



**Jahresbericht  
des  
Institutes für Elektrische Energietechnik**

**Bericht Nr. 2 (1991)**

**Dezember 1991**

**Prof. Beck**

**Vorwort**

Liebe Freunde und Mitarbeiter des Instituts,

seit der Neubesetzung der Institutsleitung vor zwei Jahren wurde von den Mitarbeitern des IEE ein beträchtliches Maß an Aufbauarbeit geleistet, um Lehre und Forschung auf die am Institut neu gesetzten Schwerpunkte auszurichten.

Die Hilfe und Kooperation vieler externer Stellen hat dazu beigetragen, die Lehre effizienter zu machen und die Forschungsarbeiten bzw. -ziele zukunftsorientiert zu gestalten.

Für diejenigen Freunde, Kollegen und Mitarbeiter, die einen tieferen Einblick in unsere Institutsarbeit wünschen, wird dieser Bericht vorgelegt.

Mit einem aufrichtigen Dank für die von Ihnen geleistete Hilfe, Kooperation und Mitarbeit und den besten Wünschen für das neue Jahr 1992 verbleibe ich

Ihr

Dezember 1991

J A H R E S B E R I C H T 1991  
des Instituts für Elektrische Energietechnik  
Technische Universität Clausthal

**Inhaltsverzeichnis**

Seite

**Vorwort****1 Lehre**

1.1 Vorlesungen, neue Studiengänge	3
1.2 Übungen, Praktika, Seminare	4
1.3 Seminarvorträge	5
1.4 Studien- und Diplomarbeiten	7

**2 Veröffentlichungen, Dissertationen, Technische Berichte**

2.1 Bücher, Zeitschriftenaufsätze	8
2.2 Vorträge	8
2.3 Dissertationen	8
2.4 Technische Berichte, Vorlesungsmanuskripte	9
2.5 Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte	9

**3 Forschungsarbeiten**

3.1 Ausbau der Institutseinrichtungen	10
3.2 Projektblätter	11

**4 Personelle Besetzung**

4.1 Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts	29
4.2 Nebenamtlich tätige Hochschullehrer	30
4.3 Tutoren und wissenschaftliche Hilfskräfte	30
4.4 Von der Lehrverpflichtung befreite Hochschullehrer	30
4.5 Mitglieder in den Selbstverwaltungsgremien der Universität	30

**Anlage**

## **1 Lehre**

### **1.1 Vorlesungen, neue Studiengänge**

Folgende Vorlesungen wurden in diesem Jahr von Mitarbeitern des IEE angeboten:

Beck	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Doppelvorlesung vor dem Vordiplom, FB Maschinen- und Verfahrenstechnik, Service FB Metallurgie und Werkstoffwissenschaften sowie FB Bergbau und Rohstoffe)
Beck	Elektrische Antriebe, Gleich- und Drehstromantriebe
Beck	Regelung elektrischer Antriebe
Beck	Energieelektronik/Umformung elektrischer Energie
Bretthauer	Elektrische Anlagen im Bergbau
Bretthauer	Hochspannungstechnik
Canders	Elektrische Maschinen und Transformatoren
Diemar	Elektrowärme, Widerstands-, Lichtbogen- und Induktionsöfen, dielektrische Erwärmungsanlagen
Helmholtz	Theorie der Wechselströme I/II
Mückenheim	Theorie der elektromagnetischen Felder
Wahl	Elektrizitätswirtschaft, Laststeuerung, Speicherung
Wehrmann	Elektrische Energieerzeugung in Kraftwerken
Wehrmann	Energieverteilung in elektrischen Netzen

Zum Wintersemester 91/92 hat der Fachbereich Maschinen- und Verfahrenstechnik eine neue Diplomprüfungsordnung (DPO) mit dem Ziel eingeführt, die Studienzeiten weiter zu verkürzen und eine neue Studienrichtung "Informatik im Maschinenbau" anbieten zu können (Anlage 1.1).

Die wesentlichen Änderungen bei den vom IEE angebotenen Lehrveranstaltungen betreffen die "Grundlagen der Elektrotechnik I/II" vor dem Vordiplom und die Pflichtvorlesung "Elektrische Antriebe" für Maschinenbaustudenten im Hauptstudium.

Die Grundlagenvorlesung hören Studenten des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik laut Modellstudienplan (Anlage 1) jetzt in ihrem 3./4. Semester und nicht mehr im ersten und zweiten. Die zugehörigen Praktika I/II werden zukünftig parallel zu den Vorlesungen, Übungen und Tutorien angeboten. Es besteht nun ferner die Möglichkeit im jeweils nachfolgenden Semester zu Beginn des Vorlesungszeitraumes, die nicht erfolgreich durchgeführten Versuche zu wiederholen. Hierdurch entfällt die bisherige Wartezeit.

Im Hauptstudium wird die Pflichtvorlesung "Elektrische Antriebe" inhaltlich derart umgestellt, daß einerseits breitere Kenntnisse auf dem Gebiet der Elektrischen Energietechnik vermittelt werden können, andererseits jedoch die angestrebte Vertiefung der Grundlagenkenntnisse erhalten bleibt. Sie wird in "Elektrische Energietechnik" umbenannt. Ihre Umstellung ist eine Konsequenz der technischen Entwicklung der letzten Jahre. Die fortschreitende Verbreitung der Elektrotechnik verlangt auch von dem Maschinenbauingenieur ein immer breiteres Wissen auf dem Gebiet der Erzeugung, Verteilung und Anwendung elektrischer Energie.

Interessierte Studenten der Studienrichtungen "Elektrotechnik im Maschinenbau" und "Energietechnik/Energiesysteme" können ihre Kenntnisse auf dem Gebiet der Elektrischen Energietechnik in den Fächern "Energieelektronik", "Regelung elektrischer Antriebe", "Elektrische Maschinen", "Energieerzeugung", "Energieverteilung", "Elektrowärme", "Hochspannungstechnik", "Elektrizitätswirtschaft", "Theorie der Wechselströme I/II" und "Theorie elektromagnetischer Felder" im Wahlpflicht- oder Schwerpunktbereich weiter vertiefen (Anlage 1.2).

## **1.2 Übungen, Praktika, Seminare**

Im Berichtszeitraum wurden folgende Übungen und Praktika durchgeführt. Die Zahlen in Klammern geben jeweils die ungefähre Teilnehmerzahl an.

Große Übung	zu Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Wehrmann)	(150)
Tutorien	zu Grundlagen der Elektrotechnik I/II (wissenschaftliche Hilfskräfte)	(80)
Praktika	zu Grundlagen der Elektrotechnik I/II (wissenschaftliche Mitarbeiter und Hilfskräfte)	(380)
Übung	zu Elektrische Antriebe (Alders, Engel)	(50)
Praktikum	zu Elektrische Antriebe (Alders)	(10)
Übung	zu Regelung elektrischer Antriebe (Krüger)	(7)
Übung	zu Energieelektronik (Sourkounis)	(15)
Praktikum	zu Energieelektronik (Sourkounis)	(4)
Übung	zu Hochspannungstechnik (Wehrmann)	(5)
Übung	zu Elektrische Energieerzeugung in Kraftwerken (Mendt)	(5)
Übung	zu Energieverteilung in elektrischen Netzen (Mendt)	(3)
Praktikum	zu Energieanlagen (Kayser)	(3)
Grundpraktikum für Maschinenbaustudenten im Hauptstudium (ein Versuch im Gemeinschaftslabor mit anderen Instituten)	(Mendt)	(70)

### 1.3 Seminarvorträge

Candil, V.	Freiprojektierbare digitale Automatisierungssysteme zur Drehzahlregelung von elektrischen Antrieben
Kanakis, A.	Kennzeichnende Größen von Windrotoren sowie deren mathematische und experimentelle Ermittlung

- Pfeil, R.                    Einige Verzerrungsmechanismen in der Kette von elektroakustischen Übertragungsgliedern (Audio-Kette)
- Plamper, S.                Einsatz von energieelektronischen Einrichtungen bei Windkraftanlagen
- Richter, A.                Erfahrungen mit dem Simulationswerkzeug MatrixX am Beispiel eines dynamischen Systems mit Nichtlinearitäten
- Tavana-Nejad, P.        Vergleich verschiedener Konzepte zur Erkennung von Überlastfällen in Antriebswellen von Walzgerüsten

#### 1.4 Studien- und Diplomarbeiten

Lfd. Nr.	Datum	Verfasser	Thema	D S
1	03/91	Kulozik, E.	Entwicklung eines graphischen Systems zur Darstellung des Betriebszustandes von Asynchronmaschinen mit Hilfe der Theorie der Raumzeiger	D
2	03/91	Kanakis, A.	Softwareentwicklung zur Simulation eines Windrotors mit Hilfe einer stromrichterergespeisten drehmomentgeregelten Gleichstrommaschine	D
3	04/91	Candil, V.	Konzeptentwicklung einer digitalen Steuerung zur Automatisierung eines Leuchtdichte-Meßstandes	D
4	05/91	Niediek, V.	Entwurf und Aufbau eines Steuergenerators zur Erzeugung von Ansteuersignalen für Halbleiter zur Anwendung in halb- und vollgesteuerten Brückenschaltungen	S
5	06/91	Piśowotzki, F.-P.	Entwicklung, Aufbau und Erprobung eines elektronischen Universalreglers in Operationsverstärker-Technik	S
6	07/91	Shahib, Z.	Vergleich der Eigenschaften von Gleich- und Drehstrom-Lichtbogenöfen zur Stahlerzeugung	S
7	12/91	Plamper, S.	Experimentelle Ermittlung der Kenndaten eines Schenkel-polgenerators	S
8	12/91	Richter, A.	Modellierung und Simulation des Antriebsstranges einer elektrischen Lokomotive	D
9	12/91	Odendall, B.	Entwerfen und Realisieren einer Last-Leistungsregelung für einen Windkonverter mit Gleichstrom-Zwischenkreis-Umrichter	D



## **2 Veröffentlichungen, Dissertationen, Technische Berichte**

### **2.1 Bücher, Zeitschriftenaufsätze**

- Beck        Rationeller Energieeinsatz am Beispiel der "Neuen Berliner S-Bahn" - veröffentlicht im "Mitteilungsblatt der TU Clausthal", Heft 72, Verein von Freunden, Clausthal 1991 (Anlage 2);
- Beck/  
Zenner     Elektronische Einrichtung zur Minimierung der Überlasten in Antriebswellen von Walzgerüsten - veröffentlicht in der Festschrift "25 Jahre Fachbereich Maschinen- und Verfahrenstechnik 1966 - 1991" der TU Clausthal, Oktober 91 (Anlage 3), und in Vorbereitung zur Veröffentlichung in "Stahl und Eisen", Heft 3/92, Verlag des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf;

### **2.2 Vorträge**

- Beck        Elektronische Einrichtung zur Minimierung der Überlasten in Antriebswellen von Walzgerüsten - anlässlich der Festveranstaltung "25 Jahre MVT" an der TU Clausthal im Oktober 1991
- Beck        Elektronische Einrichtung zur Minimierung der Überlasten in Antriebswellen von Walzgerüsten - anlässlich einer Sitzung des Arbeitsausschusses des Vereins zur Förderung der Forschung und der Anwendung von Betriebsfestigkeitskenntnissen in der Eisenhüttenindustrie (VBFeh) in Düsseldorf, Dezember 1991

### **2.3 Dissertationen**

- keine -

## **2.4 Technische Berichte, Vorlesungsmanuskripte**

- Sourkounis      Untersuchung des Betriebsverhaltens einer fremderregten Gleichstrommaschine im Auftrag des Instituts für Energieverfahrenstechnik
- Beck/  
Wehrmann      Überarbeitung der Arbeitsblätter zur Vorlesung "Grundlagen der Elektrotechnik I/II"
- Beck/  
Kayser         Überarbeitung der Grundlagenpraktikumsskripte I/II
- Beck/  
Alders         Überarbeitung des Vorlesungsskriptes "Elektrische Antriebe"
- Beck/  
Krüger         Neubearbeitung der Arbeitsblätter zu "Geregelte Elektrische Antriebe" sowie Erstellung des zugehörigen Skriptes
- Beck/  
Sourkounis     Überarbeitung des Vorlesungsskriptes "Energieelektronik"

## **2.5 Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte**

### Exkursionen

Stahlwerke Peine-Salzgitter AG

Teilnehmer: ca. 30 Studenten der VL "Elektrische Antriebstechnik",  
und "Energieelektronik", Oktober 91

HASTRA-Betriebsdirektion Langelsheim

Teilnehmer: ca. 10 Studenten der VL "Hochspannungstechnik" und  
Mitarbeiter des IEE auf dem Gebiet der Energieerzeugung/-verteilung, Juli 91

### Gastaufenthalte am IEE

Herr Dr.-Ing. habil. Beckert und Herr Dr.-Ing. Neuber vom Institut für Elektrotechnik der Bergakademie Freiberg besuchten in der Zeit vom 4.-7. März die TU Clausthal. Herr Dr. Beckert hielt den Vortrag "Digitale Simulation des dynamischen Verhaltens von Asynchronmotoren am Netz". Bei ihrem Besuch vom 23.-25. Oktober referierte er "Zeitdiskreter Beobachter für Asynchronmotoren".

Herr Dr. Zygmunt, stellvertretender Leiter des Instituts für Elektrotechnik an der Akademia Gorniczo-Hutnicza in Krakau, besuchte in der Zeit vom 3.-11. Oktober mit seinen Vorträgen "Das Regelungssystem einer Fördermaschine mit Direktumrichter und Synchronmotor" und "Digitalsteuerung der Antriebe und technologischer Prozesse in Forschungstätigkeiten unseres Instituts" die TU Clausthal.

## **3 Forschungsarbeiten**

### **3.1 Ausbau der Institutseinrichtungen**

Im Zuge der genehmigten Mittel für einen CAD/CAE-Pool und den Zuschüssen aus Mitteln der VW-Stiftung wird die Institutseinrichtung modernisiert. Hierbei gibt es zwei Schwerpunkte:

1. Installation von modernen Geräten der Energieelektronik (Stromrichter mit Transistoren, abschaltbaren Thyristoren und Mikroprozessorsteuerung) und der Antriebstechnik (Prozeßrechner für schnelle Technologieregelung wie z.B. Zugregelung).

Hierzu wurden in diesem Jahr

- ein 152 kVA/500 V Pulswechselrichter mit Mikroprozessorsteuerung
- ein 84 kVA/500 V Pulswechselrichter mit Mikroprozessorsteuerung
- ein PC-Interface für digitale Echtzeitsteuerungen angeschafft.

2. Digitalrechner zur Simulation von Energiesystemen (Energiesystemsimulator)

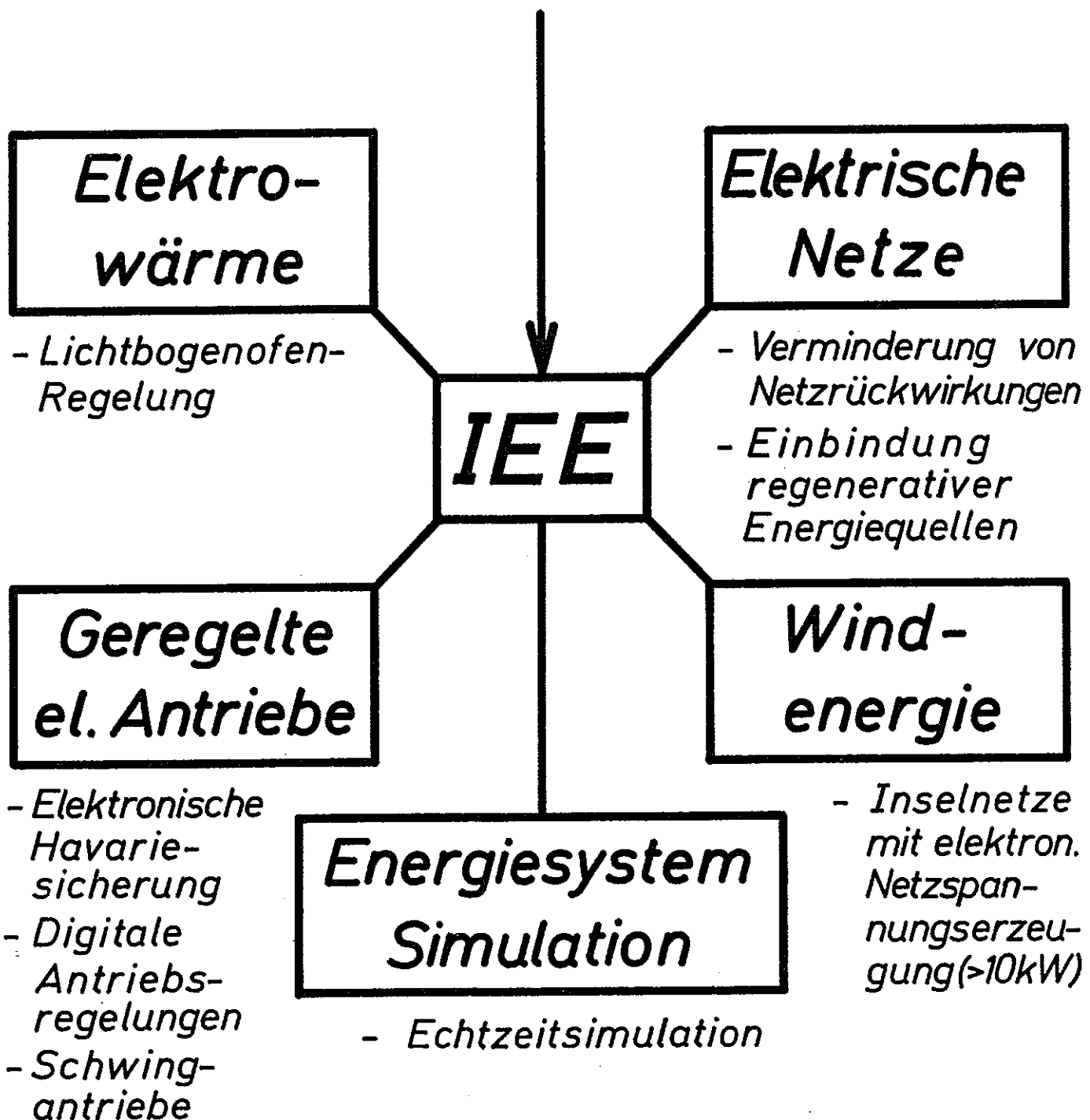
Es wurde ein CAD/CAE-Pool mit vier SUN-SPARC-Workstations für Energie- und Regelungssystems simulation (Software MatrixX) angelegt.

Im Zuge dieser Neuanschaffung wurde ein CAD/CAE-Raum mit drei Arbeitsplätzen für Studenten eingerichtet. Der Rechnerraum des IEE wurde umgebaut, neu möbliert und mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung sowie Datennetzen ausgestattet. Die Rechnerbestückung zeigt Anlage 4.

### **3.2 Projektblätter**

Zur Erläuterung der laufenden Forschungsarbeiten der wissenschaftlichen Mitarbeiter auf den Schwerpunktgebieten dienen die Übersicht und die folgenden Projektkurzbeschreibungen.

