \\
 p_4 &= -d_3 - i\omega_3.
 \end{aligned}$$

Dann ist

$$\begin{aligned}
 J_1(t) &= F_{131} e^{-d_1 t} \cos \omega_1 t + F_{132} e^{-d_1 t} \sin \omega_1 t + \\
 &\quad + F_{133} e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{134} e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

mit

$$\begin{aligned}
 F_{131} &= \frac{2}{\Psi_1^2 + \Psi_2^2} (\bar{\Phi}_1 \Psi_1 + \bar{\Phi}_2 \Psi_2) \\
 F_{132} &= \frac{2}{\Psi_1^2 + \Psi_2^2} (\bar{\Phi}_1 \Psi_2 - \bar{\Phi}_2 \Psi_1)
 \end{aligned}
 \tag{32a}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \Phi_1 &= G_{13}d_1 (3\omega_1^2 - d_1^2) + G_{12} (d_1^2 - \omega_1^2) - G_{11}d_1 + G_{10} \\
 \Phi_2 &= \omega_1 \left[ G_{13} (3d_1^2 - \omega_1^2) - 2d_1G_{12} + G_{11} \right] \\
 \Psi_1 &= 4d_1 (3\omega_1^2 - d_1^2) + 3a_3 (d_1^2 - \omega_1^2) - 2a_2d_1 + a_1 \\
 \Psi_2 &= 2\omega_1 (6d_1^2 - 2\omega_1^2 - 3a_3d_1 + a_2) \\
 F_{133} &= F_{123} \\
 F_{134} &= F_{124}
 \end{aligned} \right\} \quad (32b)$$

## II. 7 Der Laststrom $J_2(t)$

### 1. Alle Wurzeln reell

Aus (21) erhält man in völliger Analogie zu den Gln. (26) ...  
(28)

$$J_2(t) = F_{211}e^{-d_1t} + F_{212}e^{-d_2t} + F_{213}e^{-d_3t} + F_{214}e^{-d_4t}. \quad (33)$$

Die  $F_{21\nu}$  ergeben sich formal aus den  $F_{11\nu}$  dadurch, daß man in letzteren (d.h. in Gl. (28))  $G_{13}$  durch  $G_{23}$ ,  $G_{12}$  durch  $G_{22}$  usw. ersetzt.

### 2. Zwei Wurzeln komplex

Es ist

$$\left. \begin{aligned}
 J_2(t) &= F_{221}e^{-d_1t} + F_{222}e^{-d_2t} + \\
 &+ F_{223}e^{-d_3t} \cos \omega_3t + F_{224}e^{-d_3t} \sin \omega_3t.
 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Die  $F_{22\nu}$  erhält man aus den Gln. (30), indem man dort überall die  $G_{13}$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{11}$ ,  $G_{10}$  durch die entsprechenden  $G_{23}$ ,  $G_{22}$ ,  $G_{21}$ ,  $G_{20}$  ersetzt.

3. Alle Wurzeln komplex

Es ist

$$J_3(t) = F_{231}e^{-d_1 t} \cos \omega_1 t + F_{232}e^{-d_1 t} \sin \omega_1 t + \left. \begin{aligned} &+ F_{233}e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{234}e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Die  $F_{23\nu}$  erhält man aus (32) durch Ersetzung der  $G_{1\mu}$  durch die entsprechenden  $G_{2\mu}$ .

II. 8 Der Crowbarstrom  $J_3(t)$

1. Alle Wurzeln reell

Man erhält aus (23)

$$J_3(t) = F_{311}e^{-d_1 t} + F_{312}e^{-d_2 t} + F_{313}e^{-d_3 t} + F_{314}e^{-d_4 t}. \quad (36)$$

Die  $F_{31\nu}$  erhält man formal aus (28), indem man dort die  $G_{1\mu}$  durch die  $G_{3\mu}$  ersetzt und berücksichtigt, daß  $G_{33} = 0$  ist.

2. Zwei Wurzeln komplex

Es ist

$$J_3(t) = F_{321}e^{-d_1 t} + F_{322}e^{-d_2 t} + \left. \begin{aligned} &+ F_{323}e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{324}e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t. \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Die  $F_{32\nu}$  erhält man aus (30), indem man dort die  $G_{1\mu}$  durch die  $G_{3\mu}$  ersetzt.

