



## **Jahresbericht 2001**

	Seite
Vorwort	3
1 Personelle Besetzung	5
2 Lehre	7
2.1 Vorlesungen, Übungen, Praktika	7
2.2 Exkursionen	15
2.3 Diplomarbeiten	15
2.4 Studienarbeiten	16
3 Forschung	17
3.1 Kurzberichte aus laufenden Forschungsarbeiten	17
3.2 Dissertationen	43
3.3 Veröffentlichungen und Vorträge	51
4 Externe Aktivitäten und Kontakte	57
4.1 Teilnahme an Fachtagungen und Kolloquien	57
4.2 Veranstaltungen des Instituts	59
4.3 Weiterbildung	61
4.4 Mitarbeit in Gremien	61
5 Prüf-, Meß- und Labortechnik des Instituts	63

Postanschrift:  
Technische Universität Dresden  
Institut für Elektrische Energieversorgung  
und Hochspannungstechnik  
01062 Dresden

Besucheranschrift:  
Mommsenstraße 10  
Binderbau  
01069 Dresden

Telefon: (03 51) 4 63-3 43 74/-3 34 28  
Telefax: (03 51) 4 63-3 70 36/-3 71 57  
e-mail: [ihh@ehhn1.et.tu-dresden.de](mailto:ihh@ehhn1.et.tu-dresden.de)  
Internet: <http://www.tu-dresden.de/etieeh/>

Sehr geehrte Freunde  
des Instituts für Hochspannungs- und Hochstromtechnik  
und des Instituts für Elektroenergieversorgung,

mit diesem Bericht möchten wir Ihnen wieder einen Überblick über die Aktivitäten und einen Einblick in die Ereignisse des vergangenen Jahres bieten.

Das Jahr 2001 war durch organisatorische Veränderungen geprägt. Herr Kollege Prof. Dr.-Ing. Kindersberger, bisher Direktor des Instituts für Hochspannungs- und Hochstromtechnik, hat im September einen Ruf an die TU München angenommen. Einerseits sind wir natürlich stolz, dass einer der Kollegen einen solchen Ruf erhalten hat, andererseits reißt der Weggang eines Kollegen immer eine nur schwer zu schließende Lücke. Wir möchten uns an dieser Stelle bei Herrn Prof. Kindersberger nochmals für die geleistete Arbeit herzlich bedanken und hoffen auch in Zukunft das eine oder andere Projekt gemeinsam mit ihm bearbeiten zu können.

Eine ausführliche Diskussion in der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik zur zukünftigen Struktur der Fakultät führte dazu, dass die Institute für Elektroenergieversorgung und für Hochspannungs- und Hochstromtechnik seit November 2001 zu einem Institut unter dem Namen „Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik“ zusammengefasst wurden. Zu diesem neuen Institut gehören die Professuren für Hochspannungs- und Hochstromtechnik und für Elektroenergieversorgung. Wir hoffen, dass mit der Ausschreibung der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik im ersten Quartal des Jahres 2002 begonnen werden kann. Kurz- und mittelfristig stehen durch diesen Zusammenschluss noch eine Reihe von Veränderungen an, wie z. B. der Umzug des ehemaligen Institutes für Elektroenergieversorgung in den Toepler-Bau.

Im folgenden möchte ich noch auf einige besondere Ereignisse des vergangenen Jahres entsprechend der zeitlichen Reihenfolge hinweisen.

Der Dresdner Kreis, dies ist ein Treffen von Energieversorgungslehrstühlen, die eine enge Bindung mit Dresden haben, fand in diesem Jahr in Duisburg bei Herrn Kollegen Prof. Dr.-Ing. habil. Erlich statt. Die Mischung aus wissenschaftlichen Vorträgen und informellen Gesprächen wurde von allen als gute Basis für die weitere Zusammenarbeit empfunden.

Im Oktober wurde das 8. Assistententreffen der Hochspannungs- und Hochstromtechnik mit großem Erfolg durchgeführt. Über 200 Personen nahmen an dieser Veranstaltung teil. Das letzte Treffen dieser Art lag sieben Jahre zurück.

Darüber hinaus möchte ich noch auf zwei Tagungen hinweisen, die von Mitarbeitern des Institutes organisiert wurden.

An der 21. Niederspannungs-Fachtagung nahmen ca. 350 Personen teil. Diese Tagung wurde gemeinsam mit dem VDE-Bezirkverein Dresden veranstaltet.

Die 4. Fachtagung „Arbeiten unter Spannung“ war eine Veranstaltung gemeinsam mit der Energietechnischen Gesellschaft im VDE. Mit über 180 Teilnehmern aus Deutschland und Europa war diese Tagung wieder sehr erfolgreich.

Wie in jedem Jahr, möchte ich Ihnen auch einige Informationen zur Entwicklung der Studentenzahlen geben. Für das erste Semester des Studiengangs Elektrotechnik haben sich für das laufende Wintersemester 220 Studierende eingeschrieben. Erstmals bietet die TU Dresden ab dem Wintersemester 2001/2002 den neuen Studiengang „Mechatronik“ an, der zu gleichen Teilen von der Fakultät Maschinenwesen, der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ und der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik getragen wird. Für diesen Studiengang wurden 110 Studierende immatrikuliert. In den seit letztem Wintersemester angebotenen Studiengang „Informationssystemtechnik“ haben sich 140 Studierende eingetragen. Die Zahl der aus dem Ausland für das internationale Master-Studium eingeschriebenen Studenten ist auf 59 angestiegen.

Die Anzahl der Studierenden, die sich für die Studienrichtung Elektroenergie-technik entschieden hat, hat sich ebenfalls erhöht. Die gesamte Entwicklung kann als sehr positiv gewertet werden. Jedoch führt der deutliche Mangel an Absolventen bereits zu erheblichen Problemen bei der Sicherung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Es bleibt zu hoffen, dass sich die aufgezeigte Trendwende auch in Zukunft weiter fortsetzen wird.

Ich nehme diesen Jahresbericht zum Anlass, allen Mitarbeitern des Institutes für ihre tatkräftige Mitarbeit im vergangenen Jahr zu danken.

Abschließend danke ich allen unseren Forschungspartnern für ihre großzügige Unterstützung und hoffe, dass sie auch weiterhin unsere wissenschaftliche Arbeit fördern.

Ich hoffe, dass dieser Jahresbericht dazu beiträgt, die bestehenden Zusammenarbeiten auszubauen und Ansätze für neue Kooperationen zu schaffen.

Dresden, im Dezember 2001

Prof. Dr.-Ing. P. Schegner  
Direktor des Institutes für  
Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik

# 1 Personelle Besetzung

		Tel.-Nr.
Institutsdirektor	Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner	34374
	Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger (bis 31.08.01)	33428
Emeriti	Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Eberhardt	
	Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Pundt	34574
	Prof. Dr.-Ing. habil. Gert Winkler	35088
Sekretariate	Regina Scharf	34374/33428
	Lianne Domaschke (bis 15.10.01)	35054
Wiss. Mitarbeiter	Doz. Dr.-Ing. Hartmut Bauer	35104
	Dr.-Ing. Eberhard Engelmann (Laborleiter)	33103
	Dr.-Ing. Karl-Heinz Freytag	33413
	PD Dr.-Ing. habil. Helmut Löbl	32138
	Dr.-Ing. Franz Mach	35336
	Dr.-Ing. Joachim Speck	33105
	Dipl.-Ing. Thoralf Bohn	35353
	Dipl.-Ing. Christoph Gramsch (ab 01.12.01)	33080
	Dipl.-Ing. Przemyslaw Janik (ab 01.02.01)	32941
	Dipl.-Ing. Zoltan Kasztel	35365
	Dr.-Ing. Zbigniew Leonowicz (ab 01.11.01)	35272
	Dipl.-Ing. Rainer Luxenburger	35223
	Dipl.-Ing. Tomasz Magier (ab 01.11.01)	33005
	Dipl.-Ing. Jan Meyer	35102
	Dipl.-Ing. Ralph Pauer	34789
	Dipl.-Ing. Georg Pilz	35272
	Dipl.-Ing. Mario Schenk	33080
	Dr.-Ing. Helmut Scholz (Mitarb. auf Honorarbasis)	33080
	Dipl.-Ing. Stephan Schoft	34756
	Dipl.-Ing. Olaf Seifert	34142
Dipl.-Ing. Alexander Winter	34756	
Kollegiaten	Dipl.-Ing. Gerit Eberl	35365
	Dipl.-Ing. Matthias Hable	32941
	Dr.-Ing. Waclawek (ab 01.09.01)	32941

