Sensorlose Heisspunkt-Temperaturüberwachung elektrischer Antriebe mittels selbstlernenden Mikrorechnersystems

Autor(en): **Gutt, Hans-Joachim**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **80 (1989)**

Heft 23

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-903746

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Sensorlose Heisspunkt-Temperaturüberwachung- elektrischer Antriebe mittels selbstlernenden Mikrorechnersystems

Hans-Joachim Gutt

Die Fortschritte auf dem Gebiet der Mikrorechner eröffnen bislang ungeahnte Möglichkeiten auch bezüglich neuer Anwendungen für elektrische Antriebe: Als Beispiel wird ein Heisspunkt-Temperatur-Überwachungssystem ohne in die Maschine eingebaute Thermofühler beschrieben, das die aktuellen Temperaturen mittels eines selbstlernenden Mikrorechnersystems lediglich aus den Zuleitungsströmen und -spannungen sowie der Kühlmitteltemperatur errechnet.

Les progrès réalisés dans le domaine des micro-ordinateurs ouvrent des possibilités d'applications jusqu'ici inconnues dans le domaine des entraînements électriques. Cela est montré à l'exemple d'une surveillance thermométrique des points chauds ne nécessitant pas de sondes incorporées dans la machine, où un système à micro-calculateur auto-adaptatif calcule la température actuelle des points chauds à partir des grandeurs courant et tension mesurées aux bornes et de la température du fluide réfrigérant.

Dieser Beitrag ist Herrn Prof. Dr. -Ing. Dr. techn. E. h. Adolf Leonhard zu seinem 90. Geburtstag am 18.12.1989 gewidmet, dessen langjährige Tätigkeit auf dem Gebiet der Antriebstechnik an der seinerzeit noch Technischen Hochschule Stuttgart der Autor heute fortführt.

Adresse des Autors:
Prof. Dr.-Ing. *Hans-Joachim Gutt*, Direktor des Instituts für Elektrische Maschinen und Antriebe, Universität Stuttgart, D-7000 Stuttgart 70

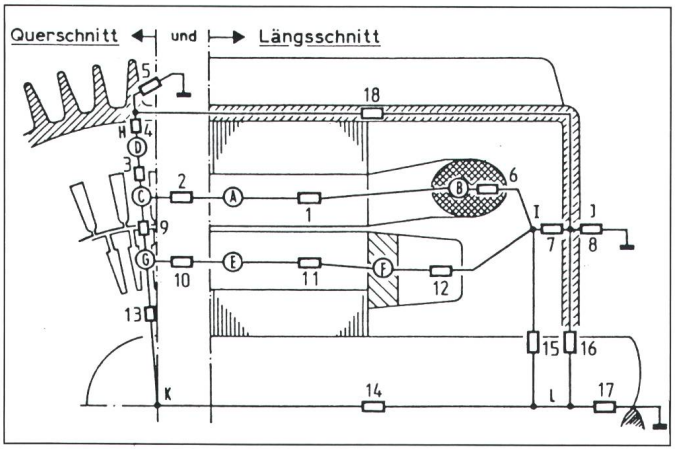
Es bestehen feste physikalische Zusammenhänge für die Umwandlung elektrischer in mechanische Energie [1], auch über die dabei auftretenden räumlichen und zeitlichen Verteilungen und Verläufe von magnetischen Grössen, Strömen, Kräften und Momenten sowie Verlusten und auftretenden Heisspunkten in den elektromechanischen Energiewandlern. Diese Zusammenhänge sind jedoch so komplex, im Detailvorgang bei Berechnungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen behaftet und oft über grössere Zeiträume sich erstreckend, dass sie mit den bislang verfügbaren analogen Methoden [2] technisch-wirtschaftlich nicht beherrschbar waren. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Mikrorechnertechnik gestatten jedoch heute eine genügend genaue und hinreichend schnelle Bearbeitung derart komplexer Zusammenhänge bei erschwinglichem und vertretbarem Kostenaufwand. Hierdurch eröffnen sich völlig neuartige Möglichkeiten, die zuvor nicht in Betracht zu ziehen waren: Kleinere kostengünstige Rechner wiesen seinerzeit nicht die notwendigen Rechengeschwindigkeiten auf, und grössere, schnellere Rechner waren zu aufwendig und zu teuer. Diese bislang ungeahnten neuen Möglichkeiten, (siehe z.B. [3]), die erst an ihrem Anfang ihrer Entwicklung stehen und daher noch lange nicht ausgeschöpft sind, sollen anhand des folgenden Beispiels erläutert werden.

Betriebliche Heisspunkt-Temperaturüberwachung ohne eingebaute Thermofühler

Problemstellung

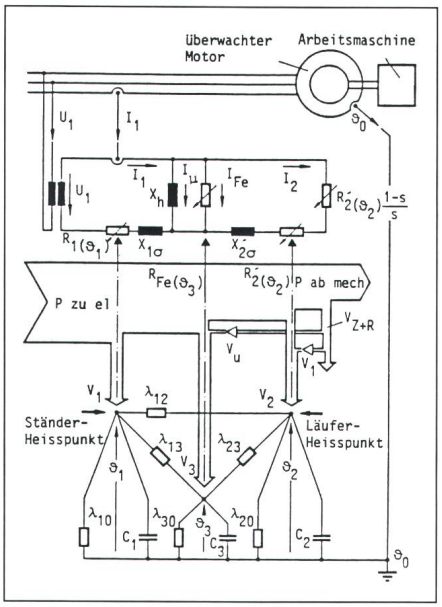
Im Verlauf automatisierter Produktionsprozesse ist es ausserordentlich wichtig, dass einzelne Antriebskomponenten während eines oft sehr komplexen Produktionszyklus nicht ausfallen oder zur Verhinderung eines Schadens nicht abgeschaltet werden müssen. Einen Extremfall stellen die höchstzulässigen *Festbremszeiten* t_E [4a, 4b] von Drehstromkäfigläufermotoren in zudem noch *explosionsgefährdeter Umgebung* dar, während denen trotz relativ schneller Temperaturanstiege bestimmte Temperaturgrenzwerte nicht überschritten werden dürfen. Die daraus resultierenden Festbremszeiten t_E bei blockiertem Läufer liegen in der Grössenordnung von weniger als einer Minute. Sie müssen jedoch mindestens fünf Sekunden betragen. Figur 1 gibt eine quasi-drei-dimensionale Darstellung der in einer elektrischen Maschine auftretenden Verlustquellen A bis L und die sie bis zum Kühlmedium verbindenden Wärmewiderstände 1 bis 18. Diese Darstellung trifft - bereits stark vereinfacht - auf rippengekühlte Drehstromasynchronmaschinen mit Käfigläufern für den stationären eingeschwungenen Betriebszustand zu. Für zeitlich veränderliche Vorgänge ist dieses thermische Ersatzschaltbild durch Wärmekapazitäten zu ergänzen (vgl. Figur 2).

