

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 19

Artikel: Modellmaschine zur direkten Simulation dynamischer Vorgänge in Synchrongeneratoren

Autor: Berchten, Stefan / Konrad, Reichert

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903922>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.04.2026

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

Modellmaschine zur direkten Simulation dynamischer Vorgänge in Synchrongeneratoren

S. Berchten, K. Reichert

Die physikalischen Grenzen verunmöglichen bei physikalischen Modellmaschinen einen einfachen und flexiblen Aufbau. Sie können nur mit Hilfe zusätzlicher Regler überwunden werden. In der Folge wird ein hybrides, physikalisches Labormodell eines Turbogenerators vorgestellt, das zur Simulation dynamischer Vorgänge im Betrieb dient. Ein speziell entwickelter Regler prägt einer Drehfeldmaschine mit Hilfe einer zweiachsigen Rotorwicklung das dynamische Verhalten der Originalmaschine ein.

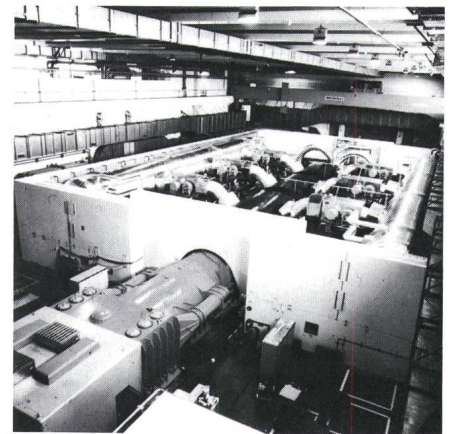
Les limites physiques absolues rendent impossible la construction de modèles physiques simples et souples, si l'on n'utilise pas de régulateurs supplémentaires. On présente un modèle physique de laboratoire hybride servant à simuler des processus dynamiques d'un turbo-alternateur dans l'exploitation d'un réseau. Un régulateur conçu spécialement confère à une machine à champ tournant avec enroulement rotorique à deux axes le comportement dynamique du turbo-alternateur.

Turbogeneratoren sind schnelllaufende Synchrongeneratoren mit einem zylindrischen Trommelläufer. Sie stehen in thermischen Kraftwerken im Einsatz und werden in der Leistungsklasse von 300–1300 MVA gebaut. Der derzeit grösste zweipolige Turbogenerator in der Schweiz produziert 1182 MVA (Fig. 1). Aus wirtschaftlichen, sicherheits- und betriebstechnischen Gründen können systematische Versuche zur Klärung des Fehlerverhaltens grosser Synchronmaschinen nicht im Betrieb durchgeführt werden. Man ist auf Simulationsinstrumente angewiesen.

1. Simulationsinstrumente

Die Untersuchung dynamischer Vorgänge in Turbogeneratorsätzen wird heute vorwiegend mit Hilfe numerischer Simulationsprogramme auf Grossrechneranlagen durchgeführt. Dabei werden hohe Anforderungen an das *mathematische Modell* (Fig. 2) des Prozesses gestellt.

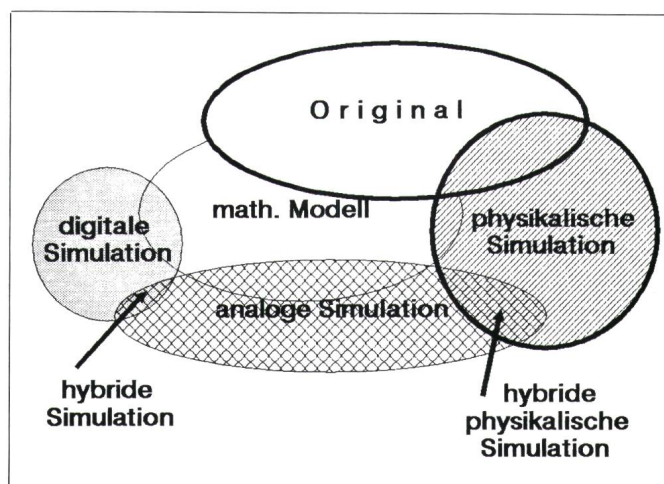
Die Vorgänge müssen im Bereich von Millisekunden bis Stunden wirklichkeitsgetreu nachgebildet werden.