Techn. Angestellte	Dipl.-Ing. (FH) Axel Göres	32613
	Margitta Händel	35329
	Dipl.-Ing. Rainer Luther	35222
	Monika Markow	32214
	Rotraud Riester	33202
Werkstatt	Ralf Dittrich	34745
	Michael Gläser	34260
	Rudolf Gräfe	33729
	Gerd Jaroszcinsky	34745
	Helge Knüpfel	34260
	Peter Wermuth	33516
	Falk Wolf	33729
Aspirant	Dipl.-Ing. A.-H. Mostafa El-Sayed Ahmed	35223

## **2 Lehre**

### **2.1 Vorlesungen, Übungen, Praktika**

#### **Hochspannungstechnik 1**

**Prof. Dr.-Ing. J. Kindersberger;**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Dr.-Ing. J. Speck**

V 2, Ü 1, P 2 (WS/SS)

Spannungsbelastung von Hochspannungsisolierungen; Hochspannungsprüfanlagen; analytische und numerische Berechnung elektrostatischer Felder; elektrisches Feld in Mehrstoffdielektrika und Mehrelektrodenanordnungen; elektrische Leitfähigkeit und Polarisierung; Durchschlag von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen; Überschlag an Isolierstoffoberflächen

#### **Hochspannungstechnik 2**

**Prof. Dr.-Ing. J. Kindersberger; Prof. Dr.-Ing. P. Schegner**

V 2, Ü1, P 1 (SS/WS)

Gasentladungsvorgänge; Teilentladungen; Wanderwellen; äußere Überspannungen (Blitzentladung, Schutzrichtungen); Lichtbogen; Leistungsschalter; Prüfung von Leistungsschaltern; gasisolierte Schaltanlagen

#### **Hochspannungs-Isoliertechnik**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Dr.-Ing. E. Engelmann**

V 2 (WS)

Isoliervermögen aus statistischer Sicht; Eigenschaften und Prüfung von Isolierstoffen; gasförmige, flüssige und feste Isolierstoffe; Hochspannungsisolatoren; Kabelisolierungen; Maschinenisolierungen; Alterung von Isolierstoffen und Isolierungen

## **Hochspannungstechnik**

für Wirtschafts- und Verkehrsingenieure

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Dr.-Ing. J. Speck**

V 2, Ü 1, P 1 (WS)

Hochspannungsprüfanlagen; elektrisches Feld in Einstoff- und Mehrstoffsystemen; elektrische Leitfähigkeit, Polarisation und dielektrische Verluste; Durchschlag von gasförmigen, flüssigen und festen Isolierstoffen; Teilentladungen und Alterung von Isolierstoffen; Lichtbogen und Schalten hoher Ströme; stromtragende Verbindungen; Alterung von Verbindungen und Zustandsdiagnose; thermische und mechanische Stromtragfähigkeit von Betriebsmitteln

## **Hochstromtechnik**

**Privatdozent Dr.-Ing. habil. H. Löbl**

V 2, Ü 1, P 1 (WS)

Strombelastbarkeit und thermische Beanspruchung von Hochspannungsgeräten; mechanische Beanspruchung und Festigkeit von Stromleitanordnungen; elektrische Kontakte; Optimierung der Strombahn; Prüfung der Dauerstromtragfähigkeit; Störlichtbogen

## **Hochspannungsgeräte**

**Privatdozent Dr.-Ing. habil. H. Löbl**

V 2, P 1 (SS)

Ruhende Kontakte und deren Langzeitverhalten; Erwärmungsberechnung mit Wärmenetzen (Wärmequellen, Wärmewiderstände); Prüfung der Stromtragfähigkeit; Einfluß der Strombelastung auf das Isoliervermögen (thermomechanische Spannungen in festen Isolierstoffen, thermische Grenzschichtprobleme bei gasförmigen Isolierstoffen)



## **Hochspannungs-Prüf- und Meßtechnik**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Dr.-Ing. E. Engelmann**

V 2, P 1 (WS)

Grundlagen der Impulsmeßtechnik; Messung hoher Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen; Messung hoher Stoßströme; Feldsonden; Kalibrierung von Hochspannungsmeßsystemen; Teilentladungsmeßtechnik; elektromagnetische Verträglichkeit von Hochspannungsmeßsystemen

## **Blitzschutztechnik**

**Prof. Dr.-Ing. J. Kindersberger / Dr.-Ing. E. Engelmann**

V 1 (SS)

Räumlich-zeitliche Entwicklung der Blizentladung; Blitzstromparameter; elektromagnetische und thermische Wirkungen des Blitzstromes; Schutzraumtheorie; Blitzschutzklassen und Schutzzonenkonzept; Schutz vor direkten Blitzeinschlägen; Begrenzung der elektromagnetischen Beeinflussung

## **Elektronische Gerätetechnik / Thermische Dimensionierung**

**Privatdozent Dr.-Ing. habil. H. Löbl**

Diese Vorlesung wird gemeinsam von Herrn Prof. K.-J. Wolter, Frau Dr. I. Witte und PD Dr. H. Löbl gehalten.

V 2 (WS)

Thermische Dimensionierung elektronischer Geräte; Grundlagen der Wärmeübertragung (Leitung, Strahlung, Konvektion, Kühlmittelströmung); spezielle Elemente zur Wärmeübertragung (Kühlkörper, Heat-Pipe, Peltier-Element, Lüfter, Wärmekontaktelemente); Wärmenetzmethode zur Berechnung der Erwärmung und Kühlung

## **Statistik für Elektrotechniker**

**Prof. Dr.-Ing. J. Kindersberger / Dr.-Ing. J. Speck**

V 2, P 1 (SS)

Zufallsgrößen und Verteilungsfunktionen; Punkt- und Konfidenzschätzungen der Verteilungsparameter; statistische Testverfahren; Korrelation und Regression; spezielle Versuchsprozeduren und deren Auswertung; statistische Versuchsplanung; Vergrößerungsgesetz

## **Elektroenergietechnik**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner**

V 2, Ü 1, P 1 (WS/SS)

Struktur der Elektroenergieversorgung in Deutschland; Grundlagen der Auslegung von Betriebsmitteln und Systemen; Koordination von Beanspruchung und Festigkeit am Beispiel von Hochspannungsisolierungen; Grundlagen der Teilentladungsvorgänge; Elektrosicherheit und Schutzmaßnahmen; Grundlagen der Drehstromerzeugung und Drehstromtechnik; Aufbau und Wirkungsweise von Drehfeldmaschinen und Gleichstrommaschinen; Grundsaltungen der Leistungselektronik

## **Elektroenergiesysteme**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner**

V 3, Ü 2, P 1 (WS)

Übersicht zum Elektroenergiesystem; spezielle Berechnungsgrundlagen; Aufbau, Parameter und Betriebsverhalten von Freileitungen, Kabeln, Generatoren, Transformatoren, Drosselpulen und Kondensatoren; Übertragungsverhältnisse auf Leitungen und in Ringnetzen; Kurzschlußstromberechnung; Sternpunktbehandlung und Störungsgeschehen; Beeinflussungsprobleme

## **Netzberechnung**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner**

V 2, Ü 2 (WS)

Knotenpunktverfahren; Maschenverfahren; Lösung großer algebraischer Gleichungssysteme; Nachbildung von Fehlerzuständen; Kurzschlußstromberechnung für symmetrische und unsymmetrische Fehler; Lastflußberechnung mittels Knotenpunkt- und Newton-Raphson-Verfahren; statische und transiente Stabilität

## **Elektroenergieanlagen**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Prof. Dr.-Ing. habil. G. Winkler**

V 2, Ü 1 (SS)

