Gedanken zum Hochschulunterricht in elektrischen Maschinen

Autor(en): **Palit, B. B.**

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): **70 (1979)**

Heft 13

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905395

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

Gedanken zum Hochschulunterricht in elektrischen Maschinen [1])

Von B. B. Palit

621.313:378.147;

Die für die Studierenden der ETHZ vorgeschlagenen Lehrveranstaltungen und Unterrichtsthemen sollen als Anregung zur Diskussion über die Fachausbildung in Elektrotechnik aufgefasst werden. Die systematisch zu gestaltenden Kurse haben vier Aufgaben zu erfüllen: Sie sollen didaktisch wirksam aufgebaut sein, dem Ausbildungsziel der Abteilung für Elektrotechnik entsprechen, den Anforderungen der Ingenieurpraxis genügen und schliesslich eine gute Forschungsbasis sichern.

Les cours et les thèmes d'enseignement proposés aux étudiants de l'EPFZ doivent être considérés comme des motifs d'une discussion sur l'enseignement de l'électrotechnique. Les cours conçus systématiquement ont quatre tâches à remplir: Ils doivent être didactiquement efficaces, correspondre au but de formation du Département d'électrotechnique, satisfaire aux exigences de la pratique d'ingénieur et, finalement, assurer une bonne base pour la recherche.

1. Geschichtlicher Rückblick

An der ETH Zürich wurde im Jahr 1882 zum ersten Mal eine Vorlesung über elektrische Maschinen gehalten [1]. Damals hiess die Schule «Eidgenössische Polytechnische Schule», und die angekündigte Vorlesung lautete: «Theorie der elektrodynamischen Maschinen». Professor *Weber* vom damaligen Lehrstuhl für Physik war der erste Dozent, der über elektrische Maschinen las. Seither steht das Fach elektrische Maschinen unter verschiedenen Bezeichnungen ununterbrochen im Lehrplan [2]. Ab 1895 hielt sogar ein zweiter Dozent, Professor *Wyssling*, neben Professor *Weber*, eine Vorlesung, und zwar über den «Bau von Dynamomaschinen» [3]. Das Lehrgebiet elektrische Maschinen hat somit an der ETH eine fast 100 Jahre alte Tradition.

Ausserhalb der Schule leistet die schweizerische Elektromaschinenindustrie seit 1875 einen grossen Beitrag an die Entwicklung der elektrischen Maschinen. *Emil Bürgin* aus Basel konzipierte 1875 den ersten schweizerischen Gleichstromdynamo für Maschinenbetrieb [4]. Etwa ab 1880 begann man mit dem Bau von kommerziell verwertbaren Wechselstromgeneratoren. Zum Durchbruch kam das Prinzip des dreiphasigen Synchrongenerators mit der ersten Verwirklichung einer Leistungsübertragung über 175 km von Lauffen nach Frankfurt a. M. anlässlich der internationalen elektrotechnischen Ausstellung im Jahr 1891. Der dafür verwendete Generator 210 kVA, 40 Hz, 150 U/min, wurde von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut [5]. Diese Maschine kann heute im Deutschen Museum, München, besichtigt werden. Seither ist die technische Entwicklung im Elektromaschinenbau derart rasch vorangeschritten, dass 1974 Turbogeneratoren von 1480 MVA für 1800 U/min gebaut werden konnten [6]. Vergleicht man die Nennleistungen der beiden Generatoren, 1480 MVA und 210 kVA, so stellt man eine 7000fache Steigerung der Einheitsleistung innerhalb von rund 80 Jahren fest! Die stürmische Entwicklung des Elektromaschinenbaus und speziell des Turbogeneratorbaus, bei welchem die schweizerische Elektromaschinenindustrie mit an der Spitze stand und immer noch steht, ist heute noch lange nicht abgeschlossen.

[1]) Dieser Aufsatz ist eine leicht geänderte Fassung der Antrittsvorlesung, welche der Autor am 7. Dezember 1978 an der ETH Zürich gehalten hat.

2. Veranlassung der Arbeit

Der neuzeitliche Unterricht in elektrischen Maschinen soll einerseits der hohen Lehrtradition der ETH entsprechen und anderseits mit der industriellen Entwicklung Schritt halten. Daneben sind weitere Gründe, die den Autor veranlasst haben, sich mit dem Hochschulunterricht in elektrischen Maschinen zu befassen:

2.1 Das Geburtsjahr der elektrischen Maschinen liegt zwischen 1830 und 1833 [7]. Das technische Gebiet der elektrischen Maschinen hat somit eine rund 150 Jahre alte Tradition. Der Informationsumfang über elektrische Maschinen ist in dieser Zeitspanne stetig gewachsen. Eine Straffung des Unterrichtsstoffes ist notwendig, wobei für das Grundlegende, Wichtige und Aktuelle Prioritäten gesetzt werden müssen.

