

Thermische Modelle zur Nachbildung des Verlaufs der mittleren Ankerwicklungs-temperatur von Gleichstrommaschinen auf einem Digitalrechner

A. Weinert, K. Bretthauer*)

Der Artikel berichtet über die Ergebnisse der gleichnamigen Dissertation. Die Problematik der Messung von Ankerwicklungstemperaturen von Gleichstrommaschinen, besonders während ihres Betriebs, wird behandelt. Hieraus ergibt sich der Wunsch nach thermischen Modellen zur kontinuierlichen Nachbildung der mittleren Ankerwicklungstemperatur. Nur solche Modelle sind darüber hinaus geeignet, Temperaturverläufe aufgrund beabsichtigter Belastungsverläufe vorzuberechnen.

Es werden thermische Modelle des Ankers geschildert, mit denen man aus dem Verlauf der sogenannten Modelleingangsgrößen den Verlauf der mittleren Ankerwicklungstemperatur berechnen kann. Diese Modelle können auf einfache und praktikable Weise die Temperaturabhängigkeiten der thermischen Eigenschaften der Ankermaterialien berücksichtigen. Die Modelleingangsgrößen lassen sich aus leicht erfaßbaren Maschinenmeßgrößen ermitteln; Modifikationen am rotierenden Anker sind hierzu nicht erforderlich. Die Anpassung eines thermischen Modells an eine gegebene Maschine ist das schwierigste Teilproblem; zwei hierfür geeignete, sich gut ergänzende Verfahren werden geschildert.

Über die Verwirklichung aller genannten Verfahren auf einer kleinen Prozeßrechneranlage und ihre Erprobung wird abschließend berichtet.

This paper gives an account of the results of the dissertation "Thermische Modelle zur Nachbildung des Verlaufs der mittleren Ankerwicklungstemperatur von Gleichstrommaschinen auf einem Digitalrechner".

The problems with measuring the temperature of the armature coil in a dc motor, particularly while revolving, are treated. It follows the need of thermal models for continuously denouncing the mean temperature of the armature coil. Beyond that, only such thermal models are able to predict runs of the temperature based on assumed runs of the motors load.

Thermal models suitable for both predicting and continuously denouncing the coil temperature are described. In a simple and practical manner, these models allow to take into account the temperature dependency of the thermal properties of the armature materials. Modell inputs are calculated from easily obtainable measured values of the motor; there is no need for modification of the armature.

The most difficult problem is the adapting of a thermal model to a given motor; two suitable methods, supplementing each other, are described.

All indicated methods for obtaining model input values, and for adapting the models and the running of them have been implemented on a small process computer, and they were tested. A report hereabout and an exemplary experimental result is given in the paper.

1 Problemstellung

Gleichstrommaschinen werden überwiegend dort eingesetzt, wo Drehmoment und Drehzahl in weiten Bereichen variiert werden müssen oder wo deren gute Steuer- und Regelbarkeit gefordert werden. Typische Anwendungsgebiete sind Gleichstromantriebe von Walzstraßen, Schachtförderan-

*) Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Albrecht Weinert war z. Z. der Abfassung des Aufsatzes wissenschaftlicher Assistent, und Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Bretthauer, VDE, ist Direktor des Instituts für Elektrische Energietechnik der Technischen Universität Clausthal.
Manuskripteingang: 20. 6. 1983

lagen und Fahrzeugen. Bei solchen Maschinen kommen gelegentlich thermische Beschädigungen der Ankerwicklungsisolation vor, ohne daß eine (für das Bedienungspersonal erkennbare) unübliche Überlastung vorangegangen wäre. Die Möglichkeit einer kontinuierlichen Überwachung der Ankerwicklungstemperaturen während des laufenden Betriebs würde eine große Sicherheit gegen thermische Schäden und die Möglichkeit einer höheren Ausnutzung der Anlage bedeuten. Bild 1 zeigt die drei prinzipiellen Wege zur gewünschten kontinuierlichen Überwachung der Ankerwicklungstemperatur:

- Messung bestimmter örtlicher Temperaturen mit Thermometern bzw. Fühlern, die in die Ankerwicklung eingebaut sind;
- Ermittlung der mittleren Ankerwicklungstemperatur (nach VDE 0530 [6]) über die Messung des ohmschen Ankergleichstromwiderstands;
- Nachbildung des zeitlichen Verlaufs der mittleren Ankerwicklungstemperatur mit einem geeigneten thermischen Modell.

Eine Realisierung dieser Überwachung mit in die Ankerwicklung eingebauten Temperaturfühlern hat einige, teilweise gravierende, technische Nachteile [7]; punktuelle Fühlermessungen haben darüber hinaus nur einen beschränkten Aussagewert. Eine kontinuierliche Überwachung der mittleren Ankerwicklungstemperatur, wie man sie aus einer Messung des ohmschen Gleichstromwiderstands der Ankerwicklung (nach VDE 0530 [6]) ermitteln kann, vermeidet alle diese Nachteile. Wie in [5] gezeigt werden konnte, ist es bei Beachtung bestimmter Kriterien

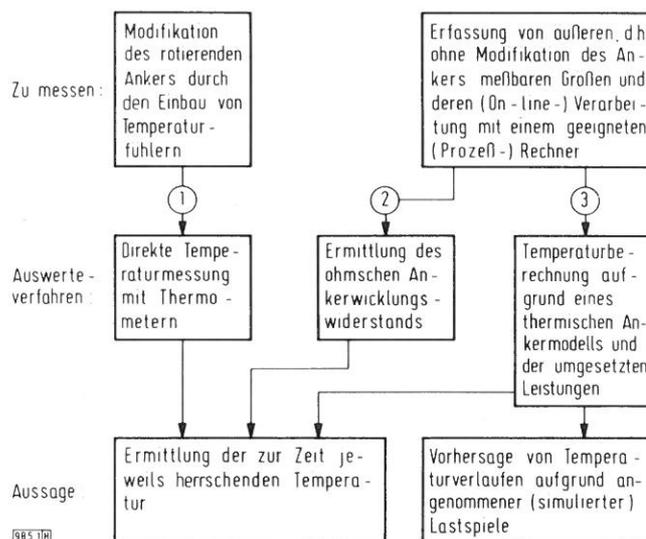


Bild 1. Grundsätzlich mögliche Verfahren zur Ermittlung der Ankerwicklungstemperatur von Gleichstrommaschinen

auch ausreichend, nur die mittlere Ankerwicklungstemperatur kontinuierlich zu überwachen.

Bei den entsprechenden Untersuchungen [5] an einer 490-kW-Gleichstrommaschine wurden zwar unter bestimmten Umständen mit Fühlern in der Ankerwicklung Temperaturen gemessen, deren Differenz zur mittleren Wicklungstemperatur die entsprechenden Sicherheitszuschläge der Bestimmung VDE 0530 um ein Mehrfaches überstieg, aber aus den ausführlichen Messungen mit mehreren Fühlern usw. ließ sich auch ein Grenzwert für die mittlere Ankerwicklungstemperatur angeben, bei dem kein Fühlermeßwert den zulässigen Grenzwert überschritt. Dieser Grenzwert liegt natürlich niedriger als der entsprechend VDE 0530 ($40^\circ\text{C} + \text{Grenzübertemperatur}$) ermittelte; in dem in [5] beschriebenen Fall würde letztlich doch eine Überwachung der mittleren Ankerwicklungstemperatur genügen, zumal sich das thermische Zeitverhalten der kritischen Stellen als sehr gut mit dem der mittleren Wicklungstemperatur übereinstimmend erwies.