Aufgaben und Aufbau von Elektroenergieanlagen; Bemessungsgrundsätze; Arten und Löschrinzipien der Schaltgeräte; Kenngrößen und Grundschaltungen der Schaltanlagen; Gestaltung von Abgangs-, Kupplungs- und Meßfeldern; Bauformen von Freiluftschaltanlagen und gasisolierten Schaltanlagen; Ausführung von Umspannwerken und Stationen; mechanisch-dynamische und thermische Festigkeit; Verfahren der Isolationskoordination; Schalthandlungen in Elektroenergieanlagen; Bemessung von Kabel- und Freileitungsanlagen; Anforderungen und Gestaltung von Erdungsanlagen; Hilfsenergieanlagen; Havarie-, Schaltfehler- und Umweltschutz

## **Netzbetrieb**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Prof. Dr.-Ing. habil. G. Winkler**

V 2, P 1 (WS/SS)

Systemzustände und -vorgänge; Oberschwingungen; Unsymmetrien; Anlagenbemessung; stationärer Systemzustand; Elektroenergiequalität; zeitweilige Spannungs- und Stromüberhöhungen; zeitweilige Resonanzüberspannungen und -ströme; transiente Überspannungen und Überströme; Blitzüberspannungen; Spannungs- und Strombegrenzungsmaßnahmen; Beeinflussung; Frequenz-Wirkleistungsregelung; Spannungs-Blindleistungsregelung; Nullimpedanzregelung; Störungs- und Schadensanalyse

## **Rationelle Energieanwendung**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Prof. Dr.-Ing. habil. G. Winkler**

V 2 (SS)

Wirtschaftlicher Elektroenergieeinsatz in Industrie, Gewerbe, Handel, Landwirtschaft und Haushalt; Energievorräte und -strukturen; Verfahren zur Elektroenergieerzeugung; Sekundärenergienutzung; Wärmerückgewinnungssysteme; Wärmepumpen; Regenerative Energien; Prozeßanalysen bei der Elektroenergieanwendung; Blindleistungsminimierung und Netzverluste; Elektroenergiemeßeinrichtungen; Technik zur Überwachung und Beeinflussung des Belastungsganges; Tarifmodelle und Tarifstrukturen

## **Elektroenergieversorgung**

für Wirtschaftsingenieure und Lehramt an berufsbildenden Schulen

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Prof. Dr.-Ing. habil. G. Winkler**

V 2, Ü 1, P 1 (WS)

Grundlagen der Elektroenergiewirtschaft; spezielle Berechnungsverfahren in Drehstromsystemen; Ersatzschaltbilder von Betriebsmitteln; Verhalten von Generatoren; Verbraucherstrukturen; Aufbau und Wirkungsweise von Transformatoren, Freileitungen und Leistungskabeln; Isolierungen und Isolatoren; elektrische Beanspruchung und Festigkeit; Ausführung von Schaltgeräten; Aufbau von Schaltanlagen; Durchführung von Schalthandlungen; Schaltung von Kraftwerkseigenbedarfsanlagen; Berechnung von Lastflüssen und Kurzschlußströmen; Kompensation und Auswirkungen von Blindströmen; Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag

## **Netzschutz- und Leittechnik**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Doz. Dr.-Ing. H. Bauer**

V 3, Ü 1, P 1 (SS)

Betriebs- und Fehlervorgänge im Elektroenergiesystem; Analyse von Funktionsinhalten; Anforderungen an Genauigkeit und Selektivität, Reaktionszeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit; Meßwerterfassung und Verarbeitung; Schutzkriterien; Konzeption des Objektschutzes; Reserveschutz; Schaltfehlerschutz; Diagnose; Bedienoberflächen; Software-Qualitätssicherung; EMV-Störgrößen und -Modelle; Störwege und Barrieren; Lichtwellenleitereinsatz; Hilfsenergieversorgung; Parametrierung; Datenspeicherung

## **Zuverlässigkeits- und Sicherheitsberechnung**

**Doz. Dr.-Ing. H. Bauer**

V 1, Ü 1 (SS)

Anlagen- und Versorgungszuverlässigkeit; Kenngrößen und Funktionen; Ersatzschaltungen; Fehlerbäume; Wege- und Schnittmethoden; Markoffsche Modelle; Monte-Carlo-Simulation; Sicherheit und Risiko; Gefährdungsmodelle; Sicherheits- und Vorsorgegrenzwerte

## **Elektrische und magnetische Felder in der Nähe von Elektroenergieanlagen**

Studium generale und Dresdner Bürger-Universität

**Doz. Dr.-Ing. H. Bauer**

V 1, P 1 (SS)

Akzeptanzprobleme: „Elektrosmog“; „Elektroallergie“; „Elektrophobie“; Rechnerische Feldstärkeabschätzung für unterschiedliche Leiteranordnungen; Numerische Feldberechnung für Freileitungen; Hochspannungs-Schaltanlagen und Transformatorstationen am PC (mit Übung); Einfluß von Häusern und Bäumen; Messung elektrischer und magnetischer Felder unter Freileitungen und in Schaltanlagen (mit Exkursion); Biologische Wirkungen und Ergebnisse epidemiologischer Studien; Technische Wirkungen; Störbeeinflussung; Maßnahmen zur Feldreduzierung und EMV

## **Erzeugung, Übertragung und Verteilung von Elektroenergie**

Studium generale und Dresdner Bürger-Universität

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Doz. Dr.-Ing. H. Bauer /**

**Dr.-Ing. K.-H. Freytag**

V 2 (SS)

Grundlagen der Elektroenergiewirtschaft; Elektroenergieversorgungssysteme und elektrischer Verbund; Besonderheiten elektrischer Betriebsmittel; Berechnungsgrundlagen für Normalbetrieb und Fehlerzustände; Ursachen und Maximalwerte für Überspannungen und Fehlerströme; Bemessungsgrundlagen; Digitale Schutz- und Leittechnik; Regenerative Energiequellen und rationelle Energieanwendung; Schutz gegen elektrischen Schlag

## **Elektroenergieversorgung**

für Wirtschaftsingenieurwesen

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Prof. Dr.-Ing. habil. G. Winkler**

V 2, P 1 (WS)

Überblick über die Elemente der Elektroenergieversorgung, die Berechnung deren elektrischer Parameter sowie deren Betriebsverhalten als Grundlage zur Beurteilung des Gesamtsystems der Elektroenergieversorgung; Berechnung der Übertragungsverhältnisse auf Drehstromleitungen; Übersicht über Sternpunktbehandlungs- und Fehlermöglichkeiten unter dem Blickwinkel der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung; Wirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper und Maßnahmen zum Personen- und Sachwertschutz

## **Elektroanlagenprojektierung**

**Prof. Dr.-Ing. P. Schegner / Dr.-Ing. F. Mach**

V 1, Ü 2, P 1 (WS)

Schaltplantechnik im Elektroanlagenbau zur Anlagengestaltung und Anlagenfertigung; Entwerfen, Dimensionieren und Gestalten von Elektroanlagen; Projektierung von Nieder-, Mittel- und Hochspannungsanlagen; der Projektierungsablauf für den Computereinsatz; CAD-Systeme in der Elektroprojektierung; Projektentwürfe von Mittel- und Niederspannungs-Schaltanlagen mit verschiedenen CAD-Systemen; 3D-Konstruktion einer Hochspannungs-Freiluftschaltanlage

## 2.2 Exkursionen

Exkursionen mit den Studenten des Studienschwerpunktes Elektroenergieversorgung und Hochspannungstechnik zu folgenden Firmen:

19.01.01	LDIC Volkersdorf
27.01.01	Kraftwerk Schwarze Pumpe, LAUBAG (Zentraleitstelle)
13.-15.02.01	Hamburg, Besuch der ETG-Fachtagung „Schaltanlagen für Verteilungsnetze unter den neuen Rahmenbedingungen“
24.04.01	CeBIT Hannover
24.04.01	Kraftwerk Lippendorf
24.04.01	Hannover Messe Industrie
14.05.01	BEWAG Berlin (alternative Energieerzeugungsanlagen, 380-/110-kV-SF <sub>6</sub> -Schaltanlage, Warte der Netzführung des 380-/110-kV-Übertragungsnetzes)
05.-09.06.01	Große Exkursion nach Mecklenburg (Otto-Lilienthal-Museum in Anklam, Energiewerke Nord in Lubmin, Fusionsforschung im Max-Planck-Institut Greifswald, Raketenmuseum Peenemünde, HGÜ in Rostock-Bentwisch, Maritimen-Simulatorenzentrum Warnemünde, Cargo-Lifter-Halle in Brand)
18.06.01	380-kV-UW Dresden der VEAG sowie Lastverteilung Dresden und Schaltleitung Heidenau der ESAG
14.11./12.12.01	Heizkraftwerk Nossener Brücke in Dresden
06.12.01	Stahl- und Walzwerk AG, Riesa