# Forschungsschwerpunkte des Institut für Elektrische Energietechnik





**Problem, Ziel:** Entwicklung einer Regelung für Lichtbogenöfen zur Stahlherstellung unter Verwendung des Meßsystems "Clausthal" und der Lichtbogenspannung als Regelgröße

**Stand der Technik:** Impedanzregelung, d.h. Regelung auf den Quotienten von Lichtbogenspannung und Lichtbogenstrom, wobei die Messung der Lichtbogenspannung mit erheblichen Fehlern behaftet ist;

**Lösungsweg:**

1. Verbesserte Meßwerterfassung, insbesondere die genaue Messung der Lichtbogenspannung (Meßsystem Clausthal)
2. Entwicklung eines Regelungskonzeptes mit geregelter Lichtbogenspannung
3. Laboraufbau der neuen Regelung
4. Labornachbildung eines Lichtbogenofens zur Überprüfung der Regelkonzepte und der Regelschaltung
5. Erprobung des Regelkonzeptes

**Ergebnisse:** Prototyp einer neuartigen Regelung für Lichtbogenöfen für die Stahlherstellung mit den Optionen:

1. Handbetrieb
2. automatisierter Betrieb
3. Möglichkeit der Einbindung der Regelung in einen übergeordneten Leitrechner zur Optimierung der Betriebsabläufe

**Vorteile angestrebter Lösungen:**

1. Direkte Einstellung der wesentlichen Betriebsparameter wie Bogenspannung, Bogenstrom und Bogenleistung zur Einsparung elektrischer Energie
2. Verschleißreduzierung bei den Schmelzgefäßen
3. Qualitätssteigerung

**Voraussichtliches Ende:** Februar 1992

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Obenauf (Tel.: 72-2299)

Datum: 1.12.1991

---

**Projekt: Entwicklung einer optimierten Regelung  
für Lichtbogenöfen**

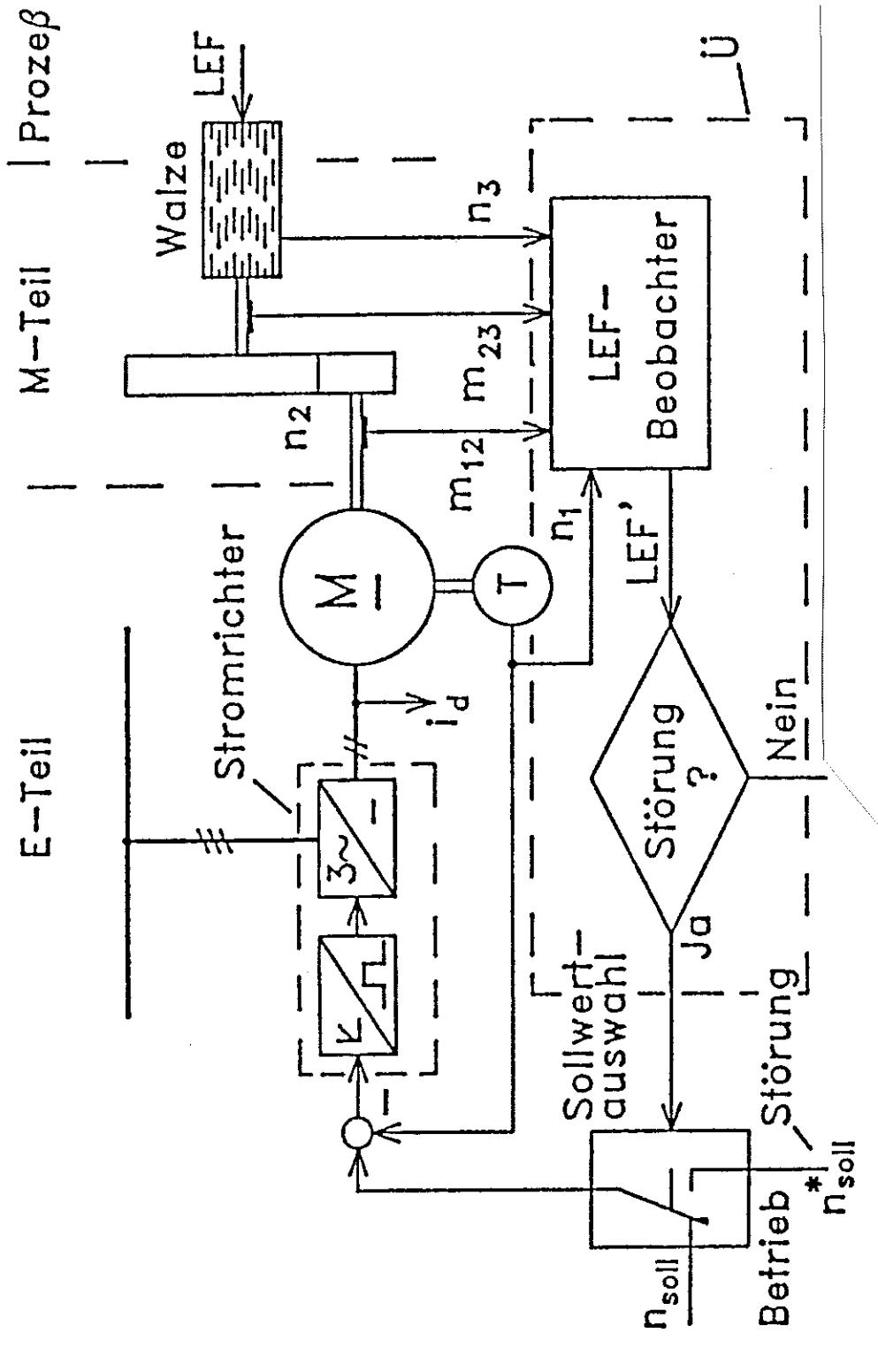


- Problem:** In Walzwerken führen Walzblockierungen in der Regel zu Betriebsstörungen bzw. zu Schäden an der Antriebsanlage.
- Ziel:** Die Reduzierung bzw. Vermeidung der Überlasten in den Antriebssträngen durch eine Elektronische Havariesicherung.
- Stand der Technik:** Betriebsstörungen der genannten Art können zu einem vorzeitigen Ausfall der Walzanlage führen. Wartung und Reparatur von Sicherheitskupplungen führen zu Produktionsausfällen. Ein Leichtbau des Antriebsstranges ist zur Zeit noch nicht möglich.
- Lösungsweg:**
1. Entwicklung eines Steuerungs-/Regelungskonzeptes für Gleichstromantriebe
  2. Simulation des Konzeptes
  3. Erstellen eines Prüfstandes
  4. Erprobung des entwickelten Konzeptes am Prüfstand
- Ergebnisse:**
1. Erprobtes Konzept zur Lasteingangsfunktionsberechnung
  2. Folgeantragstellung des IfH/IEE bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft
  3. Simulationsergebnisse (s.u.), Prüfstand konzipiert und teilweise erstellt
- Voraussichtliches Ende:** 1994
- Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Kayser (Tel.: 72-2572)  
Dipl.-Ing. Harste, IfH

Datum: 13.12.1991

---

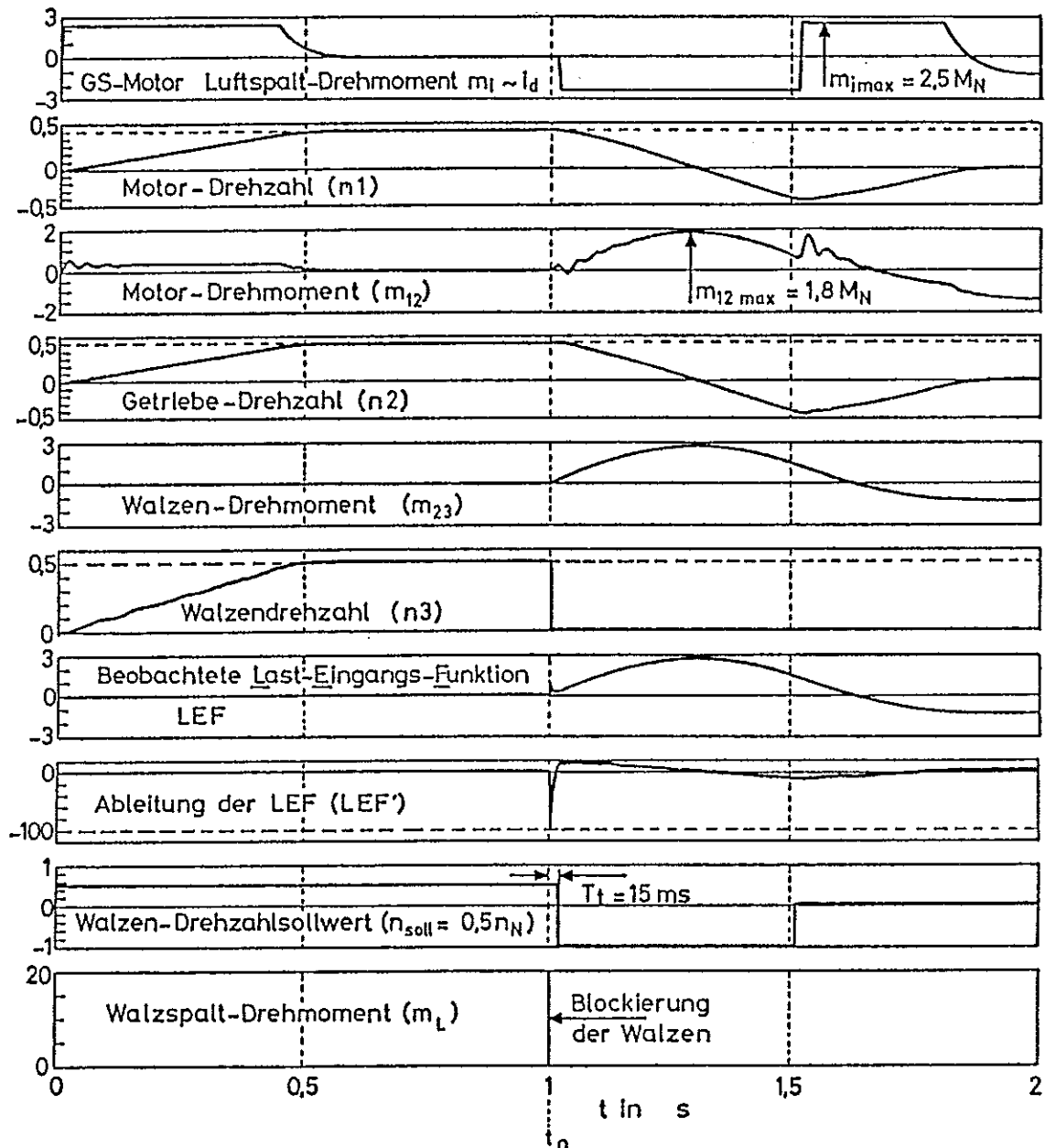
**Projekt: Elektronische Überlastsicherung für  
Walzwerksantriebe**



LEF: Last-Eingangs-Funktion

Prinzipbild eines stromrichter-gespeisten Gleichstrom-antriebes mit angekuppeltem 3-Massen-Schwinger mit Überlast-Überwachungseinrichtung (Ü)





Alle Drehmomente und Drehzahlen sind auf die Nennwerte  $M_N$  und  $n_N$  bezogen.

(Umschalten  $n_{soll} \rightarrow n_{soll}^* = -n_{soll}$ ) nach  $T_t = 15\text{ms}$   
 ( $i_{d\text{max}} = 2,5 I_{dN}$ ,  $T_U = 10\text{ms}$ )

Simulation des dynamischen Verhaltens bei Walzenblockierung mit Einleitung der Gegenmaßnahme



**Problem, Ziel:** Minimierung von Lastkollektiven bei Bahnantrieben durch digitale Wellenmomentbeobachtung und -regelung

**Stand der Technik:** Durch betriebsmäßige (zeitveränderlicher Rad-Schiene-Kontakt) oder außerordentliche Ereignisse ("Durchzündungen" von Wechselrichtern) werden Torsionsschwingungen im mechanischen Antriebsstrang verursacht, die die Lebensdauer der Bauteile herabsetzen.

**Lösungsweg:**

1. Entwicklung und Simulation eines integralen Regelkonzeptes für das Gesamtantriebssystem
2. Aufbau des Fahrmotorteiles des Bahnprüfstandes
3. Umsetzung des integralen Regelkonzeptes in Software für die Fahrmotorsteuerung
4. Überprüfung der Ergebnisse des Regelkonzeptes am Prüfstand und Einführung von Verbesserungen

**Ergebnisse:**

1. Theoretische Untersuchung des elektromechanischen Antriebssystems einer elektrischen Drehstrom-Hochleistungslokomotive
2. Erstellung eines DFG-Verbundantrages gemeinsam mit dem Institut für Hüttenmaschinen und Maschinelle Anlagentechnik der TU Clausthal sowie dem Institut für Elektrotechnik der Bergakademie Freiberg

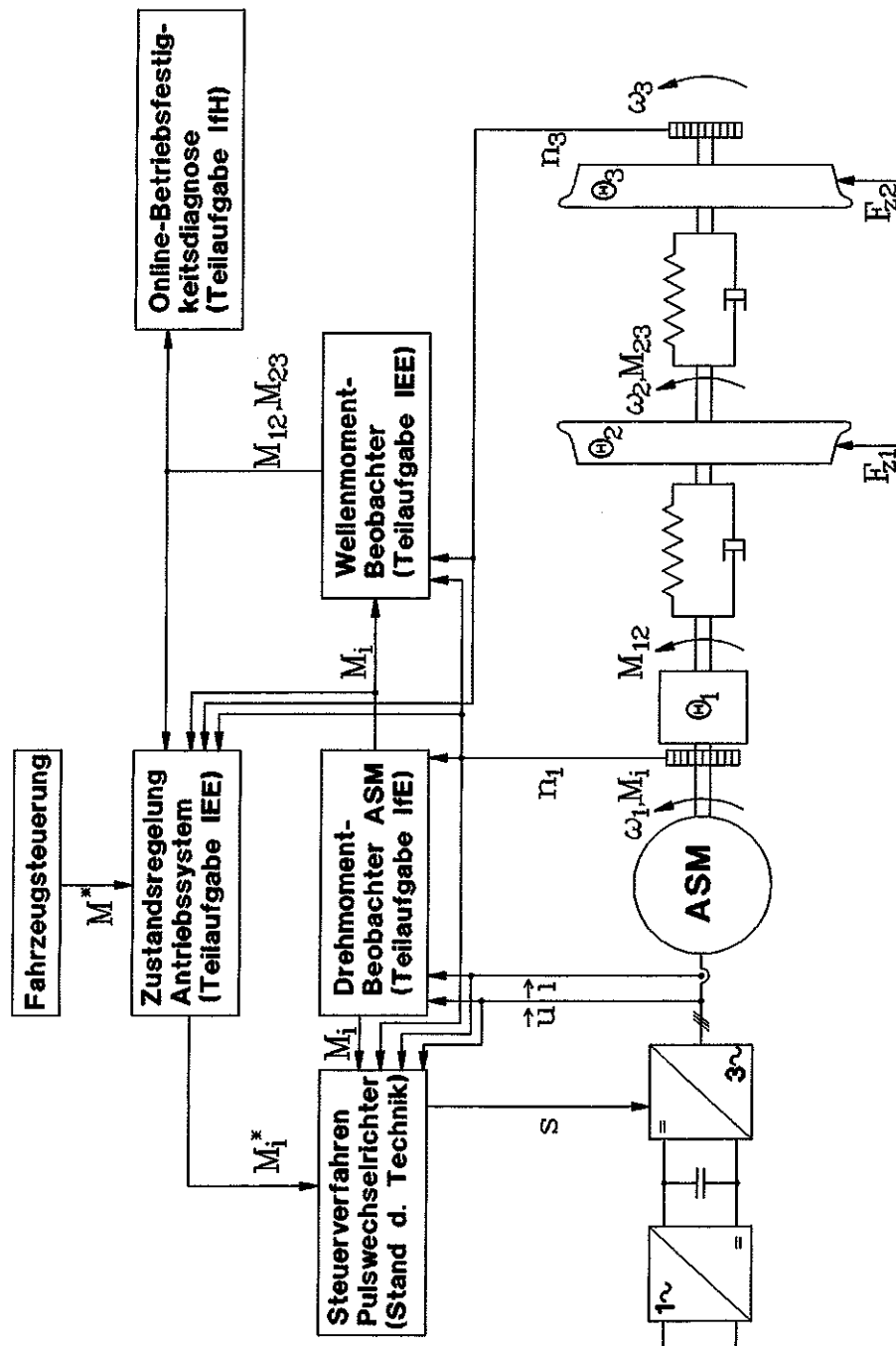
**Voraussichtliches Ende:** 1994

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Engel (Tel.: 72-2592)

Datum: 1.12.1991

---

**Projekt: Lastkollektivminimierte Bahnantriebe**



© En, 10/91

Struktur eines integralen Regelkonzeptes für „Lastkollektivminimierte Bahnantriebe“



**Problem, Ziel:** Nachbildung der mechanischen Komponenten und betrieblichen Belastungen des Antriebsstranges eines Hochgeschwindigkeitsbahnantriebes durch einen Prüfstand. Dieser soll als Grundlage für Untersuchungen zur Minimierung von Lastkollektiven bei Bahnantrieben dienen (Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Engel).

**Stand der Technik:**

1. Meßfahrten mit realen Lokomotiven
2. Simulation auf dem Digitalrechner
3. Stark vereinfachte Prüfstandsmodelle
4. Rollenprüfstand für laufdynamische Untersuchungen

**Lösungsweg:**

1. Modellierung und Simulation des Antriebsstranges auf dem Digitalrechner
2. Ähnliche Nachbildung der mechanischen Komponenten des Antriebsstranges durch einen Prüfstand
3. Nachbildung und Untersuchung des Rad-Schiene-Kraftschlußes

**Ergebnisse:**

1. Simulationsergebnisse der Gesamtantriebsstruktur
2. Ermittlung von Prüfstandsparametern zur Nachbildung des dynamischen Verhaltens des Antriebsstranges

**Vorteile angestrebter Lösungen:**

1. Untersuchungen, Erprobung und Optimierung von Bahnantriebssteuerungen sind weniger aufwendig und flexibler als bei Meßfahrten.
2. Größere Realitätsnähe gegenüber der Simulation am Digitalrechner
3. Entwicklung neuer Regelkonzepte

**Voraussichtliches Ende:** 1994

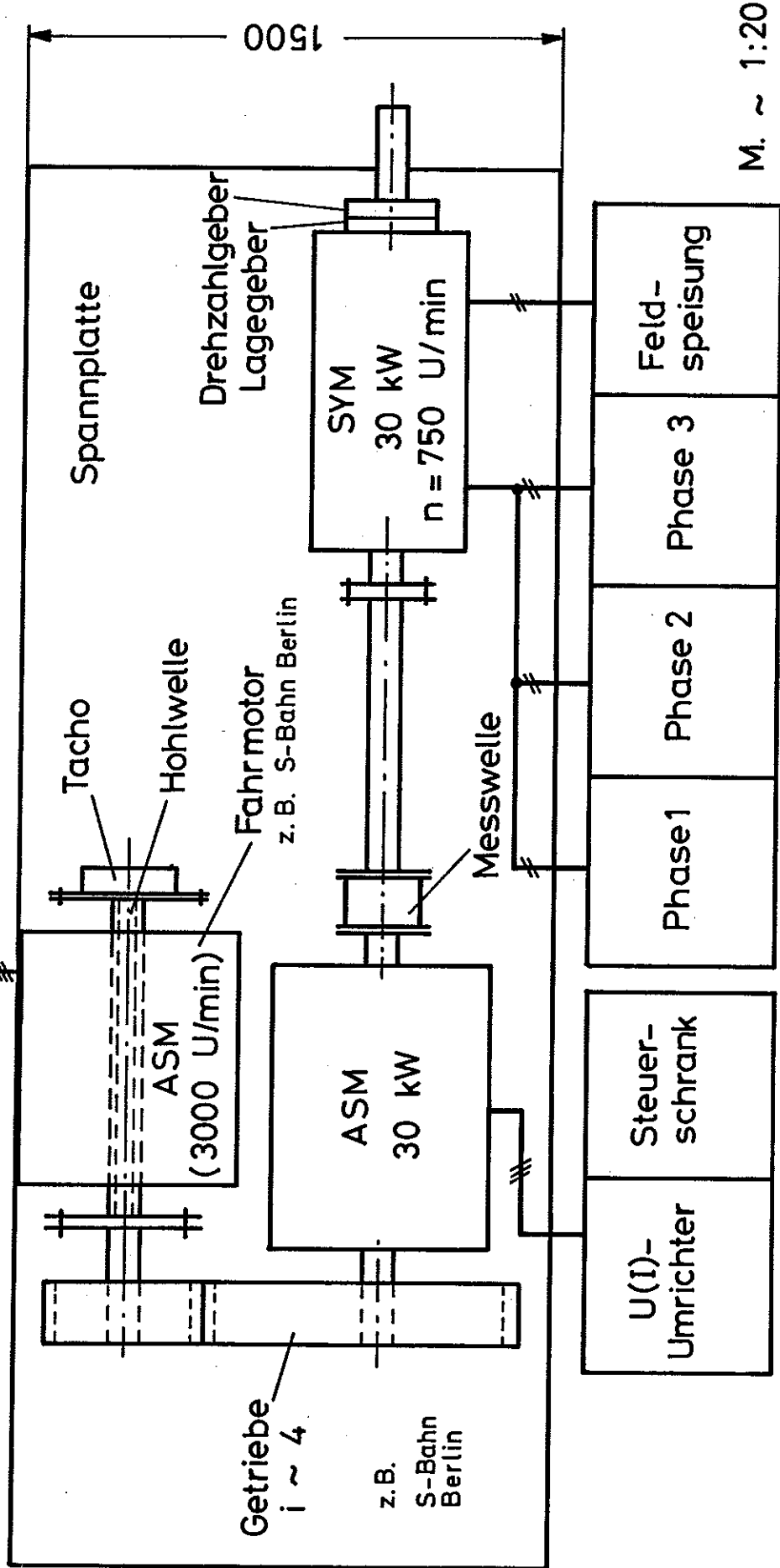
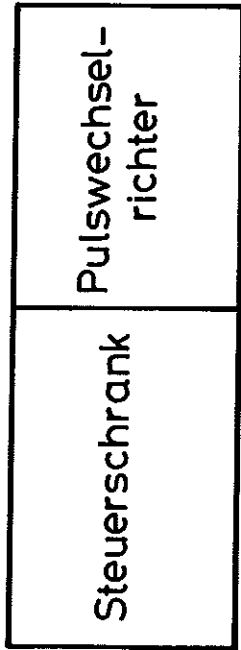
**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Alders (Tel.: 72-3821)

Datum: 1.12.1991

---

**Projekt: Lastkollektivminimierte Bahnantriebe,  
Bahnprüfstand**

Modell: Lok-Stromrichter



# Bahnprüfstand für Einzelachsantriebe



**Problem, Ziel:** Umsetzung bewährter analoger Regelkonzepte der elektrischen Antriebstechnik in geeignete digitale Regelkonzepte

**Stand der Technik:** In der industriellen Antriebstechnik werden zur Zeit ausschließlich quasikontinuierliche digitale Regelkonzepte eingesetzt, d.h. Nachbildung der Analogtechnik mittels Digitaltechnik.