Da der Ort des Auftretens der Heisspunkttemperatur je nach Betriebsart, d.h. der Art der Verlustverteilung innerhalb der Maschine, des Kühlungszustandes sowie des zeitlichen Lastverlaufs wechselt, wurden bislang mitunter an mehreren thermisch kritischen Stellen der Maschine Temperaturfühler eingebaut und mit ständigen Überwachungseinrichtungen ausserhalb der zu überwachenden Maschine verbunden. Diese Verbindungen sind jedoch - vor allem, wenn der Standort der Maschine öfter gewechselt werden muss - sehr störanfällig und nach einmaligem Ausfall irreparabel. Ziel dieser Entwicklung ist die digitale Auswertung der Klemmengrössen Spannung, Strom und Phasenwinkel und



Figur 1 Thermisches Ersatzschaltbild eines oberflächengekühlten Drehstromkäfigläufermotors

Der Übersichtlichkeit halber sind die Wärmekapazitäten weggelassen; Figur 1 gilt nur für thermisch eingeschwungene Zustände.
Die in der Maschine auftretenden Verluste wurden in den Knotenpunkten *A...L* konzentriert («Verlustquellen», siehe Tabelle I).
Für das stationäre thermische Verhalten von Bedeutung sind die «konzentrierten» Wärmeleitwerte *1...18* (siehe Tabelle I).



Figur 2 Verlustleistungs- und Temperaturermittlung mittels elektrischen und thermischen Ersatzschaltbildes

Thermisches Ersatzschaltbild

ϑ_0	Umgebungstemperatur
ϑ_1	Temperatur des Ständer-Heisspunktes
ϑ_2	Temperatur des Läufer-Heisspunktes
ϑ_3	Temperatur des Ständerjochs
V_1	zusammengefasste Ständerwicklungsverluste
V_2	zusammengefasste Läuferverluste
V_3	zusammengefasste Ständereisenverluste
λ_{ij}	resultierender Wärmeleitwert aller Wärmeleitwertkombinationen zwischen Knoten i und j; Knoten: Kühlluft/Umgebung ($j = 0$), Ständerwicklung ($i = 1$), Läufer ($i, j = 2$), Ständerjoch ($i, j = 3$)
C_i	resultierende Wärmekapazität zwischen Knoten i und der Kühlluft; Knoten: Ständerwicklung ($i = 1$), Läufer ($i = 2$), Ständerjoch ($i = 3$)

Elektrisches Ersatzschaltbild

$\underline{U_1}, \underline{I_1}$	Messwerte von Spannung und Strom nach Betrag und Phasenlage
$\underline{U_h}, \underline{I_2}, \underline{U_2}$	Zeigergrössen gemäss Figur 3 und Text
s	Schlupf
R_i, R'_i	temperaturabhängige Widerstände (siehe Text), übrige Grössen: siehe Text

daraus die laufende Ermittlung und Überwachung der Heisspunkttemperatur des Maschineninneren *ohne* in die Maschine eingebaute Thermofühler.

Lösungskonzept

Das Konzept für die Programmierung der Mikrorechner zeigt Figur 2 in vier übereinander angeordneten Ebenen. In der obersten Teildarstellung sind die Motorzuleitungen mit den benötigten Messgrössen Spannung und Strom, der zu überwachende Motor selbst und die anzutreibende Arbeitsmaschine dargestellt. Als einzige Rückführungsgrösse während des Betriebes dient die Umgebungstemperatur ϑ_o, die der Kühlmitteltemperatur entspricht. Sie lässt sich aber auch aus der Temperatur am Motorgehäuse oder an anderen leicht zugänglichen und leicht reparablen Temperaturmessstellen fortlaufend ermitteln.

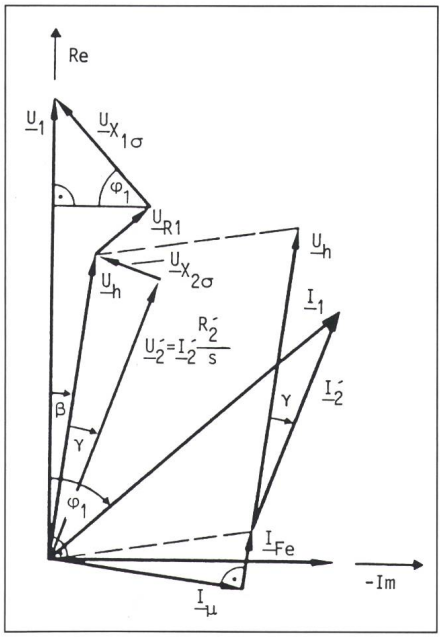
Tabelle I Verlustquellen und Wärmeleitwerte in thermischem Ersatzschaltbild gemäss Figur 1