Aus den Überlegungen des nächsten Abschnitts und den entsprechenden experimentellen Nachprüfungen [7, 8] folgt, daß eine Messung des Ankerwiderstands zur Ermittlung der mittleren Ankerwicklungstemperatur im normalen Betrieb nur sehr selten möglich sein wird. Es stehen also nur zu unregelmäßigen und eventuell weit auseinanderliegenden Zeitpunkten sogenannte Kontrollmessungen der mittleren Ankerwicklungstemperatur zur Verfügung. Daraus ergibt sich das Bedürfnis, zumindest in den Zeiten zwischen solchen Kontrollmessungen, den Verlauf der mittleren Ankerwicklungstemperatur mit einem thermischen Modell nachzubilden. Im Rahmen der Genauigkeit, mit der dies gelingt, erzielt man die gewünschte kontinuierliche Temperaturüberwachung. Im Gegensatz zu allen (direkten) Temperaturmeßverfahren sind nur solche Modelle darüber hinaus auch dazu geeignet, Temperaturverläufe aufgrund beabsichtigter Lastspiele vorauszuberechnen.

2 Messung der mittleren Ankerwicklungstemperatur

Die Ermittlung der mittleren Ankerwicklungstemperatur beruht auf der Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands des Leitermaterials (im allgemeinen Kupfer). Eine Temperaturerhöhung um 3 K hat eine Erhöhung des Gleichstromwiderstands um etwa 1 % zur Folge. Für Leitungskupfer gilt

$$R(\vartheta) = R(20^\circ\text{C}) \cdot (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \tau/\text{K} + 0,6 \cdot 10^{-6} \tau^2/\text{K}^2), \quad (1)$$

wobei $\tau = \vartheta - 20^\circ\text{C}$.

Hieraus ergibt sich die Umkehrfunktion $\vartheta(R)$ zu

$$\vartheta = 20^\circ\text{C} + \gamma 256,4\text{K} - (\gamma 256,4)^2 \cdot 154 \cdot 10^{-6} \text{K}, \quad (2)$$

wobei $\gamma = R(\vartheta)/[R(20^\circ\text{C})] - 1$,

mit dem aus Messungen ermittelten Wert

$$R(\vartheta) = U_{a,R}/I_a. \quad (3)$$

In Gl. (3) bedeuten

- ϑ Temperatur in $^\circ\text{C}$,
- R Gleichstromwiderstand der Ankerwicklung,
- I_a Ankerstrom,
- $U_{a,R}$ ohmscher Ankerspannungsabfall.

(Wie aus dem weiter unten beschriebenen Meßverfahren hervorgeht, sind für I_a und $U_{a,R}$ gegebenenfalls korrigierte Werte einzusetzen.)

Für die Temperaturermittlung kommt es darauf an, den im allgemeinen sehr kleinen Widerstand der Ankerwicklung hinreichend genau zu messen. Dazu ist es unbedingt erforderlich, den Bürstenspannungsabfall auszuschalten. Hierzu muß die Maschine mit besonderen Meßbürsten ausgestattet sein, die im allgemeinen erst nachzurüsten sind; jedoch sind keinerlei Veränderungen oder Meßeinrichtungen auf dem rotierenden Anker der Maschine nötig.

Bild 2 zeigt das Prinzip der Meßschaltung für die benötigten elektrischen Maschinenmeßgrößen. Grundsätzlich würde auch bei mehrpolpaarigen Maschinen mit mehreren (Haupt-) Bürstenpaaren ein einziges Meßbürstenpaar genügen. Es hat sich aber als vorteilhaft für eine hohe Meßgenauigkeit und Betriebssicherheit erwiesen, (in Achsrichtung) neben jedem Hauptbürstensatz jeweils eine davon isolierte Meßbürste vorzusehen. Die zueinandergehörenden Meßbürsten gleichen Potentials werden über Widerstände verbunden, die mit 100Ω bis 500Ω sehr klein gegenüber den Eingangswiderständen der Verstärker und Spannungsteiler sind. Diese Widerstände verhindern zu große Ausgleichsströme über die Meßbürsten. Zwischen den gemeinsamen Anschlüssen dieser Verbindungswiderstände wird die Ankerspannung ohne den Bürstenspannungsabfall gemessen.

Der direkt angeschlossene Meßverstärker V2, der entsprechend übersteuerungsfest sein muß, dient zur genauen Messung niedriger Ankerspannungen bis etwa $\pm 10 \text{ V}$, wie sie bei der Messung des Ankerwiderstands auftreten. Der über einen Spannungsteiler angeschlossene Verstärker V3 kann die Ankerspannung bis zum höchsten vorkommenden Wert ohne Übersteuerung erfassen.

Der Verstärker V5 mißt den Ankerstrom als Spannungsabfall an einem in den Ankerkreis eingefügten Shunt; an

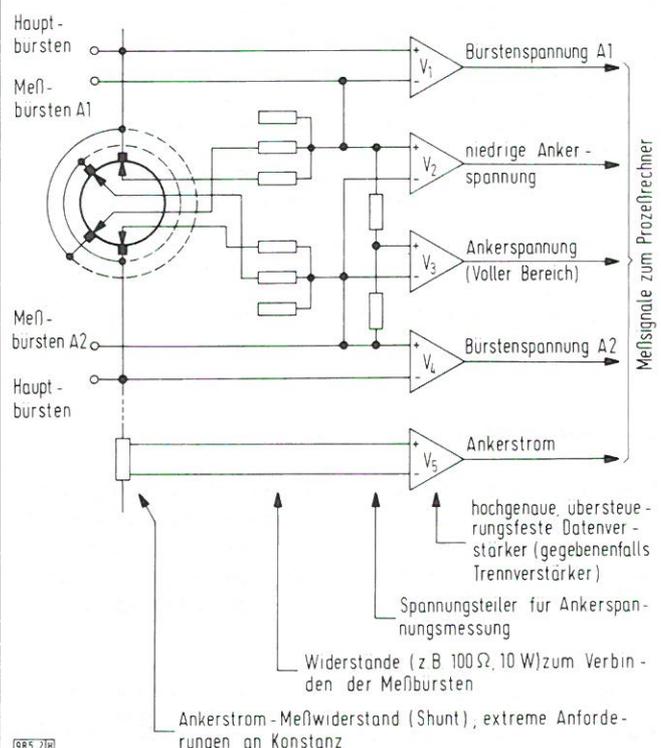


Bild 2. Erfassung der wichtigsten elektrischen Maschinengrößen

diesen sind besonders hohe Anforderungen bezüglich (Temperatur-)Konstanz zu stellen, denn es ist unmöglich, temperaturbedingte Änderungen des Ankerwiderstands im Promillbereich zu messen, wenn der Shuntwiderstand vergleichbaren Veränderungen unterliegt.

