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: 72 (1981)

Heft: 13

Artikel: Systemtechnik und elektrische Maschinen

Autor: Reichert, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905124

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: 09.07.2025

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

BULLETIN des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik und Elektronik
Electrotechnique et électronique

Systemtechnik und elektrische Maschinen [1])

Von K. Reichert

519.71:621.3;

1. Einleitung

Die Thematik «Systemtechnik und elektrische Maschinen» enthält zwei Elemente, die Systemtechnik und die elektrische Maschine, die zunächst keine erkennbaren Gemeinsamkeiten aufweisen. Schon vom Alter her unterscheiden sie sich beträchtlich.

Die Grundprinzipien der elektrischen Maschinen sind schon seit langer Zeit bekannt (Fig. 1). 1832 wurde die Gleichstrommaschine erfunden. Die Drehstromtechnik, d.h. die Erzeugung von Drehstrom mit Hilfe von Synchronmaschinen, die Übertragung mit einem Drehstromsystem und die Rückwandlung durch Asynchronmaschinen ist schon beinahe 100 Jahre alt.

Im Vergleich dazu ist die Systemtechnik sehr jung. Vor ungefähr 20 Jahren wurde der Begriff «Systemengineering» geprägt. Die Technik ist heute bewährt zur Behandlung komplexer Systemprobleme, wie sie z.B. der Entwurf von Rechnersystemen darstellt. Die elektrischen Maschinen sind jedoch einfachere Elemente.

Was könnte also die Systemtechnik für die elektrische Maschinen tun? Wird hier nicht der Versuch unternommen, einer alten Sache durch Zufügen neuer Begriffe den Anschein von Aktualität zu geben?

[1]) Einführungsvorlesung, gehalten am 14. Januar 1981.

1832 ...	Gleichstrommaschine (Pixii, Pacinotti, Hefner-Alteneck, W. Siemens)
1856 ...	Transformator (Varley, Kapp, Dolivo-Dobrowolsky)
1887 ...	Synchronmaschine (Haselwander, Bradley, Brown)
1887 ...	Asynchronmaschine (Ferraris, Tesla, Dolivo-Dobrowolsky)
1891 ...	100-kW - Drehstromübertragung Lauffen-Frankfurt

Fig. 1 Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Maschinen

2. Systemtechnik

Systemtechnik, auch Systemplanung oder Systemengineering genannt, löst Problemstellungen durch systematisches Anwenden einer *Methodik* mit Hilfe von bestimmten *Methoden*. Die Systemtechnik versucht, von der Betrachtung des Gesamtsystems ausgehend, eine Lösung zu finden, die übergeordnete Beurteilungskriterien befriedigen kann. Dabei benützt sie allgemein verwendbare, technisch-wissenschaftliche Verfahren und Hilfsmittel. Der formale Lösungsweg der Systemtechnik kann in einem Flussdiagramm dargestellt werden (Fig. 2).

Die *Problem*stellung wird zunächst einer *Analyse* unterzogen. Es müssen die Aufgaben, Ziele, Nebenbedingungen und vor allem die Beurteilungskriterien festgelegt werden. Davon ausgehend wird die *Grobstruktur* entwickelt. Das System wird in Untersysteme aufgeteilt. Es werden Aufgaben zugeordnet und definiert. Die Synthese liefert den ausgelegten, versuchsweise auch optimierten Entwurf. In der sich anschliessenden *Systemanalyse* wird festgestellt, welche Eigenschaften das System besitzt, ob die Aufgabenstellung befriedigend gelöst ist und vor allem ob die Beurteilungskriterien erfüllt werden. Die Mittel der Systemanalyse sind die Simulation und der Versuch. Voraussetzung dafür sind die Modellierung und Identifikation, wobei zur Minimierung des Aufwandes die Nachbildung nur im interessierenden Bereich erfolgen soll.

Das Ergebnis der Analyse wird im Sinne der Aufgabenstellung bewertet. Kommt die Bewertung zu einem negativen Ergebnis, so sind die Teilprozesse zu wiederholen, verfeinert unter Umständen mit geänderten Aufgabenstellungen, solange bis die Lösung befriedigt und zur Realisierung gelangen kann.