	Verlustquellen	
A	Ständer*nut*-Wicklungs-Verluste	Ständerkupfer-Verluste V_1 in Figur 2
B	Ständer-*Wickelkopf*-Verluste	
C	Ständerzahn-Eisenverluste	Ständerreisenverluste V_3 in Figur 2
D	Ständerjoch-Eisenverluste	
E	Läuferkäfig-Stabverluste	Läuferverluste V_2 (Index 2 für Läufer)
F	Läuferkäfig-Ringverluste	
G	Läuferzahn-Eisenverluste	
H	Ständergehäuseverluste	Im folgenden nicht mehr berücksichtigte Verluste, da hier vernachlässigbar
I	Reibungsverluste im Gehäuseinnern	
J	Reibungsverluste durch Aussenlüfter	
K	Über Kupplung/Welle einfallende Verluste	
L	Lagerreibungsverluste	

	Wärmeleitwerte»
1	Ständernut-Längsleitwert der Wicklung (Kupfer)
2	Ständernut-Querleitwert
3	Ständerzahn-Leitwert (Eisen)
4	Ständerjoch-Leitwert einschliesslich Übergang Blechpaket–Gehäuse
5	Leitwert des Übergangs Gehäuserippen–Aussenluft
6	Leitwert des Übergangs Wickelkopf–Innenluft
7	Längsleitwert der Luft zwischen Wickelköpfen und Gehäuse
8	Übergangs-Leitwert vom Gehäuse zur Aussenluft
9	Übergangs-Leitwert vom Läufer über Luftspalt zum Ständerblechpaket
10	Läuferquerleitwert vom Käfigstab zum Läuferzahn
11	Längsleitwert des Läuferstabes
12	Längsleitwert vom Läuferring zur Innenluft
13	Läuferjochleitwert einschliesslich Übergang zur Welle
14	Längsleitwert der Welle innerhalb des Gehäuses
15	Übergangsleitwert Welle–Innenluft
16	Übergangsleitwert Gehäuse–Welle
17	Längsleitwert der Welle ausserhalb des Gehäuses
18	Längsleitwert Gehäuse

Verlustsimulation

Der Lösungsansatz nach Figur 2 benutzt als erstes das herkömmliche einsträngige Ersatzschaltbild der Drehstromasynchronmaschine zur Verlustermittlung, wie in der zweiten Horizontalebene dieser Figur dargestellt ist. Dabei ist zunächst die Kenntnis der einzelnen Widerstände vorausgesetzt. Sie brauchen jedoch nicht für jede zu schützende Maschine im voraus bekannt zu sein, sondern werden in einem Selbstlernprozess automatisch ermittelt, wie später erläutert wird. Damit ist es möglich, ohne Drehmoment- oder Schlupfmessungen jederzeit den aktuellen Belastungszustand sowie die Leistungsaufteilung – in der dritten Ebene der Figur 2 angedeutet – lediglich aus den jeweiligen Messwerten von Spannung $\underline{U}_1$ und Strom $\underline{I}_1$ nach Betrag und Phasenlage zu berechnen. Die bekannten Zusammenhänge zur Bestimmung der übrigen Zeigergrössen $\underline{U}_h$ für die Eisenverluste, $\underline{I}_2$ sowie des Schlupfes s aus der Zeigergrösse $\underline{U}_2$ für die Läuferverlustberechnung sind im Zeitzeigerdiagramm der Figur 3 veranschaulicht.



Figur 3 Zeitzeigerdiagramm des Motorbetriebes

Die Rückführung der aktuellen Temperaturen ϑ_o, ϑ_1, ϑ_2, ϑ_3, die aus den zuvor ermittelten Verlustleistungen mit Hilfe des thermischen Ersatzschaltbildes (in Figur 2 unten) berechnet wurden, in die temperaturabhängigen Widerstände R_1, R'_2 und R_{Fe} des (in Figur 2 oben dargestellten) elektrischen Ersatzschaltbildes ist in Figur 2 durch die strichpunktierten senkrecht nach oben führenden Linien angedeutet:

$$R_{1(\vartheta 1)} = R_{1(\vartheta_o)}[1 + \alpha_1 (\vartheta_{1m} - \vartheta_o)] \qquad (1)$$

Die Ermittlung der mittleren Wicklungsübertemperatur ϑ_{1m} aus der Heisspunktübertemperatur ϑ_1 der Ständerwicklung erfolgt im Verlauf des im nächsten Abschnitt beschriebenen selbstlernenden Prozesses. Damit berechnen sich die Ständerwicklungsverluste

$$V_1 = 3 I_1^2 R_{1(\vartheta_1} \qquad (2)$$

Eine Kontrollrechnung [5] ergab, dass die Ständerstromverdrängungseinflüsse sowie die Einflüsse üblicher Stromunsymmetrien auf die Verluste V_1 vernachlässigt werden können.

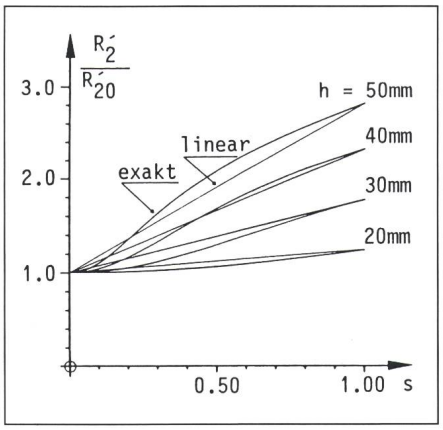
Während der Einfluss der Läufertemperaturen ϑ_2 auf R'_2 analog zur Gleichung (1) der Ständerwicklung berücksichtigt wird, ist vor allem bei Läuferstillstand der Einfluss der Stromverdrängung – nach genauen Berechnungen in Figur 4 dargestellt – nicht mehr vernachlässigbar. Mit Hilfe der in Figur 4 vorgenommenen Linearisierung der Schlupfabhängigkeit der Stromverdrängungsfaktoren lassen sich diese ebenfalls im Selbstlernprozess ermitteln. Ausser den Läuferwicklungsverlusten enthalten die Läuferverluste noch einen Verlustanteil, der durch Flusspulsationen des Hauptflusses erzeugt wird, und damit dem Quadrat der induzierten Ständerspannung U_h proportional ist [3]:

$$V_2 = 3 I'^2_2 R'_{2(\vartheta_2)} + k_2 U_h^2 \qquad (3)$$

Der Faktor k_2 wird ebenfalls im Selbstlernprozess gewonnen, ebenso die Abhängigkeit der gesamten Ummagnetisierungsverluste $V_U = 3\ U_h I_{Fe}$, repräsentiert durch den Eisenverluststrom $I_{Fe} = f(U^2_h)$. Zur Berechnung der Ständereisenverluste ist von V_U der bereits in Gleichung (3) berücksichtigte Läuferpulsationsanteil $k_2 U^2_h$ zu subtrahieren. Dafür addieren sich die ständerstromabhängigen Oberflächen- und Pulsationsverluste $V_1 = k_3\ I_1^2$, die ebenso wie zuvor die spannungsabhängigen Zusatzverluste V_U aus der mechanisch vom Rotor erzeugten Leistung gedeckt werden müssen (vgl. hierzu das Leistungsdiagramm in der dritten Horizontalebene der Figur 2).