3. Alle Wurzeln komplex

Es ist

$$J_3(t) = F_{331}e^{-d_1 t} \cos \omega_1 t + F_{332}e^{-d_1 t} \sin \omega_1 t + \left. \begin{aligned} &+ F_{333}e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{334}e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Die  $F_{33\nu}$  erhält man aus (32), indem man dort die  $G_{1\mu}$  durch die  $G_{3\mu}$  ersetzt.

## II. 9 Die Spannung über der Lastspule $U_s(t)$

Die Induktivität  $L_2$  in Abb. 1 setzt sich zusammen aus der Induktivität der Zuleitung und der eigentlichen Lastspule  $L_{Sp}$ . Der zeitliche Verlauf der Spannung über der Lastspule ( $U_s(t)$ ) ist insofern interessant, als sie sich einfacher messen läßt als der Laststrom. Die Lastspule wird als reine Induktivität angenommen. Dann ist

$$U_s(t) = L_{Sp} \cdot \frac{dJ_2}{dt}.$$

### 1. Alle Wurzeln reell

Es ist

$$U_s(t) = - L_{Sp} \cdot \sum_{\nu} F_{41\nu} e^{-d_{\nu} t} \quad (39)$$

mit

$$F_{41\nu} = F_{21\nu} \cdot d_{\nu}. \quad (40)$$

### 2. Zwei Wurzeln komplex

Es ist

$$U_s(t) = - L_{Sp} \cdot \left[ \begin{aligned} &F_{421} e^{-d_1 t} + F_{422} e^{-d_2 t} + \\ &+ F_{423} e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{424} e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t \end{aligned} \right] \quad (41)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} F_{421} &= F_{221} \cdot d_1 \\ F_{422} &= F_{222} \cdot d_2 \\ F_{423} &= F_{223} \cdot d_3 - F_{224} \cdot \omega_3 \\ F_{424} &= F_{223} \cdot \omega_3 + F_{224} \cdot d_3. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

### 3. Alle Wurzeln komplex

Es ist

$$U_s(t) = - L_{Sp} \cdot \left( \begin{aligned} &F_{431} e^{-d_1 t} \cos \omega_1 t + F_{432} e^{-d_1 t} \sin \omega_1 t + \\ &+ F_{433} e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{434} e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t \end{aligned} \right) \quad (43)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} F_{431} &= F_{221} \cdot d_1 - F_{222} \cdot \omega_1 \\ F_{432} &= F_{221} \cdot \omega_1 + F_{222} \cdot d_1 \\ F_{433} &= F_{423} \\ F_{434} &= F_{424} \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

II. 10 Spannung über Last- bzw. Crowbarkreis  $U(t)$

Es ist

$$\left. \begin{aligned} U &= L_2 \frac{dJ_2}{dt} + R_2 J_2 + \frac{1}{C_2} \int_{-T}^0 \tilde{J} dt + \frac{1}{C_2} \int_0^t J_2 dt' = \\ &= \frac{U_1}{C_{12} C_2} \left[ 1 - \frac{a}{\omega} \text{EST} - \text{ECT} \right] + L_2 \frac{dJ_2}{dt} + R_2 J_2 + \frac{1}{C_2} \int_0^t J_2 dt' \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

1. Alle Wurzeln reell

Aus (45) folgt mit (33)

$$U(t) = F_{51\nu} e^{-d_\nu t} + F_{515}; \quad (46)$$

dabei ist

$$\left. \begin{aligned} F_{51\nu} &= \left( -L_2 d_\nu + R_2 - \frac{1}{C_2 d_\nu} \right) F_{21\nu} \quad (\nu = 1, \dots, 4) \\ F_{515} &= \frac{U_1}{C_{12} C_2} \left( 1 - \frac{a}{\omega} \text{EST} - \text{ECT} \right) + \\ &+ \frac{1}{C_2} \left( \frac{F_{211}}{d_1} + \frac{F_{212}}{d_2} + \frac{F_{213}}{d_3} + \frac{F_{214}}{d_4} \right) \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