**Lösungsweg:**

1. Analyse bewährter analoger und verfügbarer digitaler Regelkonzepte der elektrischen Antriebstechnik
2. Aufstellung einer Kriterienliste zur Auswahl geeigneter digitaler Regelkonzepte
3. Variantenerprobung am Prozeßrechner mit Mikroprozessoren und Transputern
4. Lösung konkreter Probleme

**Ergebnisse:** Realisierung und Erprobung eines Abtastreglers (Kompensationsregler 3. Ordnung) mit einem freiprogrammierbaren Echtzeitrechner (Industriestandard) unter Verwendung von anwendungsnahen Software-Modulen ("Blockware", vgl. Anlage)

**Vorteile angestrebter Lösungen:** Beibehaltung der bewährten Eigenschaften analoger Regelkonzepte trotz digitaler Realisierung unter Ausnutzung aller Möglichkeiten der Digitaltechnik (hier gezielte Einstellbarkeit des Einschwingverhaltens des Regelkreises)

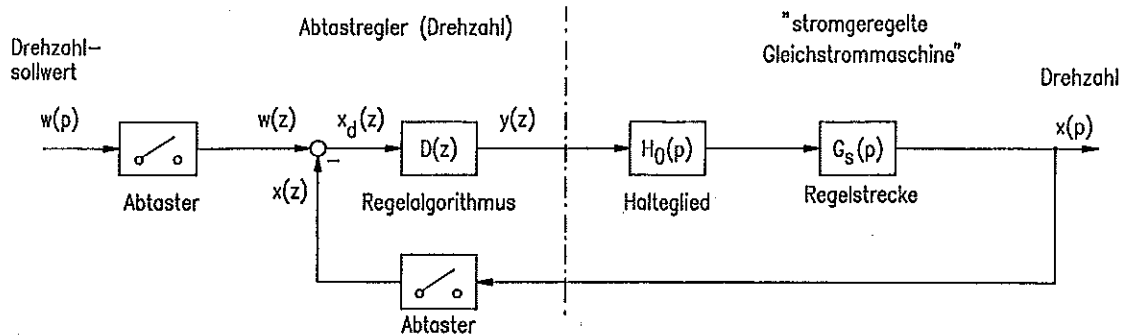
**Voraussichtliches Ende:** 1994

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Krüger (Tel.: 72-2593)

Datum: 1.12.1991

---

**Projekt: Regelkonzepte für die elektrische Antriebstechnik**



Beschreibung des Reglers  $D(z)$  im  $z$ -Bereich

Beschreibung der realen Regelstrecke  $G_S(p)$

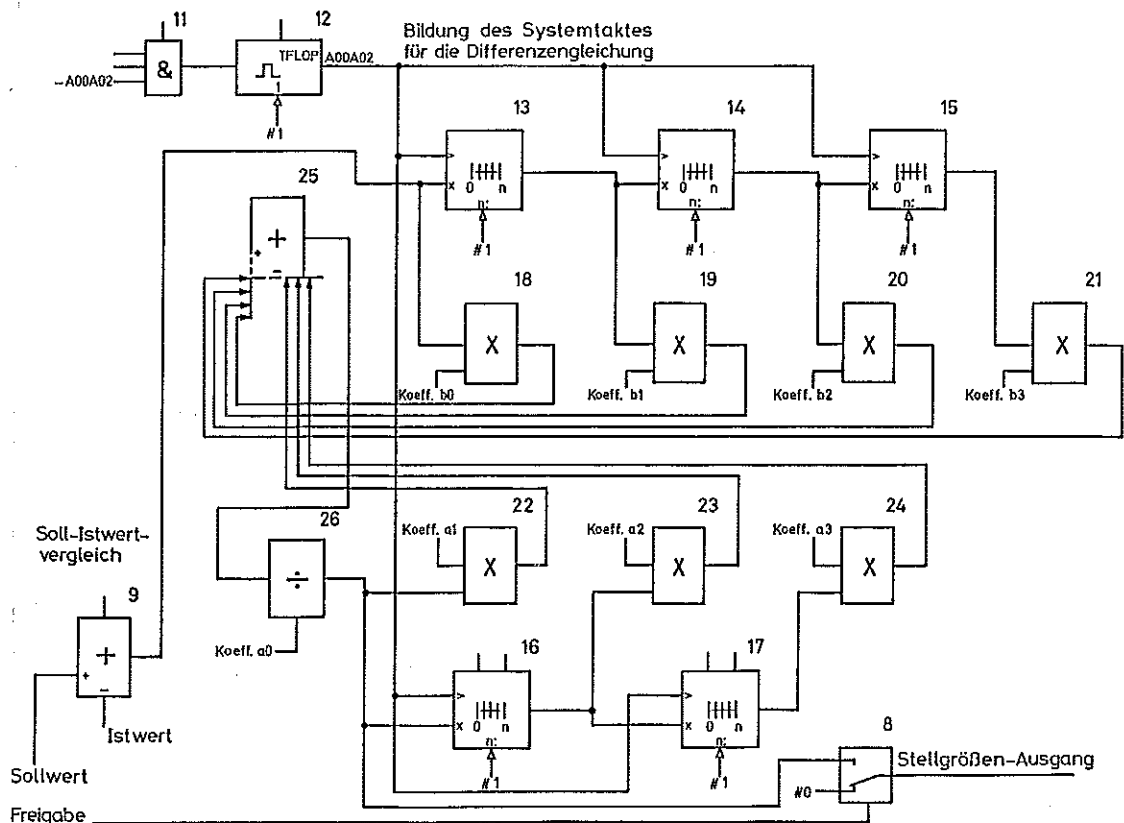
1. Zeitdiskrete Reglerübertragungsfunktion

$$D(z) = \frac{y(z)}{x_d(z)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2} + b_3 \cdot z^{-3}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + a_3 \cdot z^{-3}}$$

2. Differenzgleichung des Abtastreglers:

$$y_k = \frac{b_0 \cdot x_{d,k} + b_1 \cdot x_{d,k-1} + b_2 \cdot x_{d,k-2} + b_3 \cdot x_{d,k-3} - a_1 \cdot y_{k-1} - a_2 \cdot y_{k-2} - a_3 \cdot y_{k-3}}{a_0}$$

3. Realisierung mit einer Standard-Echtzeitrechner-Software (Abtastzeit  $T_A = 5\text{ms}$ )



## Drehzahlregelung mit vorgebbarem dynamischen Verhalten.



---

**Problem, Ziel:** Autonomes durch Windenergiekonverter gespeistes Inselnetz ohne ständig mitlaufendem Dieselgenerator.

**Stand der Technik:** Synchrongenerator läuft ständig mit. Er sorgt für Blindleistungskompensation sowie für Spannungs bzw. Frequenzstabilität.

**Lösungsweg:** Synchrongenerator (elektromechanischer-Phasenschieber) durch selbstgeführten Stromrichter ersetzen.

**Vorteile:**

- \* bessere Netzdynamik (Spannungs und Frequenzstabilität)
- \* weniger mechanische Komponenten (geringerer Verschleiß)
- \* geringer Wartungsbedarf
- \* geringere Geräuschemissionen

**Ende des Projektes:** voraussichtlich gegen Ende 1993

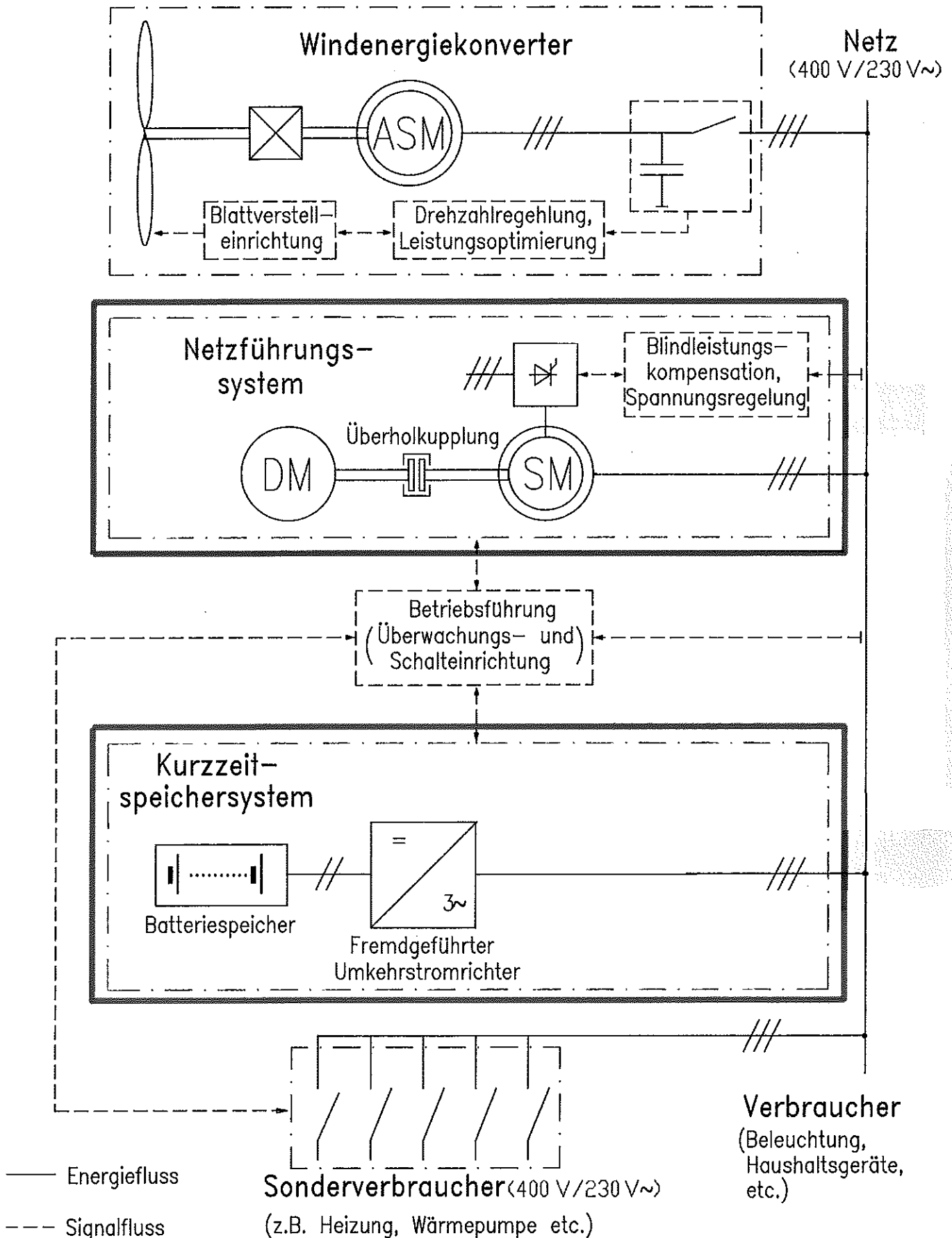
**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. C. Sourkounis (Tel.:72-2594)  
Dipl.-Ing. A. Kanakis (Tel.:72-3736)

Datum: 17.12.91

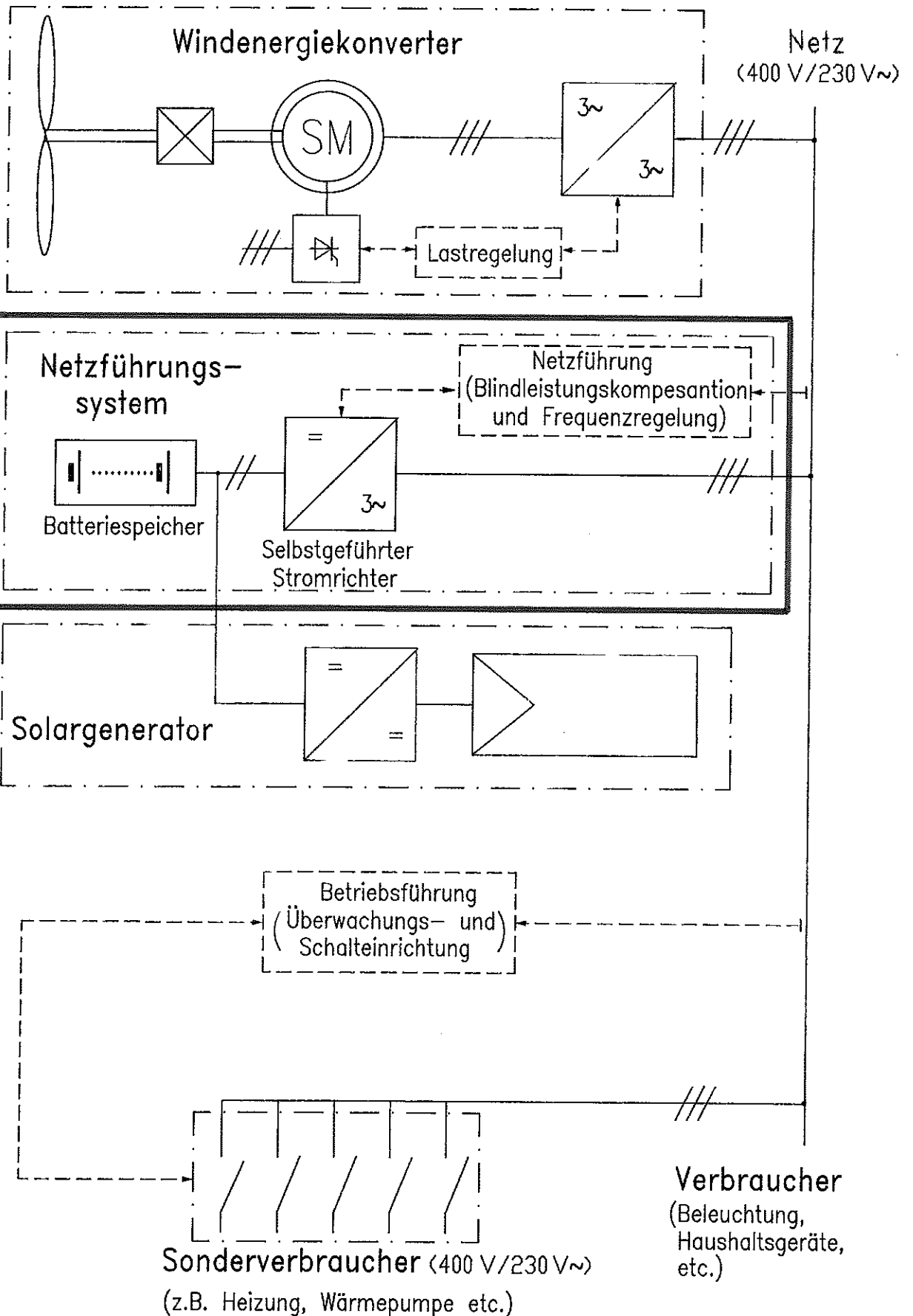
---

**Projekt: Kombinierte Inselnetzversorgung mit Wind- und Sonnenenergie**

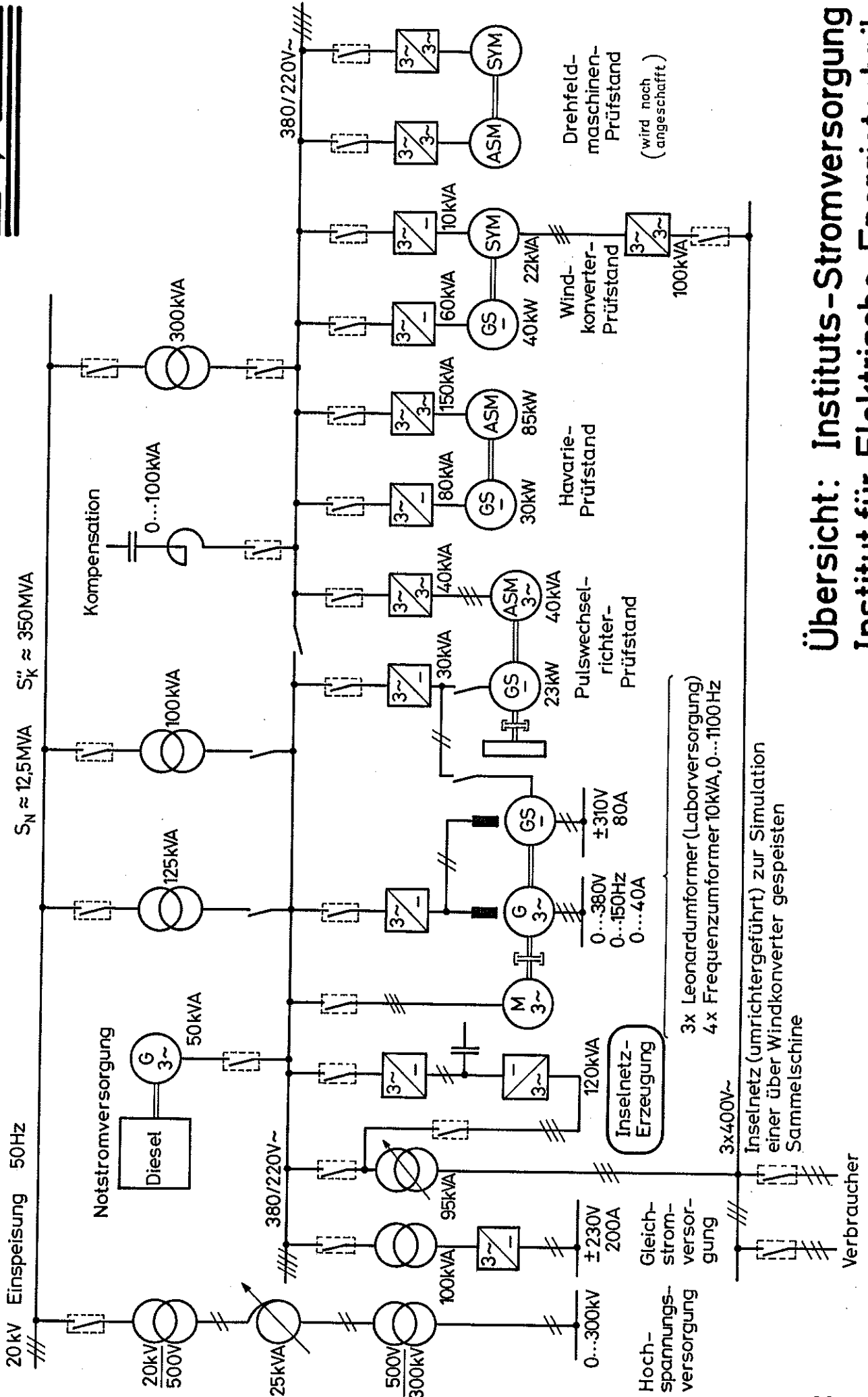




## Inselnetzversorgung mit Windenergie Stand der Technik



## Inselnetzversorgung mit Windenergie Neues Lösungskonzept



3x Leonardumformer (Laborversorgung)  
4x Frequenzumformer 10kVA, 0...1100Hz

Inselnetz (umrichtergeführt) zur Simulation einer über Windkonverter gespeisten Sammelmaschine

# Übersicht: Instituts-Stromversorgung Institut für Elektrische Energietechnik

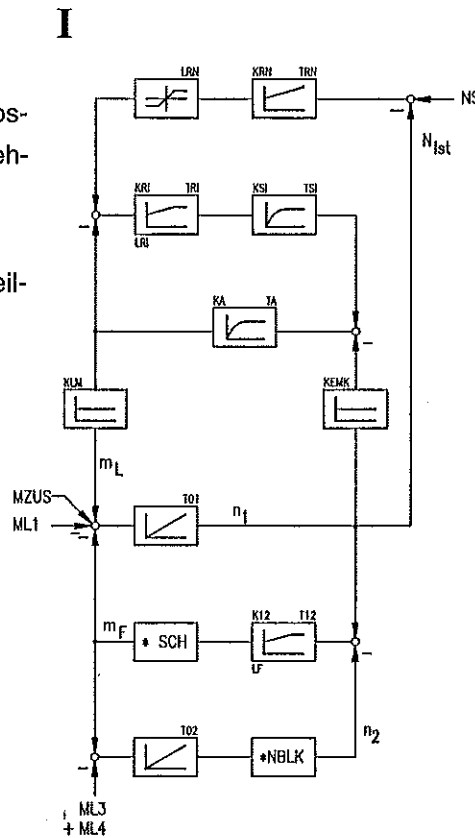
- 
- Problem:** Untersuchung der Möglichkeiten zur Echtzeitsimulation verschiedener Antriebssysteme mit unterschiedlichen Regelverfahren und unterschiedlichen Prozeßstrukturen
- Stand der Technik:**
- ◆ Zur Zeit werden Simulationen hauptsächlich in Teilgebieten eingesetzt, z. B. zur Optimierung von Regelkreisen oder zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Feder-Masse-Systemen
  - ◆ "Prozeßbegleitende" Echtzeitsimulation wird selten bei komplexen Systemen eingesetzt, i. A. wegen zu geringer Rechengeschwindigkeiten
- Arbeitsschritte:**
- ◆ Vergleich der Leistungsfähigkeit vorhandener mächtiger, anwendungsorientierter Simulationssysteme (NETASIM, MATRIX/X, SCALEF, MATLAB/SIMULAB), insbesondere der Rechengeschwindigkeit
  - ◆ Erarbeiten eines ausbaufähigen Konzeptes für die Soft/Hardware-Investitionen zur Echtzeit-Simulation
  - ◆ Realisierung des Soft/Hardware-Konzeptes zur Echtzeit-Simulation
  - ◆ Untersuchung verschiedener Antriebssysteme in "Echtzeit"
  - ◆ Entwicklung von Entscheidungskriterien zur Auswahl von Antriebssystemen mit prozeßbegleitender Echtzeitsimulation anhand von Simulationsergebnissen
- Ziel:** Einsatz von Echtzeitsimulation im Online-Betrieb zur Prozeßüberwachung und Prozeßsteuerung durch Erarbeitung von Belastungs- bzw. Lebensdauerprognosen aufgrund von Ereignissen im Prozeß
- bisherige Ergebnisse:** Für den Vergleich der Simulationssysteme wurden zwei Testsysteme ausgewählt. Es wurden bisher verschiedene Simulationsläufe mit SCALEF und NETASIM durchgeführt. Dabei ergaben sich in Abhängigkeit von der Komplexität der durchgeführten Simulation durch Hard- und Softwareeinflüsse zum Teil erhebliche Zeitdifferenzen.
- Voraussichtliches Ende:** April 1994
- Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Wolfram Mendt (Tel. 72-2938)