## 2.3 Diplomarbeiten

Gramsch, Chr.: Untersuchungen zur Erwärmung und zur Strömung in Elektrotechnischen Anlagen mit CFD

DA 914/2001 (Betreuer: Dipl.-Ing. M. Schenk)

Berger, St.: Simulation der Ladungsakkumulation auf Isolierstoffplatten und ihrer Wirkung auf die Feldverhältnisse einer Elektrodenanordnung

DA 915/2001 (Betreuer: Dipl.-Ing. A. Winter)

Magier, T.: Einfluß monopolar und bipolar aufgeladener Isolierstoffplatten auf die elektrische Festigkeit von Elektrodenanordnungen  
DA 916/2001 (Betreuer: Dipl.-Ing. A. Winter)

Jochim, M.: Untersuchung des Verbindungswiderstandes abhängig von der Verbindungskraft in Verbindungen der Elektroenergietechnik  
DA 917/2001 (Betreuer: Dipl.-Ing. St. Schoft)

## **2.4 Studienarbeiten**

Berger, St.: Bestimmung von Ladungsdichteverteilungen auf Isolierstoffoberflächen mittels kapazitiver Sonden

Baumann, Th.: Programmierung einer Fehlerschaltautomatik für das Dynamische Drehstromnetzmodell

Flemming, St.: Ausarbeitung des Praktikumsversuches „Distanzschutz“ für das Dynamische Drehstromnetzmodell

Greiner, T.: Projektierung und Implementierung der Parallelschaltautomatik (PSA) in die Leittechnik des Dynamischen Netzmodells (DNM) und Untersuchungen zur Funktion

Franke, H.: Entwurf einer Datenbank zur Speicherung von Meßdaten aus dem Energieversorgungsbereich

Dosantos, E. R.: Design and build op of a program for power flow and short circuit calculation

Schierjott, F.: Untersuchungen zum Einsatz ausgewählter Methoden der Zeitreihenanalyse zur Auswertung von Langzeitmessungen der Spannungsqualität

Zickler, U.: Untersuchung der Versorgungskonzeption eines 110-kV-Netzes unter Berücksichtigung der Reduzierung der Einspeisepunkte des übergeordneten Netzes



## 3 Forschung

### 3.1 Kurzberichte aus laufenden Forschungsarbeiten

#### Elektrische Oberflächenladungen auf Isolierstoffen

Infolge elektrischer Entladungen können auf Oberflächen elektrischer Isolierstoffe Ladungen akkumulieren. Dadurch ergibt sich eine veränderte Potentialverteilung innerhalb der Isolieranordnung, und deren Spannungsfestigkeit kann herabgesetzt werden. Ziel der Untersuchungen war es, sowohl Kenntnisse über den Aufladevorgang als auch über die Wirkung der Oberflächenladungen auf die Spannungsfestigkeit von Elektrodenanordnungen zu erhalten.

Für die Untersuchungen wurden plattenförmige PTFE-Prüflinge verwendet. Ein Prüfling wird mittels gesteuerter x-y-Linearantriebe innerhalb einer Spitze-Plattenanordnung positioniert und nach Anlegen einer negativen Gleichspannung bis -100 kV an die Spitzenelektrode durch Koronaentladungen an der Spitze aufgeladen.

Die Messung der Ladungsdichte erfolgte durch das Hineinfahren der Isolierstoffplatte in einen Meßkreis, der aus jeweils ober- und unterhalb des Prüflings angeordneten kapazitiven Meßsonden bestand.

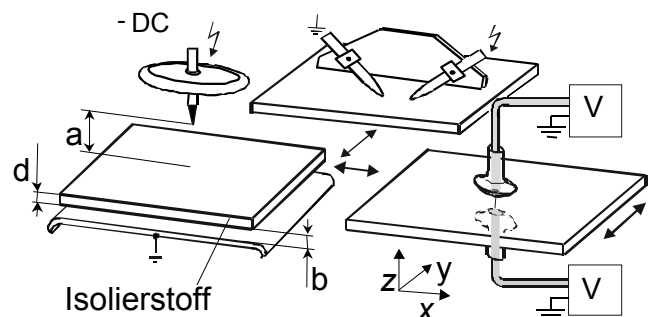
Nach der Messung der Ladungsdichten wurde der Prüfling unter eine Stabelektrodenanordnung verfahren und die Beeinflussung ihrer Durchschlagspannung untersucht (Bild 1).

Die Versuchsanordnung befand sich in einem abgeschlossenen Prüfgefäß, so daß die Untersuchungen unter Luft- und SF<sub>6</sub>-Atmosphäre bei variablen Drücken durchgeführt werden konnten.

Nach dem Aufladen erhält man auf der Isolierstoffoberfläche glockenförmige

Verteilungen der Ladungsdichten, deren Maxima sich an der Stelle befinden, die während des Aufladevorganges gegenüber der Sprühspitze positioniert wurde.

Dabei konnten für die Untersuchungen unter Luft nicht nur auf der der Sprühspitze zugewandten Seite Ladungen nachgewiesen werden, sondern es ergaben sich auch auf der Unterseite des Prüflings ähnliche Verteilungen der Ladungsdichten mit entgegengesetzter Polarität. Dieses Phänomen wurde durch Simulation der Aufladung mit einem Feldberechnungsprogramm untersucht. Dabei zeigte sich, daß während des Aufladevorganges mit negativer Gleichspannung zunächst negative Ladungsdichten an der Oberseite des Prüflings auftreten. Das daraus resultierende elektrische Feld überlagert sich dem Grundfeld so, daß die elektrische Festigkeit



*Bild 1:* Schematischer Versuchsaufbau: links Aufladeposition - Nadel-Platte-Anordnung; rechts Meßposition - Meßkreis mit 2 kapazitiven Sonden; hinten Elektrodenanordnung zur Untersuchung der Beeinflussung der Durchschlagspannung

des Isoliergases zwischen Prüfling und geerdeter Platte überschritten werden kann. Bei den auftretenden Gasentladungen entstehen positive Ladungsträger, die bestrebt sind, die negativen Ladungen auf der Prüflingsoberseite zu neutralisieren. Sie lagern sich aufgrund der Feldverhältnisse auf der Prüflingsunterseite an. Im Ergebnis dieses Aufladeprozesses bildet sich eine bipolare Ladungsdoppelschicht, deren Ladungsdichten ein Mehrfaches der Ladungsdichte einer monopolar aufgeladenen Isolierstoffplatte betragen können.

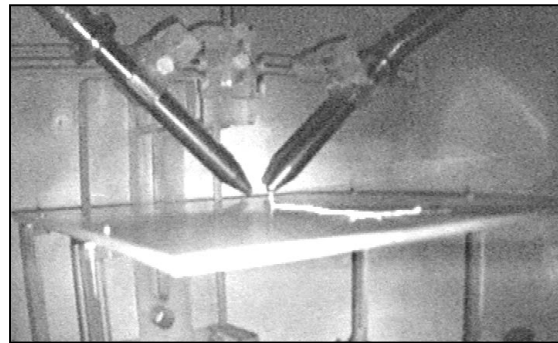
Die unter Luft durchgeführten Versuche wurden mit analogen Parametern unter  $\text{SF}_6$  wiederholt. Infolge der wesentlich höheren elektrischen Festigkeit von  $\text{SF}_6$  wurde bei sonst identischen Parametern die kritische Feldstärke des Isoliergases zwischen Prüfling und geerdeter Platte nicht überschritten, so daß die Prüflingsunterseite praktisch ladungsfrei blieb.

Verringert man unter  $\text{SF}_6$  die Abstände innerhalb der Hochspannungsanordnung sowie die Prüflingsdicke, so ergeben sich wesentlich höhere Feldstärken im Bereich zwischen Prüfling und geerdeter Platte. In deren Folge läßt sich auch unter  $\text{SF}_6$  eine Ladungsdoppelschicht erzeugen.