Figur 1 Turbogeneratorsatz Leibstadt, 1182 MVA (BBC, Baden)

Generator vorne, abgetrennt dreistufige Dampfturbine

Die Modelle müssen die Antriebswelle, das elektromagnetische System des Generators, die Stromkreise der Verbraucher und auch evtl. eingesetzte Regler genügend genau beschreiben. Dies führt im allgemeinen auf ein nichtlineares, gekoppeltes Differen-



Figur 2 Simulationsinstrumente

Adresse der Autoren

Dipl. El.-Ing. ETH Stefan Berchten, Prof. Dr. Konrad Reichert, Institut für Elektrische Maschinen, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

tialgleichungssystem mit mehr als 15 Unbekannten. Zur Lösung eines solchen Gleichungssystems benötigt ein Rechner mittlerer Leistung eine CPU-Zeit, welche rund dem 20- bis 100fachen der Echtzeit entspricht. Dies wird gerne in Kauf genommen, sind doch numerische Simulationsprogramme flexibel, recht genau und anpassungsfähig.

Für eine Echtzeitsimulation eignen sich dagegen *analoge* oder *physikalische Prozessmodelle* besser. Will man an einem Echtzeitmodell Untersuchungen anstellen, so bieten physikalische Modelle den didaktischen Vorteil, dass mit Messgeräten die physikalischen Grössen ermittelt werden können. Ferner können Mess- und Regelsysteme direkt an das Modell angeschlossen und unter harten Testbedingungen erprobt werden.

2. Physikalische Modelle

Beim Entwurf von Modellen sind die Wachstumsgesetze elektrischer Energiewandler bestimmend für die Eigenschaften [1]. Sie bilden ein Basisproblem.

Soll eine Modellmaschine das gleiche dynamische Verhalten wie das Original besitzen, so müssen die in der Maschine auftretenden elektrischen und mechanischen Energien und Verluste, bezogen auf die jeweilige Nennleistung der Maschine (p.u.-Werte), die gleiche Grössenordnung besitzen.

Mit Hilfe der bekannten Wachstumsgesetzmässigkeiten (Tab. I) kann gezeigt werden, dass z.B. eine mit dem Faktor k skalierte Maschine ($k < 1$) unter Beibehaltung der Luftspaltinduktion und Stromdichte ($\alpha = \beta = 1$)

- grössere p.u.-Wicklungswiderstände ($\sim 1/k$) und damit
- kleinere charakteristische Zeitkonstanten ($\sim k^2$)

aufweist. Diese physikalischen Grenzen führen zu unrealistischen Systemantworten bei «reinen» physikalischen Modellen.

Setzt man voraus, dass die p.u.-Werte der Wicklungswiderstände (r), der Haupt- und Streureaktanzen (x_{ad} , x_{σ}) sowie der mechanischen Trägheitskonstanten (H) ihre Werte bei einer Verkleinerung der Originalmaschine behalten sollen, so können vom geometrischen Skalierungsfaktor (k) abhängige und optimale Lösungen für die spezifischen Skalierungsfaktoren der Stromdichte ($\alpha = \sqrt{k^3}$), der Flussdichte ($\beta = \sqrt{k}$), der Nuttiefe ($\gamma = 1$)

Grösse	Relevanter Zusammenhang	Wachstumsrelation
Luftspaltfluss	$\Phi \sim D L B$	$\Phi / \Phi^* = k^2 \beta$
Strombelag	$A \sim j b_N h_N / D$	$A / A^* = \alpha \gamma$
Scheinleistung	$S \sim \Phi A D$	$S / S^* = k^3 \alpha \beta \gamma$
Strangspannung	$U \sim \Phi$	$U / U^* = k^2 \beta$
Bezugsimpedanz	$Z_B \sim U^2 / S$	$Z_B / Z_B^* = k \beta / \alpha \gamma$
Wicklungswiderstand [p.u.]	$r \sim \frac{L}{b_N h_N Z_B}$	$\frac{r}{r^*} = \frac{\alpha}{k \beta}$
Streureaktanz [p.u.]	$x_{\sigma} \sim \frac{h_N L}{b_N Z_B}$	$\frac{x_{\sigma}}{x_{\sigma}^*} = \frac{\alpha \gamma^2}{k \beta}$
Hauptreaktanz [p.u.]	$x_{ad} \sim \frac{D L}{\delta Z_B}$	$\frac{x_{ad}}{x_{ad}^*} = \frac{k \alpha \gamma}{\Delta \beta}$
Kurzschlusszeitkonstante	$T' \sim x_{\sigma} / r$	$T / T^* = \gamma^2$
Trägheitskonstante	$H \sim D^4 L / S$	$H / H^* = k^2 / \alpha \beta \gamma$