Damit berechnet sich die Verlustleistung V_3 zu

$$V_3 = 3\ U_h I_{Fe} - k_2 U_h^2 + k_3 I_1^2 \qquad (4)$$



Figur 4 Linearisierung der Stromverdrängung im Läuferstab über dem Schlupf *s*

R'_2 ständerbezogener Läuferwicklungswiderstand mit Stromverdrängung
R'_{20} ständerbezogener Läuferwicklungswiderstand *ohne* Stromverdrängung
h Läuferleiterhöhe

Temperatursimulation

Analog zur Verlustermittlung mittels des elektrischen Ersatzschaltbildes erfolgt die Temperaturberechnung mit Hilfe des thermischen Ersatzschaltbildes, welches in Figur 2 unten dargestellt ist. Als Eingangsgrössen dienen die zuvor berechneten Verlustleistungen V_1, V_2, V_3 aus den Gleichungen (2) bis (4). Das Zusammenfassen der ursprünglich 18 Wärmewiderstände zu 4 Wärmewiderständen oder -leitwerten erfolgte nach der üblichen Netzwerktheorie. Diese Vereinfachung war notwendig, um die eindeutige Bestimmung dieser Grössen aus automatisierten Lernprozessen sicherzustellen. Das zugehörige Differentialgleichungssystem lautet in Matrizenform

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_A - \lambda_{12} - \lambda_{13} - \lambda_{10} \\ -\lambda_{20} \quad \lambda_B - \lambda_{23} - \lambda_{20} \\ -\lambda_{13} - \lambda_{23} \quad \lambda_C \quad -\lambda_{30} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vartheta_0 \end{bmatrix} \qquad (5)$$

$$\text{mit } \lambda_A = \lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + C_1 \frac{d}{dt} \qquad (5.1)$$

$$\lambda_B = \lambda_{20} + \lambda_{12} + \lambda_{23} + C_2 \frac{d}{dt} \qquad (5.2)$$

$$\text{und } \lambda_C = \lambda_{30} + \lambda_{13} + \lambda_{23} + C_3 \frac{d}{dt} \qquad (5.3)$$

Die exakte Lösung mit Hilfe der Laplace-Transformation erfordert viel

Rechenleistung und -zeit. Setzt man voraus, dass sich die Verlustleistungen V_1, V_2, V_3 und die Umgebungstemperatur ϑ_o während des betrachteten Zeitabschnittes Δt nicht ändern, lässt sich mit der folgenden Näherungslösung die Anzahl der im Echtzeitbetrieb pro Zeitintervall Δt auszuführenden Rechenoperationen deutlich verringern. Die Näherungslösung ist in Matrizenschreibweise

$$\vartheta = \vartheta^* + \Delta t \cdot \boldsymbol{N} \cdot \widetilde{\boldsymbol{C}} \cdot (\boldsymbol{V} - \Lambda \vartheta^*) \qquad (6)$$

Hierbei beschreibt ϑ^* die Anfangs- und ϑ die Endtemperaturen für das zu berechnende Zeitintervall Δt.

$$\vartheta^* = \begin{bmatrix} \vartheta^*_1 \\ \vartheta^*_2 \\ \vartheta^*_3 \\ \vartheta^*_0 \end{bmatrix} \qquad (6.1) \qquad \vartheta = \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \end{bmatrix} \qquad (6.2)$$

Die Verlustleistung wird beschrieben durch

$$\boldsymbol{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \qquad (6.3)$$

Die Matrix der inversen Kapazitäten lautet

$$\widetilde{\boldsymbol{C}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_3} \end{bmatrix} \qquad (6.4)$$

Die Leitwertmatrix lautet

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_D - \lambda_{12} & \lambda_{13} - \lambda_{10} \\ -\lambda_{12} & \lambda_E - \lambda_{23} - \lambda_{20} \\ -\lambda_{13} - \lambda_{23} & \lambda_F - \lambda_{30} \end{bmatrix} \qquad (6.5)$$

mit $\lambda_D = \lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13}$ (6.6)

$\lambda_E = \lambda_{20} + \lambda_{12} + \lambda_{23}$ (6.7)

und $\lambda_F = \lambda_{30} + \lambda_{13} + \lambda_{23}$ (6.8)

Die Näherungsmatrix **N** in Gleichung (6) umfasst drei Stufen:

$$\boldsymbol{N} = \boldsymbol{E} - \boldsymbol{F} + \boldsymbol{G} - \boldsymbol{H} \qquad (6.9)$$

mit der Einheitsmatrix $\boldsymbol{E}$ [Euler-Cauchy]

$$-\boldsymbol{F} = \frac{\Delta t}{2} (\Lambda \widetilde{\boldsymbol{C}}) \qquad (6.10)$$

$$+\boldsymbol{G} = \frac{\Delta t^2}{6} (\Lambda \widetilde{\boldsymbol{C}})^2 \text{ (Heun)} \qquad (6.11)$$

$$-\boldsymbol{H} = \frac{\Delta t^3}{24} (\Lambda \widetilde{\boldsymbol{C}})^3 \text{ (Runge-Kutta)} \qquad (6.12)$$