2. Zwei Wurzeln komplex

Aus (45) folgt mit (34)

$$\left. \begin{aligned} U(t) &= F_{521} e^{-d_1 t} + F_{522} e^{-d_2 t} + \\ &+ F_{523} e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{524} e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t + F_{525} \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

dabei ist

$$\left. \begin{aligned}
 F_{52\nu} &= (-L_2 d_\nu + R_2 - \frac{1}{C_2 d_\nu} F_{22\nu} (\nu = 1, 2) \\
 F_{523} &= F_{223} (-L_2 d_3 + R_2 - \frac{1}{C_2} \frac{d_3}{d_3^2 + \omega_3^2}) + \\
 &\quad + F_{224} \omega_3 (L_2 - \frac{1}{C_2} \frac{1}{d_3^2 + \omega_3^2}) - \\
 &\quad - F_{223} \omega_3 (L_2 - \frac{1}{C_2} \frac{1}{d_3^2 + \omega_3^2}) \\
 F_{525} &= \frac{U_1}{C_{12} C_2} (1 - \frac{a}{\omega} \text{EST-ECT}) + \\
 &\quad + \frac{F_{221}}{C_2 d_1} + \frac{F_{222}}{C_2 d_2} + \frac{F_{223}}{C_2} \cdot \frac{d_3}{d_3^2 + \omega_3^2} + \frac{F_{224}}{C_2} \frac{\omega_3}{d_3^2 + \omega_3^2}
 \end{aligned} \right\} (49)$$

3. Alle Wurzeln komplex

Aus (45) folgt mit (35)

$$\left. \begin{aligned}
 U(t) &= F_{531} e^{-d_1 t} \cos \omega_1 t + F_{532} e^{-d_1 t} \sin \omega_1 t + \\
 &\quad + F_{533} e^{-d_3 t} \cos \omega_3 t + F_{534} e^{-d_3 t} \sin \omega_3 t + F_{535}
 \end{aligned} \right\} (50)$$

Dabei ist

$$\left. \begin{aligned}
 F_{531} &= F_{231} (-L_2 d_1 + R_2 - \frac{1}{C_2} \frac{d_1}{d_1^2 + \omega_1^2}) + \\
 &\quad + F_{232} \omega_1 (L_2 - \frac{1}{C_2} \frac{1}{d_1^2 + \omega_1^2}) \\
 F_{532} &= F_{232} (-L_2 d_1 + R_2 - \frac{1}{C_2} \frac{d_1}{d_1^2 + \omega_1^2}) - \\
 &\quad - F_{231} \omega_1 (L_2 - \frac{1}{C_2} \frac{1}{d_1^2 + \omega_1^2})
 \end{aligned} \right\} (51a)$$

$F_{533}$  und  $F_{534}$  entsprechen den  $F_{523}$  und  $F_{524}$  in (49), wenn man dort  $F_{223}$  und  $F_{224}$  durch die resp.  $F_{233}$  und  $F_{234}$  ersetzt.

$$F_{535} = \frac{U_1}{C_{12}C_2} (1 - \frac{a}{w} \text{EST-ECT}) + \left. \begin{aligned} &+ \frac{F_{231}}{C_2} \frac{d_1}{d_1^2 + w_1^2} + \frac{F_{232}}{C_2} \frac{w_1}{d_1^2 + w_1^2} + \\ &+ \frac{F_{233}}{C_2} \frac{d_3}{d_3^2 + w_3^2} + \frac{F_{234}}{C_2} \frac{w_3}{d_3^2 + w_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (51b)$$

## II. 11 FORTRAN-Programm

Das FORTRAN-Programm für die Power-Crowbar-Schaltung stimmt bzgl. der Ein- und Ausgabe im wesentlichen mit dem Programm für die Crowbar-Schaltung überein.

Die Eingabedaten sind (Statement No 1 und 140):

FO ( $C_1$ ), F2 ( $C_2$ ), F3 ( $C_3$ ), H1 ( $L_1$ ), H2 ( $L_2$ ), H3 ( $L_3$ ), HSP ( $L_{Sp}$ ),  
R1 ( $R_1$ ), R2 ( $R_2$ ), R3 ( $R_3$ ), U1, U3, FT, HW.

Die in Klammern stehenden Größen bezeichnen die Schaltelemente in Abb. 1, Teil II; Werte für Kapazitäten in  $\mu\text{F}$ , für Induktivitäten in  $\mu\text{Henry}$ , für Widerstände in Ohm. Befindet sich im Lastkreis keine Kapazität  $C_2$ , so ist  $C_2 = 10^{+20}$  zu setzen. U1 ist die Ladespannung von  $C_1$ , U3 die Ladespannung von  $C_3$ ; es ist zweckmäßig, sie in Einheiten von  $10^4$  V anzugeben. Bzgl. FT und HW s. Abschnitt I.11.