Zwischen einem Hauptbürstenanschluß und den zugehörigen Meßbürsten messen die Verstärker V1 und V4 die Bürstenspannungsabfälle, die für die Ermittlung der Kommutatorverluste (Abschnitt 4.1) benötigt werden.

Aus Betriebssicherheitsgründen sollten alle Verstärker (gegebenenfalls durch entsprechende äußere Beschaltung) bis zur höchsten vorkommenden Ankerspannung übersteuerungsfest sein. Falls es die Potential- oder Erdungsverhältnisse erfordern, sind Trennverstärker vorzusehen.

Die Ankerwiderstandsermittlung aus Ankergleichstrom und -spannung wird jedoch noch von einer Vielzahl von Effekten beeinflusst [7]. Der wesentlichste ist die induzierte Ankergleichspannung. Sie ist schon bei niedrigsten Drehzahlen einer schwach erregten Maschine störend groß. Die induzierte Ankergleichspannung und störende Wechselstromeffekte bewirken, daß eine hinreichend genaue Ankerwiderstandsermittlung nur in ganz bestimmten, mechanisch unbelasteten Betriebszuständen der Maschine möglich ist.

Außerdem ist im allgemeinen ein recht kompliziertes Meßverfahren erforderlich, das alle restlichen störenden Effekte kompensiert. Dann aber sind recht hohe Meßgenauigkeiten erreichbar. Man kann Temperaturänderungen in der Größenordnung 0,1 K erfassen.

Für eine genaue Messung des ohmschen Ankergleichstromwiderstands kommen nur zwei mechanisch unbelastete Betriebszustände der betreffenden Gleichstrommaschine in Frage, nämlich „Stillstand“ und „Schleichdrehzahl durch Fremdantrieb“:

Stillstand

Bei vielen Antrieben, wie beispielsweise Schachtförderanlagen oder Walzstraßen, treten betriebsmäßig einige s lange Stillstandszeiten auf, in denen entweder sowieso ein Ankergleichstrom fließt oder aber ein kleiner Ankermessgleichstrom nicht stört (gegebenenfalls muß die Maschine mechanisch festgebremst werden). Dieser Ankergleichstrom und der an den Meßbürsten gemessene Ankerspannungsabfall (siehe V5 und V2 im Bild 2) ergeben den Wicklungswiderstand und damit die gesuchte mittlere Ankerwicklungstemperatur (Gln. (3) und (2)).

Schleichdrehzahl durch Fremdantrieb

Die Widerstandsermittlung ist auch möglich, wenn die unerregte Maschine sehr langsam – etwa eine Polteilung pro s – und gleichmäßig angetrieben wird. Da eine vollkommene Entmagnetisierung der Maschine kaum zu erreichen ist, muß der über die Meßbürsten gemessene Ankerspannungsabfall um die vom Restmagnetfeld induzierte Gleichspannung korrigiert werden.

Die restliche induzierte Spannung ist mit Ankerstrom Null unter sonst gleichen Bedingungen zu messen. Dieses komplizierte Meßverfahren ließe sich betriebsmäßig bei mehrmotorigen Antrieben verwirklichen, indem abwechselnd ein Motor als Antrieb dient, während an dem oder den anderen gemessen wird.

Prinzipiell ist diese zweite (Schleichdrehzahl-) Meßmethode der Messung im Stillstand überlegen, vorausgesetzt man kann einen automatischen, reproduzierbaren Ablauf des dafür erforderlichen komplizierten Meßverfahrens

(siehe [8]) gewährleisten. Bei diesem Meßverfahren wird nämlich in immer gleicher Weise über alle Ankerstellungen gemittelt, während das Ergebnis einer Stillstandsmessung immer etwas von der (zufälligen) Ankerstellung abhängt. Es sind Fälle aufgetreten, in denen die Abhängigkeit von kleinsten Verdrehungen des Ankers so stark ausgeprägt war, daß reproduzierbare Widerstandsmessungen nur bei Schleichdrehzahl und nicht mehr im Stillstand möglich waren [7].

Für die modellmäßige Nachbildung des Verlaufs der mittleren Ankerwicklungstemperatur ist die Beherrschung dieser Widerstands- bzw. Temperaturmeßproblematik aus folgenden drei Gründen wichtig:

- Auch bei einer bereits in Betrieb genommenen modellmäßigen Nachbildung der mittleren Ankerwicklungstemperatur sind gelegentlich Messungen dieser Temperatur erforderlich, um z. B. Anfangs- oder Kontrollwerte für die nachgebildete Temperatur zu erhalten. In diesem Sinne wird später von „Kontrollmessungen der mittleren Ankerwicklungstemperatur“ gesprochen.
- Für die im Abschnitt 4 zu besprechende Modellanpassung sind gerade hier hohe Meßgenauigkeiten erforderlich.
- Die in jedem Fall erforderliche meß- und steuerungstechnische Realisierung dieser genauen Meßmöglichkeit stellt die größte Hürde für einen Anwender der hier beschriebenen Verfahren dar. Verglichen damit sind die übrigen technischen Probleme des Anwenders einfach, bzw. es existieren fertig entwickelte Verfahren, die für alle in Frage kommenden Anlagen anwendbar sind.

3 Nachbildung des Verlaufs der mittleren Ankerwicklungstemperatur mit thermischen Modellen des Ankers

Die in [8] verwirklichte Nachbildung des Wicklungstemperaturverlaufs mit einem thermischen Modell ist im Bild 3 grob skizziert. Wenn man – von der Maschine ausgehend – den Signalweg nach links verfolgt, gelangen die „Maschinenmeßgrößen“ in einen „Meßwertaufbereitung“ genannten Block. Mit den darin ermittelten (thermischen) „Modell-

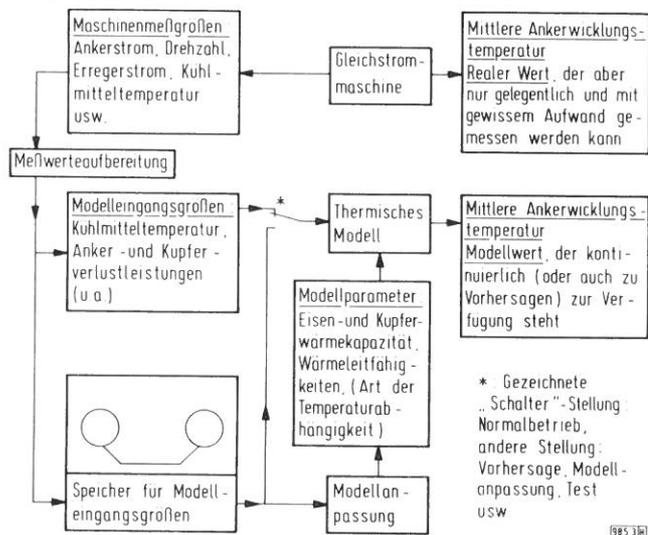


Bild 3. Überblick über die Nachbildung des Verlaufs der mittleren Ankerwicklungstemperatur mit thermischen Modellen

eingangsgrößen“ wird das „thermische Modell“ gespeist. Mit diesen Eingangsgrößen und den sogenannten Modellparametern, deren Zahlenwerte an das thermische Verhalten der betreffenden Maschine angepaßt sind, liefert das thermische Modell dann den interessierenden Verlauf der mittleren Ankerwicklungstemperatur als Modellausgangsgröße (mittlere Zeile im Bild 3, rechts).