Eine Fehlerabschätzung [5] zeigt, dass das Streckenzugverfahren nach Euler-Cauchy im vorliegenden Fall völlig ausreichende Genauigkeit besitzt, wenn für den Zeitintervall Δt = 0,5 s im Hinblick auf die Mindestfestbremszeiten $t_{E\,(min)}$ = 5 s gewählt wird. In diesem Fall kann für die Näherungsmatrix **N** die Einheitsmatrix **E** eingesetzt werden. Andernfalls kann die Matrix **N** bereits während des Selbstlernprozesses eindeutig bestimmt werden:

$\boldsymbol{N} = \boldsymbol{E} - \boldsymbol{F}$ nach Heun

$\boldsymbol{N} = \boldsymbol{E} - \boldsymbol{F} + \boldsymbol{G} - \boldsymbol{H}$ nach Runge-Kutta

Erweiterung auf zwei getrennte Ständerwicklungen

Die vorstehend beschriebene Temperatur-Simulationsmethode kann leicht auch auf polumschaltbare Motoren mit zwei getrennten Ständerwicklungen erweitert werden. Da jeweils nur eine der beiden Wicklungen *aktiv*, d.h. stromführend sein kann, gibt es daneben stets eine *passive*, d.h. stromlose Wicklung; die beiden Wicklungen vertauschen bei der Polumschaltung lediglich ihre Rollen. In Figur 5 wurde deshalb zusätzlich ein vierter Knoten mit einem zusätzlichen Wärmeleitwert λ_{34} und einer zusätzlichen Wärmekapazität C_4 aufgenommen. Alle übrigen Knoten bleiben die gleichen wie im bisherigen Wärmequellnetz nach Figur 2 unten. Die analytische Temperaturberechnung mit dem vorstehend erläuterten Näherungsverfahren nach Euler-Cauchy ergibt die folgenden Endtemperaturen am Ende des Zeitintervalls Δt:

$$\vartheta_1 = \vartheta^*_1 + \frac{\Delta t}{C_1} \cdot [V_1 - \lambda_{10} \cdot (\vartheta^*_1 - \vartheta_0) - \lambda_{14} \cdot (\vartheta^*_1 - \vartheta^*_4)] \qquad (7)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta^*_2 + \frac{\Delta t}{C_2} \cdot [V_2 - \lambda_{20} \cdot (\vartheta^*_2 - \vartheta_0) - \lambda_{23} \cdot (\vartheta^*_2 - \vartheta^*_3)] \qquad (8)$$

$$\vartheta_3 = \vartheta^*_3 + \frac{\Delta t}{C_3} \cdot [V_3 - \lambda_{30} \cdot (\vartheta^*_3 - \vartheta_0) + \lambda_{34} \cdot (\vartheta^*_4 - \vartheta^*_3) + \lambda_{23} \cdot (\vartheta^*_2 - \vartheta^*_3)] \qquad (9)$$

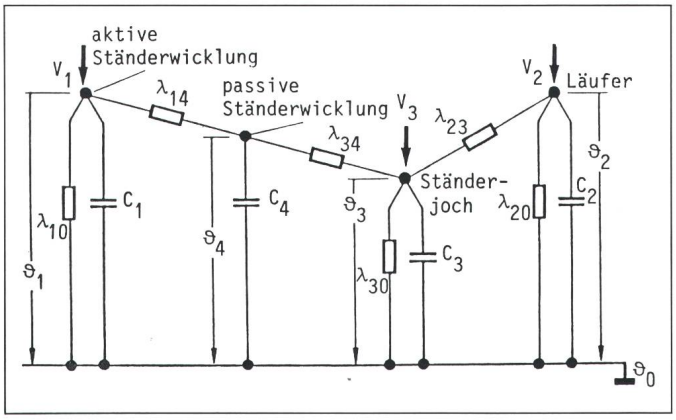
$$\vartheta_4 = \vartheta^*_4 + \frac{\Delta t}{C_4} \cdot [\lambda_{14} \cdot (\vartheta^*_1 - \vartheta_4) - \lambda_{34} \cdot (\vartheta^*_4 - \vartheta^*_3)] \qquad (10)$$

Hierbei sind ϑ^*_1, ϑ^*_2, ϑ^*_3 und ϑ^*_4 wiederum die jeweiligen Wicklungstemperaturen zu Beginn des zu berechnenden Zeitintervalls Δt.

Selbsttätige Parameterbestimmung

Die Bedeutung des vorstehend beschriebenen *sensorlosen* Temperaturüberwachungssystems wäre gering, wenn für jede zu überwachende Maschine alle Parameter des elektrischen und thermischen Ersatzschaltbildes

Figur 5 Wärmequellennetz für Zweiwicklungsmotor



ϑ_1 Temperatur der aktiven Ständerwicklung
ϑ_4 Temperatur der passiven Ständerwicklung
$\lambda_{14}, \lambda_{34}$ resultierende Wärmeleitwerte zwischen passiver Ständerwicklung und aktiver Ständerwicklung bzw. Ständerjoch
C_3, C_4 resultierende Wärmekapazitäten zwischen aktiver bzw. passiver Ständerwicklung und der Kühlluft
übrige Grössen wie in Figur 2

mühsam ermittelt und in das Mikrorechnersystem eingegeben werden müssten. Den Kernpunkt des neu entwickelten Überwachungssystems bildet daher nicht so sehr die elektrische und thermische Simulation, sondern vielmehr die neuartige selbsttätige Parameterbestimmung. Wichtig ist, dass diese automatischen Selbstlernprozesse nicht im Prüffeld, sondern vor Ort im endgültigen Zusammenbau mit der Arbeitsmaschine, d.h. ohne Drehmomentenmessung usw., erfolgen.