Das Schema für Schreibmaschinenausgabe unterscheidet sich von dem im Crowbar-Programm in zwei Punkten:

1) Die Zahl  $K = 1, 2, 3$  unterscheidet die Fälle

$K = 1$ : Alle Wurzeln der charakteristischen Gleichung sind reell,

$K = 2$ : Zwei Wurzeln sind reell, zwei konjugiert-komplex,

$K = 3$ : Je zwei Wurzeln sind konjugiert-komplex.

2) Die Genauigkeit der Lösung der charakteristischen Gleichung wird hier nicht angegeben. Die Berechnung der Wurzeln erfolgt

von Statement No 9 an nach dem im Abschnitt II.5 zitierten Verfahren. Die Forderung in Statement 9+6 gewährleistet hinreichende Genauigkeit.

Dafür schreibt die Maschine an dieser Stelle im Falle  $K = 1, 2$ :

"EXP. ABFALL NACH .....MIKROSEK.", im Falle  $K = 3$ :

"KEIN CROWBARFALL. TEXP = .....MIKROSEK.". TEXP bedeutet hier die Dauer der längeren Halbwelle. Alle anderen Angaben entsprechen dem Crowbar - Programm in Abschnitt I.11.

#### Anmerkung

Vorliegende Rechnungen haben Anregungen erfahren in mehreren Diskussionen mit Herrn Dr. H. L. Jordan und Herrn Dipl. ing. W. Anger. Bei der Aufstellung, sowie beim Testen der Programme und beim Rechnen auf der IBM 1620 erhielten wir freundliche Unterstützung von Frau Dipl. ing. Th. Martin, von Frl. E. Bismans und Herrn D. Otto. Ihnen allen sei an dieser Stelle gedankt.

FORTRAN - Programm

```
POWER CROWBAR
DIMENSION D(4),CD(4),DDD(4),G1(4),G2(4),G3(4),PS(4),PI(4),P1(4)
DIMENSION C1(4),C2(4),C3(4),C4(4),C5(5)
PI=3.141593
PIH=PI/2.
1 REAC 2,F0,F2,F3,H1,H2,H3,HSP
  IF(F0) 140,141,140
140 READ 3,R1,R2,R3,U1,U3,FT,HW
2 FCRMAT (7E1C.3)
3 FCRMAT (3E1C.3,2F8.4,F6.2,H3.0)
  PRINT 143
143 FORMAT(36F-POWER-CROWBAR PROGRAMM VCM 15.1C.64)
  PRINT2,FC,F2,H3,H1,H2,H3,HSP
  PRINT3,R1,R2,R3,U1,U3,FT,HW
  PUNCH 4
4 FCRMAT (1HN)
  PUNCH2,FC,F2,F3,H1,H2,H3,HSP
  PUNCH3,R1,R2,R3,U1,U3,FT,HW
  H12=H1+H2
  H23=H2+H3
  H31=H3+H1
  HIJ=H1*H2+H2*H3+H3*H1
  R12=R1+R2
  R23=R2+R3
  R31=R3+R1
  RIJ=R1*R2+R2*R3+R3*R1
  F12=1./F0+1./F2
  F23=1./F2+1./F3
  F31=1./F3+1./F0
  FIJ=1./F0*1./F2+1./F2*1./F3+1./F3*1./F0
  HIRJK=H1*R23+H2*R31+H3*R12
  HIFJK=H1*F23+H2*F31+H3*F12
  RIFJK=R1*F23+R2*F31+R3*F12
  A=0.5*R12/H12
  B=F12/H12
  FRQC=8-A*A
  FRQ=SQR(FRQC)
  IF(A/FRQ-1.E-90)103,103,104
103 TMAX=PIH/FRQ
  A=1.E-40
  GO TO 105
104 TMAX=ATANF(FRQ/A)/FRQ
105 TNULL=PI/FRQ
  IF(FT) 100,100,101
100 TAUC=TMAX+FT*TMAX+HW*TNULL
  GO TO 102
101 TAUC=TMAX+FT*(TNULL-TMAX)+HW*TNULL
102 PRINT 5,A,FRQ,TAUC
5 FORMAT (/2HA=,F13.8,2X4HFRQ=,F6.3,2X5HTAUO=,H6.3)
  EST=EXPF(-A*TAUC)*SINF(FRQ*TAUC)
  ECT=EXPF(-A*TAUC)*COSF(FRQ*TAUC)
  CUR10=U1*EST/(H12*FRQ)
  USPC=-FSP*U1*(A*EST-FRQ*ECT)/(FRQ*H12)
  UMIN=U1*(A*EST*(R2/A-H2-H12/(P12*P2))/(PR.*P12))
  UMIN=UMIN+U1*(ECT*(H2/H12-1./(P12*P2))+1./(P12*P2))
  UU1=F0*H12*H3/(FC+F2)+ECT*H3*(H2/PO-H1/R2)/PI2
  UU2=EST*H3*(A*(H2/H0-H1/F2)/F12-(R1*H2-R2*H1)/P12)/F12
  UPLUS=(U1*(UU1+UU2)+H1*H2*U3)/HIJ
  UDIF=UMIN-UPLUS
  PRINT 6,UMIN,UPLUS,UDIF
```