Zur Untersuchung des Einflusses aufgeladener Isolierstoffe auf die Durchschlagfestigkeit einer Elektrodenanordnung wurden Versuche mit negativer und positiver Gleichspannung unter 100 kPa  $\text{SF}_6$  durchgeführt. Dabei wurde eine Spannung unterhalb der Durchschlagspannung an die Stabelektroden angelegt und der aufgeladene Prüfling unter die Elektroden gefahren. Der Elektrodenabstand betrug 12 mm und der Abstand des Isolierstoffes zu den Elektroden 7 mm. Es wurde sowohl der Fall einer monopolar aufgeladenen Prüflingsoberseite als auch der Fall der bipolaren Ladungsdoppelschicht untersucht.

Für den Fall einer monopolaren Ladungsdoppelschicht bis zu einer Ladungsdichte von  $-3,2 \text{ nC/cm}^2$  konnte bei negativer Gleichspannung an der Elektrodenanordnung eine Erhöhung der Durchschlagfestigkeit bis ca. 15 % festgestellt werden. Bei positiver Gleichspannung an den Elektroden verringerte sich die Durchschlagspannung um bis zu ca. 20 %. Im Falle einer bipolaren Aufladung ergaben sich ähnliche Werte wie für monopolar aufgeladenen Prüflinge.

Für den Fall einer sehr kleinen Spannung an der Elektrodenanordnung traten beim Einfahren des aufgeladenen Prüflings Rückentladungen zu den Elektroden auf (Bild 2), die zu einer lokalen Entladung des Prüflings geführt haben, so daß die Durchschlagspannung bei anschließender Spannungssteigerung unbeeinflusst blieb.



*Bild 2:* Rückentladung zwischen Elektroden und aufgeladenem Prüfling

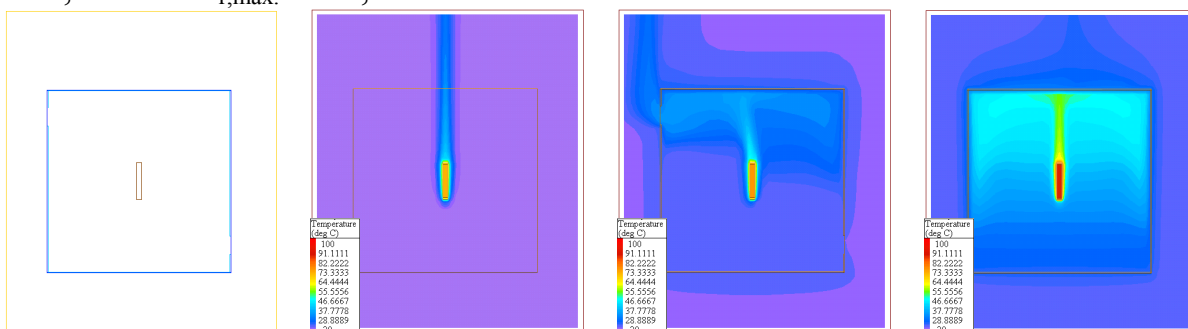
Alexander Winter

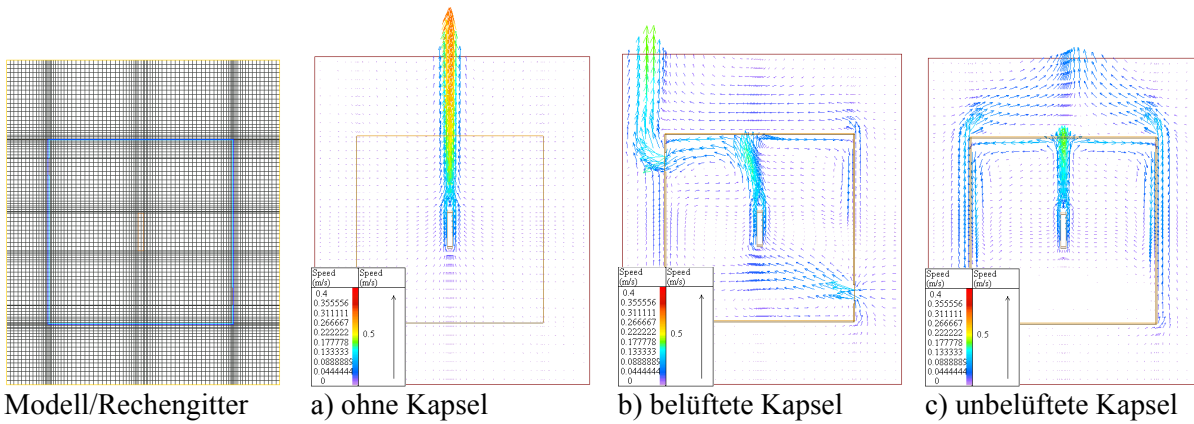
## Berechnung der Erwärmung von Geräten der Elektroenergietechnik in kompakten Anlagen mit CFD (Computational Fluid Dynamics)

Die Erwärmung der Geräte und die Strömung in kompakten Anlagen der Elektroenergietechnik können mit CFD-Codes berechnet werden. Grundlage dieser Berechnungen sind die Differentialgleichungen, die das Strömungs- und das Temperaturfeld beschreiben. Sie ergeben sich aus der Masse-, der Impuls- und der Energiebilanz. Viele CFD-Programme lösen das gekoppelte Wärme-Strömungs-Problem mit einem Finite-Volumen-Verfahren auf der Basis eines rechtwinkligen Rechengitters. Bei einigen dieser Programme wird gleichzeitig mit dem Wärme-Strömungs-Problem der Wärmeübergang durch Strahlung berechnet. Aufgrund der Vielfalt der CFD-Codes, mit denen Erwärmungs- und Strömungsberechnungen durchgeführt werden können, mußte ein für die Untersuchungen an Anlagen der Elektroenergietechnik geeignetes Programm ausgewählt werden. Um die Genauigkeit der Berechnungen mit diesem Programm zu untersuchen, wurden in einem ersten Schritt Untersuchungen an einfachen Grundanordnungen durchgeführt.

Dazu wurden das Temperatur- und das Strömungsfeld für den stationären Zustand an einer stromdurchflossenen, waagrecht - hochkant verlegten Stromschiene des Querschnitts  $A = (40 \times 6) \text{ mm}^2$  aus Aluminium untersucht. Die Berechnungen wurden für eine ungestrichene und eine gestrichene Stromschiene, jeweils für die Varianten ohne Kapsel (a), mit einer über Schlitze belüfteten, gestrichenen Kapsel (b) und mit einer unbelüfteten, gestrichenen Kapsel (c) durchgeführt. An einer Versuchsanordnung, die analog zu den o. g. Varianten aufgebaut wurde, wurden die Berechnungsergebnisse experimentell überprüft. Die Länge der Versuchsanordnung betrug  $l \approx 3 \text{ m}$  und der Querschnitt der Kapsel  $A_K = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ . Die Kapsel bestand aus Stahlblech der Dicke  $d_K = 1 \text{ mm}$ . In  $d = 20 \text{ mm}$  Entfernung von der Oberkante der Vorderseite und der Unterkante der Rückseite der Kapsel waren Lüftungsschlitze mit einer Breite  $d_S = 20 \text{ mm}$  in die Kapsel eingebracht, die geöffnet oder geschlossen werden konnten.

Die relative Abweichung zwischen den berechneten und den gemessenen Übertemperaturen, bezogen auf die gemessenen Übertemperaturen, betrug in der Mitte der Stromschiene abhängig von der untersuchten Variante zwischen  $f_{r,\text{max.}} = -13,3 \%$  und  $f_{r,\text{max.}} = -4,8 \%$ .