Optimale Lösung: $\alpha = k^{3/2}$; $\beta = \sqrt{k}$; $\gamma = 1$; $\Delta = k^2$

Grenzbedingung: $k \cdot D^*/2 \geq h_N^* \gamma + h_j^* k \beta$

Tab. 1 Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen

$x_{Modell} = x^*_{Orig} \cdot \text{Skalierungsfaktor}$

Skalierungsfaktoren:

k : für Maschinendurchmesser D , Länge L , Nutbreite b_N
 α : für Stromdichte j

β : für Flussdichte B

γ : für Nuttiefe h_N

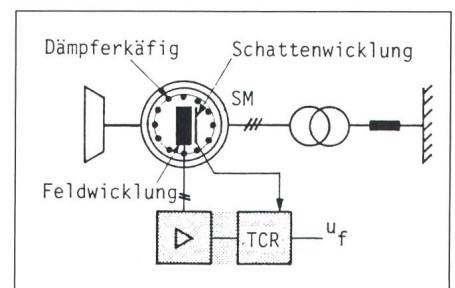
Δ : für Luftspaltabmessung δ

und des Luftspalts ($\Delta = k^2$) gefunden werden.

Einen Grenzwert für den Skalierungsfaktor k erhält man dann, wenn die Induktionsverhältnisse im Rotorjoch mitberücksichtigt werden. Bei gleichen Sättigungsverhältnissen muss der Rotorradius der Modellmaschine \geq der Summe der skalierten Rotornuttiefe und des durch die verringerte Luftspaltinduktion reduzierten Rotorjoches sein (Tab. I).

Nimmt man einen 350-MVA-Turbogenerator mit einer Nuttiefe, welche 25% des Rotorradius beträgt, so kann er deshalb höchstens mit einem Wachstumsfaktor von $k = 0,589$ modelliert werden. Damit müsste das Modell eine Minimalleistung von 21 MVA aufweisen, wenn die Dynamik des Originals derjenigen des Modells entsprechen soll. Eine Reduktion der Maschinengrösse verändert deren Eigenschaften stark. Vor allem erhöhen sich die Verluste. Damit sind der physikalischen Modellierung von Grosssynchroschmaschinen harte Grenzen gesetzt, welche nur unter Einsatz von zusätzlichen Regelsystemen überschritten werden können.

Eine klassische Lösung (Fig. 3) ist der Einsatz eines Zeitkonstanten-Reglers (TCR) [2; 3; 4]. Mit Hilfe einer Schattenwicklung der Feldwicklung wird der Synchronmaschine eine dem Feldstrom entgegengesetzte Feldspannung aufgeschaltet. Man erzielt damit eine Widerstandsreduktion im Feldkreis der Maschine. Das Modell besitzt ferner einen Dämpferkäfig, dessen charakteristische Kenngrössen nicht verändert werden können. Bei diesem Modell können nur die transienten Parameter der Modellmaschine korrigiert werden.



Figur 3 Klassische Modellmaschine

3. Hybrides, physikalisches Simulationsmodell

Eine neuartige Lösung, welche die genannten Nachteile der klassischen Modellmaschine eliminiert, ist in Figur 4 dargestellt. Sie führt auf ein hybrides, physikalisches Modell [5; 6].

Ein aus Analogrechnerkomponenten aufgebautes Simulationsmodell des Rotors der Originalmaschine (Fig. 4b) berechnet aus dessen Steuergrößen die Strom-Soll-Dynamik der Drehfeldmaschine (DFM), welche den physikalischen Teil des Modells bildet. Die Abweichungen der Strom-Ist- und Soll-Werte werden über eine Rückführungsmatrix K auf die Rotoreingänge aufgeschaltet. Das aufgebaute Regelsystem (Fig. 4a) benötigt die Rotorströme (1), die in die Messwicklungen induzierten Spannungen (2) und den Sollwert für die Feldspannung (3), um das Verhalten der Maschine zu beeinflussen. Die Drehfeldmaschine verhält sich je nach Wahl des Simulationsmodells des Rotors wie eine Synchronmaschine oder wie eine Asynchronmaschine. Durch Einstellen der Parameter des Simulationsmodells können die Kennwerte des Drehfeldmaschinenrotors in gewissen Grenzen verändert werden.