2.2 Die heutigen Ingenieuraufgaben in der Industrie erfordern von den Hochschulabsolventen Kenntnisse über die Modelle sowie über die feldtheoretischen Aspekte der elektrischen Maschinen mit gleichzeitigem Einsatz von Computern für die Problemlösungen. Diese Gesichtspunkte sollen in den Vorlesungen berücksichtigt werden.

2.3 Mit der Qualitätsverbesserung und den Preissenkungen von Halbleitern werden Stromrichter vermehrt zur Speisung und Steuerung von elektrischen Maschinen verwendet. Die durch Stromrichterspeisung verursachte Verhaltensweise der elektrischen Maschinen soll auch in den Vorlesungen behandelt werden.

2.4 Von den Nachbardisziplinen der Elektrotechnik, wie zum Beispiel der Regelungstechnik und der Energieübertragungssysteme, werden elektrische Maschinen als Systemkomponenten betrachtet. Dies bedeutet, dass im Gebiet der elektrischen Maschinen die Systemdenkweise einen Platz neben der Apparatedenkweise eingenommen hat. Der Unterricht in elektrischen Maschinen soll beide Betrachtungsweisen ermöglichen.

2.5 Bis 1973 blieb die Zahl der Studierenden, die sich für das Studium in elektrischer Energietechnik entschieden, weit hinter dem Bedarf der Praxis an qualifiziertem Nachwuchs zurück [8]. Seit der Ölkrise im Jahr 1973 ist ein stärkeres Interesse der Studenten für energietechnische Probleme, insbesondere für Energieerzeugung, deutlich spürbar geworden. Da im Wintersemester 1978/79 265 Studenten, eine bisherige Rekordzahl, in die Abteilung Elektrotechnik der ETHZ neu eingetreten sind, kann sich diese Zunahme auch beim Unterricht in elektrischen Maschinen bemerkbar machen. Höhere Studentenzahlen bedeuten vielseitige Projektwünsche in den höheren Semestern. Der vermittelte Unterrichtsstoff soll den Studierenden ermöglichen, verschiedenartigste Probleme anzupacken.

2.6 Der sechste Grund ist hochschulintern. Die Abteilung für Elektrotechnik hat sich bei der letzten Studienplanreform

(1971) zum Ziel gesetzt, weder Universalingenieure noch Spezialisten auszubilden [9]. Die breite Ausbildung darf jedoch das hohe Niveau nicht beeinträchtigen. Jeder Studierende der höheren Semester kann die ihn interessierenden Fachbereiche und Fachzweige selbst auswählen, wobei das Lehrgebiet elektrische Maschinen ein Fachzweig innerhalb des Fachbereiches Energietechnik ist.

3. Aufbau des Studiums

Das Studium in elektrischen Maschinen beginnt an der ETH Zürich bereits im 4. Semester (Tabelle I). Das Diplomstudium gliedert sich in zwei Stufen. Die erste Stufe wird als *grundlegende Fachausbildung* bezeichnet. Hier soll der Studierende die fundamentalen Kenntnisse der elektrischen Maschinen erwerben. Diese Stufe umfasst auch das Praktikum des 5. Semesters. Das Ziel dieses Praktikums ist, das theoretische Verständnis des Vorlesungsstoffes vom 4. Semester durch Messungen und Beobachtungen zu verfestigen und zu ergänzen.

Die zweite Ausbildungsstufe wird mit *vertiefte Fachausbildung* bezeichnet und dauert vom 6. bis zum 9. Semester. Sie ist für diejenigen Studierenden bestimmt, die vertiefte Kenntnisse über elektrische Maschinen erlangen wollen. Mit der vertieften Fachausbildung will man den Studierenden zeigen, wie man, ausgehend von allgemeinen Vorkenntnissen, zur selbständigen und gründlichen Bearbeitung von technischen Problemen in das Fachgebiet elektrische Maschinen vordringt.

Zur Verwirklichung dieses für die Hochschulausbildung entscheidenden Lernzieles bilden neben Vorlesungen und Übungen die Studienarbeiten im 7. und 8. Semester einen wichtigen Beitrag. Diese erstrecken sich über ein ganzes Semester. Dabei soll sich der Studierende in die einschlägige Literatur vertiefen und die Entwicklung der Technik verfolgen können.

Die Diplomarbeit, die frühestens im 9. Semester ausgeführt werden kann, besteht in der Lösung von theoretischen, experimentellen, rechnerischen und konstruktiven Aufgaben. Sie dauert acht Wochen. Diplomierten Absolventen sollte die Möglichkeit geboten werden, ihre Ausbildung durch ein Ergänzungsstudium oder ein Nachdiplomstudium zu erweitern.