Der Systemplanungsprozess ist daher im allgemeinen ein Lernprozess, bei dem die einzelnen Abschnitte adaptiv solange korrigiert werden, bis die Zielsetzung erreicht ist. Voraussetzung für eine effiziente Durchführung des Prozesses sind die systemtechnischen *Methoden*. Die wichtigsten seien hier aufgezählt:

- Systembeschreibungs-, Auswahl- und Entscheidungsmethoden für die Problemanalyse und die Erarbeitung des Systemkonzeptes
- Optimierungsverfahren für die Synthese
- Analyseverfahren
- Rechnergestützte Methoden und Systeme

Die Vorteile der Systemtechnik können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Man erhält eine Gesamtlösung, die übergeordnete Kriterien erfüllt
- Die Strukturierung zeigt innere Zusammenhänge auf
- Die Analyse, insbesondere die Simulation, liefert wertvolle Angaben zum Systemverhalten, schon vor dem Bau. Diese erleichtern die Inbetriebsetzung. Dabei muss allerdings stets beachtet werden, dass die Güte der Analyse von der Modellierung und von den Methoden abhängt. Numerisch instabile Integrationsverfahren in einem Simulationsverfahren zeigen Instabilitäten an, die in Wirklichkeit nicht existieren.
- Die Methoden sind vielseitig verwendbar und daher rationell einsetzbar. Der Einsatz von Digitalrechnern ist dabei heute selbstverständlich.

Wie erwähnt, wird die Systemtechnik heute vor allem zur Entwicklung neuer, komplexer Systeme eingesetzt. Digitalrechner werden z.B. damit vollständig auf dem Papier entwickelt und getestet. Dabei ist es selbstverständlich, dass nicht nur Konzepte, sondern auch Unterlagen für die Fertigung des Systems erstellt werden.

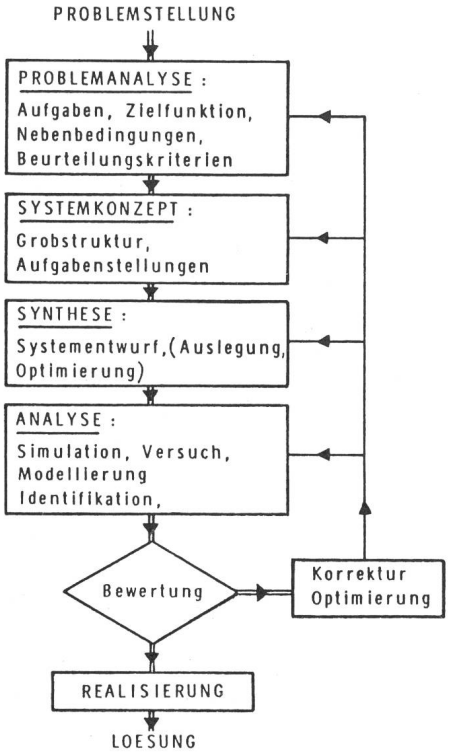


Fig. 2 Methodik der Systemtechnik

3. Elektrische Maschinen in der Energietechnik

Im Vergleich zu derartigen komplexen Systemen sind elektrische Maschinen alte, bewährte, einfache Elemente. Ihre Grundprinzipien sind schon lange bekannt, neue sind nicht zu erwarten. Variabel sind die Leistungen, die Form, die innere Technologie und vor allem die Ausnutzung und die Kühlung, d.h. die Verlustabfuhr. Was soll hier also noch die Systemtechnik? Die elektrische Maschine ist doch für jeden zu einer Selbstverständlichkeit geworden, so selbstverständlich wie die aus der Steckdose kommende Energie.

Man muss daher noch weiter gehen und sich fragen, ob es heute überhaupt noch sinnvoll ist, sich mit elektrischen Maschinen zu beschäftigen, in der Industrie, an der Hochschule, in Lehre und Forschung; sollte man die elektrische Maschine nicht den unterentwickelten Ländern überlassen? Diese produzieren sicher preiswertere elektrische Maschinen als die Industrieländer.

Wäre die elektrische Maschine ein Dinosaurier der Technik, eine aussterbende Art, wie z.B. die Dampfmaschine oder der Quecksilberdampfgleichrichter, eine Art ohne Bedarf, ohne Anpassungsfähigkeit, so wäre die Antwort einfach: geben wir sie auf, stellen wir sie ins Museum. Dem ist aber nicht so!

Die elektrische Maschine ist das Rückgrat der elektrischen Energietechnik. Sie allein kann mechanische Arbeit in elektrische Energie und umgekehrt umwandeln, in grösserem Umfange, mit sehr kleinen Verlusten. Wirkungsgrade von 99 % sind erreichbar.