Die sich daraus ergebende Anordnung stellt einen rotierenden Drehstromtransformator mit einer aktiven Beschaltung der Sekundärseite dar. Die Drehfeldmaschine besitzt eine Dreiphasenwicklung im Stator. Zur

Erfassung des Luftspaltflusses besitzt der zweisträngige Rotor in jeder Achse eine Messwicklung.

Wegen des konstanten Luftspaltes besitzt das Maschinenmodell eine unbeeinflussbare synchrone Reaktanz, welche jedoch durch geeignete Wahl der Leistung angepasst werden kann. Die Drehfeldmaschine besitzt keinen Dämpferkäfig. Der Einfluss des Dämpfers der Originalmaschine wird durch das Einprägen der Dämpferströme in die beiden Rotorwicklungen simuliert.

Dieses neuartige Maschinenmodell besitzt damit folgende Möglichkeiten:

- verschiedene Synchron- und Asynchronmaschinen modellieren
- den Einfluss verschiedener Dämpferanordnungen simulieren
- transiente und subtransiente, bei Bedarf auch sub-subtransiente Zeitkonstanten einstellen.

Äquivalenz zwischen Modell- und Originalmaschine

Bei der beschriebenen physikalischen Simulation fragt man sich zu Recht, inwieweit das Modell mit dem Original übereinstimmt, da die Modellmaschine keine dem Original entsprechenden Rotorstromkreise aufweist.

Die Messwicklung, welche im wesentlichen das Luftspaltfeld erfasst, sorgt dafür, dass der Rotor im Luftspalt die Feldverhältnisse erzeugt, die in der Originalmaschine herrschen. Damit wird sichergestellt, dass die

$$x_d(s) = x_d \frac{(1 + s T_{d'}) (1 + s T_{d''})}{(1 + s T_{do'}) (1 + s T_{do''})}$$

$$x_q(s) = x_q \frac{(1 + s T_{q''})}{(1 + s T_{qo''})}$$

$$G(s) = \frac{x_{ad} (1 + s T_{kd'})}{r_f (1 + s T_{do'}) (1 + s T_{do''})}$$

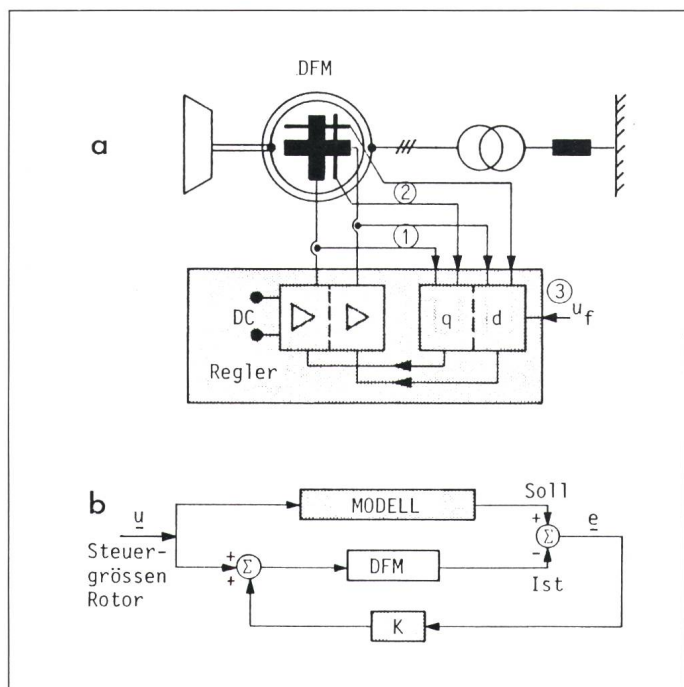
Tabelle II: Äquivalenzbeziehungen

s	komplexe Variable der Laplace-Transformation
$x_{d,q}$	synchrone Reaktanz der Längs- bzw. Querachse
$T_{d'}$	transiente Kurzschlusszeitkonstante der Längsachse
$T_{d''}, T_{q''}$	subtransiente Kurzschlusszeitkonstante der Längs- bzw. Querachse
$T_{do'}$	transiente Leerlaufzeitkonstante der Längsachse
$T_{do''}, T_{qo''}$	subtransiente Leerlaufzeitkonstante der Längs- bzw. Querachse