Wer eine Doktorarbeit durchführen will, muss einen selbständigen Beitrag zur wissenschaftlichen Forschung erbringen.

4. Gestaltung der Lehrveranstaltungen

Wie sollen die genannten Lehrveranstaltungen gestaltet werden, damit sie den Zielsetzungen der Abteilung für Elektrotechnik gerecht werden, didaktisch gut aufgebaut sind und auch den Anforderungen der Ingenieurpraxis entsprechen?

Um diese Fragen zu beantworten, erlaubt sich der Autor, ein paar Gedanken über die Gestaltung eines ihm zweckentsprechend erscheinenden Unterrichtsprogrammes zu äussern. Dabei wird nur die grundsätzliche Philosophie zur jeweiligen Lehrveranstaltung erörtert. Die in den folgenden Unterkapiteln erwähnten Kursnummern entsprechen Tab. I.

4.1 Der erste Kurs

Der Kurs im 4. Semester ist für alle Studierenden der Abteilung tür Elektrotechnik obligatorisch. Mit den Vorkenntnissen in Physik, technischer Elektrizitätslehre und Feldtheorie soll zuerst über die Grundlagen, dann über den Aufbau und erst anschliessend über die Wirkungsweise der elektrischen

Aufbau des Studiums im Fachzweig Elektrische Maschinen Tabelle I

4. Semester 1. Kurs	Grundlegende Fachausbildung	
5. Semester 2. Kurs	Grundlegende Fachausbildung Praktikum	
6. Semester 3. Kurs	Vertiefte Fachausbildung	
7. Semester 4. Kurs	Vertiefte Fachausbildung	Studienarbeit
8. Semester 5. Kurs	Vertiefte Fachausbildung	Studienarbeit
9. evtl. auch 10. Semester 6. Kurs	Ergänzungsstudium oder Nachdiplomstudium	Diplomarbeit
	Doktorarbeit	

Maschinen unterrichtet werden. Der mathematische Aufwand ist klein zu halten, die Erläuterungen und Analogien sind jedoch umfangreich zu gestalten. Dafür geht man didaktisch am besten von den drei folgenden Grundgesetzen aus, die für alle elektrischen Maschinen gelten: Faradaysches Induktionsgesetz, Maxwellsches Durchflutungsgesetz und Lorentzsches Kraftgesetz. Unter Anwendung dieser Gesetze kann die elektromagnetische Energieumwandlung für alle elektrischen Maschinen, rotierend oder linear bewegend, und auch für Transformatoren einheitlich gezeigt werden. Ebenfalls anhand dieser Gesetze sollen die Bauteile der elektrischen Maschinen vorgestellt werden. Beispielweise wird die magnetische Induktion vom Polsystem erzeugt und der elektrische Strom fliesst durch den Ankerleiter, der eine bestimmte Länge hat. Eisen wird verwendet, um den Weg des magnetischen Flusses leitend zu machen. Zur Ermöglichung der relativen Bewegung zwischen Pol- und Ankersystem muss aus mechanischen Gründen ein Luftspalt vorhanden sein. Ähnlich kann man weiter auf diese Grundgesetze aufbauen.

Aus physikalischen Überlegungen heraus soll die Wirkungsweise aller klassischen elektrischen Maschinen im stationären Betrieb erläutert werden. Die hierfür erforderlichen analytischen Ausdrücke, soweit sie zur Erläuterung der physikalischen Zusammenhänge benötigt werden, sind anzugeben. Auf eine streng mathematische Herleitung dieser Ausdrücke ist zu verzichten. In diesem Kurs ist auch der magnetische Kreis einzuführen und eine Analogie zwischen dem elektrischen und magnetischen Kreis herzustellen [10; 11].

4.2 Der zweite Kurs

Gemäss Studienplan gehört der Kurs im 5. Semester auch zur grundlegenden Fachausbildung und ist deshalb obligatorisch für alle Studierenden der Abteilung Elektrotechnik. Es handelt sich dabei um ein einführendes Praktikum in elektrischen Maschinen. Zu diesem Zweck steht ein modern eingerichteter Praktikumssaal zur Verfügung [2]. Gemäss langjähriger Tradition werden Kennlinien und Eigenschaften der elektrischen Maschinen im stationären Betriebszustand untersucht.