3.1 Die thermischen Modelle des Ankers

Für eine praktische kontinuierliche Ankertemperaturüberwachung und andere Anwendungen werden in [8] zwei geeignete Typen thermischer Modelle des Ankers angegeben; diese Modelltypen werden „Zweikapazitätenmodell“ und „Dreikapazitätenmodell“ genannt.

Dem Zweikapazitätenmodell liegt eine stark vereinfachte physikalische Modellvorstellung des Ankers zugrunde (Bild 4, unschraffiert): Das Ankereisen, in dem auch die Ankereisenverluste entstehen, wird als eine einzige diskrete Wärmekapazität C_1 mit einer Wärmeleistungsquelle Q_1 angesehen. Als zweite Wärmekapazität C_2 mit einer Wärmeleistungsquelle Q_2 wird das Ankerkupfer mit den Ankerkupferverlusten betrachtet. Durch Wärmeleitwerte G_{ij} werden die beiden Kapazitäten sowohl untereinander (durch G_{12}) als auch mit einem Temperaturreservoir ϑ_0 (durch G_{10} und G_{20}) verbunden. Das Temperaturreservoir ϑ_0 stellt das Ankerkühlmittel dar.

Nur für besondere Anwendungsfälle wurde das Dreikapazitätenmodell entwickelt. Es entsteht aus dem Zweikapazitätenmodell durch zusätzliche Berücksichtigung des Kommutators (Kommutatorverluste Q_3 , Kommutatorwärmekapazität C_3 , Kommutatorkühlmitteltemperatur ϑ_4 und die zusätzlichen Wärmeleitwerte G_{13} , G_{23} und G_{34} , siehe Bild 4, schraffiert).

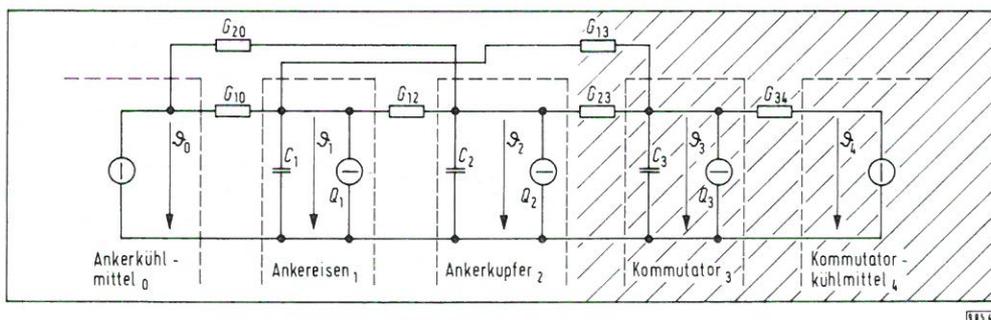
Bild 4 zeigt beide Modelltypen. Die Annahme konzentrierter anstelle verteilter Wärmekapazitäten und Wärmeleitwerte führt zu gewöhnlichen anstelle partieller Differentialgleichungen (Dgln.) und damit auch zu einer Beschreibung der thermischen Verhältnisse durch thermische Netzwerke mit diskreten thermischen Schaltelementen. Zur Darstellung dieser Netzwerke werden im Bild 4 umgedeutete elektrische Schaltzeichen verwendet.

Modellparameter	Material ; Beitrag zum Wärmewiderstand
C_1 Wärmekapazität Ankereisen 1	Eisen
C_2 Wärmekapazität Ankerleiter 2	Kupfer
G_{12} Wärmeleitwert 1 – 2	Glas
G_{10} Wärmeleitwert 1 – Ankerkühlmittel	Luftschicht
G_{20} Wärmeleitwert 2 – Ankerkühlmittel	Glas, Kunststoff, Luft ; 1 : 1 : 1
C_3 Wärmekapazität Kommutator 3	Kupfer
G_{13} Wärmeleitwert 1 – 3	Kunststoff, Mica, Eisen ; 3 : 1 : 1
G_{23} Wärmeleitwert 2 – 3	Kupfer
G_{34} Wärmeleitwert 3 – Kommutator-kühlmittel	Luft

Tabelle 1. Zuordnung von Ankermaterialien zu den Modellparametern

Die diskreten Modellwärmekapazitäten C_i und Modellwärmekapazitäten G_{ij} werden Modellparameter genannt. Diesen Modellparametern kann man die Materialien zuordnen, aus denen die entsprechenden Teile des Ankers tatsächlich bestehen. Die an sich kleinen Temperaturkoeffizienten ($-4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ bis $+10^{-3} \text{ K}^{-1}$) der thermischen Materialeigenschaften (spezifische Wärmekapazität und spezifische Wärmeleitfähigkeit) können im hier interessierenden Temperaturbereich als (temperaturunabhängig) konstant angesehen werden. Aus diesen linearen Temperaturunabhängigkeiten ergeben sich direkt und ohne besondere Versuche die Temperaturabhängigkeiten der Modellparameter.

Tabelle 1 zeigt eine beispielhafte Zuordnung von Ankermaterialien zu den Modellparametern. Hiermit ergeben sich (direkt) die in Tabelle 2 zusammengestellten Temperaturabhängigkeiten für die Modellparameter. Dabei wurde als Temperatur ϑ_i eines Wärmeleitwerts der Mittelwert der von ihm verbundenen Temperaturen angesehen. Bei aus mehreren Materialien zusammengesetzten Leitwerten wurden die Temperaturkoeffizienten der Wärmeleitfähigkeit im Verhältnis der (angenommenen) Beteiligung der Materialien am Wärmewiderstand gewichtet. Diese (linearen) Näherungen können im Einzelfall bei genauer Kenntnis des Ankeraufbaus verfeinert werden; das hier angedeutete



Art	Schaltelement	Formelzeichen	Einheit	Schaltzeichen
elektrisch	elektrischer Leitwert	G	$S = A/V$	
thermisch	Wärmeleitfähigkeit	G	W/K	
elektrisch	Kapazität	C	$F = C/V$	
thermisch	Wärmekapazität	C	J/K	
elektrisch	Stromquelle	I	A	
thermisch	Wärmeleistungsquelle	Q	W	
elektrisch	Spannungsquelle	U	V	
thermisch	Temperaturreservoir	T, ϑ	$K, ^\circ C$	