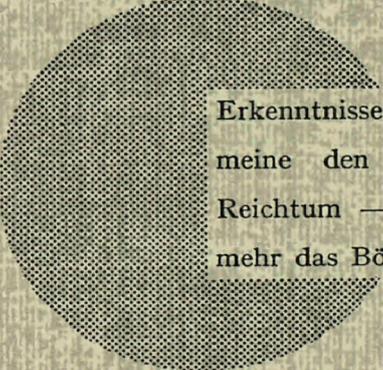
```
6   FORMAT (5HUMIN=,F8.4,2X6HUPPLUS=,F8.4,2X5HULIF=,F8.4)
    S10=U1/H1*(F0/(F0+F2)+ECT/(F0+F12)+EST/FRG*(A/(F0+F12)-R1/H12))
    S1C=S1C-LPLLS/H1
    S2C=U1/H2*(EST*(A/(F2+F12)-R2/H12)/FRG+(ECT-1.)/(F2+F12))+UPLUS/H2
    S3C=(UPLUS-L3)/F3
    SUM=S10-S20-S30
    PRINT 7,S10,S2C,S3C,SUM
7   FORMAT (3F14.7,2X12HSUM. !PUNKT=,F14.7)
    A3=FIRJK/HIJ
    A2=(RIJ+HIFJK)/HIJ
    A1=RIFJK/HIJ
    AC=FIJ/HIJ
    PRINT 8,A3,A2,A1,AC
8   FORMAT (22HKOEFF. CHARAKTER. GL.=,4f:10.3)
    XA=C.
    XB=SQRTF(A0)
9   Q1=C.5*(XA+XB)
    Q2=A0/Q1
    P1=(A1-A3*Q1)/(Q2-Q1)
    P2=A3-P1
    YQ1=Q1+Q2+P1*P2-A2
    YABS=ABSF(YQ1)
    IF(YABS-A2*1. E-05) 10,11,11
11  IF(YQ1) 12,10,13
12  XB=C1
    GC TO 9
13  XA=C1
    GC TO 9
10  DISK1=P1*P1/4.-Q1
    DISK2=P2*P2/4.-Q2
    IF(DISK1) 14,15,16
    IF(DISK2) 17,15,18
16  K=1
18  D(1)=0.5*P1-SQRTF(DISK1)
    D(2)=0.5*P1+SQRTF(DISK1)
    GC TO (22,23,23),K
22  D(3)=0.5*P2-SQRTF(DISK2)
    D(4)=0.5*P2+SQRTF(DISK2)
    GC TO 25
17  K=2
    GO TO 21
23  D(3)=0.5*P2
    D(4)=SQRTF(-DISK2)
    GC TO 25
14  IF(DISK2) 19,15,20
20  K=2
    PP2=P2
    QQ2=Q2
    P2=P1
    P1=PP2
    Q2=Q1
    Q1=QQ2
    GC TO 21
19  K=3
    D(1)=0.5*P1
    D(2)=SQRTF(-DISK1)
    GO TO 23
15  PRINT 24
24  FORMAT (/23HZWEI IDENTISCHE WURZELN//)
    GO TO 1
```

```
25 PRINT 26,K,D(1),D(2),D(3),D(4)
26 FORMAT (I1,2X22HWURZELN CHARAKT. GLN.=,4E11.3)
   IF(K-2) 27,32,28
28 IF(D(2)-D(4))83,15,84
83 TEXP=PI/D(2)
   GC TO 85
84 TEXP=PI/D(4)
85 PRINT 30,TEXP
30 FORMAT (16HKEIN CROWBAR-FALL.,2X5HTEXP=,F8.2,1X9HM[KROSEK.])
   GO TO 31
27 IF(D(1)-D(3))32,15,33
32 TEXP=1./D(1)
   GC TO 34
33 TEXP=1./D(2)
34 PRINT 35,TEXP
35 FORMAT(16HEXP. ABFALL NACH,F8.2,1X9HM[KROSEK.])
31 PRINT 36,CUR10,USPO
36 FORMAT (6HCUR10=,F8.3,2X5HUSPO=,F8.3)
   G1(4)=CUR10
   G1(3)=HIRJK*G1(4)/HIJ+S10
   G1(2)=((RIJ+H12/F3+H1/F2)*G1(4)+H1*R23*S10+H2*R3*S20+H3*R2*S30)
   G1(2)=G1(2)/HIJ
   G1(1)=(R12/F3+R1/F2)*G1(4)+H1*F23*S10+H2*S20/F3+H3*S30/F2
   G1(1)=G1(1)/HIJ
   G2(4)=G1(4)
   G2(3)=HIRJK*G2(4)/HIJ+S20
   G2(2)=(RIJ+H12/F3+H2/F0)*G2(4)+H1*R3*S10+H2*R31*S20-H3*R1*S30
   G2(2)=G2(2)/HIJ
   G2(1)=(R12/F3+R2/F0)*G2(4)+H1*S10/F3+H2*F31*S20-H3*S30/F0
   G2(1)=G2(1)/HIJ
   G3(3)=S30
   G3(2)=(H1/F2-H2/F0)*G1(4)+H1*R2*S10-H2*R1*S20+H3*R12*S30
   G3(2)=G3(2)/HIJ
   G3(1)=((R1/F2-R2/F0)*G1(4)+H1*S10/F2-H2*S20/F0+H3*F12*S30)/HIJ
   DC 29M=1,4
   DD(M)=D(M)*C(M)
29 DDD(M)=DD(M)*D(M)