Da bei modernen elektrischen Maschinen die Bauteile nicht gut zugänglich sind [2] und manchen Studenten die zeitliche und räumliche Vorstellung der Vorgänge Mühe bereitet, ist sehr zu empfehlen, einige physikalisch anschauliche Versuche mit einfachen Einrichtungen zu gestalten. Zweck dieser Versuche ist, dem Studierenden einige grundlegende Begriffe der elektrischen Maschinen näherzubringen: Gleichfeld, Wechselfeld, Drehfeld, Gegendrehfeld, Wanderfeld, Rotationsspannung, Transformationsspannung, magnetischer Kreis mit variablem Luftspalt, magnetische Kopplung, elektromagnetisch erzeugtes Drehmoment, Reluktanzmoment, Lastwinkel, Synchronismus, Schlupf, Aussertrittfallen usw. Wenn diese Begriffe richtig verstanden werden, kann das Praktikum und das spätere Studium in elektrischen Maschinen mit Leichtigkeit bewältigt werden.

4.3 Der dritte Kurs

Nachdem die Grundlagen, der Aufbau und das stationäre Betriebsverhalten sowohl theoretisch als auch praktisch unterrichtet worden sind, kann im 6. Semester die einheitliche mathematische Theorie behandelt werden. Von diesem Semester an werden Zuhörer unterrichtet, die sich im Fachzweig Elektrische Maschinen vertiefen wollen. Das Ziel dieser Lehrveranstaltung soll sein: Erkennen der Gemeinsamkeiten bei der theoretischen Behandlung aller elektrischen Maschinen. Zu diesem Zweck sind Zweiachsenmodelle zu entwickeln und Gleichungssysteme herzuleiten. Zum Aufbau der Theorie geht man am besten von einem allgemeinen elektromechanischen Energiewandler mit ausgeprägten Stator- und Rotorpolen aus. Aus diesem Wandler ist sukzessive eine Gleichstrom-Kommutatormaschine zu entwickeln. Bei den Drehfeldmaschinen sind entsprechende mathematische Transformationen vorzunehmen, um ebenfalls Modelle mit Kommutatorwicklungen zu erhalten [12; 13; 14]. Zu jedem Modell gehört ein allgemeines Gleichungssystem, das für alle Betriebszustände der Maschine gültig ist.

Als nächsten Schritt soll man aus den allgemeinen Gleichungssystemen der Maschinen die für das stationäre Betriebsverhalten gültigen Gleichungen ableiten. Diese können zur Aufstellung der Ersatzschaltbilder und somit zur Untersuchung von verschiedenen stationären Betriebszuständen verwendet werden. Dieses Vorgehen wird zur Bestätigung des Vorlesungsstoffes vom 4. Semester führen.

4.4 Der vierte Kurs

Da die allgemeinen Gleichungssysteme der elektrischen Maschinen nun bekannt sind und deren stationäres Verhalten bereits untersucht wurde, ist es zweckmässig, im 7. Semester die nichtstationären Vorgänge und die Stabilitätsfragen der elektrischen Maschinen zu behandeln [15; 16]. Als Beispiel nehme man das allgemeine Gleichungssystem der Synchronmaschine, das offensichtlich nichtlinear ist [17]. Aus diesem Gleichungssystem lässt sich irgendein transienter Vorgang mit Hilfe eines Digitalrechners numerisch simulieren. Vielfach wird auch in Studien- und Diplomarbeiten so vorgegangen. Die Philosophie dieser Vorlesung ist aber, möglichst viele lineare Vorgänge zu behandeln, da man anhand von geschlossenen analytischen Lösungen die inneren Vorgänge der elektrischen Maschinen physikalisch erklären kann. Beispielsweise darf bei dreiphasigem Stosskurzschluss der Synchronmaschine die Drehzahl konstant angenommen werden. Aufgrund dieser Annahme wird das Gleichungssystem der Synchronmaschine linear. Auch das lineare Gleichungssystem kann mittels Computer numerisch ausgewertet werden. Die auf solche Weise erhaltenen zeitlichen Verläufe der Phasenströme und des Erregerstromes beim Kurzschluss werden ähnlich aussehen wie die Oszillogramme dieser Ströme. Aber man kann diese Resultate physikalisch nicht interpretieren, da man mangels analytischen Ausdrücken der Ströme keine Grundlage dazu hat. Nur mit Hilfe der analytischen Ausdrücke des zeitlichen Verlaufs des Stosskurzschlußstromes einer Phase und des Erregerstromes ist es möglich, die verschiedenen Stromkomponenten (Gleichstrom, betriebsfrequenter Wechselstrom und doppelfrequenter Wechselstrom) den zugehörigen Zeitkonstanten zuzuordnen.

Ähnlich gibt es zahlreiche Beispiele der transienten Vorgänge, bei denen ein sinusförmiges Spannungssystem an die Klemmen der elektrischen Maschinen gelegt wird. In dieser Vorlesung sollen aber auch solche transiente Vorgänge untersucht werden, die durch ein nichtsinusförmiges Spannungs- oder Stromsystem in elektrischen Maschinen hervorgerufen werden, beispielsweise von Stromrichterspeisung herrührend.