Die Bedeutung der elektrischen Maschine für die Energietechnik ist überwältigend (Fig. 3). Praktisch 100 % der elektrischen Energie, die uns durch das Netz geliefert wird, wird von Synchrongeneratoren erzeugt. Übertragen wird diese Energie über Leitungen und Kabel. Transformatoren übernehmen dabei die Anpassung, Synchronphasenschieber die Stabilisierung und die Spannungshaltung. 60...80 % der erzeugten elektrischen Energie, in den USA 64 %, wird durch elektrische

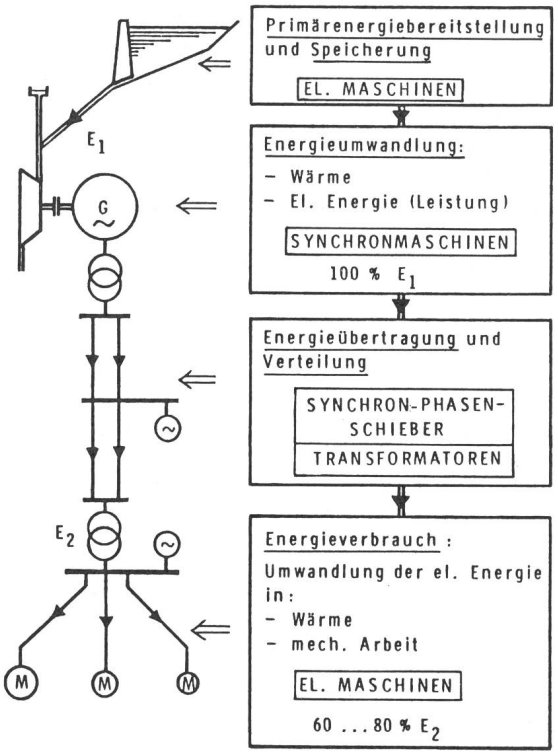


Fig. 3 Elektrische Maschinen in der Energieversorgung

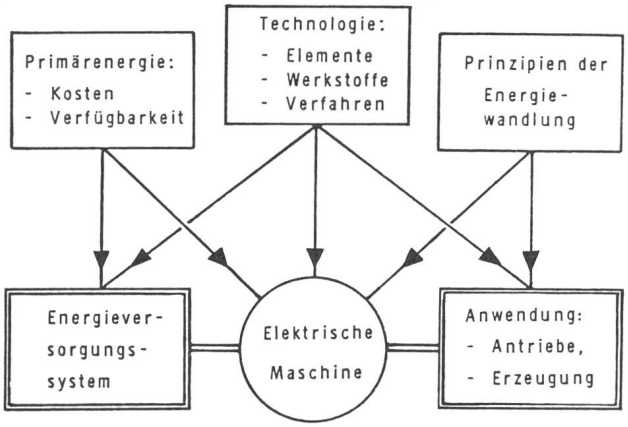


Fig. 4 Die elektrische Maschine und ihre Umwelt: Einflussgrössen des Energiewandlungssystems

Maschinen wieder in mechanische Arbeit umgewandelt. Eine Wirkungsgradverbesserung dieser Umwandlung würde also z.B. schon sehr viel bringen: Energie könnte eingespart werden.

Elektrische Maschinen werden in der Industrie, im Verkehr, im Dienstleistungsbereich, im Haushalt und in der Landwirtschaft eingesetzt. Im Durchschnitt benützen wir täglich die Dienste von rund 20 elektrischen Maschinen. Das beginnt beim Wecker und endet bei der Zahnbürste. Dazwischen liegen Ölbrennermotoren, Haushaltgeräte, Bahnmotoren, Aufzugsmotoren, Arbeitsmaschinen, Transformatoren, Uhren usw.

Zur wirtschaftlichen Bedeutung der elektrischen Maschinen nur eine Zahl: 1979 wurden weltweit elektrische Maschinen mit einem Produktionswert von rund 50 Milliarden Franken hergestellt. Der Anteil der Schweiz (statistisch nicht erfasst) ist allerdings bescheiden, einige hundert Millionen. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Industriemotoren den grössten Anteil ausmachen. Die Produktionswerte der elektrischen Maschinen werden in Zukunft sicher noch steigen, denn Öl kann entweder eingespart oder durch elektrische Energie ersetzt werden. Diese muss erzeugt und umgewandelt werden. Die elektrische Maschine ist der ideale Energiewandler: hohe spezifische Leistung, kleine Verluste, niedere Herstellungskosten.