Modell/Rechengitter

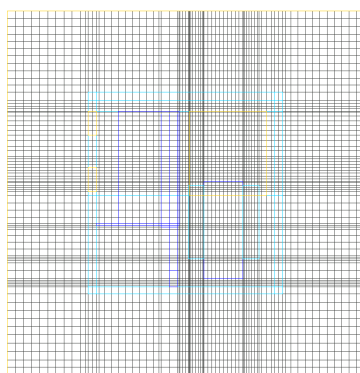
a) ohne Kapsel

b) belüftete Kapsel

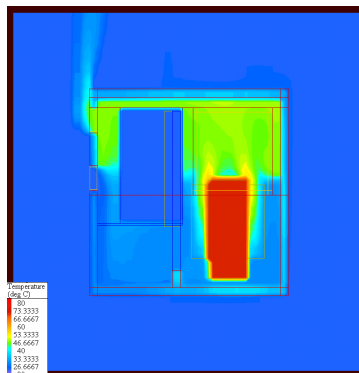
c) unbelüftete Kapsel

Im zweiten Schritt wurde untersucht, ob das CFD-Programm auch zur Berechnung der Erwärmung und der Strömung für komplexe Anlagen der Elektroenergie-technik geeignet ist. Dazu wurde die Erwärmung eines Verteilungstransformators bei freier Aufstellung und beim Betrieb des Transformators zusammen mit der NS-Verteilung und der MS-Schaltanlage in einer Netzstation berechnet und gemessen. Für die Berechnung wurden der Transformator und die Geräte als ideal wärmeleitende Körper mit gestrichener Oberfläche und das Stationsgebäude mit der Wärmeleitfähigkeit von Stahlbeton mit ebenfalls gestrichener Oberfläche modelliert. Die Widerstandsbeiwerte der Lüftungsgitter betragen  $\zeta = 17,1$ . Die berechnete mittlere Übertemperatur der Oberfläche des Transformators stimmt für beide Varianten mit der gemessenen gut überein. Die maximalen Abweichungen sind kleiner als  $f_{r,max} < 1 \%$ .

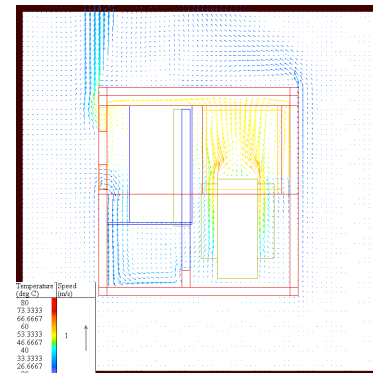
Betrieb des Transformators:	frei aufgestellt	in der Station
Leistung des Transformators [W], (gemessen)	7216	6167
Leistung der NS-Verteilung [W], (gemessen)	---	1233
Umgebungstemperatur [°C], (gemessen)	24,80	27,40
mittlere Übertemperatur der Oberfläche [K] (berechnet)	44,38	47,75
mittlere Übertemperatur der Oberfläche [K] (gemessen)	44,80	47,70
relativer Fehler $f_r$	-0,94%	0,10%



Modell und Rechengitter



Temperaturfeld



Geschwindigkeitsfeld

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Erwärmung und die Strömung sowohl für einfache Grundanordnungen als auch für komplexe Anlagen der Elektroenergie-technik mit CFD-Modellen berechnet werden können.

Mario Schenk

## Der Verbindungswiderstand abhängig von der Verbindungskraft in Verbindungen der Elektroenergietechnik

Der Zusammenhang zwischen der Verbindungskraft und dem Verbindungswiderstand hängt bei elektrotechnischen Verbindungen von der Verformung des Oberflächenprofils der Verbindungsflächen ab. Die Verbindungsflächen lösbar verbundener Leiter sind mikroskopisch betrachtet rau. Die von außen auf die Leiter aufgebrachte Verbindungskraft wird auf der Verbindungsfläche von der Summe der sich berührenden Erhebungen getragen. Das elektrische Strömungsfeld wird beim Übergang von einem zum anderen Leiter in den sich berührenden Erhebungen, den sog. Engstellen, eingeschnürt. Wird angenommen, dass sich in den Engstellen keine Oxid-, sondern nur dünne Hautschichten befinden, so ergibt sich der Verbindungswiderstand  $R_V$  aus dem Bahnwiderstand  $R_B$  der Leiter, dem Engewiderstand  $R_C$  durch die Einschnürung des elektrischen Strömungsfeldes und dem Widerstand  $R_F$  der Hautschichten (Gl. (1)).

$$R_V = R_B + R_C + R_F \quad \text{Gl. (1)} \quad R_C = \frac{\rho}{2n\bar{a}} + \frac{\rho}{\pi n^2} \sum_j \sum_{i \neq j} \frac{1}{s_{ij}} \quad \text{Gl. (2)}$$

Die Anzahl  $n$  und der mittlere Radius  $\bar{a}$  der Engstellen in den Verbindungen hängen vom Rauheitsprofil der Verbindungsflächen und der Verbindungskraft  $F_V$  ab. Der Engewiderstand  $R_C$  wird damit wesentlich von der Verbindungskraft  $F_V$  bestimmt (Gl. (2)). Um die Anzahl  $n$ , die gegenseitigen Abstände  $s_{ij}$  zwischen den Engstellen und den mittleren Radius  $\bar{a}$  der Engstellen bei stochastisch rauem, z. B. gebürsteten Verbindungsflächen zu bestimmen, werden die Oberflächenprofile der Verbindungsflächen (Originalflächen) gemessen (Bild 1). Die Höhen  $z$  der  $N$  Erhebungen der Verbindungsflächen gebürsteter Stromschieneverbindungen sind normalverteilt und mit der Dichtefunktion  $\varphi_1(z)$ , dem Mittelwert  $\mu_1$  und Standardabweichung  $\sigma_1$  beschreibbar.

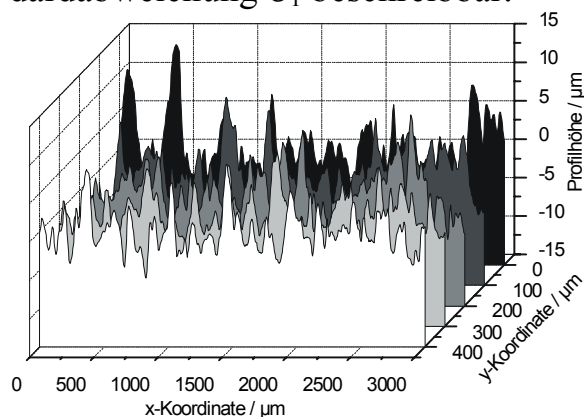


Bild 1: Oberflächenprofil einer gebürsteten Stromschiene (Al 99,5), gemessen mit Laserprofilometer OME  $\mu$ scan am Institut für Elektronik-Technologie der TU Dresden

$$\varphi_1(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right] \quad \text{Gl. (3)}$$

Berühren sich zwei stochastisch unabhängig raue Flächen mit der gleichen Dichtefunktion  $\varphi_1(z)$  der Höhen der Erhebungen, so kann dies durch die Berührung einer ideal glatten Fläche mit einer stochastisch rauhen Fläche beschrieben werden. Die Höhen der Erhebungen der rauhen Fläche sind dann wiederum normalverteilt mit dem Mittelwert  $\mu = 2\mu_1$  und der Standardabweichung  $\sigma = \sqrt{2}\sigma_1$  (Bild 2). Nähert sich die ideal glatte Flä-



che unter der Verbindungskraft  $F_V$  bis auf den Abstand  $d$  an die stochastisch raue Fläche an, so berühren  $n$  Erhebungen die ideal glatte Fläche (Gl. (4)).