Bild 4. Verwendete Typen thermischer Ankermodelle und Erläuterungen ihrer Darstellung mit umgedeuteten elektrischen Schaltzeichen

$$C_1(\vartheta) = (1,117 \cdot 10^{-3} \vartheta_1 + 0,9770) C_1(20^\circ\text{C})$$

$$C_2(\vartheta) = (4,318 \cdot 10^{-4} \vartheta_2 + 0,9914) C_2(20^\circ\text{C})$$

$$G_{12}(\vartheta) = [(\vartheta_1 + \vartheta_2) 5,4070 \cdot 10^{-4} + 0,97837] G_{12}(20^\circ\text{C})$$

$$G_{10}(\vartheta) = [(\vartheta_1 + \vartheta_0) 1,2462 \cdot 10^{-3} + 0,95015] G_{10}(20^\circ\text{C})$$

$$G_{20}(\vartheta) = [(\vartheta_2 + \vartheta_0) 1,1138 \cdot 10^{-3} + 0,95545] G_{20}(20^\circ\text{C})$$

$$C_3(\vartheta) = (4,318 \cdot 10^{-4} \vartheta_3 + 0,9914) C_3(20^\circ\text{C})$$

$$G_{13}(\vartheta) = [(\vartheta_1 + \vartheta_3) 7,6187 \cdot 10^{-4} + 0,96953] G_{13}(20^\circ\text{C})$$

$$G_{23}(\vartheta) = [-(\vartheta_2 + \vartheta_3) 8,5720 \cdot 10^{-5} + 1,0034] G_{23}(20^\circ\text{C})$$

$$G_{34}(\vartheta) = [(\vartheta_4 + \vartheta_3) 1,2462 \cdot 10^{-3} + 0,95015] G_{34}(20^\circ\text{C})$$

Tabelle 2. Temperaturabhängigkeit der Modellparameter (Zahlenwertgln.: ϑ_0 bis ϑ_4 in $^\circ\text{C}$)

einfache Verfahren zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeiten der Modellparameter hat sich aber als vollkommen ausreichend bewährt.

Bild 5 zeigt drei Verläufe I, II, III der mittleren Ankerwicklungstemperatur ϑ_2 , die mit dem gleichen Lastspiel bei gleichen Anfangsbedingungen mit drei verschiedenen thermischen Modellen (I bis III) berechnet wurden.

Die Modelle I und II unterscheiden sich nur dadurch, daß bei I die Modellparameter temperaturabhängig nach den Gln. in **Tabelle 2** und bei II temperaturunabhängig (konstant) sind. Das ebenfalls temperaturunabhängige Modell III wurde mit den im Abschnitt 4 beschriebenen Methoden für die optimale Nachbildung des durch das temperaturabhängige Modell I gegebenen Temperaturverlaufs angepaßt. Bei diesem Beispiel demonstrieren die Temperaturunterschiede zwischen den Verläufen I und II den doch deutlichen Einfluß der an sich kleinen Temperaturkoeffizienten der thermischen Materialeigenschaften auf das thermische Verhalten einer Maschine. Der Unterschied zwischen den Verläufen I und III zeigt den durch

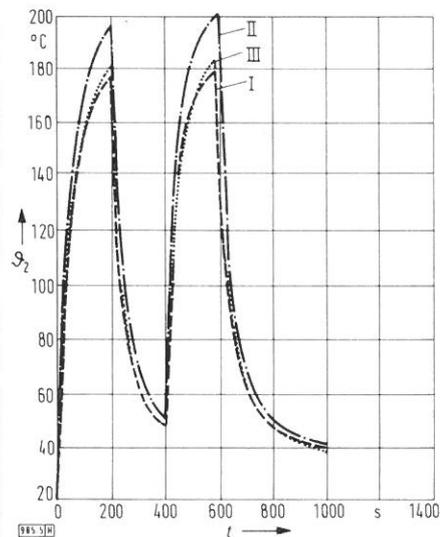


Bild 5. Auswirkung der Temperaturabhängigkeiten der Wärmekapazität und Wärmeleitwerte des Ankers (Erläuterungen im Text)
 Aufheizung: $Q_1 = 100 \text{ W}$; $Q_2 = 400 \text{ W}$; $Q_3 = 80 \text{ W}$; $\vartheta_{0,4} = 20^\circ\text{C}$
 Abkühlung: $Q_1 = 100 \text{ W}$; $Q_2 = 0 \text{ W}$; $Q_3 = 30 \text{ W}$; $\vartheta_{0,4} = 20^\circ\text{C}$
 I, II: $C_1 = 400 \text{ J/K}$; $C_2 = 100 \text{ J/K}$; $C_3 = 20 \text{ J/K}$; $G_{10} = 4 \text{ W/K}$;
 $G_{12} = 2 \text{ W/K}$; $G_{20} = 1 \text{ W/K}$; $G_{30} = 0,25 \text{ W/K}$; $G_{13} = 0,1 \text{ W/K}$;
 $G_{23} = 0,5 \text{ W/K}$

das Ignorieren dieses Einflusses hervorgerufenen unvermeidbaren Fehler. Die Notwendigkeit der Berücksichtigung dieser Temperaturabhängigkeiten wurde bereits in [5] erkannt, in [8] wurde eine praktikable Lösung hierfür gefunden.

Entsprechend seinem Zweck hat ein thermisches Modell des Ankers, wie es im **Bild 4** gezeigt und oben beschrieben wurde, eine einzige Ausgangsgröße: die mittlere Ankerwicklungstemperatur. Modellmäßig ist dies die Temperatur ϑ_2 der Modell-Ankerkupferwärmekapazität C_2 . Modelleingangsgrößen sind:

- Ankereisenverlustleistung Q_1 ,
- Ankerkupferverlustleistung Q_2 und Ankerkühlmitteltemperatur ϑ_0 beim Zweikapazitätenmodell und zusätzlich
- Kommutatorverlustleistung Q_3 und Kommutatorkühlmitteltemperatur ϑ_4 beim Dreikapazitätenmodell.

Bestimmte programmorganisatorische Maßnahmen bei der im Abschnitt 5 beschriebenen praktischen Verwirklichung der modellmäßigen Nachbildung des Ankertemperaturverlaufs und erwünschte Nebeneffekte der im Abschnitt 4 behandelten Modellanpassung ermöglichten es, einfache und praktikable Verfahren zur Ermittlung der Modelleingangsgrößen aus leicht erfaßbaren Maschinenmeßgrößen anzugeben [8]. (Diese Verfahren sind links im **Bild 3** durch den Block „Meßwertaufbereitung“ dargestellt.) Neben den im **Bild 2** erfaßten elektrischen Maschinengrößen werden im einfachsten Fall zusätzlich der Erregerstrom, die Drehzahl und die Kühlmitteltemperatur(en) benötigt.

3.2 Modellbetrieb

Zum Betrieb eines Modells wird für aufeinanderfolgende (kurze) Zeitintervalle das System der Modell-Dgln. für das jeweilige Zwei- bzw. Dreikapazitätenmodell gelöst.

Die praktische Behandlung des betreffenden Modell-Dgl.-Systems wird durch die folgenden hier zulässigen Näherungen ermöglicht: Die zeitlichen Verläufe der Modelleingangsgrößen werden durch ihre Mittelwerte während aufeinanderfolgender Zeitabschnitte, also durch entsprechende Treppenfunktionen ersetzt. Dies ist wegen des reinen Tiefpaßcharakters der thermischen Netzwerke solange zulässig, wie die betrachteten Zeitabschnitte kurz gegenüber der kleinsten thermischen Zeitkonstanten des Modells sind. Aus anderen mit der Meßwertaufbereitung und -speicherung (siehe **Bild 3**) zusammenhängenden praktischen Gründen sollten (und können) diese Zeitabschnitte noch sehr lang gegenüber den sehr viel kleineren elektrischen Zeitkonstanten der betreffenden Maschine sein.