Diese Eigenschaften können jedoch nur dann voll ausgenützt werden, wenn einerseits die Verknüpfung der elektrischen Maschine mit der Energietechnik und andererseits die Einflüsse der Umwelt mitberücksichtigt bzw. ausgenützt werden.

4. Zukunft der elektrischen Maschinen

Die elektrische Maschine bildet mit der Energieversorgung und der Anwendung ein Energiewandlungssystem (Fig. 4). Auf dieses wirken ein:

- die Primärenergiesituation
- die Technologie
- die Grundprinzipien

Die Kosten und die Verfügbarkeit der *Primärenergie* verlangen einen möglichst hohen Wirkungsgrad und eine grosse Zuverlässigkeit. Die Entwicklung des supraleitenden Generators kann z.B. auf diese Weise motiviert werden. Im Rahmen der Substitution von Öl wird es zu neuen Anwendungen elektrischer Maschinen kommen: Windgeneratoren, kleine Gesamtenergieanlagen, Wärmepumpen, rotierende Energiespeicher, jeweils mit den entsprechenden Stromversorgungseinrichtungen, Regler, Antriebssysteme sind Beispiele dafür.

Der *Einfluss* der *Technologie* ist gekennzeichnet durch Elemente, Werkstoffe und Verfahren, wie z.B. die Kühlung. Bei den Elementen sind die Leistungsstromrichter besonders hervorzuheben. Die Energieversorgung der elektrischen Maschine über Leistungsstromrichter ergibt Antriebssysteme, die verlustminimal den Lastverhältnissen angepasst werden können.

Wird die Fördermenge einer Pumpe über die Antriebsdrehzahl eingestellt, und nicht wie bisher üblich über eine mechanische Drossel, so können beträchtliche Leistungseinsparungen erzielt werden, denn im Drosselbetrieb ist die Leistung praktisch konstant (Fig. 5). Voraussetzung ist allerdings eine Optimierung des Gesamtsystems: Stromrichter und elektrische Maschine, verbunden mit einer detaillierten Systemanalyse. Ziel dabei muss die Minimierung des Aufwandes, der Verluste und der Netzrückwirkungen sein.

Bei den Werkstoffen sind neben den Isolierstoffen die Dauermagnete besonders zu erwähnen. Diese werden in den elektrischen Maschinen zur Magnetfelderzeugung eingesetzt. Man erhält dadurch besonders energiesparende Antriebe. So wird z.B. (Fig. 6) aus einem Asynchronmotor eine Synchronmaschine, wenn man im Rotor Dauermagnete einbaut. Es entfallen dadurch die Magnetisierungsströme und die Wirbelstromverluste im Rotor, da dieser jetzt synchron läuft. Die konstruktive Gestaltung muss sich allerdings auf komplexe Optimierungs- und Feldberechnungen abstützen. Das Material muss optimal eingesetzt werden. Im Anlauf oder beim Einschalten darf die Magnetisierung nicht zerstört werden.

5. Elektrische Maschinen und Systemtechnik

Diese Überlegungen zeigen, dass die elektrische Maschine auch in der Zukunft ein wesentliches Element unserer Energieversorgung sein wird. Die elektrische Maschine muss sich daher laufend der Energiesituation, der Umwelt und dem

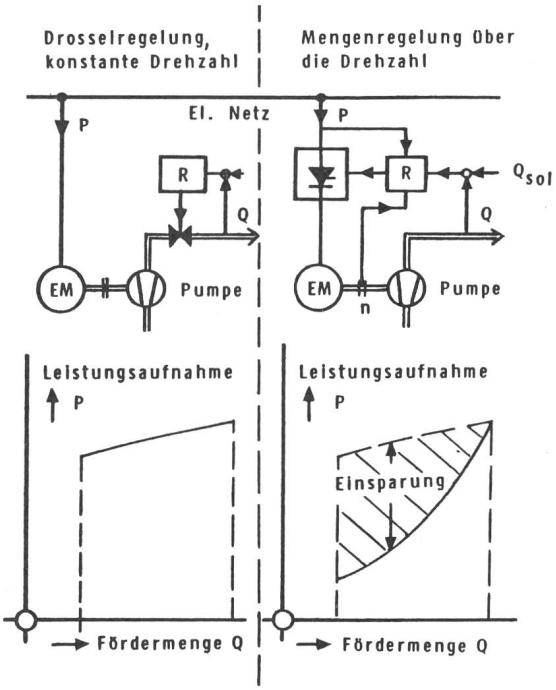


Fig. 5 Vorteile stromrichtergespeister elektrischer Maschinen Beispiel: Antrieb einer Pumpe