4.5 Der fünfte Kurs

Viele Probleme der elektrischen Maschinen können nur mit der Feldtheorie gelöst oder erklärt werden. Um diese Probleme im einzelnen untersuchen zu können, soll man im Kurs vom 8. Semester jeweils von den Maxwellschen Hauptgleichungen, der Gleichung des Vektorpotentials und den Materialgleichungen ausgehen [18].

Will man die zweidimensionalen magnetischen Felder in einer magnetisch nichtlinearen elektrischen Maschine numerisch berechnen, so lässt sich zu diesem Zweck aus den Feldgleichungen eine nichtlineare Gleichung des Vektorpotentials herleiten, die einer Poisson-Gleichung ähnlich ist [19]. Wenn die Permeabilität des Eisens unendlich gross vorausgesetzt wird, lässt sich daraus die Laplace-Gleichung des magnetischen Vektorpotentials ableiten. Aus diesem können die radiale und tangentiale magnetische Feldstärke und mit der radialen magnetischen Feldstärke die axiale elektrische Feldstärke im Luftspalt bestimmt werden. Wenn die elektrische und die magnetische Feldstärke im Luftspalt bekannt sind, können daraus der Poynting-Vektor, aus diesem die radiale Luftspaltleistung, aus den magnetischen Feldstärken die magnetische Energie des Luftspaltes und aus der magnetischen Energie das elektromagnetisch erzeugte Drehmoment bestimmt werden [20].

Für die Ermittlung der Streuinduktivitäten des Nutleiters einer rotierenden elektrischen Maschine bzw. der Wicklungen eines Transformators muss man die magnetische Energie des Nutraumes bzw. des Streuflusskanals sowie des durch die Transformatorwicklung besetzten Raumes ermitteln, wofür die tangentiale bzw. axiale magnetische Feldstärke zu bestimmen ist [21; 22].

Zur Berechnung der Stromverdrängung geht man wiederum von den Feldgleichungen aus und erhält die Differentialgleichungen der magnetischen Feldstärke im Nutraum, der elektrischen Feldstärke und der Stromdichte im Nutleiter [23; 24]. Für die Berechnung der Wirbelströme und Wirbelstromverluste in Eisenblechen von Transformatoren und elektrischen Maschinen sind ebenfalls die Feldgleichungen nützlich [14; 23; 24].

Die massgebende Gleichung für die Untersuchung des Linearmotors ist durch eine Differentialgleichung des Vektorpotentials dargestellt [25]. Aus der Lösung dieser Differentialgleichung können die magnetischen Felder und die auf den Sekundärteil wirkenden elektromagnetischen Kräfte berechnet werden. Der Sekundärteil bewegt sich linear mit der untersynchronen Geschwindigkeit. Das erregende Wanderfeld wird vom Primärteil erzeugt.

4.6 Der sechste Kurs

Damit sind alle Vorlesungen erörtert, die dem Normalstudienprogramm angehören. Die Fächer des Normalstudienprogramms werden beim Schlussdiplom geprüft.

In den Lehrveranstaltungen des Normalstudienprogramms werden elektrische Maschinen normalerweise unter idealen Bedingungen untersucht. In der Praxis können aber nichtideale Betriebszustände auftreten. Für diejenigen Interessenten, die sich auch mit dem nichtidealen Betrieb der elektrischen Maschinen befassen möchten, sollte eine Vorlesung im Rahmen des Ergänzungsstudiums bzw. Nachdiplomstudiums geschaffen werden.

Was ist unter nichtidealem Betrieb von elektrischen Maschinen zu verstehen? Um dies zu erklären, werden im folgenden einige Beispiele des nichtidealen Betriebes gezeigt.

Meistens nimmt man an, dass an den Klemmen der Drehstrommaschinen ein symmetrisches Dreiphasenspannungssystem liegt. Ist dies nicht der Fall, so muss das unsymmetrische Spannungssystem in drei symmetrische Komponenten (Mit-, Gegen- und Nullsystem) zerlegt werden. Die Frage lautet dann: Welche Auswirkungen haben diese drei Spannungssysteme auf elektrische Maschinen? Analog stellt sich die Frage, bei unsymmetrischem Stromsystem [26; 27].

Als zweites Beispiel diene der folgende Fall: Bei normalem Betrieb arbeiten die elektrischen Maschinen mit symmetrisch angeordnetem und symmetrisch gespeistem Strangsystem. Was geschieht in der Maschine, wenn eine Phase des Stators bzw. des Rotors ausfällt? *Görges* untersuchte das Maschinenverhalten bei unsymmetrischer Läuferwicklung [27].