Als zweite Näherung wird für jeden temperaturabhängigen Modellparameter konstant derjenige Wert in die Dgln. eingesetzt, der zu den Anfangstemperaturen des jeweiligen Zeitabschnitts gehört. Dies ist wegen der kleinen Werte der Temperaturkoeffizienten der Modellparameter (**Tabelle 2**) unproblematisch, solange man die Zeitabschnitte so klein wählt, daß sich in ihnen keine größeren Temperaturänderungen als etwa $\pm 10 \text{ K}$ ergeben können. (In dem in [8] vorgestellten Programmsystem werden zu lange Zeitabschnitte selbsttätig unterteilt.)

Mit diesen Näherungen gelangt man für jeden der aufeinanderfolgenden kurzen Zeitabschnitte zu jeweils einem System von gekoppelten linearen Dgln. erster Ordnung mit konstantem inhomogenem Teil. Solche Systeme lassen sich

sehr einfach numerisch lösen. Für das Dgl.-System des Dreikapazitätenmodells wird in [8] ein *Runge-Kutta*-Verfahren vierter Ordnung [4] verwendet, während das Dgl.-System des Zweikapazitätenmodells direkt gelöst wurde. Die mit *Laplace*-Transformationen [3] hergeleitete geschlossene Lösung ist im Falle des Zweikapazitätenmodells numerisch unkritischer und weniger rechenzeit-aufwendig als eine numerische Dgl.-Lösung.

Mit den bisher erwähnten Verfahren, die in einem modularen Programmsystem verwirklicht wurden, ist der Betrieb eines bereits an eine Maschine angepaßten Modells zur Temperaturüberwachung oder -vorhersage möglich.

4 Modellanpassung

Der Modellanpassung wird ein prinzipiell beliebiger Betriebsverlauf der betreffenden Maschine zugrunde gelegt, der aber genügend Kontrollmessungen der mittleren Ankerwicklungstemperatur (siehe Abschnitt 2) enthalten muß (etwa 30 bis 50); diese Kontrollmessungen können in unregelmäßigen Zeitabständen vorgenommen werden. Es sollen diejenigen Zahlenwerte der Modellparameter für 20 °C gefunden werden, bei denen der Modellfehler minimal oder zumindest genügend klein wird. Der Modellfehler wird definiert als quadratischer Mittelwert der Abweichungen zwischen den Kontrollwerten und der jeweiligen Modellausgangstemperatur.

Die Modellanpassung ist ein sehr rechenzeitaufwendiger (iterativer) Prozeß, der nur „off-line“ ausgeführt werden kann, und somit eine Aufzeichnung des der Modellanpassung jeweils zugrunde gelegten Betriebsverlaufs der Maschine erforderlich macht. Die Organisation des in [8] verwirklichten Programm- und Prozedursystems ermöglicht diese Aufzeichnung in Form der Modelleingangsgrößen, wie dies im **Bild 3** dargestellt ist. Die (ohne besondere Maßnahmen) an sich erforderliche Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs der Maschinenmeßgrößen wäre um mehrere Größenordnungen umfangreicher und unvergleichbar unhandlicher.

Zur Lösung des Modellanpassungsproblems wurden zwei Verfahren, die sich auch hinsichtlich ihrer Anwendungsbereiche gut ergänzen, entwickelt: das theoretisch recht einfache „Rastersuchverfahren“ und das theoretisch komplizierte „Regressionsanpaßverfahren“. Programmtechnisch sind beide Verfahren nicht ganz einfach.

4.1 Rastersuchverfahren

Beim Rastersuchverfahren gibt man für jeden Modellparameter ein Intervall und eine Schrittzahl an. Es werden dann alle Kombinationen von Modellparameterwerten durchgerechnet und die 16 besten Modelle ermittelt. Etwas Überlegung und Entwicklungsarbeit steckt hier in der Aufteilung der Modellparameterintervalle, vor allem aber in der Programmorganisation. Es ging darum, das Durchrechnen sehr vieler Kombinationen (unter Umständen mehr als 10 000) in einer noch vernünftigen Rechenzeit zu ermöglichen.

Im Grunde genommen käme man mit einer iterativen Anwendung des Rastersuchverfahrens auf immer weiter verkleinerte Modellparameterintervalle aus. Es ist aber günstiger, mit dem Regressionsanpaßverfahren weiterzuarbeiten, wenn man mit Hilfe des Rastersuchverfahrens bereits folgendes erreicht hat:

- man hat festgestellt, daß der zugrunde gelegte Betriebsverlauf der Maschine für die Modellanpassung geeignet ist (siehe Abschnitt 4.3);
- man hat mindestens ein Modell mit einem Fehler von unter 10 K (besser 5 K) als Ausgangsmodell für das Regressionsanpaßverfahren gefunden.

4.2 Regressionsanpaßverfahren

Beim Regressionsanpaßverfahren wird, von einem möglichst guten Modell ausgehend, im Raum der zu variierenden Modellparameter ein sogenannter Korrekturvektor berechnet. Die Schilderung dieser Berechnung würde hier den Rahmen sprengen; u. a. wird dabei ein abgewandeltes Verfahren der sogenannten mehrfachen linearen Regression verwendet. Daher rührt der Name dieses Modellanpaßverfahrens. Der Korrekturvektor weist vom Ausgangsmodell in Richtung besserer Modelle. In dieser Richtung werden 15 verschiedene Modelle durchgerechnet und das beste als Ausgangsmodell für den nächsten Iterationsschritt verwendet. Lag das ursprüngliche Ausgangsmodell nahe genug am globalen Optimum, so wird dieses in wenigen Iterationsschritten gefunden. Programmtechnische Schwierigkeiten lagen bei diesem Verfahren in der Ablauforganisation des umfangreichen Programms und in der sinnvollen Behandlung vieler Sonderfälle.

4.3 Vergleich und Anwendungsbereiche beider Modellanpaßverfahren

Das Regressionsanpaßverfahren liefert (als echtes Optimierungsverfahren) bessere Ergebnisse als es bei einer noch so geschickten iterativen Anwendung des Rastersuchverfahrens möglich wäre; außerdem ist der Rechenzeitaufwand sehr viel geringer. Seine Anwendung setzt aber bereits eine gewisse Kenntnis des thermischen Verhaltens der betreffenden Maschine (in Form des erwähnten möglichst guten Ausgangsmodells) voraus.

Im Gegensatz dazu kann als Rastersuchverfahren mit entsprechend großen Modellparameterintervallen in einem allerersten Modellanpassungsversuch auch ohne jede Kenntnis des thermischen Verhaltens der Maschine verwendet werden. Neben einem oder mehreren für die weitere Verbesserung (mit dem Regressionsanpaßverfahren oder in weiteren Iterationsschritten mit dem Rastersuchverfahren) geeigneten Modellen liefert nur das Rastersuchverfahren eine weitere wichtige Information:

- Werden mehrere sehr unterschiedliche Zweikapazitätenmodelle mit nicht zu großen Fehlern (< 2 K) gefunden, so ist der zugrunde gelegte Betriebsverlauf der Gleichstrommaschine für die Modellanpassung ungeeignet. Im allgemeinen sind dann die einzelnen Verluste Q_1 und Q_2 zu eng korreliert, die Kühlmitteltemperatur zeitlich konstant oder einfach zu wenig Kontrollmessungen der mittleren Ankerwicklungstemperatur vorhanden. In einem solchen Falle muß man sich vor weiteren Modellanpaßversuchen zunächst um die Aufzeichnung anderer, in einem gewissen Sinn möglichst unregelmäßiger Betriebsverläufe der Maschine bemühen.