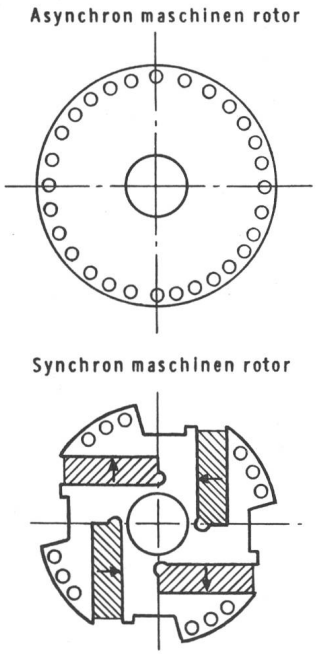


Fig. 6 Dauermagneterregte Drehfeldmaschinen

technologischen Fortschritt anpassen, wenn sie ihrer Aufgabe, der *billigen, wirtschaftlichen* und *sicheren Energiewandlung* gerecht werden will.

Es wird daher auch in der Zukunft noch genügend interessante Aufgaben und Probleme auf dem Gebiet der Energiewandlung geben, sowohl für die Lehre als auch für die Industrie. Wie aber soll man dabei vorgehen, wie soll man sie lösen? Die Antwort darauf ist die Systemtechnik. Diese Tendenz entspricht auch den Bedürfnissen und der Vorgehensweise der Praxis, denn auch dort geht schon seit längerem die Entwicklung von der Element- zur Systembetrachtungsweise. Ein typisches Beispiel dafür ist der Turbogenerator:

Noch vor einigen Jahren war die Beanspruchung im Klemmenkurzschluss die dimensionierende Grösse für die Wellen, Kupplungen, Statorabstützungen, ohne die Dynamik des Gesamtsystems zu berücksichtigen. Die gestiegenen Einheitsleistungen und vor allem die erhöhten Anforderungen an die Zuverlässigkeit, ausgelöst durch verschiedene Ereignisse, erzwangen jedoch eine Behandlung des Gesamtsystems: Antrieb, Generator und Netz, und vor allem eine genaue Analyse der dynamischen Vorgänge und Beanspruchung. Man erhielt so neue Auslegungskriterien, die auch das Gesamtsystem (Schutz, Netzbetrieb ...) beeinflussten.

Die Welt des Elektromaschinenbauers hat sich also wesentlich vergrössert. Sein Tätigkeitsbereich beschränkt sich nicht mehr allein auf die reine Auslegung und Konstruktion. Er hat das Gesamtsystem zu betrachten, um zu optimalen Gesamtlösungen zu kommen. Die Verwendung der modernen Methoden der Systemtechnik und die Rechnerunterstützung sind dabei selbstverständlich. Diese Feststellung wird durch zwei Beispiele aus der industriellen Praxis belegt:

Durch den Pump-Speicherbetrieb können im Verbundbetrieb die Täler und Berge des Energiebedarfs ausgeglichen werden. Nachts oder an den Wochenenden wird der Speicher durch Pumpen gefüllt, damit wird dann tagsüber nach Bedarf Spitzenenergie erzeugt. Verwendet man die Turbine auch als Pumpe, so liegen deren Betriebspunkte bei verschiedenen Drehzahlen. Es muss daher entweder ein Schaltgetriebe oder ein polumschaltbarer Generator eingesetzt werden. Bei diesen sind die Pole gespalten, die Durchflutung ist umschaltbar, und so entstehen verschiedene Polzahlen (Fig. 7).