Elektrische Ersatzgrössen

Die Ermittlung der Daten des elektrischen Ersatzschaltbildes ist verhältnismässig einfach. Aus dem Kurzschlussversuch bei stillstehendem Läufer sind $R_K = R_1 + R'_2$ und $X_K = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$ bekannt, ebenso R_1 aus der üblichen Ständerwiderstandsmessung und damit auch R'_2. Die Streublindwiderstände $X_{1\sigma}$ und $X'_{2\sigma}$ gewinnt man in genügend guter Näherung aus der hälftigen Aufteilung von X_K. Damit liefert der Leerlaufversuch $X_h = X_1 - X_{1\sigma}$. Die Trennung der Leerlaufverluste V_o in Eisen- und Reibungsverluste erfolgt in bekannter Weise aufgrund der quadratischen Abhängigkeit von $V_{Fe} = f(U_h^2)$ durch Variation der Klemmenspannung und damit von U_h. Der Einfluss der Stromverdrängung im Läufer (vgl. Figur 4) ergibt sich aus beliebigen, allein durch den normalen Betrieb der Arbeitsmaschine sich einstellenden Belastungsfällen zwischen Leerlauf und Stillstand, die ohnehin für die folgende automatische Ermittlung der Grössen des thermischen Ersatzschaltbildes erforderlich sind.

Automatische Bestimmung der thermischen Ersatzgrössen

Bei eigenbelüfteten Maschinen sind zwei grundverschiedene Parametersätze zu unterscheiden, nämlich erstens jenen für den eingeschalteten, zwischen Leerlauf- und Kippdrehzahl laufenden Motor und zweitens jenen für die abgeschaltete, stillstehende Maschine. Bei polumschaltbaren Motoren kommt ein dritter Parametersatz hinzu, der durch das Einschalten des hochpoligen Wicklungsteils bestimmt und entsprechend selbsttätig angewählt wird. Diese Unterscheidungen beziehen sich jedoch nur auf die Wärmewiderstände oder -leitwerte. Die Werte der Wärmekapazitäten werden dabei nicht verändert. Genaugenommen müssten in der Berechnung die Wärmewiderstände beim Lauf zwischen Kippdrehzahl und Stillstand kontinuierlich verändert werden. Hierauf kann jedoch verzichtet werden, da bei abgeschalteter Maschine und längerem Auslauf die nach Abschaltung für stillstehende Maschinen gerechneten Temperaturen bezüglich ihrer Überwachung auf der sicheren Seite liegen. Anderseits sind bei festgebremstem oder im Schweranlauf betriebenem Motor wegen der ein bis zwei Zehnerpotenzen höheren Ständer- und Läuferverluste gegenüber Nennbetrieb die Temperaturanstiege zunächst adiabatisch zu berechnen. Anschliessend werden die Wärmekapazitäten massgebend. Der Einfluss der drehzahlabhängigen Wärmewiderstände ist demgegenüber vernachlässigbar.

Zur Bestimmung der Wärmekapazitäten und Wärmewiderstände ist die Maschine – sofern ihre Daten nicht von ähnlichen Ausführungen her bekannt sind – lediglich für den Lernlauf mit vier Thermofühlern zur Erfassung der Verläufe von ϑ_1, ϑ_2, ϑ_3 und ϑ_o während beliebiger Lastspiele auszustatten. Bei integraler Schreibweise der Gleichung (5) ergibt sich:

$$\int_{t_a}^{t_b} V_1\,dt = C_1 \cdot [\vartheta_1(t_b) - \vartheta_1(t_a)] + \lambda_{10} \cdot \int_{t_a}^{t_b} (\vartheta_1 - \vartheta_0)\,dt - \lambda_{12}\,(\vartheta_2 - \vartheta_1)\,dt - \lambda_{13} \cdot \int_{t_a}^{t_b} (\vartheta_3 - \vartheta_1)\,dt \qquad (11)$$

$$\int_{t_a}^{t_b} V_2\,dt = C_2 \cdot [\vartheta_2(t_b) - \vartheta_2(t_a)] + \lambda_{20} \cdot \int_{t_a}^{t_b} (\vartheta_2 - \vartheta_0)\,dt + \lambda_{12} \cdot \int_{t_a}^{t_b} (\vartheta_2 - \vartheta_1)\,dt - \lambda_{23} \cdot \int_{t_a}^{t_b} (\vartheta_3 - \vartheta_2)\,dt \qquad (12)$$

$$\int_{t_a}^{t_b} V_3\,dt = C_3 \cdot [\vartheta_3(t_b) - \vartheta_3(t_a)] + \lambda_{30} \cdot \int_{t_a}^{t_b} (\vartheta_3 - \vartheta_0)\,dt + \lambda_{13} \cdot \int_{t_a}^{t_b} (\vartheta_3 - \vartheta_1)\,dt + \lambda_{23} \cdot \int_{t_a}^{t_b} (\vartheta_3 - \vartheta_2)\,dt \qquad (13)$$

Für endliche Messintervalle $\Delta t = t_b - t_a$ lassen sich die rechten Seiten der Gleichungen (11) bis (13) aus den während des Erwärmungs-Lernlaufs gespeicherten Temperaturmesswerten numerisch berechnen, ebenso das Integral der Ständerwicklungsverluste V_1 auf der linken Seite der Gleichung (11). Dagegen ist von den beiden Gleichungen (12) und (13) zunächst nur die Summe der Verlustwärmeleistungen V_2 des Läufers und V_3 des Ständerblechpaketes bekannt. Zur notwendigen Aufteilung der spannungsabhängigen Zusatzverluste auf Läufer und Ständer ist der Faktor k_2 der Gleichung (3) ebenfalls durch Lernlauf zu ermitteln. Als Ausgangswert wird zunächst $k_2 = 0$ gewählt und dafür nach Gl. (3) $V_{20} = V_2$ und nach Gl. (4) $V_{30} = V_3$ berechnet. Der Faktor k_3 wird in Übereinstimmung mit [6] eingesetzt.

$$k_3 = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{3}\; U_N\,(\cos\varphi_N)\,/\,I_N \qquad (14)$$

Damit ergeben sich die tatsächlich wirksamen Verluste der Gl. (3) und (4) zu

$$V_2 = V_{20} + k_2\,U_h^2 \qquad (15)$$

$$V_3 = V_{30} - k_2\,U_h^2 \qquad (16)$$

Somit lautet die linke Seite der Gl. (12):