5 Praktische Erfahrungen

Alle genannten Verfahren zur Ermittlung der Modelleingangsgrößen, zum Betrieb und zur Anpassung eines Modells

wurden als modulares Programm- und Prozedursystem auf einer kleinen Prozeßrechneranlage (HP 2100 S [1], RTE II [2]) verwirklicht. Die meisten Module sind in Fortran IV geschrieben; nur wenige wurden aus Rechenzeit- und Speicherplatzgründen in Assembler erstellt, können aber ohne weiteres durch entsprechende Versionen in höheren Programmiersprachen ersetzt werden.

Durch Versuche wurde der Nachweis der praktischen Verwendbarkeit aller angegebenen Verfahren erbracht. Über mehrstündige und unregelmäßige Betriebsverläufe einer Gleichstrommaschine konnte der Verlauf der mittleren Ankerwicklungstemperatur mit mittleren quadratischen Fehlern zwischen 0,5 K und 1,5 K modellmäßig nachgebildet werden.

Bild 6 zeigt einen etwa 100 min langen Betriebsverlauf einer vierpoligen, selbstbelüfteten Gleichstrommaschine; von oben nach unten sind die zeitlichen Verläufe von Erregerstrom, Bürstenspannung, Ankerspannung, Ankerstrom und Drehmoment, Drehzahl sowie von zwei Kühlmitteltemperaturen dargestellt.

Bild 7 zeigt zunächst die daraus errechneten Verläufe der Modelleingangsgrößen Q_1 bis Q_3 (untere drei Kurven) sowie (mit einem „Kreis“ bzw. „Quadrat“ markiert) ϑ_0 und ϑ_4 (siehe Abschnitt 3.1). Von einem thermischen Modell der betreffenden Maschine wurde der Verlauf der Ankereisentemperatur (Modelltemperatur ϑ_1 , im Bild 7 gestrichelt) und vor allem der Verlauf der mittleren Ankerwicklungstemperatur (Modellausgangsgröße ϑ_2 , im Bild 7 oben, durchgezogene Kurve) berechnet. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Kontrollwerten ϑ_{2k} (im Bild 7 mit einem „Kreuz“ markiert, siehe auch Abschnitt 2);

die mittlere quadratische Abweichung zwischen den Kontrollmeßwerten und der entsprechenden Modellaussage beträgt hier 0,68 K.

Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist noch folgendes zu berücksichtigen:

- Der im Bild 6 gezeigte Betriebsverlauf ist nicht derjenige, der bei der Modellanpassung zugrunde gelegt wurde (siehe Abschnitt 4).
- Die Kontrollmeßwerte der mittleren Ankerwicklungstemperatur wurden hier *nicht* zur Korrektur der Modellausgangstemperatur ϑ_2 verwendet. Eine solche Korrektur ist natürlich bei jedem Vorliegen einer Kontrollmessung möglich und im allgemeinen auch sinnvoll. Sie ist – in Verbindung mit einer (unter Umständen komplizierten, siehe Abschnitt 2) Messung des Ankerwiderstands nach den bisherigen Erfahrungen nur etwa alle 3 h erforderlich.

Damit wurde ein allgemein anwendbares, praktikables Verfahren zur kontinuierlichen Überwachung der mittleren Ankerwicklungstemperatur von Gleichstrommaschinen entwickelt, das ohne jede Eingriffe und Meßeinrichtungen auf dem rotierenden Anker auskommt und so auch für bereits bestehende Anlagen geeignet ist. Neben der kontinuierlichen Überwachung können auch Temperaturverläufe vorausberechnet werden.

Mit diesen Darstellungen konnte keine vollständige, nachvollziehbare Beschreibung der entwickelten Lösungen gegeben werden; einige Probleme und Einzelheiten mußten hier stark vereinfacht beschrieben oder völlig übergangen werden.

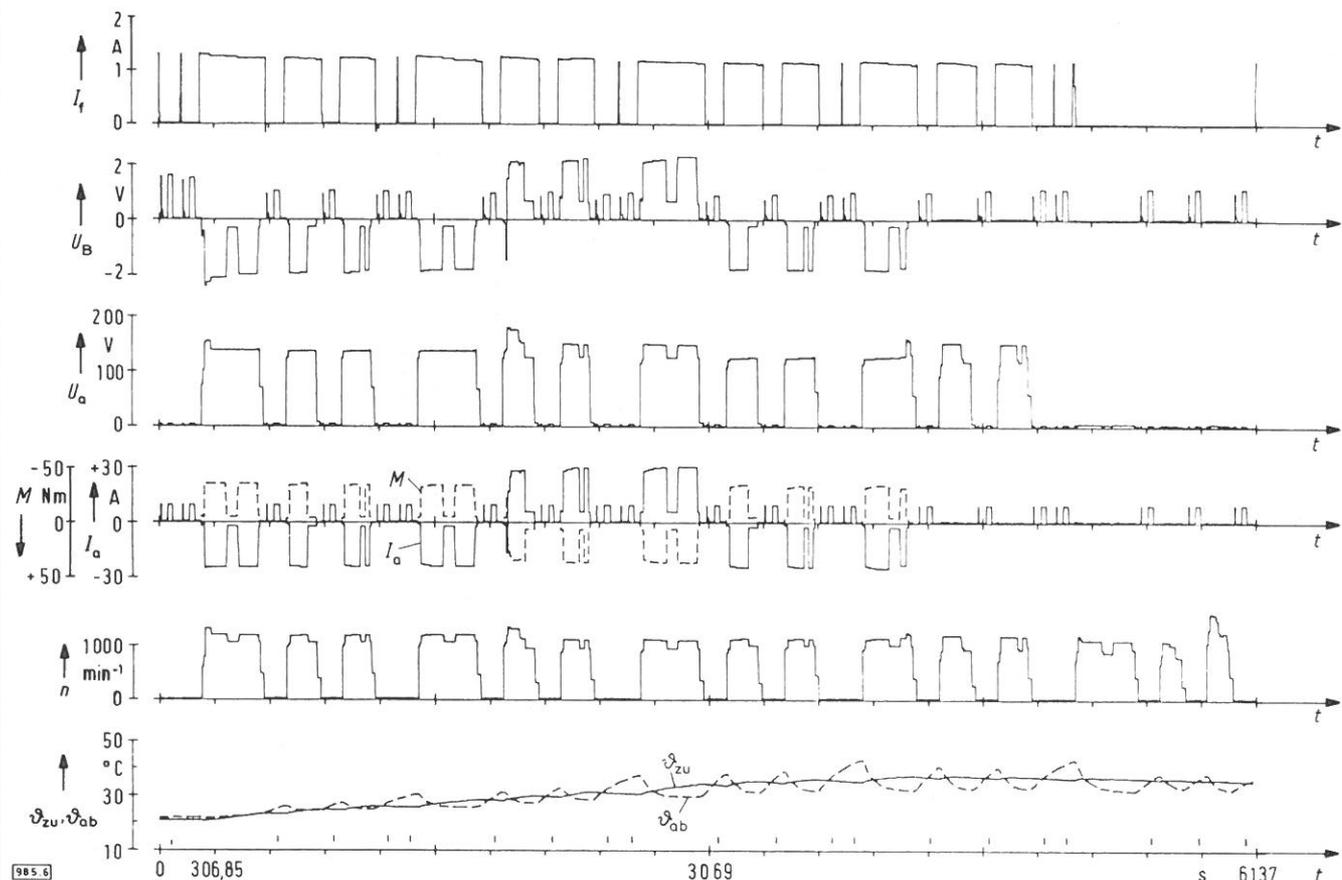


Bild 6. Betriebsverlauf einer Gleichstrommaschine (oberhalb der Zeitachse sind die Zeitpunkte der Kontrollmessungen der mittleren Ankerwicklungstemperatur mit senkrechten Strichen markiert)