normierten Reaktanz-Operatoren für die beiden Maschinenachsen [$x_d(s)$ und $x_q(s)$] (Tab. II) quantitativ mit denen des Originals übereinstimmen. Die Reaktanz-Operatoren bilden die frequenzvariablen Zusammenhänge zwischen den Statorflussverkettungen und den Statorströmen. Sie sind abhängig von den charakteristischen Kenngrößen einer Synchronmaschine und sind weitgehend durch die Rotorzeitkonstanten bestimmt. Durch geeignete Wahl der Reglerstruktur wird ermöglicht, dass auch das Übertragungsmass [$G(s)$] der skalierten Feldspannung zur Statorflussverkettung demjenigen der Originalmaschine entspricht.

4. Versuchsstand

Zu einem Turbogeneratorenmodell gehört neben dem Modellgenerator ein dynamisches Torsionsschwingungsmodell der Antriebswelle. Nach [7] genügt eine Unterteilung der Antriebswelle in ein System von sechs Massen- und fünf Federelemente den rechnerischen Bedürfnissen. Damit können fünf Eigenschwingungsformen mit genügender Genauigkeit nachgebildet werden. Wegen des überproportionalen Wachstums der mechanischen Verluste muss beim vorliegenden Modell der Wellenstrang auf ein Dreimassensystem reduziert wer-



Figur 4 Aufbau des physikalischen Modells (a) mit vereinfachter Reglerstruktur (b)

Modell: Rotormodell aufgebaut aus Analogreglerkomponenten
 K : Rückführungsmatrix
 DFM: Drehfeldmaschine 2 kVA.
 Modell und Rückführung bilden den Regler

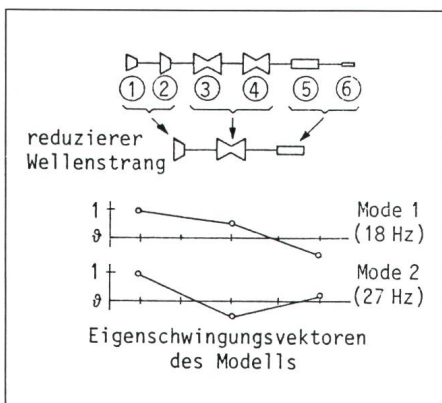
den. In Figur 5 ist die gewählte Aufteilung gegeben.

Figur 6 zeigt den Laboraufbau des Turbogeneratorenmodells. Die 2-kVA-Synchronmaschine (1) ist an das Federmassenmodell der Antriebswelle (4) gekoppelt. Eine Antriebsmaschine (5) liefert die Turbinenleistung. Zwei 10-kVA-Rotorstromquellen (2) liefern den Feldstrom und im Störfall die beiden Rotordämpferströme in den Längs- und Querachsenwicklungen. Im Kontrollschrank (3) befinden sich die Schaltkreise des hybriden Rotormodells, Messfilter und die Elektronik der Drehmomentmessung sowie ein Generatorspannungsregler, der nach Bedarf zugeschaltet werden kann. Es stehen ferner Spulen und Kondensatoren zur Verfügung, mit denen Leitungsmodelle aufgebaut werden können.

In Figur 7 ist eine typische Versuchsanordnung zur Untersuchung dynamischer Vorgänge dargestellt. Eine grosse Hilfe ist ein elektronischer Leistungsschalter, mit dem definierte 1-, 2- oder 3phasige Schalthandlungen simuliert werden können. Die Signale der Messwandler werden im allgemeinen mit einem Transientenspeicher aufgezeichnet und auf dem instituts-eigenen Rechner ausgewertet.