In den Kursen des Normalstudienprogramms wird hauptsächlich mit der Grundwelle des räumlichen Durchflutungs- oder Induktionsverlaufs gearbeitet. Das heisst, man lernt eigentlich das Grundwellenverhalten der elektrischen Maschinen kennen. Der wirkliche Verlauf der genannten Grössen kann beispielsweise rechteckig oder trapezförmig sein. Die Fourier-Analyse dieser periodischen Funktionen ergibt neben der Grundwelle auch ungerade Oberwellen. Welche Einflüsse üben diese Oberwellen auf das Drehmoment, auf das Geräusch und die Rüttelkräfte aus [28]?

Ein nichtidealer Betrieb kann auch von mechanischer Natur sein. Im Idealfall setzt man voraus, dass der Rotor keine Exzentrizität besitzt. Was geschieht, wenn der Rotor tatsächlich exzentrisch gelagert ist [29]?

Diese und ähnliche Fragen können in einer Vorlesung als ein geschlossenes Thema behandelt werden.

4.7 Zusammenfassung der Kurse

Stellt man nun die vorgeschlagenen Lehrveranstaltungen zusammen, so entsteht Tabelle II. Um den Zusammenhang zwischen dem Aufbau des Studiums und den angebotenen Lehrveranstaltungen besser überblicken zu können, vergleiche man Tabelle I mit Tabelle II.

Lehrveranstaltungen über elektrische Maschinen Tabelle II

4. Semester 1. Kurs	Elektrische Maschinen: Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise	
5. Semester 2. Kurs	Einführungspraktikum in elektrischen Maschinen	
6. Semester 3. Kurs	Einheitliche Theorie der elektrischen Maschinen	
7. Semester 4. Kurs	Transiente Vorgänge in elektrischen Maschinen	Selbständige Projekt- Arbeiten
8. Semester 5. Kurs	Elektromagnetische Aspekte in elektrischen Maschinen	
9. evtl. auch 10. Semester 6. Kurs	Nichtidealer Betrieb der elektrischen Maschinen	
	Forschungs- und Promotionsarbeiten	

Wie in Tab. II dargestellt, hat jeder Kurs nun einen aussagekräftigen Titel. Jede Vorlesung behandelt ein zusammenhängendes Thema und baut auf die vorhergehenden Lehrveranstaltungen und auf die Vorkenntnisse aus den propädeutischen Fächern auf. Dem Charakter nach lässt der Vorlesungsstoff vom 6. und 7. Semester zu, elektrische Maschinen in Regelkreise oder Energieübertragungssysteme einzubauen.

4.8 Studien- und Diplomarbeiten

Es ist zu hoffen, dass die Vorlesungen, zusammen mit den Studien- und Diplomarbeiten in Form von Projektarbeiten (Tab. II), auch diejenigen Studierenden ansprechen, die Erfinder- und Innovationsgeist besitzen. Für die Studien- und Diplomarbeiten steht eine Maschinenhalle mit elektrischen Maschinen verschiedenster Bauart, Drehzahl und Leistung zur Verfügung [2]. Mit Maschinengruppen, deren Nennleistungen bis zu 180 kVA reichen, können neben Alleinbetrieb auch Mehrmaschinenprobleme behandelt werden. In dieser Richtung sind bereits Themen wie Frequenzanlauf von Synchronmaschinen, Betriebsverhalten von Asynchronmaschinen bei bifrequenter Speisung, selbsterregte Pendelungen von Asynchronmaschinen bei Gruppenbetrieb usw. in Angriff genommen worden.

5. Schlussbemerkungen

Das Thema Forschungsarbeiten (Tab. II) auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen ist nicht Gegenstand dieses Aufsatzes. Wer aber einen Überblick über die gegenwärtigen Forschungsthemen auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen hat, erkennt zweifellos, dass der Vorlesungsstoff der vorgestellten Lehrveranstaltungen durchaus eine wesentliche Grundlage für Promotions- und Forschungsarbeiten liefert. Es lässt sich somit folgendes festhalten: Wo die Lehre auf einer hohen Stufe steht, ist auch eine gute Forschungsbasis gesichert.

Es ist gewiss nicht fehl am Platz, wenn man bei dieser Gelegenheit auf die guten Beziehungen zwischen dem Institut für

Elektrische Maschinen der ETHZ und der schweizerischen Elektromaschinenindustrie hinweist. Diese Beziehungen könnten zu gegenseitigem Nutzen, besonders auf dem Gebiet der Forschung, noch wirksamer ausgebaut werden.

Literatur

[1] Programm der Eidgenössischen Polytechnischen Schule für Schuljahr 1882/83. Zürich, Orell Füssli, 1882.

[2] *B.B. Palit:* Die neuen Laboratorien des Instituts für Elektrische Maschinen der ETHZ. Bull. SEV/VSE 69(1978)17, S. 913...917.