Die *Problemanalyse* zeigt, dass die Ausnutzung einerseits und die Minimierung des Oberwellengehaltes des Luftspaltes andererseits die Auslegung bestimmen. Die *Synthese* wurde

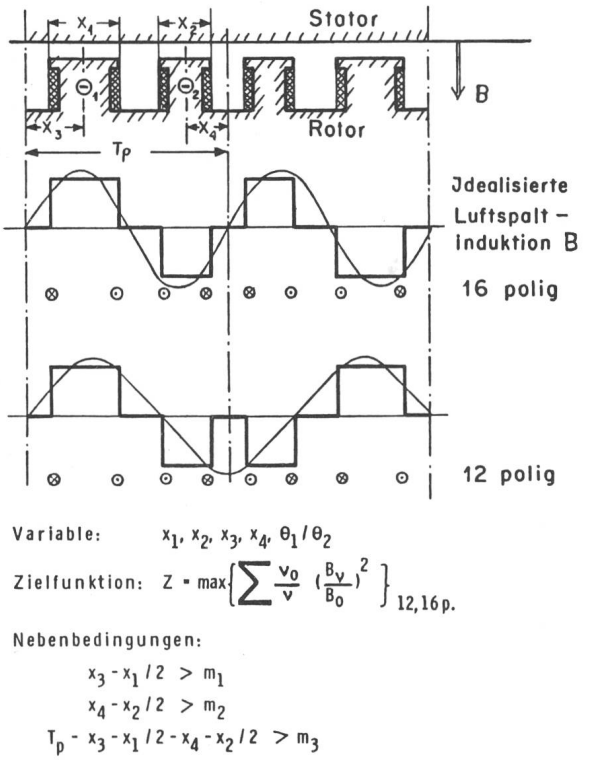


Fig. 7 Optimierung polumschaltbarer Synchronmaschinen

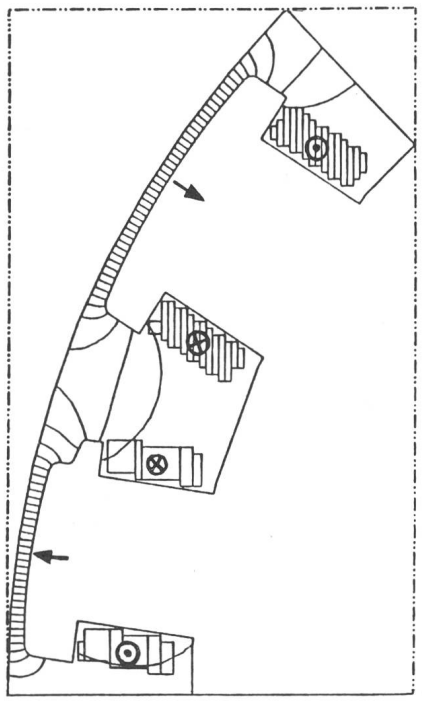


Fig. 8 Feldverlauf in einem Sektor der Synchronmaschine

daher als Optimierungsaufgabe formuliert. Unbekannt sind die Abmessungen der geteilten Pole und die Durchflutung. Der bewertete Oberschwingungsgehalt ist zu minimieren, eine Aufgabe, die mit einem Standardoptimierungsprogramm gelöst werden kann. Die *Analyse,* d.h. die Überprüfung der Resultate der Synthese, erfolgt mit Hilfe der numerischen Feldberechnung. Figur 8 zeigt das Magnetfeld im Luftspalt für den 12poligen Betrieb, und Figur 9 den Verlauf der Luftspaltinduktion.

Das zweite Beispiel ist verbraucherorientiert. Es geht hier um die Auslegung eines dezentralen Energieversorgungssystems. Dieses (Fig. 10) besteht aus einer Einspeisung, einer Eigenerzeugung und den Verbrauchern, in diesem Falle Verdichterantriebe. Auszuwählen bzw. auszulegen sind der Generator, die Generatorregelung, die Antriebe und das Schützsystem.

Die *Problemanalyse* zeigt, dass vor allem bei Kurzschlüssen Schwierigkeiten zu erwarten sind. Sowohl der Generator als auch der Synchronmotor können bei einer zu langen Fehlerdauer ausser Tritt fallen. Die Simulation der Dynamik des Systems wird in diesem Falle schon bei der Synthese eingesetzt (Fig. 11). Sie zeigt, dass der Synchronmotor nach dem Kurzschluss instabil wird. Die Sammelschienenspannung bricht zusammen, wenn der Motor nicht abgeschaltet wird. Der Asynchronmotor dagegen übersteht den Fehler; nach 1 s geht er in den normalen Betrieb zurück.