   GC TO (37,37,39),K
37 IF(K-1) 38,38,40
38 N=4
   GC TO 41
40 N=2
41 DO 42M=1,N
42 PS(M)=-4.*DDD(M)+3.*A3*DD(M)-2.*A2*D(M)+A1
   L=1
46 DC 45M=1,N
45 F1(M)=(-G1(4)*DDD(M)+G1(3)*DD(M)-G1(2)*D(M)+G1(1))/PS(M)
   GC TO (47,48,48),K
47 GC TO (49,50,51),L
49 DC 52M=1,4
52 C1(M)=F1(M)
   GO TO (53,54,55),K
53 CUR1=C1(1)+C1(2)+C1(3)+C1(4)
   GO TO 56
54 CUR1=C1(1)+C1(2)+C1(3)
   GC TO 56
55 CUR1=C1(1)+C1(3)
56 L=2
   DC 57M=1,4
57 G1(M)=G2(M)
```

```
GO TO(46,46,58),K
50 DO 59M=1,4
59 C2(M)=F1(M)
GC TO(60,61,62),K
60 CUR2=C2(1)+C2(2)+C2(3)+C2(4)
GC TO 63
61 CUR2=C2(1)+C2(2)+C2(3)
GC TC 63
62 CUR2=C2(1)+C2(3)
63 L=3
DC 64M=1,3
64 G1(M)=G3(M)
G1(4)=0.
GC TO (46,46,58),K
51 DC 65M=1,4
65 C3(M)=F1(M)
GO TO (66,67,68),K
66 CUR3=C3(1)+C3(2)+C3(3)+C3(4)
GC TO 69
67 CLR3=C3(1)+C3(2)+C3(3)
GC TO 69
68 CUR3=C3(1)+C3(3)
69 UKLAM=U1*(1.-A*EST/FRQ-ECT)/(F12*F2)
GC TO (70,70,71),K
70 DC 72M=1,N
72 C4(M)=C2(M)*D(M)
GO TO (73,74,74),K
73 USP=-HSP*(C4(1)+C4(2)+C4(3)+C4(4))
GC TO 75
76 USP=-HSP*(C4(1)+C4(2)+C4(3))
75 DO 78M=1,N
78 C5(M)=C2(M)*(-H2*D(M)+R2-1.)/(F2*D(M))
GC TC (79,80,80),K
79 C5(5)=UKLAM+(C2(1)/D(1)+C2(2)/D(2)+C2(3)/D(3)+C2(4)/D(4))/F2
UCR=C5(1)+C5(2)+C5(3)+C5(4)+C5(5)
GC TO 90
81 UUC=C2(1)/D(1)+C2(2)/D(2)+C2(3)*D(3)*F5KL2+C2(4)*D(4)*F5KL2
C5(5)=UKLAM+UUC/F2
UCR=C5(1)+C5(2)+C5(3)+C5(5)
GC TO 90
82 UUA=C2(1)*D(1)+C2(2)*D(2)
C5(5)=UKLAM+(UUA*F5KL1+(C2(3)*D(3)+C2(4)*D(4))*F5KL2)/F2
UCR=C5(1)+C5(3)+C5(5)
90 PRINT 91,C1(1),C1(2),C1(3),C1(4),CUR1
PRINT 92,C2(1),C2(2),C2(3),C2(4),CLR2
PRINT 93,C3(1),C3(2),C3(3),C3(4),CUR3
PRINT 94,C4(1),C4(2),C4(3),C4(4),USP
PRINT 95,C5(1),C5(2),C5(3),C5(4),C5(5),UCR
91 FORMAT(/4E10.3,12X5HCUR1=,F8.3)
92 FORMAT(4E10.3,12X5HCUR2=,F8.3)
93 FORMAT(4E10.3,12X5HCUR3=,F8.3)
94 FORMAT(4E10.3,12X4HUSP=,F8.3)
95 FORMAT(5E10.3,3X4HUCR=,F8.3//)
PRINT 142
142 FORMAT(54(/))
GO TO 96
77 USP=-HSP*(C4(1)+C4(3))
F5KL1=1./(D0(1)+D0(2))
C5(1)=C2(1)*(-H2*D(1)+R2-D(1)+F5KL1/F2)+C2(2)*D(2)*(H2-F5KL1/F2)
C5(2)=C2(2)*(-H2*D(1)+R2-D(1)+F5KL1/F2)-C2(1)*D(2)*(H2-F5KL1/F2)
```

```
80      F5KL2=1./(CD(3)+DD(4))
        C5(3)=C2(3)*(-H2*D(3)+R2-D(3)*F5KL2/F2)+C2(4)*D(4)*(H2-F5KL2/F2)
        C5(4)=C2(4)*(-H2*D(3)+R2-D(3)*F5KL2/F2)-C2(3)*D(4)*(H2-F5KL2/F2)
        GO TO (81,81,82),K
39      L=1
58      PS(1)=4.*D(1)*(3.*DD(2)-DD(1))+3.*A3*(DD(1)-DD(2))-2.*A2*D(1)+A1
        PS(2)=2.*D(2)*(6.*DD(1)-2.*CD(2)-3.*A3*D(1)+A2)
        PH(1)=G1(4)*D(1)*(3.*DD(2)-CD(1))+G1(3)*(DC(1)-DD(2))-G1(2)*D(1)
        PH(1)=PH(1)+G1(1)