Datum: 04.12.1991

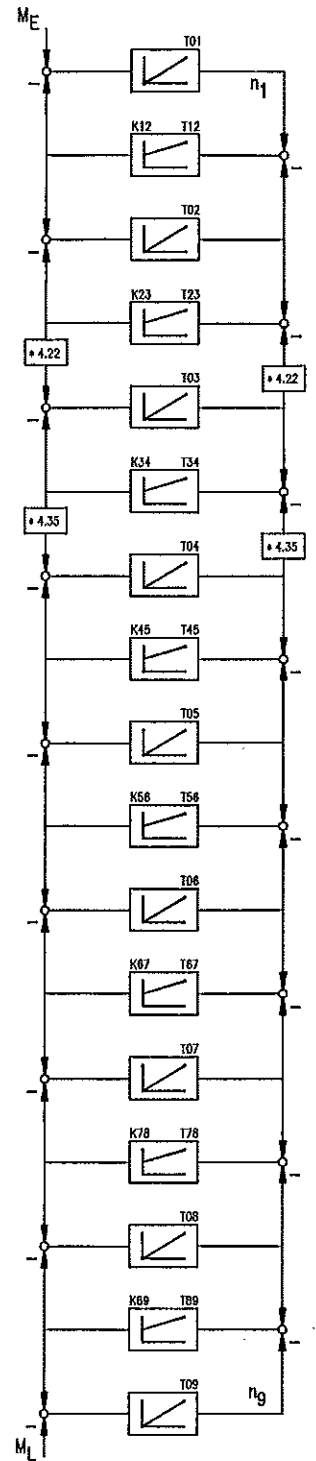
ausgewählte Testsysteme:

**I** Modell eines Gleichstromantriebs-Prüfstandes mit Strom- und Drehzahlregelung

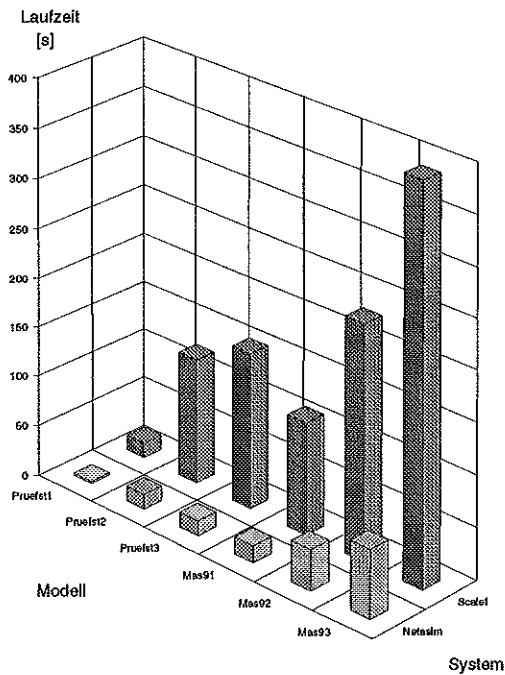
**II** Modell des mechanischen Teilsystems eines Walzantriebs



**II**



Pruest1-3 und Mas91-3 sind Simulationsläufe der Modelle I und II mit unterschiedlich komplexen Drehzahl- und Drehmomentvorgaben



Vergleich der Rechenzeiten zwischen SCALEF/NETASIM

**4 Personelle Besetzung**

(Stand 1.12.91)

**4.1 Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts**

Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

Oberingenieur: Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann

Akademischer Rat a. Z.: Dipl.-Ing. W. Mendt

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Frau Dr.-Ing. G. Klepp  
Dr.-Ing. B. Jain  
Dipl.-Ing. J. Alders  
Dipl.-Ing. B. Engel  
Dipl.-Ing. A. Kanakis  
Dipl.-Ing. H. Kayser  
Dipl.-Ing. M. Krüger  
Dipl.-Ing. H.-D. Obenauf  
Dipl.-Ing. K. Sourkounis

Gastwissenschaftler: - keine -

Mitarbeiter im Technischen  
und Verwaltungsdienst: Frau E. Mendt  
Herr D. Bartz  
Herr W. Hansmann  
Herr V. Just  
Herr H. Kirchner  
Herr H. Knocke  
Herr H. Schultze  
Herr I. Vahldiek

#### **4.2 Nebenamtlich tätige Hochschullehrer**

Prof. Dr. rer. nat. W. Mückenheim  
Dr.-Ing. W.-R. Canders  
Dr.-Ing. W. Diemar  
Dr.-Ing. D.-J. Wahl  
Dipl.-Ing. G. Helmholtz

#### **4.3 Tutoren und wissenschaftliche Hilfskräfte**

Frau cand.-ing. R. Riebenstahl  
cand.-ing. A. Barthold  
cand.-ing. G. Diorinos  
cand.-ing. B. Engelhardt  
cand.-ing. K. Frank  
cand.-ing. A. Franzen  
cand.-ing. T. Freder  
cand.-ing. F. Hoffmann  
cand.-ing. S. Makrides  
cand.-ing. R. Pfeil  
cand.-math. D. Pinkernell  
cand.-ing. F.-P. Pißowotzki  
cand.-ing. S. Plamper  
cand.-ing. M. Stutz

#### **4.4 Von der Lehrverpflichtung befreite Hochschullehrer**

Prof. Dr.-Ing. (em.) K. Bretthauer

#### **4.5 Mitglieder in den Selbstverwaltungsgremien der Universität**

Geschäftsführender Direktor und  
Leiter des Praktikantenamtes

Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

Mitarbeiter des Praktikantenamtes

Dr.-Ing. B. Jain

Mitglied im Instituts- und Personalrat sowie Gefahrstoffbeauftragter

Herr W. Hansmann

Sicherheitsbeauftragter

Herr H. Knocke



# Anlagen

Maschinenbau-Grundstudium

1. Sem. 2. Sem. 3. Sem. 4. Sem.

1	Ing. Math I 4V+2Ü	Ing. Math II 4V+2Ü	Ing. Math. III 2V+2Ü	Strömungsmech. I 2V+1Ü
2				Wärmeübertrag. I 2V+1Ü
3				
4				
5				
6				
7	Datenverarbeitung für Ingenieure I 2V + 1Ü	Physik II 4V + 1Ü	Tech. Mech. III 3V+2Ü	Konstruktionsel. III 2V+4Ü
8				
9				
10	Einf. Programm. 2Ü		Thermodynamik I 2V+1Ü	
11				
12				
13	Techn. Mechanik I 2V+1Ü	Techn. Mech. II 3V+2Ü		E-Technik II 2V+1Ü
14				Praktika II 2P
15	Techn. Zeichn./CAD 3Ü	Datenverarbeitung für Ingenieure II 2V + 1Ü	Konstruktionsel. II 4V+2Ü	Grundlagen der Meßtechnik 2V + 1Ü
16				
17				
18	Bauteilprüf. 2V+1P		Einf. Chemie 2V	
19				
20				
21	Physik I 2V	Konstruktionsel. I 2V + 1Ü	E-Technik I 2V + 1Ü	
22		Werkstoffkunde II 2V	Praktika I 2P	
23	Werkstoffkunde I 2V			
24				
25	Fertigungstechnik 2V			
26				

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CLAUSTHAL

Fachbereich Maschinen- und Verfahrenstechnik

Der Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Zenner

3892 Clausthal-Zellerfeld, 19.09.1991  
Telefon: Zentrale 05323 / 720  
Fachbereich 05323 / 722667

Zn/De

Neue DPO's im Fachbereich Maschinen- und Verfahrenstechnik

An die Studenten der Studiengänge Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen

Im WS 91/92 werden neue Diplomprüfungsordnungen (DPO's) für die o.g. Studiengänge eingeführt. Da die Genehmigung durch das Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK), Hannover, eist im Verlauf des Wintersemesters zu erwarten ist, liegt noch kein neuer Studienführer für die Studiengänge vor. Diese Mitteilung soll den Studenten, in erster Linie den Erstsemestern, die notwendigen Hinweise liefern.

Die Erstsemester haben Ihr Studium nach der neuen DPO aufzunehmen. Falls Änderungen durch das MWK vorgenommen werden, erfolgt eine rechtzeitige Information.

Für höhere Semester gilt die bisherige DPO.

Die neuen DPO's enthalten grundlegende Änderungen für das Grund- und Hauptstudium. Zur Planung Ihres Studiums sind folgende Modelstudienpläne beigelegt:

Auszug: **IEE-Anteile im Studienplan**



6.

Modellstudienplan für die Studienrichtung:  
Elektrotechnik im Maschinenbau

Std.	5. Semester WS	6. Semester SS	7. Semester WS	8. Semester SS	9. Semester WS	10. Semester SS
1	(Ingenieur-)mathematik IV *	Regelungstechnik I (2V,1Ü)	Kraft- und Antriebsmaschinen I (2V,1Ü)	Elektrotechnische Meßtechnik (2V,1Ü)		
2	(2V,1Ü)	Regelungstechnik I (2V,1Ü)	Regelungstechnik II (2V,1Ü)	Identifizierung u. Optimierung tech. Prozesse (2V,1Ü)	Schwerpunkt II (5V/Ü)	
3	Schwingungslehre u. Maschinendynamik I (2V,1Ü)	Elektrische Energietechnik (2V,1Ü)	Regelungstechnik II (2V,1Ü)		Seminar (2S)	
4			Energieelektronik (2V,1Ü)	Fachpraktikum (4P)		
5	Betriebsfestigkeit I (2V,1Ü)	Signalübertragung (3V)	Regelung elektrischer Antriebe (2V,1Ü)	Schwerpunkt II (4V/Ü)		
6	Produktionstechnik (2V,1Ü)	Nichttechnische Fächer (2V/Ü)	Grundpraktikum (4P)			
7	Technische Elektronik I (2V,1Ü)	Schwerpunkt I (5V/Ü)	Fachpraktikum (2P)			
8	Digitaltechnik u. Maschinensteuerungen (2V,1Ü)					
9	Betriebswirtschaftslehre (2V,1Ü)					
10	Nichttechnische Fächer (2V/Ü)					
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						

\* wahlweise im 5. oder 6. Semester

... Für Studenten der Elektrischen Energietechnik

8.

Modellstudienplan für die Studienrichtung:  
Energietechnik/Energiesysteme

Std.	5. Semester WS	6. Semester SS	7. Semester WS	8. Semester SS	9. Semester WS	10. Semester SS
1	(Ingenieur-)mathematik IV *	Elektrische Energietechnik (2V,1Ü)	Schwerpunkt I (6V/Ü)	Nichttechnische Fächer (2V/Ü)	Seminar (2S)	
2	(2V,1Ü)	Technische Thermodynamik II (2V,1Ü)		Fachpraktikum (6P)		
3	Schwingungslehre u. Maschinendynamik I (2V,1Ü)	Regelungstechnik I (2V,1Ü)	Schwerpunkt II (4V/Ü)			
4	Kraft- u. Antriebsmaschinen I (2V,1Ü)	Feste Brennstoffe (2V,1Ü)				
5	Produktionstechnik (2V,1Ü)	Elektrische Energiezeugung (2V,1Ü)				
6	Technische Elektronik I (2V,1Ü)	Energieelektronik (2V,1Ü)				
7	Digitaltechnik u. Maschinensteuerungen (2V,1Ü)	Umwandlung von Energierohstoffen (2V,1Ü)				
8	Betriebswirtschaftslehre (2V,1Ü)	Schwerpunkt I (3V/Ü)				
9	Nichttechnische Fächer (2V/Ü)					
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						

\* wahlweise im 5. oder 6. Semester



### Verfahrenstechnik-Grundstudium

Std.	1. Sem. (WS)	2. Sem. (SS)	3. Sem. (WS)	4. Sem. (SS)
1	Ingenieur-Mathe. I 4 V + 2 Ü	Ingenieur-Mathe. II 4 V + 2 Ü	Ingenieur-Mathe. III 2 V + 2 Ü	Strömungsmechanik I 2 V + 1 Ü
2				
3				
4				
5				
6	Experimentalphysik I 2 V	Tech. Mechanik III 3 V + 2 Ü	Tech. Mechanik III 3 V + 2 Ü	Wärmeübertragung I 2 V + 1 Ü
7				
8				
9				
10				
11	Techn. Mechanik I 2 V + 1 Ü	Experimentalphysik II 4 V + 1 Ü	Thermodynamik I 2 V + 1 Ü	Maschinenelemente II 2 V + 1 Ü
12				
13				
14				
15				
16	Einf. i. Programmieren 2 Ü	Techn. Mechanik II 3 V + 2 Ü	Maschinenelemente I 2 V + 1 Ü	Entwurf mit apparate- technisch. Bezug 2 Ü
17				
18				
19				
20				
21	Datenverarbeitung für Ingenieure II 2 V + 1 Ü	Einführung Physikalische Chemie 3 V	Organische Chemie 3 V	Einführung Angewandte Chemie für Verfahrenstechniker 2 V + 1 Ü
22				
23				
24				
25				
	Einführung Allgem. und Anorgan. Chemie 2 V	Techn. Zeichnen/ CAD 3 Ü	Grundlagen der Elektrotechnik I 2 V + 1 Ü	Grundlagen der Elektrotechnik II 2 V + 1 Ü
18				
19				
20				
21				
22	Bauteilprüfung 2 V + 1 P	E-Tech.-Prakt. I 1 P	E-Tech.-Prakt. II 1 P	E-Tech.-Prakt. III 1 P
23				
24				
25				
	Werkstoffkunde II 2 V	Werkstoffkunde II 2 V	E-Tech.-Prakt. I 1 P	E-Tech.-Prakt. II 1 P
23				
24				
25				
	Werkst.-Praktikum 1 P	Werkst.-Praktikum 1 P	E-Tech.-Praktikum 1 P	E-Tech.-Praktikum 1 P
23				
24				
25				
	Σ = 23	Σ = 25	Σ = 22	Σ = 21
23				
24				
25				
	Σ = 91	Σ = 91	Σ = 91	Σ = 91
23				
24				
25				

### Modellstudienplan für die Studienrichtung: Informatik im Maschinenbau

Std.	5. Semester WS	6. Semester SS	7. Semester WS	8. Semester SS	9. Semester WS	10. Semester SS
1	(Ingenieur-)mathematik IV * (2V,1Ü)	Elektrische Energietechnik (2V,1Ü)	Schwerpunkt I (6V/Ü)	Nichttechnische Fächer (2V/Ü)	Seminar (2S)	10. Semester SS
2						
3	Schwingungslehre u. Maschinendynamik I (2V,1Ü)	Regelungstechnik I (2V,1Ü)	Regelungstechnik II ** (2V,1Ü)	Fachpraktikum (6P)	Schwerpunkt II (6V/Ü)	9. Semester WS
4						
5	Kraft- u. Arbeitsmaschinen I (2V,1Ü)	Softwareentwicklung für technische Systeme II (2V,1Ü)	Regelungstechnik II ** (2V,1Ü)	Schwerpunkt I (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS
6						
7	Produktionstechnik (2V,1Ü)	Identifizierung und Optimierung technischer Prozesse (2V,1Ü)	Nichttechnische Fächer (2V/Ü)	Schwerpunkt II (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS
8						
9	Betriebsfestigkeit I (2V,1Ü)	Mensch-Maschinenschnittstellen (2V)	Technische Elektronik I (2V,1Ü)	Schwerpunkt I (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS
10						
11	Betriebswirtschaftslehre (2V+1Ü)	Informatik für Ingenieure (3V,1Ü)	Grundpraktikum (4P)	Schwerpunkt II (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS
12						
13	Softwareentwicklung für technische Systeme I (2V,1Ü)	Digitaltechnik u. Maschinensteuerungen (2V,1Ü)	1. Studienarbeit	Schwerpunkt I (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS
14						
15	Digitaltechnik u. Maschinensteuerungen (2V,1Ü)	1. Studienarbeit	Schwerpunkt II (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS	10. Semester SS
16						
17	1. Studienarbeit	Schwerpunkt I (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS	10. Semester SS	10. Semester SS
18						
19	1. Studienarbeit	Schwerpunkt II (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS	10. Semester SS	10. Semester SS
20						
21	1. Studienarbeit	Schwerpunkt I (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS	10. Semester SS	10. Semester SS
22						
23	1. Studienarbeit	Schwerpunkt II (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS	10. Semester SS	10. Semester SS
24						
25	1. Studienarbeit	Schwerpunkt I (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS	10. Semester SS	10. Semester SS
26						
27	1. Studienarbeit	Schwerpunkt II (3V/Ü)	2. Studienarbeit	10. Semester SS	10. Semester SS	10. Semester SS

\* wahlweise im 5. oder 6. Semester  
\*\* oder CIM im Maschinenbau

## IEE-Lehrveranstaltungen für Nicht-Elektrotechniker

(gilt ab WS 91/92)

### 2. Betriebs- und Systemverhalten

Beratung: Prof. Dr.-Ing. H. Zenner

Betriebs- und Systemverhalten	3 V/Ü	Zenner, Rohde
Weitere LV wählbar aus:		
Regelung elektrischer Antriebe	3 V/Ü	Beck
Regelungstechnik II	3 V/Ü	N.N.
Digitale Regelungssysteme	2 V/Ü	N.N.
Betriebsfestigkeit II	3 V/Ü	Zenner
Ausgewählte Kapitel der Systemanalyse	2 V	Stamerjohanns
Schwingungslehre und Maschinendynamik	3 V/Ü	Behr
Mechanische Antriebstechnik II	2 V	Holland

### 4. Antriebstechnik

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Holland  
Prof. Dr.-Ing. Beck

Mechanische Antriebstechnik II	3 V/Ü	Holland
Energieelektronik	3 V/Ü	Beck
Weitere LV wählbar aus:		
Konstruktionslehre II	3 V/Ü	Dietz
Getriebekinematik I	3 V/Ü	Torke
Grundl. der Kolbenmaschinen	3 V/Ü	Holland
Kraft- und Arbeitsmaschinen II	3V/Ü	Noack
Betriebsfestigkeit II	3 V/Ü	Zenner
Betriebs- und Systemverhalten II	3 V/Ü	Zenner
Hydraulische Antriebstechnik	3 V/Ü	Noack
Pneumatik	3 V/Ü	Barth
Regelung elektrischer Antriebe	3V/Ü	Beck

## IEE-Lehrveranstaltungen für Nicht-Elektrotechniker

### 8. Fördertechnik

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Torke

Fördertechnik I (Innerbetriebliche Förderanlagen)	2 V	Torke
Fördertechnik II (Lasthebemaschinen)	2 V	Torke
Weitere LV wählbar aus:		
Betriebsfestigkeit II	3 V/Ü	Zenner
Konstruktionslehre II	3 V/Ü	Dietz
Grundlagen des Stahlbaus	2 V/Ü	N.N., Torke
Getriebekinematik I	3 V/Ü	Torke
Getriebekinematik II	3 V/Ü	Torke
Energieelektronik	3 V/Ü	Beck
Schmierstoffbedarf u. Versorgungseinrichtungen	3 V/Ü	Noack
Arbeitssicherheit u. Nachbarschaftsschutz	2 V/Ü	Skiba

## Informatikschwerpunkt mit IEE-Beteiligung

### 29. Industrielle Leittechnik

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Elzer		
Prozeßrechneranwendungen	4 V/Ü	Elzer
Weitere LV wählbar aus:		
Prozeßautomatisierung	2 V	Mühlenfeld
Technische Elektronik I bzw. II	3 V/Ü	Preiser
Wissensbasierte Systeme	3 V/Ü	N.N.
Datenbanksysteme I	3 V	Heuer
Regelung elektrischer Antriebe	3V/Ü	Beck

## Schwerpunktfächer für Elektrotechniker

### 19. Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Beck	
Elektrische Energieverteilung	Wehrmann
Weitere LV wählbar aus:	
Elektrische Energieerzeugung	Wehrmann
Hochspannungstechnik	Breithauer
Elektrizitätswirtschaft	Wahl
Nichtkonventionelle Energienutzung	Pötke
Softwareentwicklung technischer Systeme I	Elzer
Theorie der Wechselströme I	Heilmholtz
Theorie der Wechselströme II	Heilmholtz
Theorie der elektromagnetischen Felder	Mückenheim
Betriebs- und Systemverhalten	Zenner

### 20. Umwandlung elektrischer Energie in Nutzenergie

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Beck	
Elektrische Maschinen	Canders
Weitere LV wählbar aus:	
Theorie der Wechselströme I	Heilmholtz
Theorie der Wechselströme II	Heilmholtz
Betriebs- und Systemverhalten	Zenner
Elektrische Maschinen	Canders
Elektrochemie	Schwarz
Elektrowärme	Diemar
Industrielle Anwendung der HF-Technik	Leppin
Theorie der elektromagnetischen Felder	Mückenheim

## Schwerpunktfächer für Elektrotechniker

### 21. Regelungstechnik und Signalverarbeitung

Beratung: N.N., Dr.-Ing. Preiser		
Digitale Regelungssysteme	2 V/Ü	N.N.
Technische Elektronik II	3 V/Ü	Preiser
Weitere LV wählbar aus:		
Theorie der Wechselströme I	3 V/Ü	Heilmholtz
Ausgewählte Kapitel der Regelungstechnik	3 V/Ü	N.N.
Grundlagen der Nachrichtentechnik	3 V/Ü	Preiser
Modulationsverfahren in der Meßtechnik	3 V/Ü	Preiser
Hydraulische Antriebstechnik	3 V/Ü	Noack
Pneumatik	3 V/Ü	Barth

### 22. Industrieelektronik

Beratung: Dr.-Ing. Leppin		
Elektronische Verstärker I und II	4 V/Ü	Leppin
Industrielle Anwendungen der HF-Technik	2 V/Ü	Leppin
Weitere LV wählbar aus:		
Modulationsverfahren in der Meßtechnik	3 V/Ü	Preiser
Technische Elektronik II	3 V/Ü	Preiser
Grundlagen der Nachrichtentechnik	3 V/Ü	Preiser
Theorie der Wechselströme I	3 V/Ü	Heilmholtz
Theorie der Wechselströme II	3V/Ü	Heilmholtz

## Schwerpunktfächer für Elektrotechniker

### 23. Meß- und Automatisierungstechnik

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Mühlenfeld

Entsprechende LV wählbar aus:

Theorie der Wechselströme I	3 V/Ü	Helmholtz
Digitale Regelungssysteme	2 V/Ü	N.N.
Mustererkennung	2 V	Mühlenfeld
Prozeßautomatisierung	2 V	Mühlenfeld
Softwareentwicklung für die Prozeßtechnik I	3 V/Ü	Eizer
Technische Elektronik II	3 V/Ü	Preiser
CIM im Maschinenbau	3V/Ü	Dietz, Müller

### 24. Regelung von Maschinenanlagen

(Nicht für Studierrichtung Elektrotechnik im Maschinenwesen)

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Mühlenfeld

N.N.