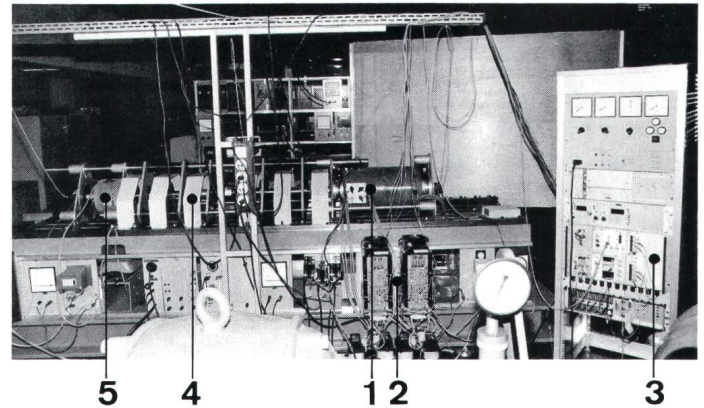
5. Untersuchungen mit der physikalischen Modellmaschine

Wie eingangs erwähnt, besitzen physikalische Modelle einen hohen didaktischen Stellenwert. Dies äussert sich nicht nur bei Demonstrationen, sondern auch bei Untersuchungen am Objekt. Im Gegensatz zur Computersimulation muss eine Untersuchung am physikalischen Simulationsmodell sorgfältig geplant werden, denn der



Figur 5 Wellenstrangreduktion auf ein Drei-Massen-Drehschwingungssystem

Figur 6 Laboraufbau des Turbogeneratorsmodells



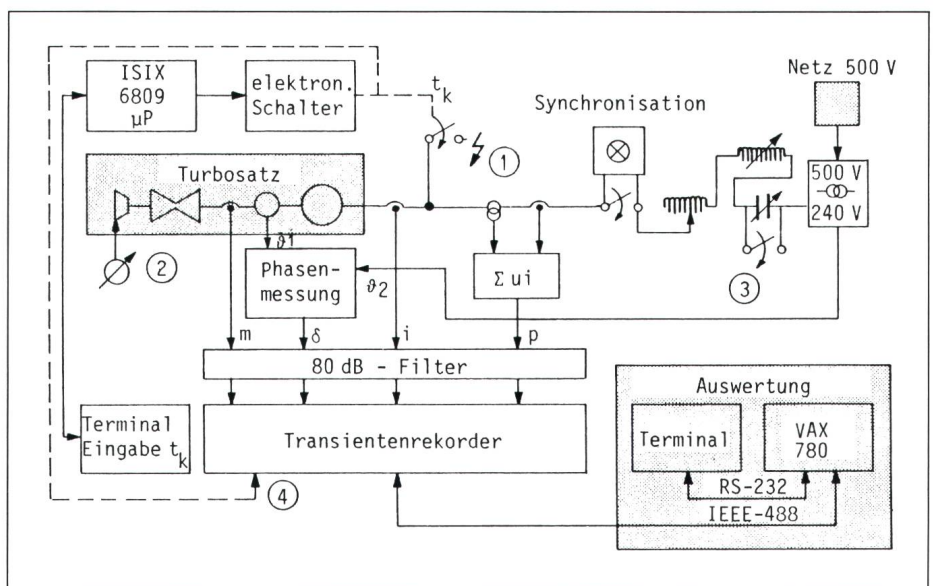
Arbeitsaufwand für einen Versuchsaufbau ist beträchtlich, und Messgeräte können nicht verschwenderisch eingesetzt werden, da sofort Übersicht und Effizienz verlorengehen. Vor jeder Simulation muss man sich die folgenden Fragen stellen:

- Welches sind die wichtigsten Messgrößen?
- Wo können sie am einfachsten erfasst werden?
- Welcher qualitative Verlauf ist zu erwarten?
- Sind Verifikationsversuche notwendig?

Verifikationsversuche sind ein wesentliches Element der Arbeit mit einem physikalischen Modell. Dabei werden die Voreinstellungen der Messgeräte überprüft und notwendige Eichprozesse durchgeführt. Die charakteristischen Kennwerte der Synchronmaschine werden mit einem Computerprogramm vorausberechnet. Die daraus resultierenden Reglerpara-