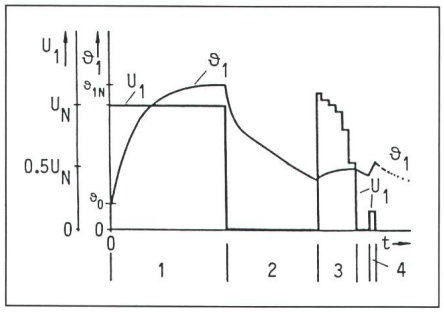
$$\int_{t_a}^{t_b} V_2\,dt = \int_{t_a}^{t_b} V_{20}\,dt + k_2 \int_{t_a}^{t_b} U_h^2\,dt \qquad (17)$$

und die linke Seite der Gl. (13):

$$\int_{t_a}^{t_b} V_3\,dt = \int_{t_a}^{t_b} V_{30}\,dt - k_2 \int_{t_a}^{t_b} U_h^2\,dt \qquad (18)$$

Durch Gleichsetzen der Gl. (17) und (18) mit den Gl. (12) und (13) lassen sich mittels der Temperaturmesswerte die gesamten Elemente C_1 bis C_3, λ_{10} bis λ_{23} und k_{2U} berechnen.

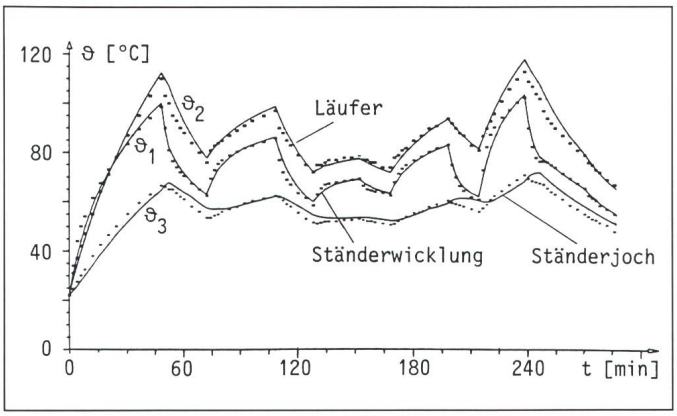
Der sogenannte Lernlauf zur automatischen Ermittlung der Parameter kann im echten Betrieb vor Ort zu beliebiger Zeit und in beliebiger Reihenfolge vorgenommen werden. Aus den mehr oder weniger zufälligen Lastverläufen lassen sich vier typische Phasen unterscheiden, die für die automatische Parameterbestimmung erforderlich sind und wie folgt definiert werden können. Während des als *Phase 1* bezeichneten Zeitraums sollte die zu überwachende Maschine am Netz betriebsnah, d.h. etwa bei Nennspannung und Nennfrequenz ungefähr mit Nennmoment belastet sein, bis sie ihren thermischen Gleichgewichtszustand erreicht hat. In dieser Phase sind alle zur Bestimmung der Grössen des thermischen Ersatzschaltbildes im Betrieb erforderlichen Messungen sowie die zur Verlustleistungs-Parameterberechnung erforderlichen Messungen der Klemmmenspannung und der Drehzahl durchzuführen. Die sogenannte *Phase 2* umfasst den Zeitraum nach Abschaltung und Stillsetzung der Maschine im Anschluss an einen Warmlauf zwecks Ermittlung der für Stillstand gültigen Grössen der thermischen Ersatzschaltung. *Phase 3* besteht aus Leerlaufversuchen zur Bestimmung des Magnetisierungsstroms sowie der spannungsabhängigen Eisenverluste bei in Stufen verminderter Klemmenspannung. Zweckmässigerweise wird der erforderliche Blockierversuch der *Phase 4* mit Nennstrom bei ebenfalls reduzierter Spannung gleich im Zusammenhang mit den Messungen der Phase 3 ausgeführt.



Figur 6 Typische Phasen *1...4* des Lernlaufs

U_N Nennspannung
U_1 Klemmenspannung
ϑ_0 Umgebungstemperatur
ϑ_1 Temperatur des Ständer-Heisspunktes
ϑ_{1N} Betriebstemperatur-Nennwert
t Zeit

Figur 7 Gerechnete und gemessene Heisspunkttemperaturen eines 4poligen 7-kW-Motors



ϑ_1 berechnete Ständerwicklungstemperaturen
ϑ_2 berechnete Läufertemperaturen
ϑ_3 berechnete Ständerjochtemperaturen
Punkte: Messwerte
ausgezogene Linien: berechnete Temperaturen

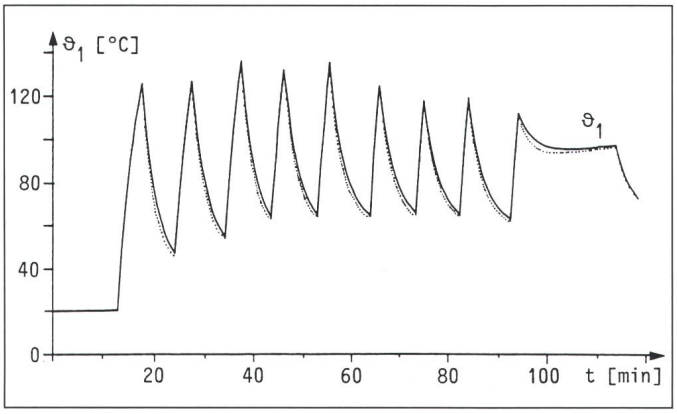
Ergebnisse

Das beschriebene Temperaturüberwachungsgerät einschliesslich dem Selbstlernteil wurde mit dem 16-bit-Prozessor Intel 8086 (6 MHz) realisiert und zusammen mit listenmässigen Drehstrom-Käfigläufermotoren, die für einen messtechnischen Vergleich zusätzlich mit Temperaturmessgeräten ausgestattet waren, betrieben.