[3] Programm der Eidgenössischen Polytechnischen Schule für das Sommersemester 1895. Zürich, Orell Füssli, 1895.

[4] *W. Wyssling:* Die Entwicklung der schweizerischen Elektrizitätswerke und ihrer Bestandteile in den ersten 50 Jahren. Zürich, SEV, 1946.

[5] *K. Abegg* und *P. Rauhut:* Elektrische Grossmaschinen gestern, heute und morgen. Bull. SEV 62(1971)18, S. 865...874.

[6] *N. Krick* und *R. Noser:* Das Wachstum von Turbogeneratoren. Brown Boveri Mitt. 63(1976)2, S. 148...155.

[7] *E. Dünner:* Die Entwicklung der elektrischen Maschinen. Bull. SEV 48(1957)11, S. 501...506.

[8] *D. Kind:* Die Fachrichtungen der Elektrotechnik in Studium und Beruf. ETZ-A 94(1973)12, S. 713...716.

[9] Wegleitung für die Studierenden der Abteilung für Elektrotechnik an der ETHZ. Zürich, Vorstand der Abteilung für Elektrotechnik IIIB, 1978.

[10] *A.J. Ellison* and *E.R. Laithwaite:* The teaching of electrical machines. Proceedings Part 2, Theme T/3, International Conference on Electrical Machines (1978), Brussels, Belgium, pp. 1...10.

[11] *H. Frohne* und *E. Ueckert:* Einführung in die Elektrotechnik. Bd. 2: Elektrische und magnetische Felder. Stuttgart, Teubner, 1972.

[12] *D. O'Kelly* and *S. Simmons:* Introduction to generalized electrical machine theory. London/New York/Toronto/Sydney, McGraw-Hill, 1968.

[13] *C.V. Jones:* The unified theory of electrical machines. London, Butterworths, 1967.

[14] *F. Taegen:* Einführung in die Theorie der elektrischen Maschinen. Bd. I und II. Uni-Text. Braunschweig, Vieweg und Sohn GmbH Verlag, 1971.

[15] *K.P. Kovàcs* und *I. Ràcz:* Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Bd. I und II. Budapest, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, 1959.

[16] *G. Müller:* Elektrische Maschinen. Theorie rotierender elektrischer Maschinen. Berlin, VEB-Verlag Technik, 1967.

[17] *Th. Laible:* Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb. Hg. Maschinenfabrik Oerlikon. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1952.

[18] *I. Wolff:* Grundlagen und Anwendungen der Maxwellschen Theorie. Ein Repetitorium. Teil I. Hochschulskripten 818/818a. Mannheim/Zürich, Bibliographisches Institut, 1968.

[19] *E.A. Erdélyi, M.S. Sarma* and *S.S. Coleman:* Magnetic fields in nonlinear salient pole alternators. IEEE Trans. PAS 87(1968)10, pp. 1848...1856.

[20] *B.B. Palit:* Einheitliche Untersuchungen der elektrischen Maschinen mit Hilfe des Poynting-Vektors und des elektromagnetischen Energieflusses im Luftspaltraum. Habilitationsschrift an der ETHZ, 1978.

[21] *W. Schuisky:* Berechnung elektrischer Maschinen. Wien, Springer-Verlag, 1960.

[22] *R. Richter:* Elektrische Maschinen. Bd. III: Die Transformatoren. Berlin, Springer-Verlag, 1932.

[23] *K. Küpfmüller:* Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Ed. 5. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1955.

[24] *W. Schuisky:* Induktionsmaschinen. Wien, Springer-Verlag, 1957.

[25] *S.A. Nasar* and *I. Boldea:* Linear motion electric machines. New York, Wiley and Sons, 1976.

[26] *K.P. Kovàcs:* Symmetrische Komponenten in Wechselstrommaschinen. Lehr- und Handbücher der Ingenieurwissenschaften, Bd. 24. Basel/Stuttgart, Birkhäuser-Verlag, 1962.

[27] *H. Jordan, V. Klima* und *K.P. Kovàcs:* Asynchronmaschinen: Funktion – Theorie – Technisches. Braunschweig, Vieweg, 1975.

[28] *P.L. Alger:* Induction Machines: Their behaviour and uses. (Former title: The nature of induction machines.) New York/London/Paris, Gordon and Breach Science Publishers, 1970.

[29] *T. Bratoljić* und *P. Vrkljan:* Durch Rotorexzentrizität verursachte magnetische Kraft bei elektrischen Maschinen. Brown Boveri Mitt. 54(1967)9, S. 580...592.