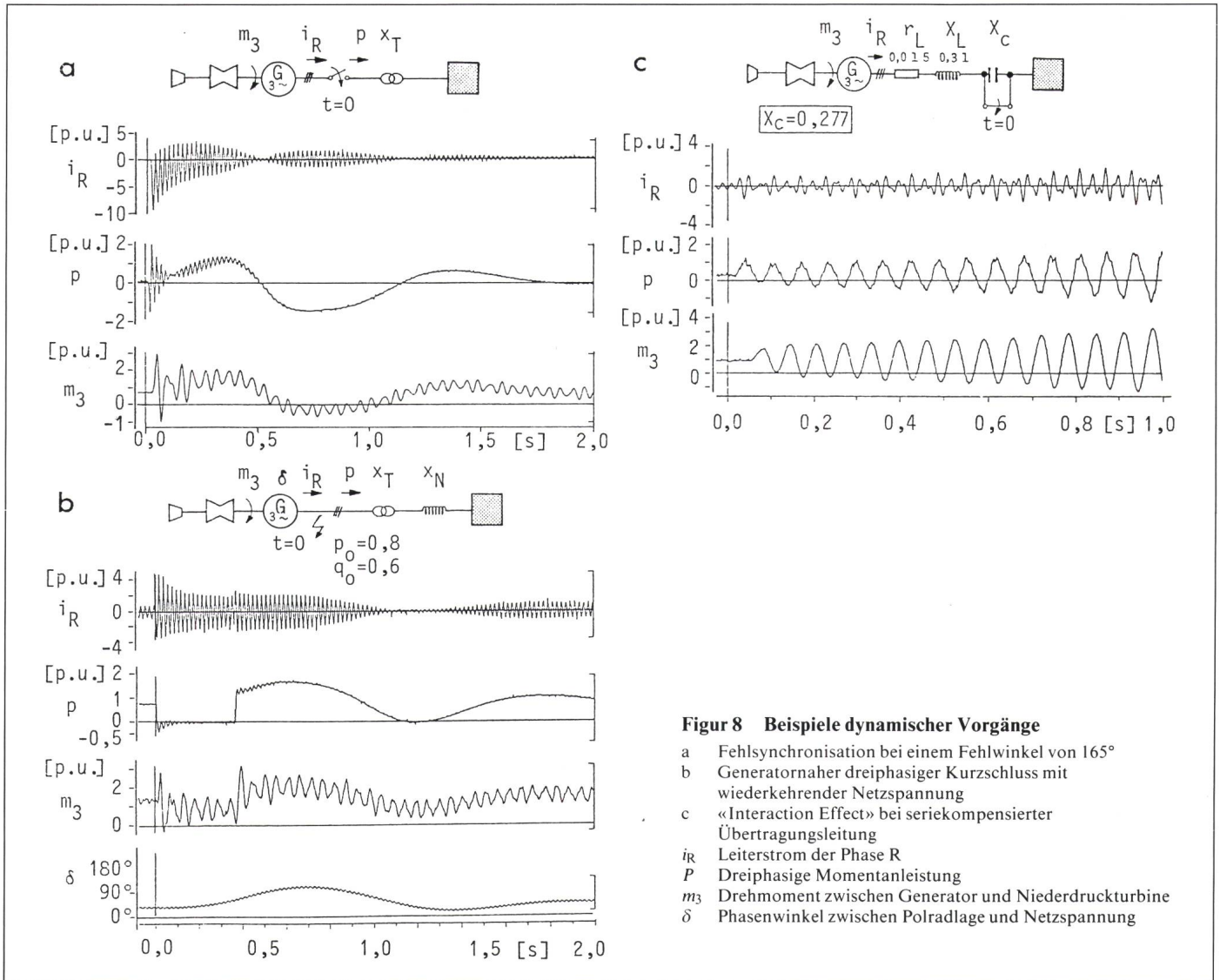
meter werden im Hybridregler implementiert. Das transiente und subtransiente Verhalten der Modellmaschine kann durch einen Stosskurzschlussversuch oder eine Frequenzgangmessung überprüft werden. Damit wird eine Basis geschaffen, mit der die Versuchsergebnisse schneller interpretiert werden können. Darauf aufbauende, systemumfassende Untersuchungsthemen sind zum Beispiel:

- statische Stabilität; Einfluss des Spannungsreglers und dessen Parameter
- dynamische Stabilität; Einfluss der Netzparameter
- Kurzschluss, wiederkehrende Netzspannung; Einfluss der Kurzschlussdauer auf die Wellenstrangbelastung
- Resonanzprobleme bei seriekompensierten Netzen: subsynchrone Resonanzen (SSR), Induction-Effect und Interaction-Effect [8]
- Abgleich von Spannungsreglern
- Austesten von neuartigen Messsystemen oder Schutzeinrichtungen (SSR-Schutz).