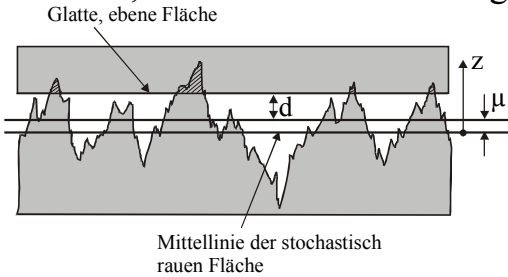


Bild 2: Kontakt einer ideal glatten mit einer stochastisch rauhen Fläche

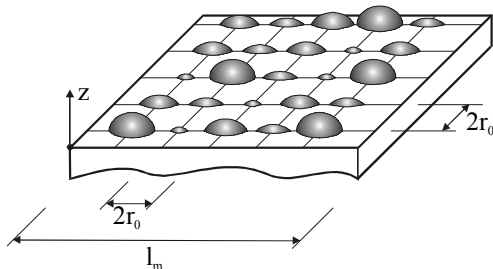


Bild 3: Modellfläche mit unterschiedlich weit hervorstehenden Halbkugeln

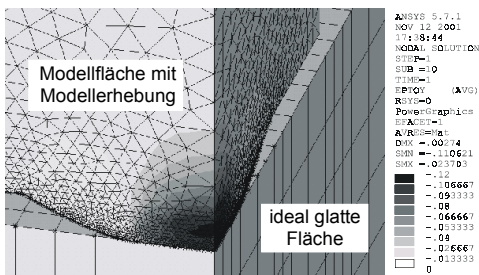


Bild 4: Verformung einer Modellerhebung mit  $r_0 = 98 \mu\text{m}$  und der Höhe  $12,5 \mu\text{m}$  bei einer Verbindungskraft von  $F_V = 25 \text{ kN}$

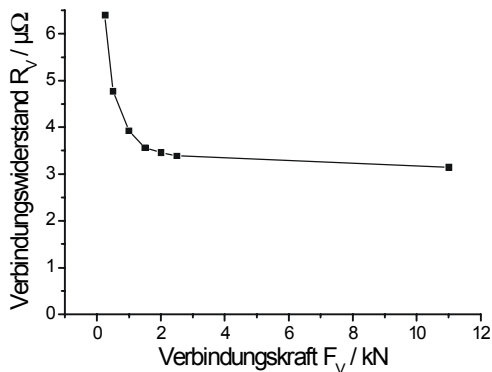


Bild 5: Verbindungswiderstand  $R_V$  abhängig von der Verbindungskraft  $F_V$  einer gebürsteten  $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  Stromschienschenverbindung aus Al 99,5

$$n(d) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \int_d^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dz \quad \text{Gl. (4)}$$

Aus den gemessenen Oberflächenprofilen (Originalflächen) wird eine Modellfläche gebildet, auf der die  $N$  Erhebungen der Originalfläche durch Halbkugeln (Modellerhebungen) modelliert werden, die unterschiedlich hoch aus der Modellfläche hervorstehen (Bild 3). Die Höhenverteilung und die Anzahl  $N$  der Modellerhebungen entsprechen der Höhenverteilung und der Anzahl  $N$  der Erhebungen der Originalfläche. Der Radius  $r_0$  ergibt sich aus der Spitzenanzahl  $R_{PC}$  pro Profil-Messstrecke der Länge  $l_m$ . Beim Abstand  $d$  der Modellfläche von einer ideal glatten Fläche wird von  $n$  Modellerhebungen die Verbindungskraft  $F_V$  unter der Nachgiebigkeit  $(z-d)$  getragen.

$$F_V(d) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \int_d^{\infty} f(z-d) \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dz \quad \text{Gl. (5)}$$

Die Funktion  $f(z-d)$  beschreibt die von einer Modellerhebung getragene Kraft abhängig von ihrer Höhe auf der Modellfläche und dem Abstand  $d$ . Mit Hilfe des FE-Programms ANSYS wird die Funktion  $f(z-d)$  bei elastischer und plastischer Verformung der Modellerhebungen bestimmt (Bild 4). Mit den Gl. (3) bis (5) und den gemessenen Rauheitsparametern  $\mu_1$  und  $\sigma_1$  werden die Anzahl  $n$ , der mittlere Radius  $\bar{a}$  und der Abstand  $s_{ij}$  der tragenden Modellerhebungen abhängig von der Verbindungskraft  $F_V$  berechnet und in Gl. (2) zur Berechnung des Engewiderstandes  $R_C$  eingesetzt. Mit Gl. (1) wird der Verbindungswiderstand  $R_V$  abhängig von der Verbindungskraft  $F_V$  berechnet (Bild 5).

Stephan Schoft

## Entwicklung eines Kontaktelements für große Toleranzen

Verbindungen in der Elektroenergie-technik müssen langzeitstabil den Strom übertragen. Das heißt, der Widerstand der Verbindung muß über einen langen Zeitraum kleiner als der zulässige Grenzwiderstand sein. Diese Forderung gilt auch für steckbare Verbindungen, in denen Kontaktelemente eingesetzt werden. Bei diesen Verbindungen wird oft die Kontaktkraft mittels Biegemoment von einer Torsionsfeder zum Kontakt übertragen. Um den Strom mit hoher Stromdichte übertragen zu können, werden z. B. Kontaktbügel aus Kupfer eingesetzt. Da Kupfer bei Temperaturen  $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  verstärkt kriecht, verformen sich die Kontaktelemente und die Kontaktkraft nimmt mit der Zeit signifikant ab. Sie kann so klein werden, daß die Verbindung instabil wird und ausfällt. Bei dem hier betrachteten Kontaktelement (Bilder 1 und 2) soll untersucht werden, ob es im mechanisch hoch beanspruchten Crimp-Bereich des Kontaktbügels durch das Kriechen zu so starken Verformungen kommt, daß sich der Kupferbügel von der Torsionsfeder löst. Außerdem soll ermittelt werden, ob sich der Kontaktbügel selbst durch das Kriechen unzulässig verformt.

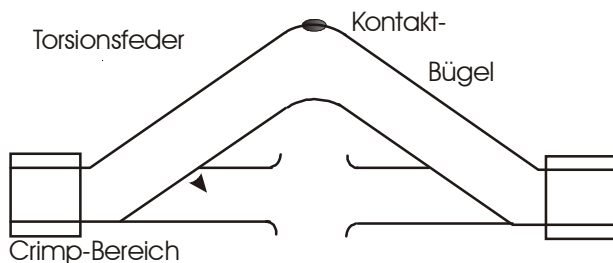


Bild 1: Kontaktelement Draufsicht

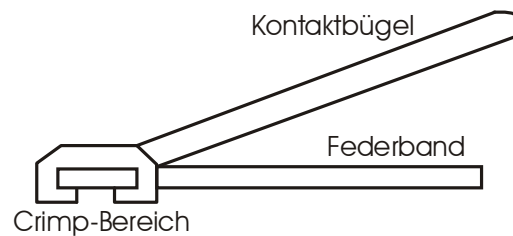


Bild 2: Kontaktelement Seitenansicht

Wichtig ist es, Voraussagen treffen zu können, ob und wann die Kontaktkraft kleiner wird als ein zulässiger Mindestwert. Dazu wird mit einem Finite-Elemente-Programm das Kontaktelement modelliert. Mit diesem Modell wird berechnet, wie sich die mechanische Spannung im Crimp-Bereich des Elements abbaut. Dazu muß das Gesetz, mit dem das Kriechen beschrieben werden kann und die dazu notwendigen Parameter bekannt sein (siehe Gl. (1)).

$$\dot{\epsilon} = C \sigma^n \exp \frac{Q}{RT} \quad (1)$$

Dabei ist  $\dot{\epsilon}$  die Kriechgeschwindigkeit,  $C$  ein Proportionalitätsfaktor,  $\sigma$  die mechanische Spannung,  $n$  der Norton Exponent,  $Q$  die Aktivierungsenergie,  $R$  die Gaskonstante und  $T$  die Temperatur in Kelvin. Zur Berechnung der Verformung durch Kriechen wurden die Parameter  $Q$  und  $n$  der Literatur entnommen. Der Proportionalitätsfaktor  $C$  wurde experimentell bestimmt. Dazu wurden Bleche aus Kupfer an zwei Stellen lose gelagert und an den Enden mit Gewichten belastet (Bild 3). Die Durchbiegung der Bleche wurde in der Mitte mit einer Mikrometeruhr gemessen. Mit dem Finite-Elemente-Programm Ansys wurde die Durchbiegung berechnet. Dabei wurde  $C$  solange variiert, bis das Ergebnis der Simulation mit dem Ergebnis des Experiments übereinstimmte.

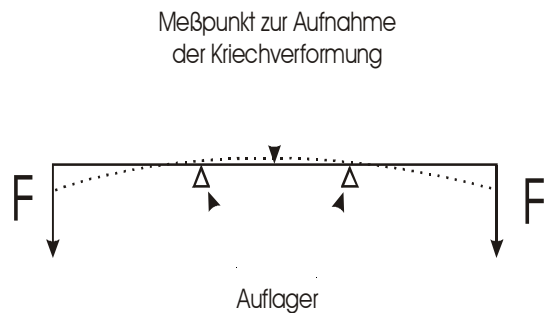


Bild 3: Experiment zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors



Bild 4: Modell des Crimp-Bereichs

Ist der Proportionalitätsfaktor  $C$  bekannt, kann das Kriechen des Kupfers im Crimp-Bereich des Kontaktelements berechnet werden. Dazu wurde der Crimp-Bereich in einem 2D-Modell nachgebildet (Bild 4). Mit diesem Modell konnte z. B. berechnet werden, wie stark sich das Kupfer nach 50 Jahren von der Torsionsfeder abhebt (Bild 5). Die Berechnungen zeigen, daß sich die mechanische Verbindung zwischen Feder und Bügel durch das Kriechen des Kupfers nicht löst. Die Funktionsfähigkeit des Kontaktelements wird nicht gefährdet.