        PH(2)=D(2)*(G1(4)*(3.*DD(1)-DD(2))-2.*D(1)*G1(3)+G1(2))
        FAK12=2./(PS(1)*PS(1)+PS(2)*PS(2))
        F1(1)=FAK12*(PH(1)*PS(1)+PH(2)*PS(2))
        F1(2)=FAK12*(PH(1)*PS(2)-PH(2)*PS(1))
48      GO TO (43,44,44),L
43      PS(3)=4.*D(3)*(3.*DD(4)-DD(3))+3.*A3*(DD(3)-DD(4))-2.*A2*D(3)+A1
        PS(4)=2.*D(4)*(6.*DD(3)-2.*CD(4)-3.*A3*D(3)+A2)
44      PH(3)=G1(4)*D(3)*(3.*DD(4)-CD(3))+G1(3)*(DD(3)-DC(4))-G1(2)*D(3)
        PH(3)=PH(3)+G1(1)
        PH(4)=D(4)*(G1(4)*(3.*DD(4)-DD(4))-2.*D(3)*G1(3)+G1(2))
        FAK34=2./(PS(3)*PS(3)+PS(4)*PS(4))
        F1(3)=FAK34*(PH(3)*PS(3)+PH(4)*PS(4))
        F1(4)=FAK34*(PH(3)*PS(4)-PH(4)*PS(3))
        GO TO 47
71      C4(1)=C2(1)*D(1)-C2(2)*D(2)
        C4(2)=C2(1)*D(2)+C2(2)*D(1)
74      C4(3)=C2(3)*D(3)-C2(4)*D(4)
        C4(4)=C2(3)*D(4)+C2(4)*D(3)
        GO TO (76,76,77),K
96      TAU=TAU0+TEXP
        T=0.
        TXPL=0.
        TDIF=TAU/500.
        DXPL=1./500.
        CURCO=U1/(FRQ*H12)
        USPCO=HSP*CURCO
112     IF(T-TAU0)97,98,98
97      I=1
        ESFT=EXP(-A*T)*SINF(FRQ*T)
        ECFT=EXP(-A*T)*COSF(FRQ*T)
        CURT=CURCO*ESFT
        USPT=USPCO*(-A*ESFT+FRQ*ECFT)
        PUNCH 99, TXPL, CURT, USPT
99      FORMAT(F7.4, 10XF10.4, 10XF10.4)
118     IF(TXPL-1.)110,1.1
110     T=T+TDIF
        TXPL=TXPL+DXPL
        GO TO (112,119),I
98      I=2
        T=T-TAU0
119     GO TO(113,113,115),K
113     CUR1T=0.
        CUR2T=0.
        CUR3T=0.
        USPT=0.
        UCRT=0.
        DC 130M=1,N
        EDT=EXP(-D(M)*T)
        CUR1T=CUR1T+C1(M)*EDT
        CUR2T=CUR2T+C2(M)*EDT
        CUR3T=CUR3T+C3(M)*EDT
```

```
130    USPT=-HSP*(LSPT+C4(M)*EDT)
      UCRT=UCRT+C5(M)*EDT
      GC TO (116,114,114),K
116    UCRT=UCRT+C5(5)
      PUNCH 117, TXPL, CUR1T, CUR2T, CUR3T, USPT, UCRT
117    FCRMAT(F7.4,5(2XF8.4))
      GC TO 118
115    ED1CT=EXPF(-D(1)*T)*COSF(D(2)*T)
      ED1ST=EXPF(-D(1)*T)*SINF(D(2)*T)
      CUR1T=C1(1)*ED1CT+C1(2)*ED1ST
      CUR2T=C2(1)*ED1CT+C2(2)*ED1ST
      CUR3T=C3(1)*ED1CT+C3(2)*ED1ST
      USPT=C4(1)*ED1CT+C4(2)*ED1ST
      UCRT=C5(1)*ED1CT+C5(2)*ED1ST
114    ED3CT=EXPF(-D(3)*T)*COSF(D(4)*T)
      ED3ST=EXPF(-D(3)*T)*SINF(D(4)*T)
      CUR1T=CUR1T+C1(3)*ED3CT+C1(4)*ED3ST
      CUR2T=CUR2T+C2(3)*ED3CT+C2(4)*ED3ST
      CUR3T=CUR3T+C3(3)*ED3CT+C3(4)*ED3ST
      USPT=-HSP*(USPT+C4(3)*ED3CT+C4(4)*ED3ST)
      UCRT=UCRT+C5(3)*ED3CT+C5(4)*ED3ST
      GC TO 116
141    CALL EXIT
      END
```



Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

## VERTRIEBSSTELLEN

Alle Euratom-Berichte sind bei folgenden Stellen zu den auf der Rückseite des Umschlags angegebenen Preisen erhältlich (bei schriftlicher Bestellung bitte die EUR-Nummer und den Titel, die beide auf dem Umschlag jedes Berichts stehen, deutlich angeben).

### PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES

98, Chaussée de Charleroi, Bruxelles 6

Banque de la Société Générale - Bruxelles  
compte N° 964.558,

Banque Belgo Congolaise - Bruxelles  
compte N° 2444.141,

Compte chèque postal - Bruxelles - N° 167.37,

Belgian American Bank and Trust Company - New York  
compte No. 22.186,

Lloyds Bank (Europe) Ltd. - 10 Moorgate, London E.C.2,  
Postcheckkonto - Köln - Nr. 160.861.

### OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

2, place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

#### BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE  
40-42, rue de Louvain - Bruxelles  
BELGISCH STAATSBLAD  
Leuvenseweg 40-42 - Brussel

#### GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

OFFICE CENTRAL DE VENTE  
DES PUBLICATIONS DES  
COMMUNAUTES EUROPEENNES  
9, rue Goethe - Luxembourg

#### DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER  
Postfach - Köln 1

#### ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO  
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

#### FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE  
DES PUBLICATIONS DES  
COMMUNAUTES EUROPEENNES  
26, rue Desaix - Paris 15<sup>e</sup>

#### NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ  
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

**EURATOM — C.I.D.**  
51 - 53, rue Belliard  
Bruxelles (Belgique)

CDNA02550DEC