Aus diesen Beispielen ist ersichtlich, dass die Dinge in der Praxis schon sehr weit gediehen sind. Aber nicht nur in der Industrie, auch an den Hochschulen wird Systemtechnik betrieben, vor allem in den Systemgebieten Informatik, Datentechnik, Nachrichtentechnik und Automatik.

Welche Konsequenzen muss man daraus ziehen, insbesondere für die Hochschule? Die Systemtechnik muss auch in der Energietechnik durch Lehre und Forschung stärker gepflegt

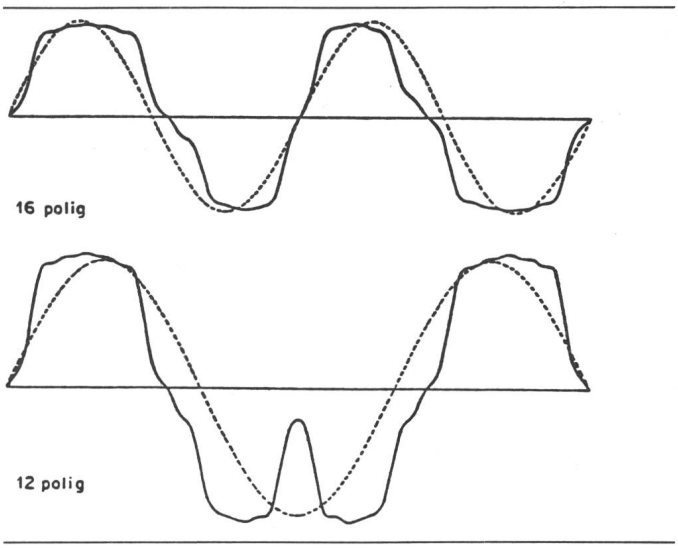


Fig. 9 Luftspaltinduktion der polumschaltbaren Synchronmaschine

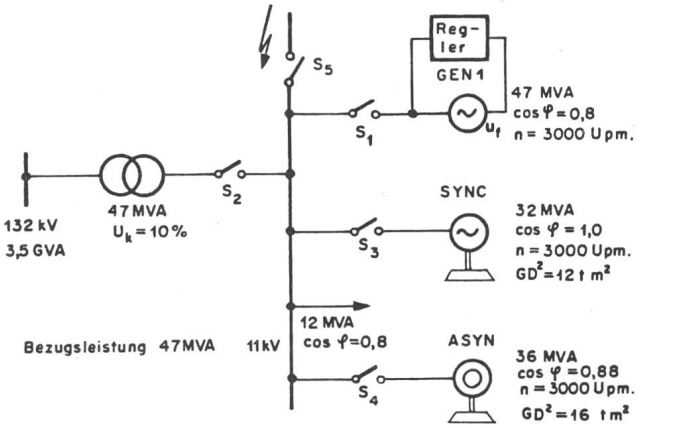
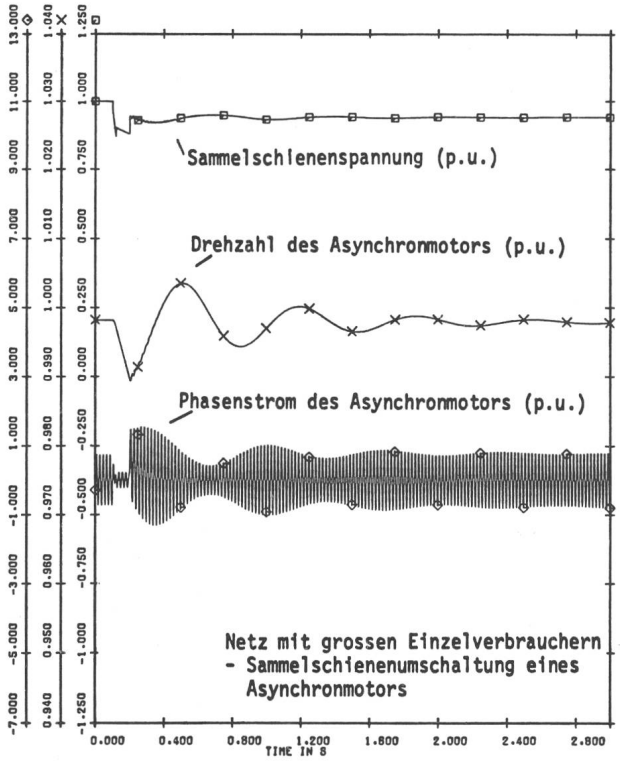