Adresse des Autors

PD Dr.-Ing. *B.B Palit*, Institut für Elektrische Maschinen, ETH Zürich, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Literatur – Bibliographie

DK: 620.9 : 621.313 : 621.772 SEV-Nr. A 736/I+II

Hütte. Taschenbücher der Technik. 29. Auflage. Elektrische Energietechnik. Band I: Maschinen. Von *Walter Böning*. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1978; kl. 8°, XX/622 S., 456 Fig., 73 Tab. – Preis: gb. DM 128.–. Band II: Geräte. Von *Walter Böning*. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1978; kl. 8°, XIV/401 S., 272 Fig., 69 Tab. – Preis: geb. DM 88.–.

Für die allen Elektrotechnikern bekannte «Starkstrom»-HÜTTE aus dem Jahre 1957 ist nun endlich die langerwartete Neuauflage gefolgt. Für die Auflage 1978 hat das Bild der HÜTTE wesentlich geändert: nicht nur der Name ist neu: Taschenbücher der Technik, nicht nur der Verlag ist neu: Springer-Verlag, sondern Umfang und Darstellung des Stoffes zeigen den Fortschritt der Elektrotechnik während der letzten 20 Jahre. Der Herausgeber hat das Stoffgebiet *Elektrische Energietechnik* (nicht mehr *Starkstromtechnik)* auf vier Einzelbände aufgeteilt, von denen die Bände 3 (Netze) und 4 (Anwendungen) sich in Vorbereitung befinden.

Band 1, *Maschinen,* befasst sich mit dem Problemkreis der rotierenden elektrischen Maschinen. Die Bearbeiter der einzelnen Abschnitte, alles Fachleute mit langjähriger Erfahrung auf einem Spezialgebiet der elektrischen Maschinen, geben eine Darstellung der Probleme, die den neuesten Erkenntnissen entsprechen. Der erste Abschnitt, allgemeine Grundlagen, vermittelt einen Überblick über Normen, Werkstoffe und Messtechnik, wobei dieser Stoff auch für die anderen Bände Gültigkeit hat. Abschnitt 2 behandelt die Grundlagen der elektrischen und mechanischen Maschinenberechnung; dabei wird auch auf die mechanische Beanspruchung bei Grenzleistungsmaschinen eingegangen. Auch die Kühlung sowie Umweltprobleme wie Geräusche und Funkentstörung werden hier behandelt. Der Inhalt des Abschnittes 3 umfasst das Betriebsverhalten der heute wichtigen Maschinen: Gleichstrommaschine, Synchronmaschine, Asynchronmaschine, Kleinmotoren, Bahnmotoren und einige Sondermaschinen. Bei den Sondermaschinen werden speziell hochtourige Maschinen mit wicklungslosem Rotor sowie Wanderfeldmotoren behandelt; Schrittmotoren und Schlupfkupplungen werden nicht erwähnt. Auf die Zusammenarbeit Stellglied – Antriebsmotor – Arbeitsmaschine wird leider fast gar nicht eingegangen. Es ist zu hoffen, dass ein Abschnitt über elektrische Antriebe in Band 4 zu finden sein wird. Im Abschnitt 4 wird der Prüfung und Betriebsüberwachung genügend Platz eingeräumt; dabei werden Kommutierungsstörungen besonders eingehend behandelt.

Band 2, *Geräte,* behandelt die Geräte der Energietechnik mit Ausnahme von Schaltgeräten (Band 3). Abschnitt 1 behandelt die Stromrichtertechnik, beginnend mit dem Aufbau der Ventile und der Kommutierung, bis zu den Eigenschaften der Stromrichterschaltungen. In bezug auf die Anwendung der Stromrichterschaltungen wird auf ein reichhaltiges Literaturverzeichnis verwiesen. Abschnitt 2 umfasst die Behandlung des Transformators, der Drosselspule, der Messwandler und des Überspannungsableiters. Im dritten Abschnitt werden Kondensatoren behandelt, im vierten Akkumulatoren, Primärelemente und, was besonders hervorzuheben ist, Brennstoffzellen, thermo- und fotoelektrische Stromerzeuger sowie MHD-Generatoren. Der letzte Abschnitt ist der Hochenergiephysik gewidmet. Es soll so den im Anlagenbau tätigen Ingenieuren ein Einblick in dieses Gebiet vermittelt werden.

Die Neuauflage der HÜTTE «Energietechnik» schliesst endlich eine Lücke im Büchermarkt, denn in den letzten 20 bis 25 Jahren sind keine derart ausführlichen Taschenbücher der Elektrotechnik erschienen. Für den in Praxis, Lehre und Forschung tätigen Ingenieur stellt die neue HÜTTE ein Nachschlagewerk dar, auf dessen Benutzung niemand verzichten sollte, nicht zuletzt wegen des umfangreichen Literaturverzeichnisses zu jedem Abschnitt, in welchem Zeitschriftenaufsätze bis und mit Jahrgang 1977 berücksichtigt sind. *H. Hagemeier*