Entsprechende LV wählbar aus:

Elektro-optische Meßtechnik	3 V/Ü	Mühlenfeld
Digitaltechnik und Maschinensteuerungen	3 V/Ü	Mühlenfeld
Theorie der Wechselströme I	3 V/Ü	Helmholtz
Signalübertragung	3 V/Ü	Leppin
Technische Elektronik I	3 V/Ü	Preiser
Identifizierung und Optimierung technischer Prozesse	3 V/Ü	N.N.
Regelungstechnik II	3 V/Ü	N.N.
Digitale Regelungssysteme	2 V/Ü	N.N.
Regelung elektrischer Antriebe	3V/Ü	Beck

## Energiesysteme - Energietechnik - Schwerpunkte

### 25. Energietransport und -speicherung

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Beck

Prof. Dr.-Ing. Jeschar

Entsprechende LV wählbar aus:

Wärmeübertragung II	3V/Ü	Jeschar
Hochspannungstechnik	3V/Ü	Bretthauer
Elektrische Energieverteilung	3V/Ü	Wehrmann
Elektrizitätswirtschaft	2V/Ü	Wahl
Ferntransport flüssiger Energieträger	2V/Ü	N.N.
Fernwärme	1V/Ü	N.N.
Untertagespeichertechnik	2V/Ü	Haddenhorst

### 26. Energieumwandlungsprozesse

Beratung: Prof. Dr.-Ing. Beck

Dr.-Ing. Pötke

Entsprechende LV wählbar aus:

Elektrische Energieerzeugung	3V/Ü	Wehrmann
Energieelektronik	3 V/Ü	Beck
Elektrochemie	3 V/Ü	Schwarz
Nichtkonventionelle Energienutzung	3 V/Ü	Pötke
Umwandlung fossiler Energieträger in Koppelprozessen	1 V	Pfeifer
Elektrische Maschinen	3 V/Ü	Canders
Energieinspartechiken (thermische Verfahren)	2 V/Ü	Pötke

**Wir stellen vor:**  
**Professor Dr.-Ing. H.-P. Beck**

## Rationeller Energieeinsatz am Beispiel der „Neuen Berliner S-Bahn“

### Einleitung

Die Energiepolitik der nächsten Jahrzehnte muß darauf gerichtet sein, die Energiequelle „Rationelle Energieverwendung“ weiter zu nutzen und auszubauen. Dies ist erforderlich, weil die Anwendung fossiler Energieträger wegen steigender Umweltbelastungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden sollte (1). Auch beim zukünftigen Einsatz der regenerativen Energiequellen ist ein hoher Energieeinsatzgrad durch rationale Energieverwendung anzustreben, da auf diesem Wege die höheren Erzeugungskosten teilweise ausgeglichen werden können.

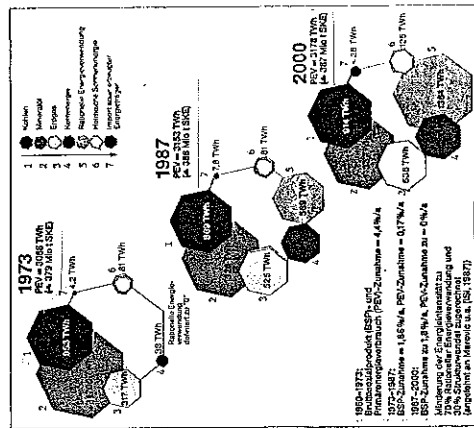


Bild 1: Energie-Heptagon zum Strukturwandel in der Energieerzeugung und -verwendung (1973, 1987, ESSO 2000). Statistisches Bundesamt, Blümelstr. 10, 53111 Bonn. Solarstrom: DLR, ZSW und MWMT Baden-Württemberg, Stuttgart 1991.

Dr.-Ing. Hans-Peter Beck ist seit dem 1. Oktober 1989 als Nachfolger von Professor Dr.-Ing. Karlheinz Brethrauer als Professor für „Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik“ an der TU Berlin tätig. Er war von 1973 bis 1989 als Leiter des Instituts für Elektrotechnik und Elektronik an der TU Berlin tätig. Nach dem Schulabschluss absolvierte er ein Studium der Elektrotechnik an der TU Berlin und promovierte anschließend bei Professor Michel am Institut für Allgemeine Elektrotechnik der TU Berlin. Das Wissenschaftliche Arbeitsgebiet, auf dem er auch seit 1976 beim AEG-Forschungsinstitut unter der Leitung von Professor Heurmann tätig war, befasst sich mit der Entwicklung von Stromrichtertransistorschaltungen, die Netzrückwirkungen von Stromrichtern sowie die Kopplung von Einphasen-Bahn- mit Drehstromnetzen. Danach folgte die zu seiner Berufung eine Tätigkeit als Entwicklungsleiter für Elektrotechnik bei der AEG in Berlin. Zwei wesentliche Projekte, die in der Zeit von 1984 bis 1989 von ihm mitbearbeitet wurden, betreffen die Entwicklung der elektrischen Ausrüstung des (Drehstrom)ICE (Express) sowie die der neuen Berliner S-Bahn. In den letzten Jahren hat er sich mit der Entwicklung von Stromrichtertransistorschaltungen, die Netzrückwirkungen von Stromrichtern sowie die Kopplung von Einphasen-Bahn- mit Drehstromnetzen beschäftigt. Er ist Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina und stromrichterfähige Inneerzweit mit regenerativen Energiequellen untersucht.

nologie (BIVT) und dem Senator für Wissenschaft und Forschung gefördert. Vornehmens wurde durch die zu einer Arbeitsgemeinschaft zusammengeschlossenen Firmen AEG AG, Siemens AG und Waggon Union (WU) GmbH, in enger Abstimmung mit der VEG, ein Prototyp-Fahrzeug für die neue Berliner S-Bahn entwickelt, gebaut und erprobt.

Der aus vier Doppelpendeltriebwagen (DTW) bestehende Prototyp-Fahrzug wurde im Zeitraum Dezember 1986 bis März 1987 an die VEG ausgeliefert. Nach umfangreichen Inbetriebnahme-, Erprobungs- und Schulungsprogrammen sowie nach der Zulassung durch die Technische Aufsichtsbehörde wurden die DTW ab Mitte 1987 auf der „Warnseebahn“ im Fahrplänebetrieb eingesetzt. In der Zwischenzeit haben die Prototypfahrzeuge einen vierjährigen erfolgreichen Probetrieb hinter sich gebracht. Der Betreiber hat sich deshalb 1990 entschlossen, eine erste Serie von Vollzeugsätzen in Auftrag zu geben.

Inzwischen ist auch die Entscheidung gefallen, diese Baureihe in der wiedervereinigten Hauptstadt als Standardfahrzeug einzusetzen. Die neuen S-Bahn-Triebzüge unterscheiden sich von bisher gebauten Nahverkehrszügen durch den konsequenten Einsatz von Komponenten modernster Technik mit folgenden Zielen:

- Steigerung der Attraktivität für den Fahrgast durch eine möglichst große Reisegeschwindigkeit von ca. 50 km/h bei hohem Reisekomfort,
  - Senkung der Instandhaltungskosten, zum Beispiel durch Wartungsintervalle von mindestens 20.000 km und Hauptunterwuchungsintervalle von 50.000 km und
  - Verbesserung der Arbeitsbedingungen für das Fahrpersonal, zum Beispiel durch einen hellen, übersichtlichen und klimatisierten Fahrzeuginnenraum.
- Bei der Erarbeitung des Fahrzeug- und Antriebskonzeptes wurde insbesondere die Senkung der regelmäßig anfallenden Betriebskosten (Energie, Wartung und Reparatur) ein hohes Stellenwert zugeordnet. Während der 30- bis 40jährigen Lebensdauer der Fahrzeuge können auf diese Weise erhebliche Einsparungen bei den Betriebs- und Energiekosten erzielt werden. Der Einsatz von Mikrorechner-Technik sowie der Antrieb mit Drehstrom-Fahrmotoren und Umrichter sind hierfür wichtige Voraussetzungen (Bild 2).

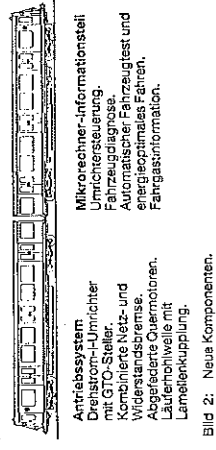


Bild 2: Neue Komponenten, im folgenden soll deshalb auf das Antriebssystem mit vollabgeleiteten Quermotoren und stromgeführten Drehstrom-Umrichtern sowie die Fahrzeug- und Zugsteuerung mit Mikrorechnern näher eingegangen werden.

### Fahrdynamische Auslegung

Die geforderte Steigerung der Reisegeschwindigkeit auf 50 km/h kann durch Erhöhung der Antriebsleistung und Bremsverzögerung sowie der Höchstgeschwindigkeit erzielt werden. Beide Maßnahmen bedingen eine höhere Fahrzeugleistung. Aus Kompatibilitätsgründen mit den älteren Fahrzeugen und den S-Bahn Strecken in Berlin (Ost) liegt aber die Netzspannung von 800 V fest, in derartigen Netzen ist ein Netzstrom von ca. 5000 A ein aus technischen und wirtschaftlichen Gründen gebotener Grenzwert. Für einen Vollzug, bestehend aus vier DTW, ist somit die maximale zulässige Leistung 4 MW, für einen DTW folglich 1 MW (2).

### Höchstgeschwindigkeit

Die Höchstgeschwindigkeit  $v_{max}$  ist in Abhängigkeit vom mittleren Haltestellenabstand und der geforderten Reisegeschwindigkeit unter Berücksichtigung der erreichbaren Anfahrbeschleunigung und Bremsverzögerung festzulegen.

Für das Berliner S-Bahn-Netz kann von einem mittleren Haltestellenabstand von 1500 m ausgegangen werden. Wird eine heute für S-Bahnen übliche Anfahrbeschleunigung  $a_a$  und Bremsverzögerung  $a_b$  von  $1 \text{ m/s}^2$  gewählt, so ergibt sich bei einer Netzleistungsbegrenzung von  $P_N = 1 \text{ MW}$  das Fahrschaubild nach Bild 3. Die kürzeste Fahrzeit beträgt danach bei 4% Zeitrückhalt  $t_k = 92 \text{ s}$ . Die Höchstgeschwindigkeit von  $v_{max} = 100 \text{ km/h}$  wird dabei nur ca. 3,5 s lang oder 100 m gefahren.

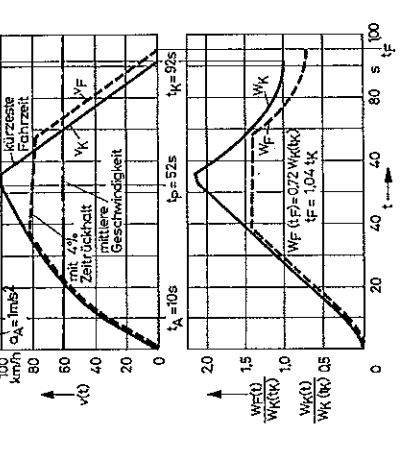


Bild 3: Fahrschaubild und Energieverbrauch für einen Doppelpendeltriebwagen, Haltestellenabstand 1500 m, 2/3-Besetzung. Quelle: AEG, Berlin.

Eine Steigerung der Höchstgeschwindigkeit über 100 km/h hin- und wieder bei der vorgegebenen Netzleistung und den angenommenen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten sowie dem aus fahrdynamischen Gründen notwendigen Zeitrückhalt keine Fahrzeitverkürzungen bringen. Im Gegenteil: Eine Energieerhöhung führt zu einer Vergrößerung des Haltestellenabstands. Wenn eine 4 s längere Fahrzeit in Kauf genommen und zum Beispiel durch eine Verringerung der Haltestellenabstände von 25 auf 21 s ausgeglichen werden kann, können, wie im Bild 3 gezeigt, 28% Energie eingespart werden. Zur Optimierung der Fahrweise ist daher ein Bordrechner vorgesehen, der im Abschnitt „Energieparendes Fahren“ näher beschrieben wird.

Bei diesem Fahrschaubild ergibt sich bei  $t_k = 25 \text{ s}$  Haltestellenabstand von 1500 m eine Reisegeschwindigkeit  $v_a$  von

$$v_a = \frac{v_{max} \cdot t_k}{t_k + \frac{v_{max}}{a_a}} = \frac{100 \text{ km/h} \cdot 25 \text{ s}}{25 \text{ s} + \frac{100 \text{ km/h}}{1 \text{ m/s}^2}} = 55,7 \text{ km/h} \cdot \frac{92}{25} = 46,2 \text{ km/h} < 50 \text{ km/h}$$

Für einen Haltestellenabstand von 1,5 km wäre also auch noch eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h ausreichend. Da das S-Bahn-Netz in Berlin-West jedoch auch einige lange Haltestellenabstände von bis zu 7,8 km aufweist, stellt die gewählte Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h einen guten Kompromiß dar.



#### Anfahrbeschleunigung

Aus dem Bild 3 geht auch hervor, daß eine Erhöhung der Anfahrbeschleunigung bei vorgegebener maximaler Netzleistung  $P_N = 1 \text{ MW}$  nur in den ersten  $10 \text{ s}$  ( $v < 35 \text{ km/h}$ ) eine Fahrzeitverlängerung bringt kann. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die maximale Anfahrbeschleunigung aus Gründen der Rückbegrenzung erst nach ca. 2 s erreicht wird. Bei  $v < 25 \text{ km/h}$  wird aus Gründen der Netzleistungsbegrenzung vom Betrieb mit konstanter Anfahrbeschleunigung auf den mit konstanter Leistung übergehenden (6).

Der folgende Zeitschritt  $t_5 - t_4 = 42 \text{ s}$  dauert etwa viermal so lange, und die sich anschließende Bremsphase ist dreimal länger als der Anfahrvorgang mit  $a_4 = 1 \text{ m/s}^2$ .  
Daraus folgt, daß eine Erhöhung der Anfahrbeschleunigung auf zum Beispiel  $1,4 \text{ m/s}^2$  nur eine geringe Fahrzeitreduzierung von 2 s, das heißt ca. 2% der Gesamtfahrzeit, bringen kann. Da eine 40%ige Erhöhung der Anfahrbeschleunigung aber eine 40%ige Bauleistungserhöhung der Umrichteranlage bedingt, ist eine solche Vorgabe unwirtschaftlich. Die Anfahrbeschleunigung wurde daher auf  $1 \text{ m/s}^2$  bei 2/3-Besetzung festgelegt.

#### Bremsverzögerung

Da S-Bahnen im Gegensatz zu Stadtbahnen, die am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen, auf eigenständigen gesicherten Gleisanlagen verkehren, spielt die Länge des Bremsweges gegenüber den Kriterien Fahrzeitoptimierung und Rückspaisewirkungskgrad der generativen Netzbrasse eine geringe Rolle. Bei der Auslegung der elektrischen Bremse, die als Netz- und Widerstandsbrasse auszuführen ist, wurden folgende Kriterien zugrunde gelegt (2):

- Bei der maximal zulässigen Netzspannung von  $960 \text{ V}$  ( $800 \text{ V} + 20\%$ ) sollten die Rückspaiseströme wegen der Netzleistungsbegrenzung nicht wesentlich über den Netzstrom beim Anfahren liegen.
- Die Bremsleistung ist so bemessen, daß Anfahr- und Bremsleistung annähernd gleich sind, um den Einbau von Bremsvorwiderständen und zugehörigen Schaltern zum Abbau von Bremsleistungsspitzen zu vermeiden.
- Die erzielbare Bremsverzögerung in Abhängigkeit der Bremshebel-Auslenkung sollte zwischen leerem und maximal beladenem Fahrzeug gleich sein, um den Triebabreitfahrgänger ein einheitliches Maß für den Bremsweg zu geben.
- Widerstandsbrasse sowie die pneumatische Bremse sollten unter allen Witterungsbedingungen erreicht werden.
- Die vorstehenden Kriterien führen zu folgender Dimensionsierung der elektrischen Bremse:
- Im Geschwindigkeitsbereich von  $100 \text{ km/h}$  bis  $70 \text{ km/h}$  konstante Bremsleistung.
- Von  $70 \text{ km/h}$  bis zum Stillstand konstante maximale Verzögerung von  $a_g = 1,0 \text{ m/s}^2$ , dabei stellt die Lastkompensation eine gleichbleibende maximale Verzögerung unabhängig vom Belastungsgrad ein.
- Unterhalb der Kehlinie für maximale Bremskraft ist die Bremskraft stufenlos einstellbar.

#### Leistungsauslegung

Bei einer Fahrt mit kürzester Fahrzeit beginnt die Fahrt mit einer Anfahrbeschleunigung  $a_1 = 1 \text{ m/s}^2$  (2/3-Besetzung) bis zum Erreichen der maximalen Netzleistung  $P_N = 800 \text{ V} \cdot 1250 \text{ A} = 1 \text{ MW}$ .  
Daran schließt sich ein Beschleunigungsvorgang bis zur Höchstgeschwindigkeit von  $v_{max} = 100 \text{ km/h}$  mit konstanter Netzleistung von  $P_N = 1 \text{ MW}$  an. Bei Netzspannung ( $< 800 \text{ V}$ ) wird der Netzstrom auf  $1250 \text{ A}/\text{DTW}$  begrenzt.  
Bei Bremsen im Bereich von  $100 \text{ km/h}$  bis  $70 \text{ km/h}$  ist die Bremsleistung konstant (ca.  $1 \text{ MW}$ ). Ab  $70 \text{ km/h}$  bis 0 beträgt die Bremsverzögerung  $a_g = 1 \text{ m/s}^2$ .

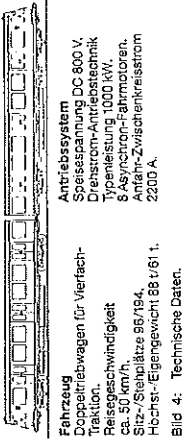


Bild 4: Technische Daten.

Auf der Grundlage dieser Grenzwerte wurde die Auslegung des Antriebssystems (Bild 4) durchgeführt. Für den rd. 86 t schweren DTW ergibt sich eine Fahrmotor-Dauerleistung von insgesamt  $720 \text{ kW}$  (max.  $824 \text{ kW}$ ).

Die nachfolgende Frage, auf wieviel Radsätze diese Leistung zu veranlagen sei, ergibt sich durch die auf vier Radsätze dieser Leistung zu Wagen-Grundlast ( $v$ , Verläufig) auf vier Dreigleisen fast von selbst: 50% Reibungsgewicht hakt für  $1 \text{ m/s}^2$  Beschleunigung und Verzögerung eine betriebmäßige Beanspruchung des Kraftschluß-Behälteres von etwa 0,3 vorausgesetzt. Dies ist für Nahverkehrsfahrzeuge nicht zu empfehlen, 66% oder 75% Reibungsgewicht kommen aus konstruktiven Gründen nicht in Betracht, so daß schließlich der Altschienenantrieb mit acht angetriebenen Radsätzen verbleibt.

Für Nahverkehrsfahrzeuge mit Gleichspannungsspelsung kommen heute drei verschiedene Klassen von Antriebssystemen in Frage:

- Mischstrommotor mit Gleichrichter.
- Drehstrom-Asynchronmotor mit U-Umrichter (Stromzwischenkreis) und
- Drehstrom-Asynchronmotor mit U-Umrichter (Spannungszwischenkreis).

Die beiden Drehstrom-Varianten wurden Ende der 70er Jahre bei der Berliner U-Bahn erprobt. Der Systementscheid fiel, dem damaligen Stand der Umrichtertechnik entsprechend, zugunsten der U-Umrichter-Lösung aus. Diese Lösung hat sich inzwischen in Europa in Nahverkehrsfahrzeugen mit Gleichspannungsspelsung durchgesetzt.