Fig. 10 Dezentrale Energieversorgung mit grossen Verbrauchern



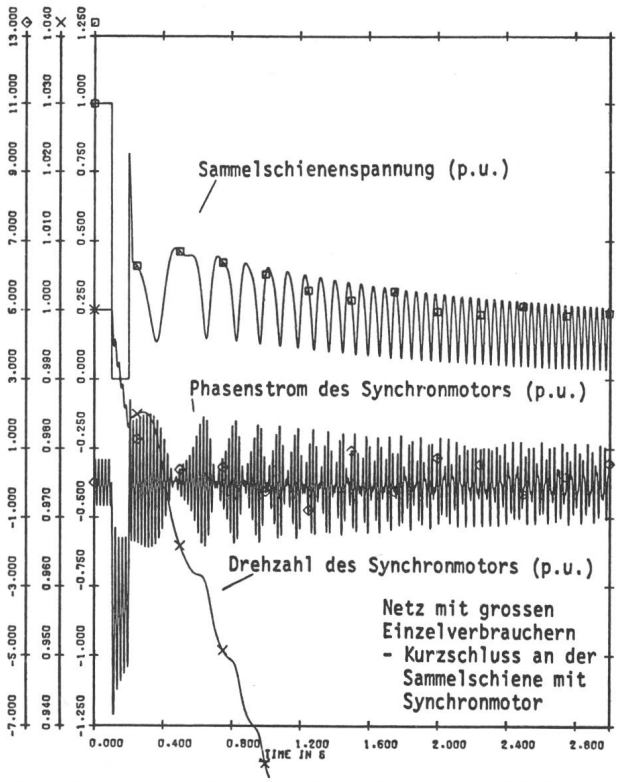


Fig. 11 Verhalten der Verbraucher nach Fig. 10 (Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen) bei Störungen

und vorangetrieben werden. Die *Lehre* sollte die Methodik und die Methoden entwickeln. Als Grundlage dafür muss aber vor allem auch das Verständnis für die Grundphänomene und deren Zusammenhänge gefördert werden. Die *Forschung* sollte speziell die Methoden weiterentwickeln und gezielt anwenden.

Damit kann auch die Hochschule einen weiteren Beitrag zum Energieproblem leisten. Sie wird der Industrie und den Anwendern sowohl systemtechnisch ausgebildete Ingenieure als auch bewährte Methoden zur Verfügung stellen können. Somit können und sollen folgende Schwerpunkte gesetzt werden:

- Vertiefung und Verbreitung der *Phänomenologie* der elektromagnetischen Energiewandlung als Mittel für das Beschreiben und für das Verstehen komplexer physikalischer Systeme.
- *Modellierung* und *Identifikation* der Energiewandlungssysteme, vorab mit Hilfe von Prozessrechnern.
- *Optimierungsverfahren* für die Auslegung und Anwendung bestehender Methoden.
- *Simulationsverfahren* für dynamische Probleme einerseits, für Feldprobleme andererseits.
- *Systemtechnische Methoden* allgemein, Standardisierung, Programmierung, Systematik.
- *Anwendung* der Methodik und der Methoden auf aktuelle Problemstellung.

Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit auf diesen Gebieten ist notwendig und sollte eigentlich selbstverständlich sein.

6. Schlussfolgerungen

1) Die elektrische Maschine wird der Lastesel der Energietechnik bleiben. Für sie gibt es keinen Ersatz. Die Elektronik kann sie verbessern, besser nützen, jedoch niemals ersetzen. Es muss daher alles getan werden, um sie optimal einzusetzen.

2) Die elektrische Maschine muss für sich, oder zusammen mit der Versorgung und dem Antrieb, systemtechnisch behandelt werden. Nur so erhält man noch optimale Lösungen.

3) Betrachtet man die Energiewandlung systemtechnisch, so werden auch dort die anspruchsvollen Probleme nicht ausgehen.

4) Lehre und Forschung müssen die systemtechnische Betrachtungsweise vermitteln und fördern. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit scheint möglich und notwendig zu sein.

Durch die Verbindung mit der Systemtechnik wird die elektrische Maschine bzw. die Ingenieurarbeit auf diesem Gebiet ihre frühere Attraktivität zurückgewinnen.

Adresse des Autors
Prof. Dr. *K. Reichert*, Vorsteher des Instituts für Elektrische Maschinen, ETHZ, 8092 Zürich.