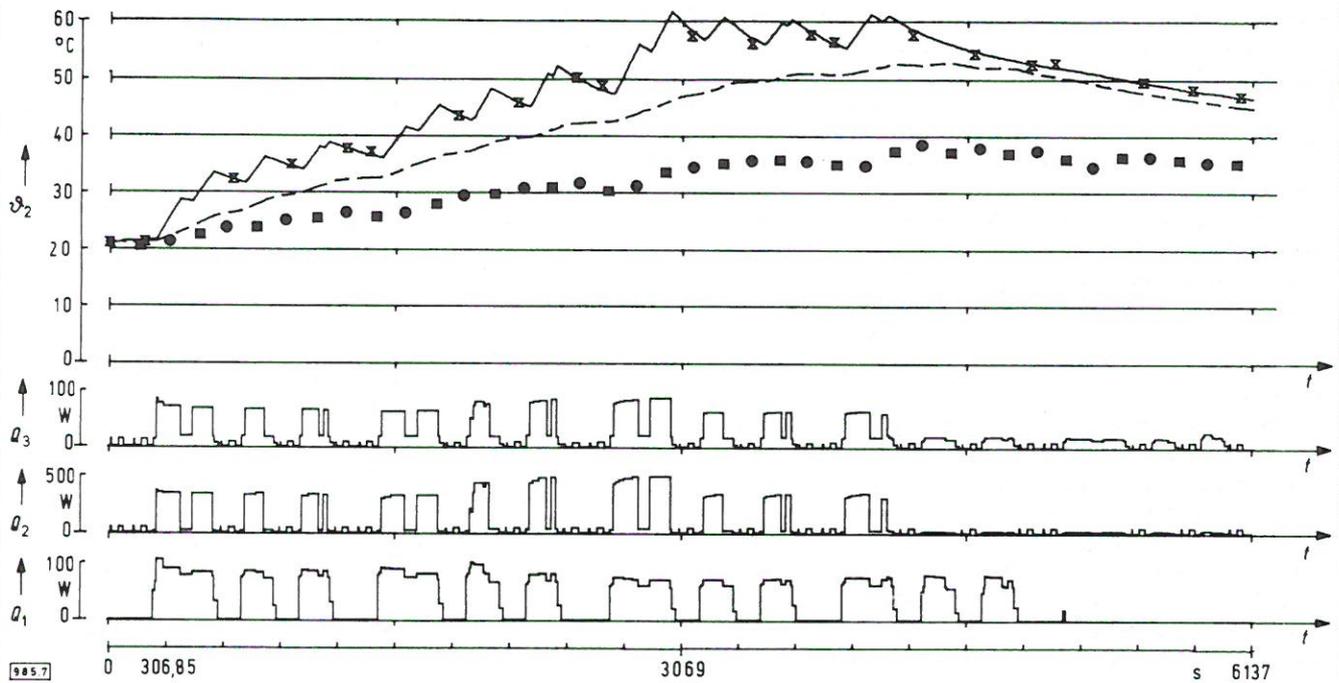


Bild 7. Der von einem thermischen Modell der Maschine nachgebildete Verlauf der mittleren Ankerwicklungstemperatur ϑ_2 (—) für den im Bild 6 dargestellten Betriebsverlauf (Erläuterungen im Text)
 - - - Ankerseitentemperatur
 x Kontrollwerte ϑ_{2k}
 • und ■ Modelleingangsgrößen ϑ_0 und ϑ_4

6 Zusammenfassung

Es werden die Ergebnisse einer Dissertation [8] vorgestellt, in der die theoretischen und meßtechnischen Aspekte des in der Überschrift genannten Problems behandelt und einsatzfähige, praktikable Lösungen entwickelt werden.

In den ersten beiden Abschnitten wird die Problemstellung erläutert und der Lösungsgedanke begründet. In diesem Zusammenhang behandelt der zweite Abschnitt die Messung des ohmschen Gleichstromwiderstands der Ankerwicklung (zur Ermittlung der mittleren Ankerwicklungstemperatur); dies ist ein Nebenproblem, dessen technische Beherrschung bei hohen Genauigkeitsanforderungen (10^{-4}) aber für die Ermittlung der Modellparameter (siehe Abschnitt 4) unabdingbar ist.

Der dritte Abschnitt schildert die Nachbildung des Verlaufs der mittleren Ankerwicklungstemperatur mit Hilfe thermischer Modelle des Ankers. Die Anpassung eines solchen Modells an eine gegebene Gleichstrommaschine ist das schwierigste Teilproblem, das auch den zeitlich weitaus größten Teil der Entwicklungsarbeit beanspruchte. Die Modellanpassung selbst wird im vierten Abschnitt beschrieben.

Von der entwickelten technischen Lösung und deren experimenteller Überprüfung berichtet der fünfte Abschnitt.

Schrifttum

- [1] A pocket guide to the 2100 computer. Cupertino (Calif.): Hewlett-Packard-Company, 1972
- [2] RTE II software system; programming and operating manual. Cupertino (Calif.): Hewlett-Packard-Company, 1978
- [3] *Holbrook, J. G.*: Laplace Transformationen. Braunschweig: F. Vieweg & Sohn, 1970
- [4] *Kamke, F.*: Differentialgleichungen; Lösungsmethoden und Lösungen. Leipzig: Akad. Verl.-gesell., 1951
- [5] *Müller, R.*: Beitrag zur analogen Nachbildung von Temperaturen in Gleichstrommaschinen. Diss. Tech. Univ. Clausthal, 1977
- [6] VDE 0530 Teil 1/11.72: Bestimmungen für umlaufende elektrische Maschinen (Allgemeines). Berlin & Offenbach: VDE-VERLAG, 1972
- [7] *Weinert, A.*: Untersuchung der meßtechnischen Möglichkeiten zur Bestimmung der Ankerwicklungstemperatur einer großen Gleichstrommaschine mit Hilfe äußerer Meßgrößen. Diplomarb. Tech. Univ. Clausthal, 1977
- [8] *Weinert, A.*: Thermische Modelle zur Nachbildung des Verlaufs der mittleren Ankerwicklungstemperatur von Gleichstrommaschinen auf einem Digitalrechner. Diss. Tech. Univ. Clausthal, 1983