#### Schaltungskonzept

Wie Bild 5 zeigt, ist jeder der beiden ständig gekuppelten S-Bahnwagen (A- und B-Wagen) eines DTW mit einer eigenen Antriebsanlage ausgerüstet (A-Wagen nur teilweise dargestellt). Nur der Fahrzeughauptschalter ist nicht redundant aufgebaut. Jedes Umrichterantriebsgestänge des DTW mit 50% der Leistung angefahren werden kann. Der Umrichter mit einer Schaltleistung von

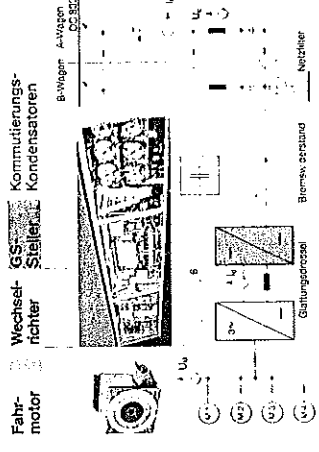


Bild 5: Schaltungsplan und Ansicht des Antriebssystems, Container-Bauweise.

1 MVA, bestehend aus Gleichrichter, Glättungscrossen und Wechsler, speist vier Fahrmotoren mit insgesamt  $360 \text{ kW}$  Dauerleistung. Die dreifache Überdimensionierung der Umrichter ist eine Folge der fahrdynamischen Anforderungen und der im Vergleich zu elektrischen Maschinen bei Umrichtern nicht vorhandenen kurzzeitigen Überlastfähigkeit im Sekundärbereich (3).

Die im Bild 5 symbolisch dargestellten Komponenten Fahrmotor, Wechsler mit Kommutierkondensatoren und Gleichstromrichter (GS-Steller) sind im oberen Teil im Foto wiederzugeben.

Im Vordergrund rechts des Containers sind die Kommutierkondensatoren des Wechslers zu sehen, in der Mitte der Gleichstromrichter und von links hinten der Wechslerlichter. Gleichstromrichter-Schaltleistung  $S_{Wech}$  und Wechslerlichterschaltleistung  $S_{WechL}$  sind etwa gleich.

#### Fahrmotor und Antriebe

Vergleich Längs- und Quermotor  
Abweichend von dem bei heutigen U- und Stadtbahnen meist üblichen Stand, ist der kompakte Drehstrom-Fahrmotor quer zur Fahrtrichtung voll abgedeckt parallel zum Radsatz aufgehängt (Bild 6). Er treibt über ein einfaches, einstufiges Stirnradgetriebe den Radsatz an. Der klassische Einzelachsantrieb kommt also dank der besonderen Vorzüge der Drehstrom-Technik wieder zur Anwendung.

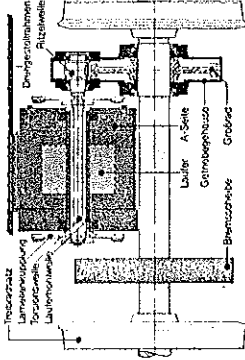


Bild 6: Einzelrad-Querantrieb mit Läuferhohle und Lamellenkupplung.

Der seit den 50er Jahren mit Erfolg bei Straßen- und Nahverkehrsbahnen eingeführte „Längsantrieb“ mit einem zentralen Fahrmotor in der Mitte und zwei Kegelradgetrieben veran auf die besonderen Belange von Gleichstrom-Victorien zugeschnitten. Mit der Einführung der wartungsarmen Drehstrom-Asynchronmotoren erweist sich der Längsantrieb in seiner Zweckbestimmung als überholt: Die Längsanordnung ist wegen der geringen Abmessung der Drehstrom-Motoren nicht mehr notwendig. Der Vorteil der geringeren Schleudermenge des Längsantriebs entfällt durch die mögliche elektrische Kupplung mehrerer Drehstrom-Motoren über die gemeinsame Drehstrom-Sammelschiene. Schließlich sind die beim Längsantrieb notwendigen Kegelradgetriebe mit aufwendiger Verzahnung teurer und in ihrer Lebensdauer nur mit etwa einem Zehntel derjenigen einfacher und leichter Stirnradgetriebe für Querantriebe zu bewerten.

Die in den Triebzügen der Berliner S-Bahn verwirklichte Lösung zeigt, daß - axial noch genügend Platz für eine Bremsmotorbremse - durch die kompakte kommutatorlose Bauweise des Motors innerhalb der Radsätze für  $1435 \text{ mm}$  Normalspur bleibt.

#### Vollabgedeckter Quermotor mit Läuferhohle

Wegen der elastischen Aufhängung des Fahrmotors im abgedeckten Drehgestellrahmen wird die Drehmomentübertragung

über den bekanntesten Sicheron-Lamellen-Antrieb mit Läuferhohle vorgenommen. Die zweiseitige Lagerung von Großrad und Ritzal in dem am Kräftefluß beteiligten geschlossenen Gehäuse läßt im Vergleich zu herkömmlichen Tatzlager-Antrieben mit Blech-Schutzkästen geringste Neigungs- und Schräglagerfehler durch Wellenleitung und damit gute Geräuscharmut erwarten und bietet ausgezeichnete Dichtigkeit gegen den bislang als unabänderlich bezeichneten Ölverlust.

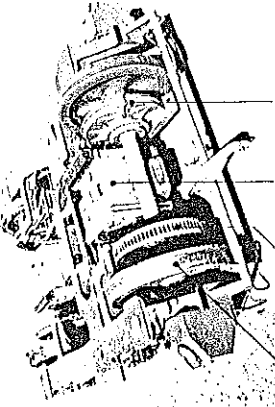


Bild 7: Drehgestell mit Antrieb.

#### Konstruktive Ausführung

Die konstruktive Ausführung von Fahrmotor und Antrieb sind auf dem Foto des kompletten Drehgestells (Bild 7) zu erkennen. Das Motorgehäuse besteht aus stranggeprägten Aluminiumteilen, die Lagerschilde sind aus vergüteten Aluminiumguß gefertigt.

Die Eigenbelüftung wird mit einem Einkammendüser mit ungleicher Schaufelteilung zur Reduzierung von Geräuschen durchgeführt. Der Luftantritt wird durch eine Lufthaube auf der A-Seite der Luftausrüstung durch im B-seitigen Lageschild vorgesehene Öffnungen realisiert (5).  
Die Gewichtsauflistung der Antriebs-Komponenten ergibt folgende Werte:  
- Fahrmotor 495 kg.  
- Getriebe 205 kg.  
- Kupplung (Hohlwellentyp) 30 kg.

#### Meßergebnisse

Die Erprobungsphase des Triebzuges begann Mitte 1987 mit der Durchführung eines Meß- und Versuchsprogrammes. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden auch Fahrtauschbilder aufgenommen. Das Bild 8 zeigt die Zeitverläufe der Effektivwerte einiger elektrischer Größen der Antriebsausrüstung und die Geschwindigkeit

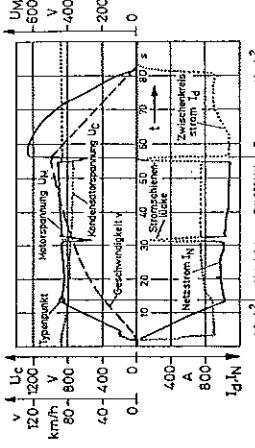


Bild 8: Gemessenes Fahrtauschbild eines Doppeltriebwagens, 10% Besetzung und Widerstandsbrasse. Quelle: AEG, Berlin.

bei einer sogenannten Spitzfahrt auf dem Prüfgleis in Berlin-Wannsee. Bei einer solchen Fahrt wird bis zur Höchstgeschwindigkeit mit maximaler Antriebsleistung beschleunigt und gleich wieder abgebrems (Kurzstrecke-Fahrt).

Die Spitzfahrt kann in drei Intervalle eingeteilt werden:

- Anfahren mit konstanter Anfahrbeschleunigung. Der Netzstrom  $I_N$  steigt linear bis zum Typenpunkt an. Die Geschwindigkeit im Typenpunkt wird nach 11,5 s (vgl. Bild 9,  $t_N = 10$  s) erreicht. Die Beschleunigung ist daher nicht wie dort angenommen  $1 \text{ m/s}^2$ , sondern nur auf  $0,9 \text{ m/s}^2$  eingestellt.

Nach Erreichen des Typenpunktes bleibt die Motorspannung  $U_M$  etwa konstant. Da die Kondensatorspannung  $U_C$  netzbedingt abnimmt, steigt der Netzstrom  $I_N$  wegen der konstanten Leistungsregelung von  $1000 \text{ A}$  auf  $1100 \text{ A}$  an. Beim Überfahren der Stromschienenlücke wird er kurzzeitig unterbrochen.

- Nach Erreichen der Höchstgeschwindigkeit wird zum Abbremsen die Widerstandsbremse eingeschaltet, weil die Einspeisung des Prüfgleises keine Netzurückspeisung erlaubt und mit einer maximalen Bremsleistung von  $P_{\text{max}} = U_M \cdot I_M \cdot \eta \cdot \sqrt{3} = 650 \text{ V} \cdot 1,08 \text{ kA} \cdot 0,79 \cdot \sqrt{3} = 948 \text{ kW}$  verschleißfrei gebremst.

Wäre eine Rückspeisung möglich gewesen (wie beim Streckenbetrieb mit mehreren Fahrzeugen), könnte bei dieser Fahrweise ein Rückspeisewirkungsgrad von ca. 50 % zugrunde gelegt werden (vgl. Meßkurven Bild 9).

Der Netzstrom  $I_N$  bleibt bei dieser Spitzfahrt unter seinem Maximumwert von  $1250 \text{ A}$ , weil das Fahrzeug nur zu 10 % besetzt war.

#### Zug- und Antriebssteuerung

Die bei der Berliner S-Bahn eingesetzten Leistungselektronikgeräte arbeiten nach dem Prinzip schnellwirkender Schalter (Umrichter mit Thyristoren [Wechselrichter] und abschaltbaren Thyristoren). Dadurch kann im Fahr- wie im Bremsbetrieb die elektrische Energie praktisch verlustfrei umgeformt werden. Wegen der hohen Arbeitsfrequenz von bis zu  $500 \text{ Hz}$  kann der Triebfahrzeugführer im Gegensatz zu Schichtverkehrszeugen mit mechanischen Schaltern nur Fahrsteuerbefehle vorgeben und keine Fahrstützen einstellen; eine direkte Steuerung durch den Menschen ist ausgeschlossen. Das Bindeglied zwischen dem Fahrer und der Antriebsanlage ist die digitale Antriebssteuerung mit Mikrorechner (7, 8), die den Fahr- und Bremsbetrieb der Motoren regelt. Die Nutzbrems optimal einstellt und die Hauptschalteinrichtungen des Antriebskreises bedient. Eine interne Begrenzung der verstellbaren Geschwindigkeiten ermöglicht ein rückfreies und korforables Betriebsverhalten. Außerdem werden im Falle schlechter Gleisverhältnisse die Fahr- und Bremskräfte automatisch so weit reduziert, daß die bestmögliche Haftverwertung gewährleistet ist und ein Gleiten während der Bremsphase und ein Schleudern während der Antriebsphase ausgeschlossen ist.

#### Energiesparendes Fahren

Eine von der Fahrzeugsteuerung völlig losgelöste Aufgabe des Fahrzeug-Bordrechners ist die Unterstützung des Triebfahrzeugführers bei einer energiesparenden Fahrweise. Vorausberechnungen haben gezeigt, daß nennenswerte Stromersparnisse möglich sind, wenn zwischen der Beschleunigungs- und Bremsphase einer sogenannten Spitzfahrt noch eine möglichst lange Rollphase eingeschoben wird. Das Fahrzeug braucht dann mehr Zeit, um die Wegstrecke zurückzulegen (siehe Abschnitt „Höchstgeschwindigkeit“).

Bild 9 zeigt eine typische Relation zwischen zusätzlicher Fahrzeit und eingesparter Energiemenge, wobei der während der Bremsphase rückspeisbare Anteil in der unteren Kurve vollständig und in der oberen übermaut nicht berücksichtigt wurde. Aus dem Diagramm geht beispielsweise hervor, daß eine durch die Rollphase hervorgerufene Fahrzeitverlängerung von 5 % einen Sparereffekt von ca. 20 % verursacht; ein  $\Delta t$  von 15 % schlägt sogar mit

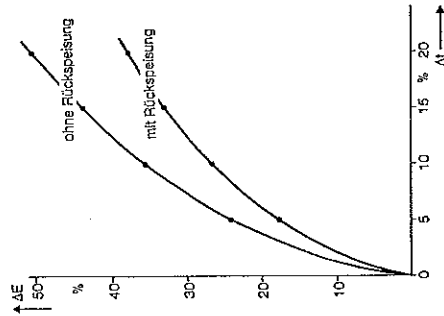


Bild 9: Energieeinsparung durch Zeitrückhalt. Quelle: AEG, Berlin.

ca. 30 bis 40 % Minderverbrauch zu Buche. Es ist natürlich wenig sinnvoll, alle Züge langsamer fahren zu lassen, weil dann die Leistungsfähigkeit des Verkehrsnetzes absinkt. Vielmehr sollte angestrebt werden, eventuell vorhandene Fahrzeitleistungen nicht durch überlange Aufenthalte im Bahnhof zu verschwenden, sondern sie nach normalen Halteintervallen durch energiesparende Fahrweise auf der Strecke in Stromersparnis umzusetzen. Dazu muß sekundengenau bekannt sein, wieviel Zeitvorsprung zum Fahrplan vorhanden ist und ab wann eine Rollphase eingeschaltet werden darf, um die Reserve für den nächsten Streckenabschnitt genau zu nutzen. Ein Fahrer wäre mit dieser Aufgabe überfordert und zumindest unzulässig stark abgelenkt.

Deshalb sind im Bordrechner für alle Strecken Fahrpläne und Profile gespeichert, so daß der Rechner mit seiner internen Uhr Zeitüberschüsse registriert und per Vorausberechnung genau den Zeitraum ermittelt, in dem eine außerordentliche Rollphase eingeschaltet werden soll. Der Fahrer bekommt dafür ein Signal und kann so mühelos energieoptimal Betrieb ohne Verspätungen erreichen. Mit einer weiteren Energieersparnis über die Nutzbrems hinaus von 10 bis 20 % ist zu rechnen!

#### Ausblick

Die neuen Züge der Berliner S-Bahn lösen Fahrzeuge ab, die zu ihrer Zeit als modernsten der Welt galten. Die neue Generation repräsentiert wiederum den höchsten Stand der Technik. Die Fahrleistungen sind den heutigen Erfordernissen bezüglich Transportkapazität und Geschwindigkeit angepaßt, wobei besonderer Wert auf sparsamen Umgang mit elektrischer Energie gelegt wurde. Hierzu trägt die fortschrittliche Drehstrom-Antriebs-technik mit Strom-Zwischenkreis-Umrichter und Drehstrom-Asynchronmotoren bei, die im Fahrbetrieb mit hohen Wirkungsgraden operiert und während des Bremsbetriebs die gesamte generierte Leistung der Motoren in das Netz rückspeisen. Die Energieeinsparung gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen beträgt je nach Fahrweise und Haltestellenabstand 30 bis 50 %.

#### Schrifttum:

- (1) Beler, K.: S-Bahn-Prototyp. Berliner Verkehrs-Betriebe (BVG), Öffentlichkeitsarbeit, Broschüre (1987).
- (2) Steiler, G.: Entwicklung neuer S-Bahn-Triebzüge für die Berliner Verkehrsbetriebe. Elektrische Bahnen 84 (1986) Nr. 4, S. 107-118.
- (3) Falk, P. u. Sauer, H.: Die elektrische Ausrüstung der neuen Triebzüge 480 für die Berliner S-Bahn. ETR-Eisenbahntechnische Rundschau 35 (1986) Nr. 9, S. 606-617.
- (4) Beck, H.-P.: Antriebsstechnik in Nahverkehrsfahrzeugen. Elektroniker (1987) Nr. 4, S. 95-98.
- (5) Abratis, H. u. Hallmann, D.: Fahrmotor und Antrieb für die Prototyp-Triebwagen ET 480 der Berliner S-Bahn. Nahverkehrs-Praxis (1987) Nr. 3, S. 83-87.
- (6) Tietze, Ch.: Die elektrische Ausrüstung der Prototyp-Triebzüge (Baureihe 480 der S-Bahn Berlin (West)). ZEY-Glas, Ann. 111 (1987) Nr. 8, S. 241-247.
- (7) Weigel, W.-D.: Eine neue Generation von elektronischen Triebfahrzeug-Steuerungen mit Mikrocomputer. ZEY-Glas, Ann. 107 (1983) Nr. 8/9, S. 305-312.
- (8) Urbanke, C.: Moderne Steuer- und Informationstechnik auf Bahnfahrzeugen. ZEY-Glas, Ann. 110 (1986) Nr. 6/7, S. 223-231.
- (9) Energiebericht der Elektroindustrie, ZVEI, Ausg. 1988, S. 12.
- (10) Beck, H.-P. u. Urbanke, C.: Die elektrische Ausrüstung der neuen S-Bahn-Triebzüge Baureihe 480 in Berlin (West). ZEY-Glas, Ann. 111 (1987) Nr. 11/12, S. 429ff.
- (11) Dritter Bericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Schutz der Erde“. Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/8030, 1990.

Quelle: Mitteilungsblatt der TU Clausthal, Heft 72, 1991  
ISBN 0344-6611

## Elektronische Einrichtung zur Minimierung der Überlasten in Antriebswellen von Walzgerüsten

Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck und Prof. Dr.-Ing. H. Zenner

### 1. Einführung

Nicht nur im Flugzeug- und Fahrzeugbau, sondern im gesamten Maschinen- und Apparatebau einschließlich des Schwermaschinenbaus wird heute, soweit möglich, aus Kostensparnisgründen der "Leichtbau" bevorzugt. Mit diesem Konstruktionsprinzip verbindet sich die Vorstellung hoher Materialausnutzung. Leichtbau läßt sich jedoch auch durch Begrenzung bzw. Reduzierung der Betriebslasten erzielen. Dies ist möglich, wenn die Betriebslasten bekannt sind und ihr Schwankungsbereich zwischen Normalbetrieb und Überlast in Grenzen gehalten werden kann /1/.

Da die Möglichkeiten der Vermeidung von Überlasten durch Blockierungen der Walzen bei Antriebswellen von Walzgerüsten von der Prozeßseite her gering sind - mit falscher Walzenanstellung oder zu niedriger Brammentemperatur etc. muß immer gerechnet werden - bleibt der Weg, die Überlast von der elektrischen Antriebsseite her zu verringern /13/. Tritt beispielsweise eine Blockierung beim Anstich auf, wobei sich die Walzen vor Beginn der Störung mit halber Nenndrehzahl drehen und der elektrische Antrieb mit unverändertem Drehmoment treibt, kann in den Antriebswellen in Abhängigkeit von der Konstellation der Massenträgheiten und Drehfedersteifigkeiten als Spitzenwert das fünf- bis sechsfache Nenndrehmoment auftreten /2/. Bei einer nach Leichtbaukonstruktionsgesichtspunkten ausgelegten Antriebswelle wird dies vermutlich zu einem Schaden oder zumindest zu einer Vorschädigung führen.

Zur Verringerung der Überlast auf elektronischem Wege muß in die elektrische Antriebsregelung rechtzeitig eingegriffen werden, um das treibende Drehmoment während des Störfalles schnellstmöglich abzubauen bzw. die Drehzahl des Elektromotors an die durch die Störung erzwungene Walzendrehzahl - hier gleich Null - anzupassen. Um Schädigungen der Walzen durch Aufheizung vorzubeugen, kann auch eine Drehzahlumkehr zur Brammenausräumung in Betracht gezogen werden.

### 2. Beispiel einer Überlastminimierung auf elektronischem Wege

Wird z. B. ein stromrichter gespeister Gleichstromantrieb gemäß dem Stand der Technik als Antriebsmaschine verwendet (Bild 1) und die Lasteingangsfunktion (LEF) mit einem "LEF-Beobachter" in Echtzeit berechnet /3/, so kann in diesem Fall nach einer Totzeit von  $T_L = 15$  ms entschieden werden, ob eine Störung vorliegt oder nicht. Die Störung ist dabei so definiert, daß bei Nichteingreifen in den aktuellen Drehzahlsollwert  $n_{soll}$  das zulässige Spitzendrehmoment überschritten wird. Ein Simulationsergebnis

(Bild 2) der Anordnung nach Bild 1 zeigt, daß durch Umpolung von  $n_{soll}^* = -n_{soll}$  bei  $t_0 = 1$  s das Drehmoment  $m_{12}$  in der Antriebswelle den zweifachen Nennwert nicht überschreitet. Nach etwa 0,5 s ist  $m_{12}$  genügend abgeklungen;  $n_{soll}^*$  wird deshalb auf Null gesetzt. Wird der Sollwert  $n_{soll}^* = -n_{soll}$  beibehalten, beschleunigen die Walzen in die umgekehrte Richtung, sofern  $m_L < m_{12}$  gilt.

Das vorstehende Beispiel zeigt, daß es prinzipiell möglich ist, Überlasten in Antriebswellen zu vermeiden, wenn die nötigen Meßwerte für den "LEF-Beobachter" zur Verfügung stehen und die Drehmomentversteilgeschwindigkeiten sowie die zulässigen Stoßdrehmomente des verwendeten geregelten Elektromotors hinreichend groß sind.