Figur 7 Versuchsanordnung zur Messung dynamischer Vorgänge

- ① Kurzschluss
- ② Antriebsmoment
- ③ Kompensation ausschalten
- ④ Trigger



Figur 8 Beispiele dynamischer Vorgänge

- a Fehlsynchronisation bei einem Fehlwinkel von 165°
- b Generatornaher dreiphasiger Kurzschluss mit wiederkehrender Netzspannung
- c «Interaction Effect» bei seriekompensierter Übertragungsleitung
- i_R Leiterstrom der Phase R
- P Dreiphasige Momentanleistung
- m_3 Drehmoment zwischen Generator und Niederdruckturbine
- δ Phasenwinkel zwischen Polradlage und Netzspannung

Die beiden letztgenannten Beispiele sind für die physikalische Modellmaschine besonders geeignet.

Beispiele von Untersuchungen

Einige Möglichkeiten des physikalischen Modells werden in den folgenden Beispielen dargestellt. Figur 8 zeigt die entsprechenden Messungen.

Im ersten Beispiel (Fig. 8a) wird eine Synchronisation mit einem Fehlwinkel von etwa 165° ausgeführt. Beim Zuschalten der Synchronmaschine an das Netz treten durch die entgegengesetzte Phasenlage von Netz- und Klemmenspannung sehr hohe subtransiente und transiente Statorströme auf. Die Maschine schlüpft einmal und läuft nach etwa 2 s synchron am Netz. Es treten hohe Momentenspitzen auf, die sich dem Reibungsmoment, welches durch die Rotorschleifringe der Maschine bedingt ist, überlagern.

Der zweite Versuch (Fig. 8b) zeigt die beobachteten Auswirkungen eines

generatornahen Kurzschlusses und der wiederkehrenden Netzspannung im Anschluss an die Fehlerfortschaltung. Die wiederkehrende Netzspannung bedeutet für den Turbosatz eine nicht-simultane Fehlsynchronisation der einzelnen Phasen. Der dabei entstehende Momentenstoß überlagert sich einem bereits laufenden dynamischen Vorgang, wodurch hohe mechanische Beanspruchungen im Turbosatz entstehen können. Die auftretenden Momentenspitzen können das dreifache Nennmoment übersteigen.

Im dritten Beispiel (Fig. 8c) wird der Turbogenerator an ein seriekompensiertes Netz geschaltet. Die dabei entstehenden subsynchronen Netzschwingungen regen den Wellenstrang bei einer seiner mechanischen Eigenschwingungen an. Die dabei auftretende mechanische Resonanzschwingung ist in unserem Fall negativ gedämpft und kann zur Zerstörung des Wellenstrangs führen.

Literatur

- [1] G. Quittner: Die Grundprobleme der physikalischen Modellnachbildung von Synchrongeneratoren. E und M 75(1958)3, S. 45...50.
- [2] R. Robert: Micromachines et microréseaux: Etude des problèmes de stabilité transitoire par la réalisation de modèles électromécaniquement semblables aux machines et réseaux existants. Rapport CIGRE No. 338, 1950.
- [3] T.J. Hammons and A.J. Parsons: Design of microalternator for power-system-stability investigations. Proc. IEE 118(1971)10, p. 1421...1441.
- [4] D.J.N. Limebeer, R.G. Harley and M.A. Lahoud: A laboratory system for investigating subsynchronous resonance. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 1980; paper A80 019-0.
- [5] Y.D. Landau: Adaptive control; the model reference approach. New York/Basel, Dekker, 1979.
- [6] S. Berchten and K. Reichert: A novel approach of a micro synchronous alternator for dynamic performance studies. IECM 86. International Conference on Electrical Machines, 8,9,10. September 1986, München. Proceedings, part 2, p. 616...619.
- [7] First Benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance. IEEE Trans.PAS 96(1977)5, p. 1565...1572.
- [8] M. Canay: Subsychrone Resonanz, Erläuterung der physikalischen Zusammenhänge. Brown Boveri Mitt. 68(1981)8/9, S. 348...357.