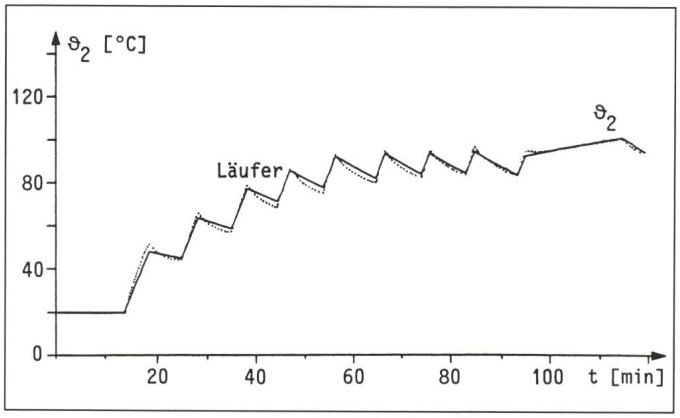
Die Ergebnisse sowohl der automatischen *Selbstlernläufe* als auch der damit errechneten Temperaturverläufe wurden an verschiedenen Drehstromkäfigläufermotoren geschlossener Bauart mit Eigenbelüftung durch vergleichende Heisspunkttemperaturmessungen nachgeprüft. Die Figur 7 stellt den Vergleich der Messpunkte mit den berechneten und durchgehend gezeichneten Temperaturkurven in Läufer- und Ständerwicklung sowie im Joch des Ständerblechpaketes bei Aussetzbetrieb mit wechselnder Lasthöhe für einen 6poligen geschlossenen Drehstromsynchronmotor mit 7 kW Nennleistung dar.

Die Figur 8 zeigt die in einem *Aussetzbetrieb* gemessenen Ständerwicklungstemperaturwerte als Punkte, verglichen mit den aufgrund der im Lernprozess ermittelten Daten und der daraus für diesen Aussetzbetrieb berechneten Kurven (ausgezogene Linien). In diesem Fall handelt es sich um einen polumschaltbaren Motor mit 4-/6poliger Ständerwicklung für 31/21 kW Nennleistung. In Figur 9 sind die entsprechenden Läufertemperaturverläufe angegeben. Die erreichte Genauigkeit liegt mit in der Regel 3 K im Rahmen der üblichen technischen Genauigkeit, die maximalen Abweichungen von 5 K treten selten auf.

Figur 8 Ständerwicklungstemperaturen eines 4-/6poligen Motors für 31/21 kW im Aussetzbetrieb



Punkte: Messwerte
ausgezogene Linien: berechnete Temperaturen



Punkte: Messwerte
ausgezogene Linien: berechnete Temperaturen

Figur 9
Läufertemperaturen bei Aussetzbetrieb wie Figur 8

Zusammenfassung

Mikrorechner – im vorliegenden Fall ein 16-bit-Rechner auf der Basis eines Prozessors Intel 8086 (6 MHz) – bieten bislang ungeahnte Möglichkeiten zur Überwachung, Schutz, Steuerung usw. moderner elektrischer Antriebssysteme. Als Beispiel wird ein neuentwickeltes System zur laufenden Ermittlung der aktuellen Heisspunkttemperaturen in elektrischen Maschinen beschrieben, das im Betrieb ohne – in die Motoren eingebaute – Temperaturfühler arbeitet. Diese werden lediglich für neue Maschinentypen mit noch nicht bekannten Daten für eine kurze Lernphase benötigt. Der entscheidende Vorteil besteht darin, dass auf diese Fühler im anschliessenden praktischen Betrieb vollständig verzichtet werden kann: Das Überwachungs- und Schutzsystem benötigt lediglich die Klemmengrössen wie Spannung und Strom nach Betrag und Phasenlage. Dies ist von grossem Vorteil z.B. beim häufigen Umsetzen der Motoren und den oft damit verbundenen Beschädigungen der Thermofühlerzuleitungen. Ebenfalls grosse Vorteile bietet dieses System bei den erhöhten Sicherheitsanforderungen wie Eigensicherheit des Schutzkreises bei Aufstellung und Betrieb der Motoren in explosionsgefährdeter Umgebung. Das System erreicht eine gute Genauigkeit, liegen doch die Abweichungen zwischen den mit diesem System simulierten Heisspunkttemperaturen und den zum Vergleich gemessenen Werten in der Regel um 3 K und erreichen selten 5 K.

Literatur

[1] *Leonhard, A.:* Elektrische Antriebe. 2. Auflage. Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag, 1959.
[2] *Leonhard, A.:* Die selbsttätige Regelung. 3. Auflage, Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer Verlag, 1962.
[3] *Schröter, M.:* Hochtouriger bürstenloser Positionierantrieb mit extrem geringer Momentenwelligkeit. Dissertation der Universität Stuttgart/Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, 1986.
[4a] Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche. Allgemeine Bestimmungen. SEV-EN 50014, 1978.
[4b] Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche. Besondere Bestimmungen für die Zündschutzart erhöhte Sicherheit «e». SEV-EN 50019, 1978.
[5] *Zeller, T.:* «Echtzeit-Temperatursimulation von Käfigläufermaschinen mit selbsttätiger Parameteranpassung». Dissertation der Universität Stuttgart/Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, 1988.
[6] Umlaufende elektrische Maschinen. Ermittlung der Verluste und des Wirkungsgrades. DIN 57 530 Teil 2 / VDE 0530 Teil 2/11.82.

Energieversorgungsnetze interaktiv planen

POSCODAM®

Das interaktive Programmsystem Poscodam® (Power System Computation and Data Management) für Personal Computer bewährt sich bereits auf über fünfzig installierten Anlagen:

- Netzdatenverwaltung mit Elementdatenbank
- Lastfluss- und Ausfallrechnung
- Kurzschlussberechnung nach VDE 0102/IEC 909 oder mit dem Überlagerungsverfahren
- Graphische Eingabe und Ausgabe von Netzplänen (GKS)

ABB
ASEA BROWN BOVERI

ASEA BROWN BOVERI AG, Geschäftsbereich Netzleittechnik, Abt. ELV-TN, 5300 Turgi
Tel. 056 29 20 84 / 29 27 32, Telefax 056 28 26 70, Telex 828 291 52