In der hier gezeigten idealisierten Antriebssystemsimulation (Nachbildung durch lineare, zeitkontinuierliche Übertragungsglieder) werden eine Drehmomentanregelzeit  $t_{An} = 10$  ms (Bild 2) und eine 2,5-fache zulässige Motordrehmomentüberlastung vorausgesetzt und somit eine Drehmomentreduzierung auf ein Drittel erzielt. Vergleichsrechnungen zeigen, daß dieses gute Ergebnis bei der Minimierung der Überlast in der Antriebswelle maßgeblich durch die kurze Störfallerkennungszeit von  $T_L = 15$  ms beeinflusst wird /3/. Bei dem hier verwendeten "LEF-Beobachter" nach dem Prinzip des "Inversen Mechanischen Modells" können solche kurzen Zeiten erreicht werden, da die prozeßnahe Meßgröße  $m_{23}$  (Drehmoment am Walzeneingang) und  $n_3$  (Walzendrehzahl) als meßbar vorausgesetzt werden. Diese sind in der Praxis jedoch selten verfügbar, so daß andere LEF-Beobachter mit anderen Eingangsgrößen verwendet werden müssen.

### 3. Überlastminimierung - eine Systemaufgabe

Das Beispiel macht deutlich, daß die Überlastminimierung in Antriebswellen von Walzgerüsten auf elektronischem Wege eine Systemaufgabe ist, die nur in enger Zusammenarbeit zwischen Elektrotechnikern und Maschinenbauern gelöst werden kann. An der TU Clausthal wird diese Aufgabe daher im Rahmen eines Forschungsverbundprojektes bearbeitet. Beteiligt sind das Institut für Hüttenmaschinen und Maschinelle Anlagen-technik und das Institut für Elektrische Energietechnik.

In der Praxis wird in derartigen Fällen oft nicht verstanden, daß eine enge Zusammenarbeit bei der Auslegung von Antriebssystemen zwischen Betreiber (Kunde, Prozeßkennner), Mechanik- und E-Teillieferant und Systemführer erforderlich ist. Aus elektrotechnischer Sicht liegt ein Hauptgrund für diese Vorgehensweise darin, daß ein elektrischer Antrieb je nach Anwendungsfall ein völlig unterschiedliches dynamisches Verhalten entwickeln kann. Dies gilt insbesondere heute, wo fast alle geregelten elektrischen Antriebe stromrichter gespeist sind. Durch die Stromrichterspeisung wird die der elektrischen Maschine eigene dynamische Verhaltensweise beeinflusst bzw. verändert. Das dynamische Verhalten eines Antriebssystems, welches auch die Lebensdauer wesentlich beeinflusst, kann deshalb nur in Form einer Systembetrachtung analysiert werden. Das Ziel ist die "Systemintegration", d.h. die funktions- und kostengerechte Einbindung des

Antriebssystem in die Produktionsanlage. Dies ist eine mehr oder weniger komplexe Aufgabe. Um jedoch Betriebsausfällen, vorzeitiger Schädigung und erhöhten Kosten vorzubeugen und Leichtbaukonstruktionsprinzipien in die Anlagenerstellung einfließen lassen zu können, ist eine Systemanalyse, insbesondere bei Stromrichteranwendung, ratsam.

Bezogen auf die elektronische Einrichtung zur Minimierung der Überlasten bedeutet dies, daß der Systemführer folgende Systemgrößen je nach Anwendungsfall festlegen muß:

- notwendige Anregelzeit des Luftspaltdrehmomentes
- zulässige Überlast in der Antriebswelle
- Einschwingverhalten des Luftspaltdrehmomentes
- Meßsignale für den LEF-Beobachter
- Überlasterkennungszeit (Totzeit bis zum Eingriff in die Antriebsregelung)
- Lastannahmen für den Mechanikteil
- Überlastreserve für den Mechan- und E-Teil
- Parameter und Genauigkeit des mathematischen Modells des gesamten Antriebs.

Die Festlegung dieser Anforderungen setzt viel Erfahrung und eine Absicherung durch eine Systemsimulation voraus; sie beeinflusst wesentlich die entstehenden Investitions- und Betriebskosten der Antriebsanlage. Vielleicht sind dies die Gründe dafür, warum elektronische Überlast- bzw. Lastkollektivminimierungen im Schwermaschinenbau bisher selten oder gar nicht angewendet werden. Die heutige Simulationstechnik und rechnergeführte Stromrichterantriebstechnik liefern jedoch neue Möglichkeiten und rechtfertigen die wissenschaftliche Bearbeitung des Themas.

#### 4. Vorgehen bei der Modellbildung

Elektromechanische Antriebssysteme können grob in zwei Klassen unterteilt werden:

1. unregelte Antriebe mit netzgespeister Drehfeldmaschine
2. geregelte Antriebe mit stromrichteragespeisten Gleich- und Drehstrommaschinen

Das Bild 3 zeigt ein Blockschaltbild und ein Feder-Masse-Ersatzschaltbild eines Antriebs mit netzgespeister Asynchronmaschine (1). Das Kennzeichnende an diesem System ist die Kopplung eines mechanischen Mehrmassenschwingers und eines magnetischen Schwingers ( $d_M, c_M, \Theta_M$ ), dessen Eigenfrequenz und Dämpfung stark vom Betriebspunkt der Asynchronmaschine abhängen. Die mechanischen Übertragungsglieder (2,3) sind bei genauer Betrachtung nichtlinear und machen eine analytische Lösung zur Berechnung der Wellenmomente praktisch unmöglich. Zur Lösung dieser Problematik wird in neueren Veröffentlichungen /4/ vorgeschlagen, den Rechnungsgang in zwei Teilschritten aufzuteilen: Der E-Maschinenhersteller löst die Spannungs- und Bewegungsgleichungen mit einem stark vereinfachten Wellenstrang und übergibt das so ge-

fundene Luftspaltdrehmoment an den Anlagenbauer, der dieses dann als Anregungsfunktion für seinen in allen Einzelheiten nachgebildeten Wellenstrang verwendet. In einem zweiten Schritt wird bei bekannter Lasteingangsfunktion (LEF) auch diese als Anregungsfunktion auf die Lastseite aufgeschaltet und geprüft, inwieweit unzulässige Betriebszustände entstehen. Die Rückwirkung des Luftspaltdrehmomentes auf die LEF bleibt dabei unberücksichtigt.

Wie umfangreiche Untersuchungen gezeigt haben, kann die Vereinfachung des Wellenstranges sehr weit getrieben werden. Für die Praxis lassen sich die folgenden Regeln aufstellen:

- 1) Die vorgeschlagene dreistufige Vorgehensweise ist zulässig, wenn das mechanische Ersatzmodell wenigstens als Zweimassenschwinger nachgebildet wird.
- 2) Nur wenn das Luftspaltdrehmoment oder die LEF Pendeldrehmomente erzeugt, deren Frequenzen in der Nähe der 1. als auch der 2. torsionskritischen Drehzahl des Wellenstranges liegen, muß das Rechenmodell auf einen Dreimassenschwinger erweitert werden.
- 3) Es muß vor Rechenansätzen gewarnt werden, die das Luftspaltdrehmoment durch analytische Ersatzfunktionen zu beschreiben versuchen /5/. Dies führt zu physikalisch falschen Ergebnissen und kann eine Fehldimensionierung zur Folge haben.
- 4) Im Zweifelsfall wird die Simulation des Gesamtsystems mit Hilfe eines leistungsfähigen Simulationssystems /14/ empfohlen. Dies gilt insbesondere dann, wenn Drehmomentüberschwingungen im Luftspaltdrehmoment der elektrischen Maschine erwartet werden, die zu unzulässigen Torsionsschwingungsamplituden im Antriebsstrang führen können.

Geregelte Antriebe mit Stromrichterspeisung haben ein gänzlich anderes Verhalten als netzgespeiste Drehfeldmaschinen. Das Bild 4 zeigt ein Blockschaltbild und ein Feder-Masse-Ersatzschaltbild eines solchen Antriebs. Zur bedarfsgerechten, verlustarmen Steuerung des elektrischen Energieflusses vom Netz (5) zur elektrischen Maschine (1) ist ein Stromrichter (6) vorgesehen. Der Antrieb wird zum "Drehmomentexperten", der ein vorgegebenes Soll Drehmoment  $M_{i,y}$  drehzahlunabhängig in kürzester Zeit, d. h. je nach Typ in ca. 3 ... 300 ms anregt. Durch die Regelleinrichtung (4) und den Stromrichter wird der magnetische Schwinger "E-Maschine" quasi eliminiert. Das Feder-Masse-Ersatzschaltbild enthält deshalb unter sonst gleichen Bedingungen einen Schwinger ( $d_M, c_M$ ) weniger. Die grundsätzliche o. a. Vorgehensweise bei der Auslegung bleibt davon unberührt.

### 5. Beispiele geregelter Elektroantriebe für Walzgerüste von gestern, heute und morgen

Der klassische Elektroantrieb für Walzgerüste ist die stromrichtergerieste Gleichstrommaschine. Das Bild 5 zeigt ein Blockschaltbild, ein Oszillogramm zur Drehmomendynamik und eine Zusammenfassung der wichtigsten Kennzeichen bzw. Eigenschaften. Dargestellt ist ein Stromrichtertransformator (1) in "netzfreundlicher" 12-Puls-Schaltung mit zwei in Reihe geschalteten 6-Puls-Umkehrstromrichtern (2, 3). Sie speisen über Schutzschalter (4) und Glättungsdrosselspule (5) die Gleichstrommaschine (6), die für den Vierquadrantenantrieb vorgesehen ist.

Das Oszillogramm des Ankerstromes  $i_d(t)$  eines realen Antriebs /11/, welcher dem Luftspaldrehmoment  $m_l(t)$  proportional ist, zeigt, daß  $m_l(t)$  in 10 ms umgekehrt werden kann. Trotz dieses guten Drehmomentverhaltens werden heute bei Neuanlagen überwiegend Drehfeldmaschinen eingesetzt, weil so die zu geringe Grenzleistung und die Betriebsbeschränkungen durch den Kommutator (z. B. Begrenzung von  $dj_d/dt$ ) eliminiert werden können.

Das Bild 6 zeigt Blockschaltbild, Oszillogramm und Kennzeichen der heute bei Neuanlagen meist eingesetzten Drehfeldmaschinenvariante. Der prinzipielle Aufbau ähnelt dem der Gleichstromvariante. Anstelle der Gleichstrommaschine wird jedoch eine Dreiphasensynchronmaschine (6) vorgesehen. Aus dem Gleichstromankerkreis wird ein Dreiphasenständerkreis mit den Maschinenanschlüßklemmen U, V, W /6/. Die drei notwendigen in Stern geschalteten Umkehrstromrichter (2, 3, 4) (Direktumrichter) liefern jetzt einen symmetrischen Drehstrom an die Drehfeldmaschine im Frequenzbereich von  $20 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 20 \text{ Hz}$  (negative Frequenz entspricht Drehrichtungsumkehr). Die maximale Ausgangsfrequenz von 20 Hz ist prinzipbedingt durch die Netzfrequenz von 50 Hz vorgegeben. Zukünftig ist damit zu rechnen, daß sie durch Weiterentwicklung dieses Antriebstyps auf 50 Hz angehoben werden kann /7/. Das dynamische Drehmomentverhalten beim Umsteuern zeigt das Oszillogramm. Es ist vergleichbar mit dem der Gleichstrommaschine. Allerdings gibt es keine Betriebsbeschränkungen durch den nichtvorhandenen Kommutator.

Eine Zukunftslösung für Walzwerkshauptantriebe, die heute schon bei Hochgeschwindigkeitslokomotiven mit Drehstrom-Asynchron-Fahrmotoren angewendet wird /8/, zeigt das Bild 7. Die Antriebslösung könnte als eine Gleichstrommaschine mit "elektronischem Kommutator" bezeichnet werden. Dieser besteht aus einem 3-Punkt-Pulswechselrichter (6) mit Gate-Turn-Off-Thyristoren, der aus einem Gleichspannungszwischenkreis gespeist wird /6/. Er speist die Drehstromasynchronmaschine (7) mit einer Frequenz  $f_1$  von etwa  $200 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 200 \text{ Hz}$ . Gekennzeichnet ist dieses zukunftsweisende Antriebskonzept durch eine robuste elektrische Maschine (keine Schleifringe wie die Synchronmaschine nach Bild 6) mit hoher Drehzahl- und Drehmomentdynamik. Die bisher kürzeste gemessene Drehmomentumsteuerzeit liegt bei 3,5 ms; sie beträgt also nur ca. 30 % des Wertes der Gleichstrommaschine. Solche Antriebe wären wegen ihrer

schnellen Reaktionszeit zur elektronischen Überlastminimierung und zur aktiven Dämpfung von Torsionsschwingungen im Antriebsstrang hervorragend geeignet. Leider liegt die Grenzleistung derartiger Stromrichter zur Zeit noch bei ca. 5 MVA /10/. Seriemäßig sind sie heute bis 1,8 MVA am Markt verfügbar /9/. Mit einer Markteinführung von Antrieben größerer Leistungen ist wegen der schnell fortschreitenden Entwicklung der leistungselektronischen Bauelemente in einigen Jahren zu rechnen.

### 6. Simulationsbeispiele

Um eine Einschätzung der Wirksamkeit der elektronischen Überlastminimierung beim Einsatz dieser drei verschiedenen Antriebskonzepte vornehmen zu können, sollen zum Schluß noch drei Simulationsbeispiele gezeigt werden, wobei von den Drehmomentumsteuerzeiten TU der vorgestellten Antriebstypen ausgegangen wird. Der Mechanteil des simulierten Modellwalzgerüsts /2/ wird dabei unverändert gelassen. Die Überlasterkennungszeit beträgt  $T_1 = 15 \text{ ms}$ . Die Stromgrenze des Stromrichterausgangstromes wird auf den 1,5- /12/ und 2,5-fachen Nennwert eingestellt. Die unterschiedliche Dynamik der Antriebe kann durch Variation der Maschinenendaten nachgebildet werden. Die Tabelle zeigt, daß das Maximum des Wellendrehmomentes  $m_{12}$  (Bild 2) in Abhängigkeit von der möglichen Antriebsüberlastung auf 50 % ( $m_{1\text{Max}}/M_{N1} = 1,5$ ) bzw. 35 % ( $m_{1\text{Max}}/M_{N1} = 2,5$ ) gesenkt werden kann. Die Umsteuerzeit TU hat hier keinen Einfluß, weil die Eigenfrequenzen des mechanischen Systems mit  $f_1 = 10,9 \text{ Hz}$  und  $f_2 = 28,5 \text{ Hz}$  vergleichsweise niedrig liegen. Erst wenn diese im Bereich der 20 ... 50 Hz angesiedelt sind, welches heute bei Neuanlagen angestrebt wird, können die kürzeren Umsteuerzeiten der stromrichtergespeisten Drehfeldmaschinen zur Wirkung kommen.

### 7. Ausblick

Die hier gezeigten Simulationsbeispiele sind ein Ergebnis der seit einem Jahr laufenden Forschungsarbeiten. Aufbauend auf diesen ermutigenden Resultaten werden sich Arbeiten zur Realisierung des LEF-Beobachters und eine Erprobung auf einem 30 kW-Prüfstand anschließen. Hierbei werden u. a. Konzepte zur direkten Wellendrehmomentregelung mit dem Ziel untersucht, die Torsionsschwingungen im Antriebsstrang aktiv auf elektronischem Wege zu bedämpfen, um so die Lastkollektive in den Betriebs- und Störfällen zu minimieren.

8. Literatur

- /1/ Zenner, H. Leichtbau und Betriebslasten, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung, Berlin 1991, S. 183 ff
- /2/ Sitzmann, G. Simulation eines Anlagenüberwachungssystems zur aktiven Überlastsicherung mit Matrix, ASIM 91, 7. Symposium, Hagen 1991, Vieweg Verlag
- /3/ Sitzmann, G. Ermittlung der Lasteingangsfunktionen durch dynamische Systemanalyse eines Walzgerüstes und einer Gutbettwalzenmühle TU Clausthal, Diss., 1990
- /4/ Seinsch Pittius Orłowski Stoßdrehmomente im Wellenstrang von Großantrieben, etz Bd. 111, 1990, H. 6, S. 286 ff
- /5/ Peeken, H. Eispaf, A. Instationäre Kupplungsbelastung durch Drehmomentstöße von Elektromotoren, Antriebstechnik 27, 1988, S.62 ff
- /6/ Meyer, M. Leistungselektronik, Einführung, Grundlagen, Überblick Springer Verlag, 1990
- /7/ Hussels, P. Mehne, M. Synthesis of cycloconverter and current-source-inverter for high power high performance drive Archiv für Elektrotechnik 74 (1990), S.25 ff
- /8/ Baader, U. Hodapp, J. Für die Hochleistungs-traktion optimierte Regelung der Induktionsmaschine, eb 3/91, S.73 ff
- /9/ Hyvärinen, U. Mäkinen, J. P. Digital Drive Systems For Variabel Speed AC Motors Intelligent Motion, PCIM Europe 11/12, 1990
- /10/ Beck, H.-P. Putz, V. Tados, V. High Power Inverter with GTO-Thyristors ETG-Fachtagsberichte, Konferenz 6/1988
- /11/ Langhoff, J. Raatz, E. Geregelte Gleichstromantriebe, AEG-Telefunken-Handbuch Bd. 19, Eilitera 1977
- /12/ VDE / DIN 530 Umlaufende elektrische Maschinen, Teil 1, Juli 1991, S. 26 f
- /13/ Guericke, W. König, B. Riefenstahl, U. Dynamische Belastung von Walzmaschinen und Möglichkeiten ihres Schutzes vor Überlastungen Neue Hütte, Februar 1984
- /14/ Schäfer, P. Jud, W. Simulation gemischter diskret-kontinuierlicher Systeme mit Standard-Simulationssystemen, Tagungsband: Fortschritte in der Simulationstechnik, Vieweg Verlag, September 1991

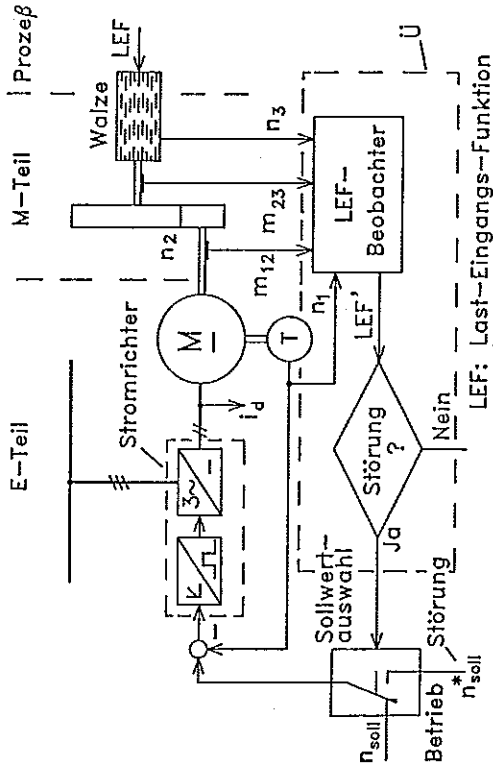


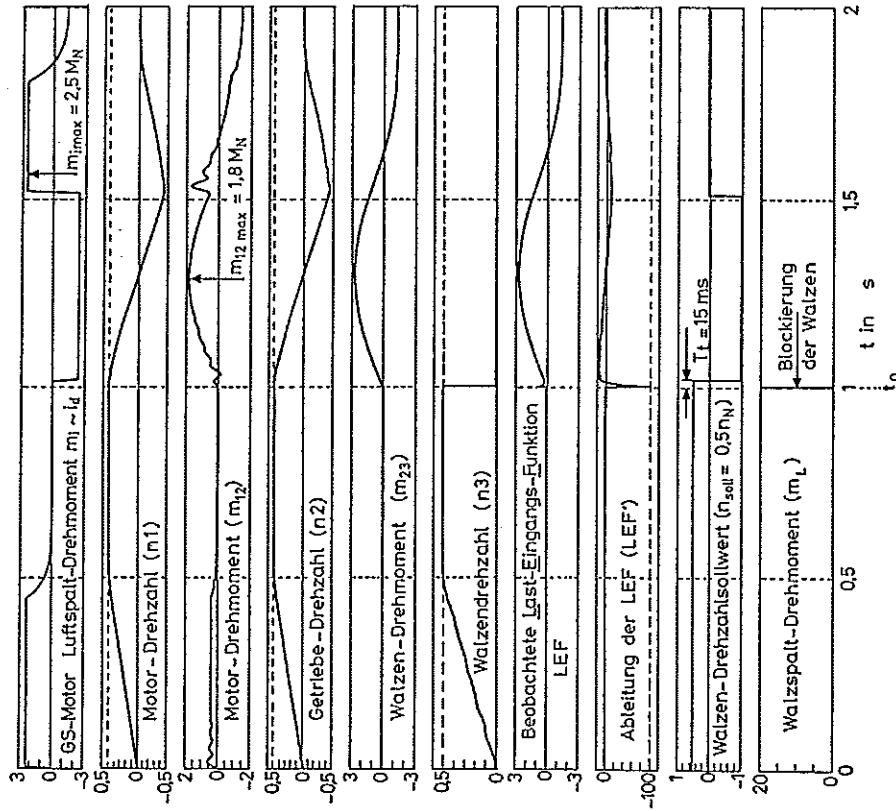
Bild 1 Prinzipbild eines stromrichter-gespeisten Gleichstromantriebes mit angekuppeltem 3-Massen-Schwinger mit Überlast-Überwachungseinrichtung (Ü)

	Umkehrstromrichter mit Gleichstrommaschine		Direktumrichter mit Synchronmaschine		Pulswechseleinrichter mit Asynchronmaschine	
	12ms	20ms	6ms	10ms	2ms	3,3ms
Umsteuerzeit( $T_U$ )	12ms	20ms	6ms	10ms	2ms	3,3ms
Luftspalt-Drehmoment Maximum( $M_{1,max}$ )	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5
Motor-Drehmoment-Maximum ( $M_{12,max}$ )	2,6	1,8	2,6	1,8	2,6	1,8

Alle Drehmomente sind auf den Nennwert bezogen.

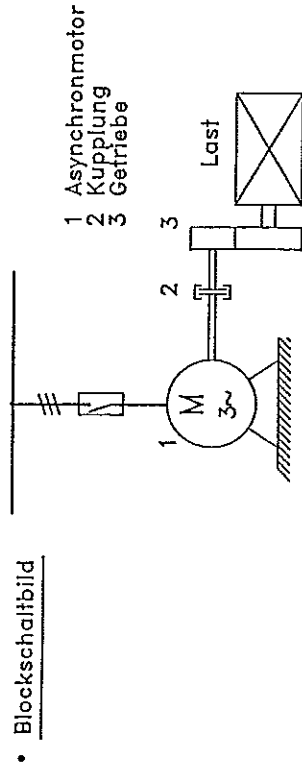
Tabelle

Vergleich der Wirksamkeit der elektronischen Überlastminderung bei verschiedenen Gleich- und Drehstrom-Antriebstypen (Überlasterkennungszeit  $t_1 = 15ms$ ,  $n_{soil} = 0,5n_N$  Eigenfrequenzen des mechan. Systems  $f_1 = 10,9Hz$ ,  $f_2 = 28,5Hz$ )



Alle Drehmomente und Drehzahlen sind auf die Nennwerte  $M_N$  und  $n_N$  bezogen.

Bild 2 Simulation des dynamischen Verhaltens bei Walzenblockierung mit Einleitung der Gegenmaßnahme (Umschalten  $n_{soll} \rightarrow n_{soll}^* = -n_{soll}$ ) nach  $T_t = 15\text{ms}$  ( $I_{d\text{max}} = 2,5 I_{dN}$ ,  $T_J = 10\text{ms}$ )



• Feder-Massen-Ersatzschaltbild

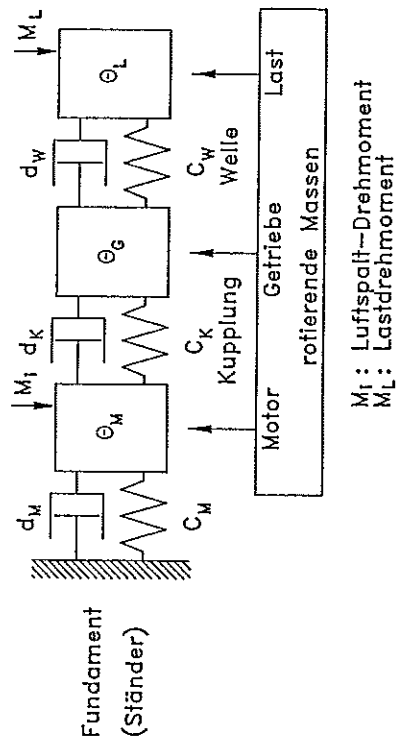


Bild 3 Modellbildung zur Simulation eines Antriebssystems mit Drehstrommotor am starren Netz

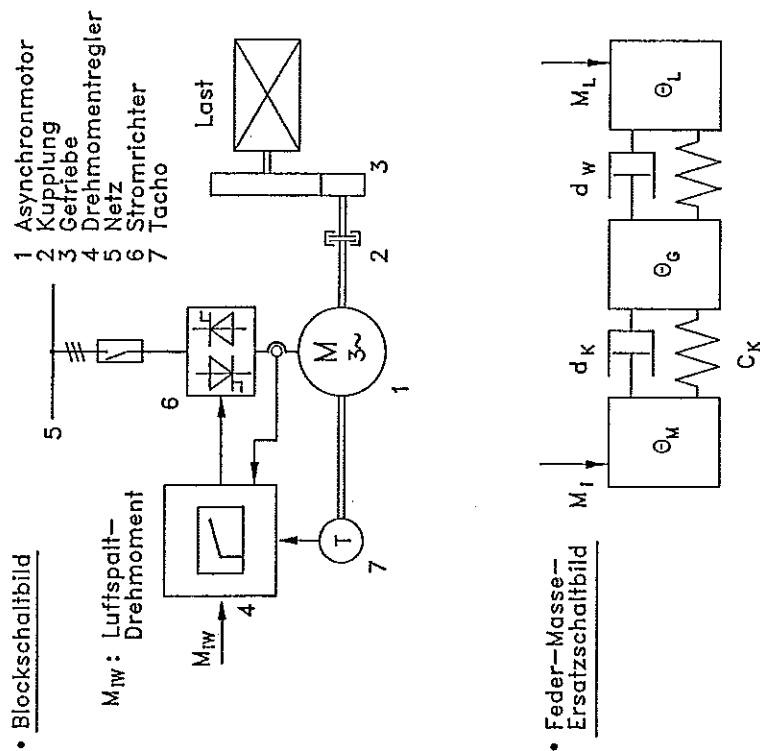


Bild 4 Modellbildung zur Simulation eines Antriebssystems mit stromrichtergespeistem Elektromotor

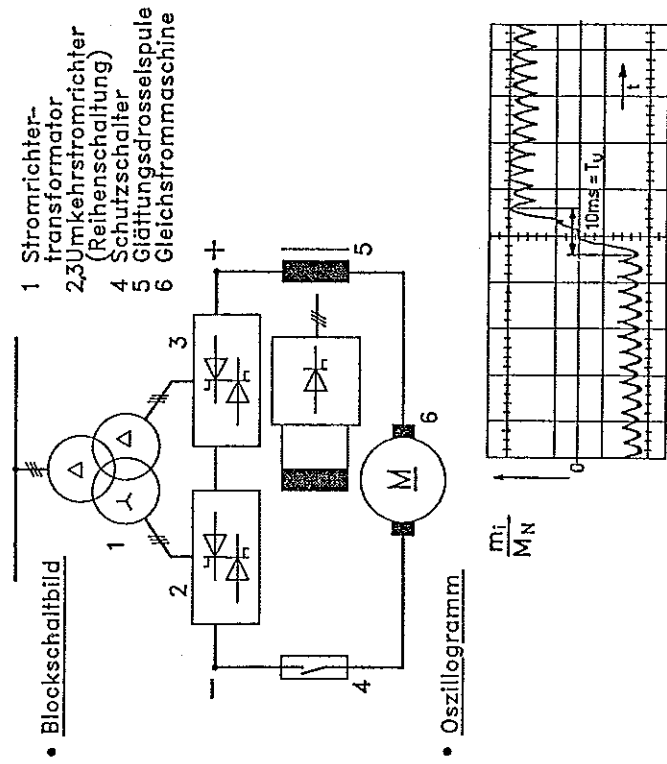


Bild 5 Konventionelle Antriebslösung für Hauptantriebe; Gleichstrommaschine mit Umkehrstromrichter



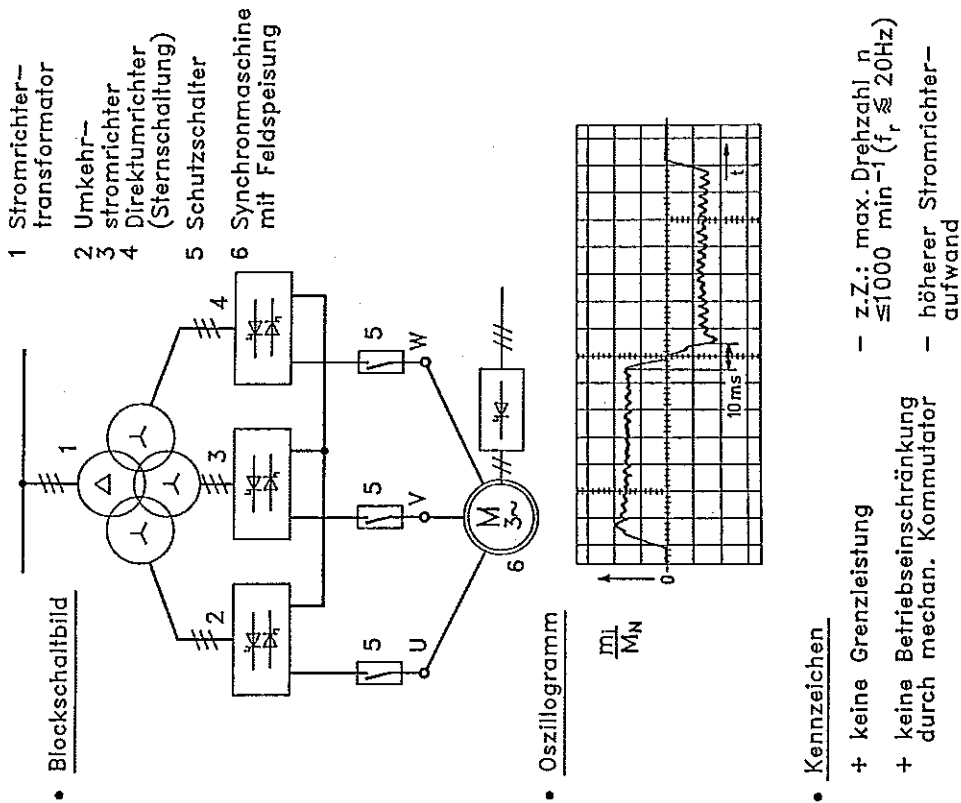


Bild 6 Moderne Antriebslösung für Hauptantriebe; Synchronmaschine mit Direktumrichter

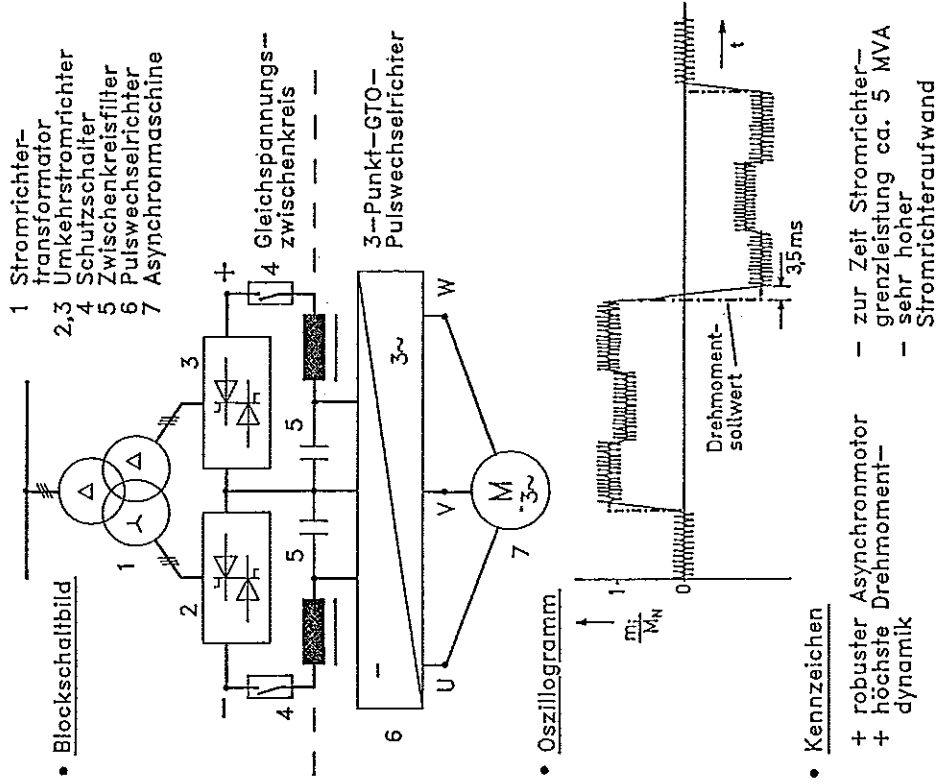
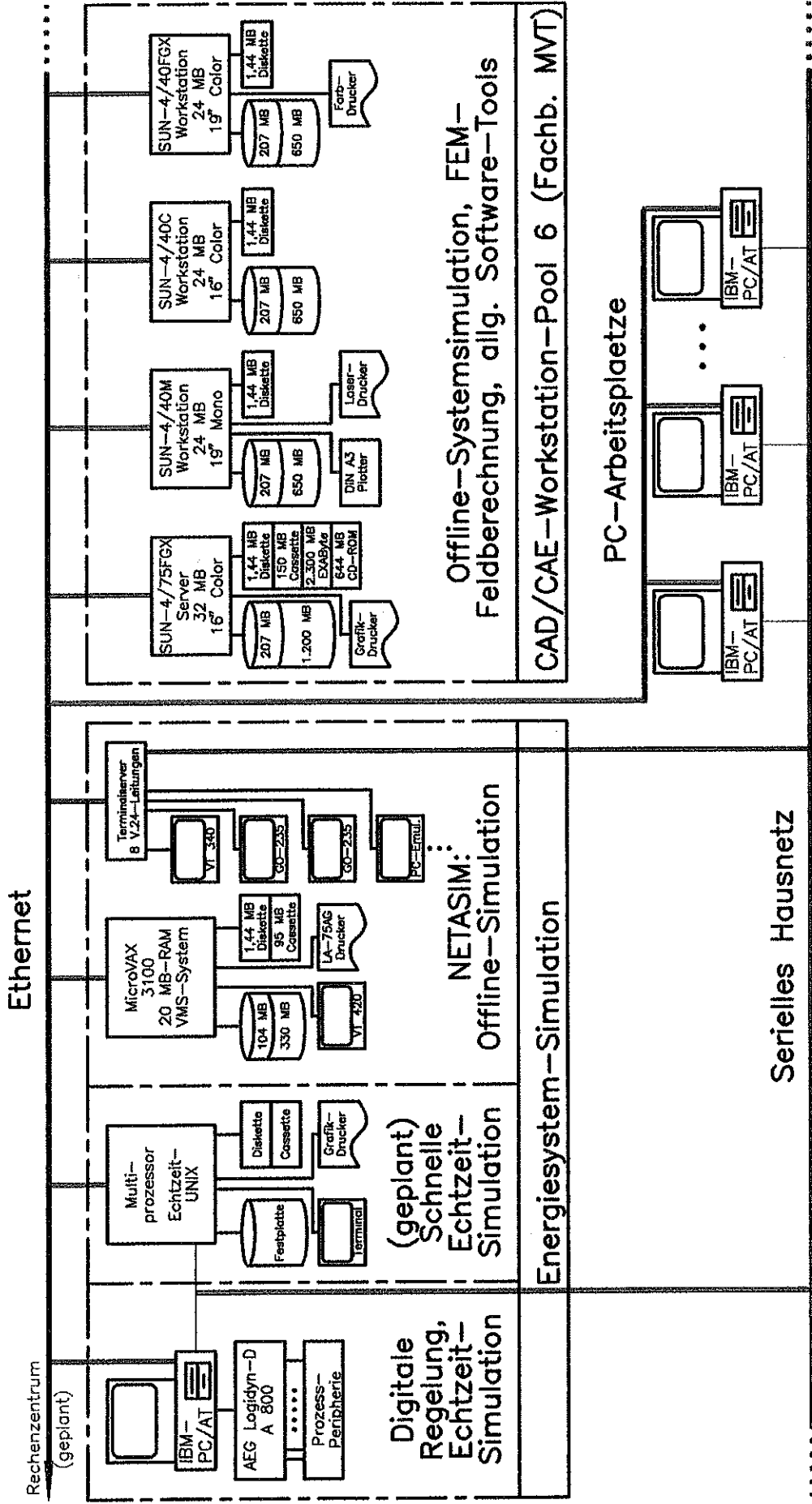


Bild 7 Mögliche Zukunftslösung für Hauptantriebe; Asynchronmaschine mit 3-Punkt-GTO-Wechselrichter



Offline-Systemsimulation, FEM-  
Feldberechnung, allg. Software-Tools

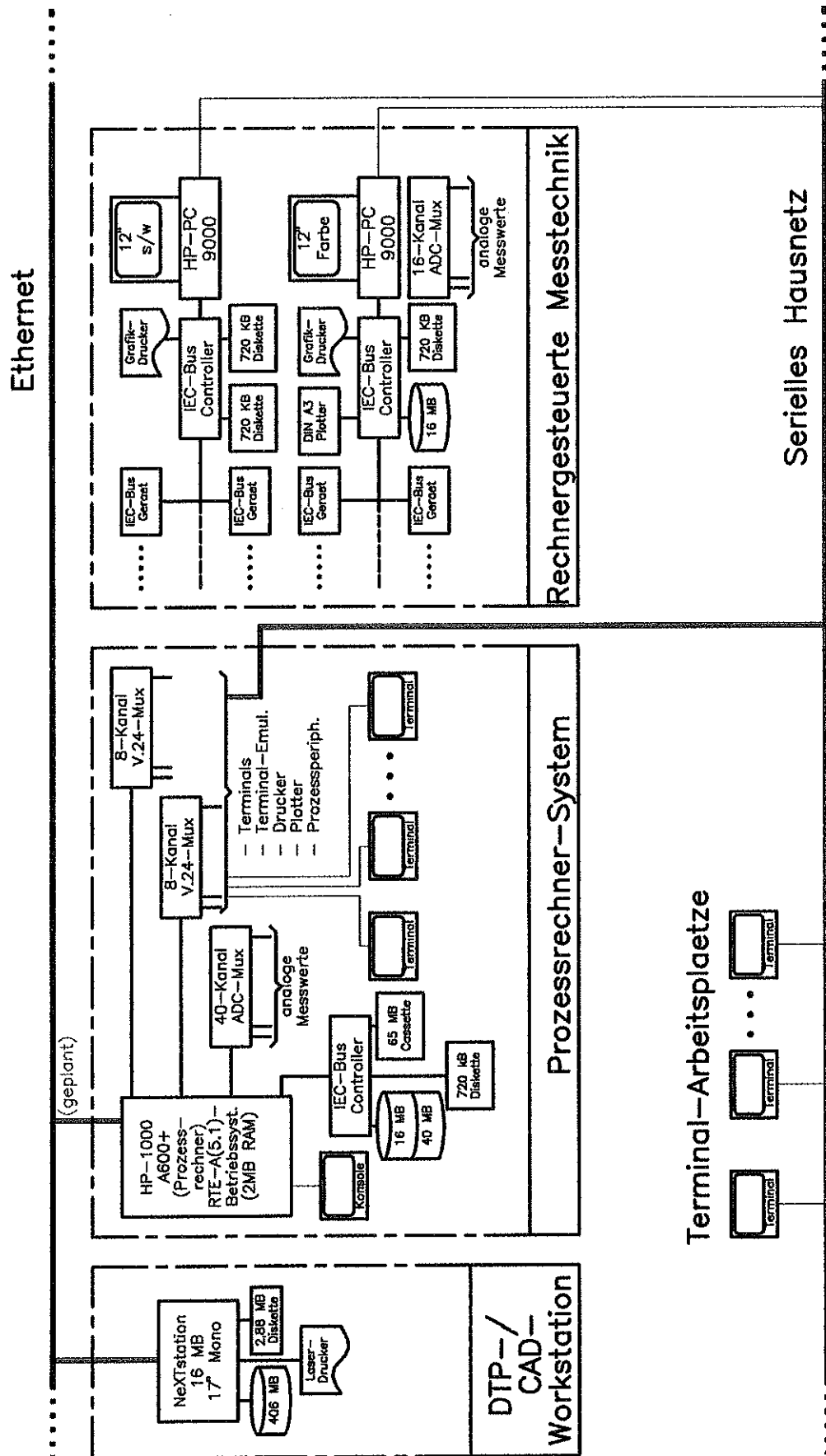
(geplant)  
Schnelle  
Echtzeit-  
Simulation

NETASIM:  
Offline-Simulation

Digitale  
Regelung,  
Echtzeit-  
Simulation

Energiesystem-Simulation

Recherausstattung zur Simulation von Energiesystemen



Rechnerausstattung zur Mess- und Regelungstechnik im Prüffeld



- |  |                          |
|--|--------------------------|
| ● Verfügbare Gebäudefläche<br>(Leibnizstraße 28)                   | <u>1620m<sup>2</sup></u> |
| – Bürofläche   | 826m <sup>2</sup>        |
| (einschl. verliehener Fläche)                                      | (220m <sup>2</sup> )     |
| – Labor-/Prüffeldfläche  | 794m <sup>2</sup>        |
| ● Mitarbeiter  |                          |
| – wissenschaftliches Personal                                      | 12                       |
| – techn.-/Verwaltungspersonal                                      | 9                        |
| – Lehrbeauftragte/Gastwissenschaftler                              | 5                        |
| – wissenschaftliche Hilfskräfte                                    | 14                       |
|  | <u>Σ 40</u>              |
| ● Prüffeld mit   |                          |
| – Maschinen-/Antriebslabor   |                          |
| – Energieelektroniklabor   |                          |
| – Hochspannungs-/Energieanlagenlabor                               |                          |
| – Meßdatenverarbeitungslabor (HP 1000)                             |                          |
| ● Mechanik-/Elektrotechnik-/Elektronik-<br>werkstatt               |                          |
| ● Prozeßrechner-/Simulationstechniklabor<br>(MicroVAX, SUN 4, PCs) |                          |