Bild 5: verformter Crimp-Bereich nach 50 Jahren bei 150 °C

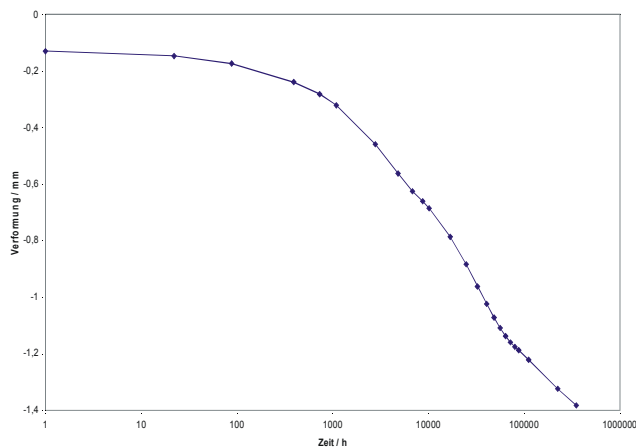


Bild 6: Verformung des Kontaktbügels im Kontaktbereich bei 2,5 mm Einfederung

Der Bügel des Kontaktelements wurde in einem 3D-Modell nachgebildet. Im Bügel selbst treten die größten Biegespannungen am Übergang zum Crimp-Bereich auf. Dadurch kommt es zu einer Verformung des Bügels. Sie beträgt nach ca. 50 Jahren bei einer Dauertemperatur von 150 °C im Kontaktbereich ca. 1,2 mm (Bild 6). Da an Verbindungen der Elektroenergietechnik i. d. R. die Dauertemperatur  $< 105$  °C ist, ist auch durch diese Kriechverformung die Funktionstüchtigkeit des Kontaktelements nicht gefährdet.

Ralph Pauer



## Magnetische Felder in Gebäuden mit hoher Lastdichte und Datentechnik

Einrichtungen zur elektronischen Datenverarbeitung wie Rechenzentren, Kommunikationsnetzknotten oder Internetprovider gewinnen zunehmend an Bedeutung. Diese Anlagen weisen oft, verbunden mit der erforderlichen Gerätetechnik, einen großen Elektroenergiebedarf bei hohen Anforderungen an die Funktionszuverlässigkeit auf.

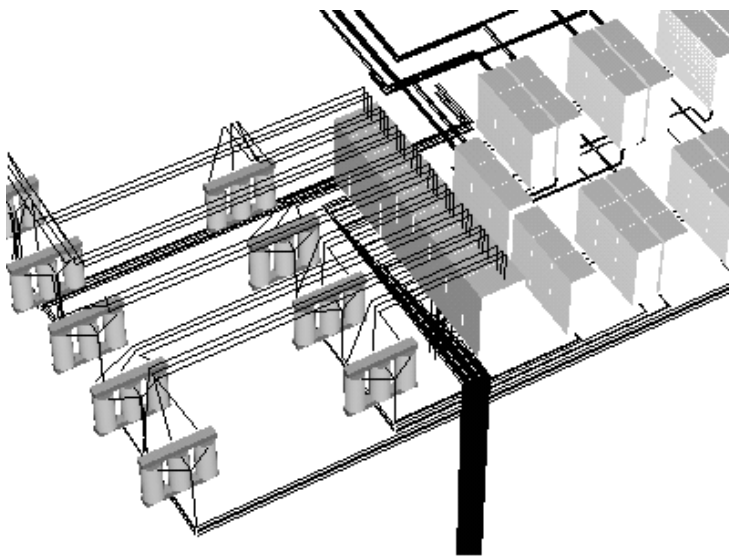


Bild 1: Modell einer Hauptunterverteilung

Die Versorgung mit elektrischer Energie bei sehr hohen Anschlussleistungen muss oft in einem Gebäude auf engem Raum mit digitaler Datentechnik erfolgen, deren Funktion sowohl im Betriebs- als auch im Fehlerfall durch die dabei auftretenden Feldstärken nicht gestört werden soll. An einem konkreten Objekt wurde die Feldbelastung in Abhängigkeit von den Feldquellen und deren Zustand untersucht. Die Elektroinstallation umfasste die Spannungsebenen 110 kV, 10 kV und 0,4 kV, die in einem Gebäude gemeinsam mit der Datentechnik untergebracht sind. Wegen der Komplexität der Anlagen wurden Möglichkeiten zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes und zur Wahl geeigneter Schnittstellen für die Modellierung untersucht.

Um die Modellierung sinnvoll durchführen zu können, werden Teilmodelle für die Berechnung gebildet (Bild 1). Diese orientieren sich an der Struktur der installierten Anlagen:

- Gasisolierte 110-kV-Schaltanlage im Keller
- Transformatoren 110/10 kV im Keller
- Mittelspannungsschaltanlage im Keller
- Kabeltrassen, Kabelschächte zu den Unterverteilungen
- Transformatoren 10/0,4 kV in einer Techniketage
- Hauptverteilungen und Netzersatzanlagen in einer Techniketage
- Niederspannungsanlagen in der Nähe der Verbraucher

Zur Bestimmung der lokal von den Feldquellen hervorgerufenen maximalen Flussdichtewerte werden die Ergebnisse quellenorientiert ausgewertet (Bild 2). Die Darstellung erfolgt als Isolinien an den Raumgrenzen. Zur Beurteilung der Elektromagnetischen Verträglichkeit in den Räumen mit Datentechnik ist eine senkenorientierte Betrachtungsweise vorteilhaft, d.h. die Wirkung aller relevanten Feldquellen wird in Referenzpunkten überlagert. Außerdem sind die Berechnungen

getrennt für Normalbetriebs- und Fehlerfälle durchzuführen, da sich die beteiligten Anlagenabschnitte und die betroffenen Leiter in Abhängigkeit von der Fehlerart jeweils ändern. Eine Reduzierung der beispielsweise an den Niederspannungsverteilungen auftretenden hohen Flussdichtewerte ist durch konstruktive Maßnahmen, z.B. durch eine günstigere Aufstellung der verbrauchernah angeordneten Verteilungen erreichbar.

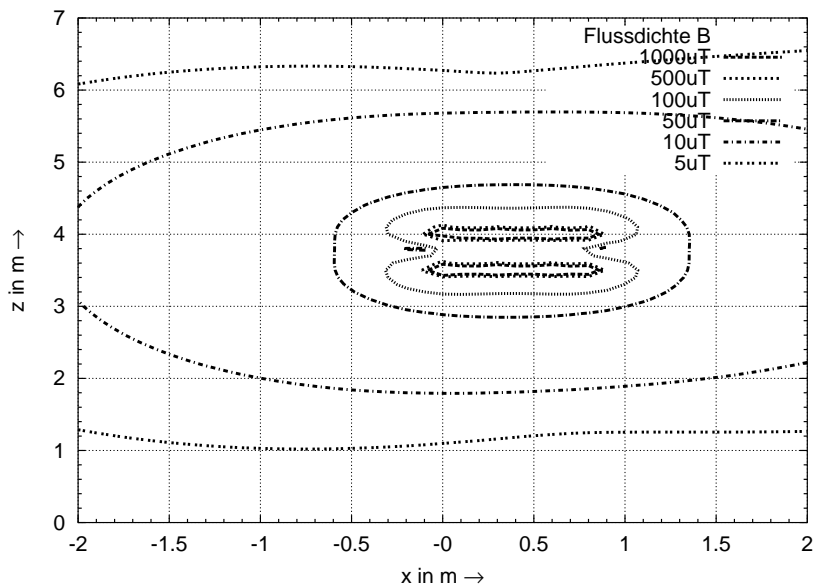
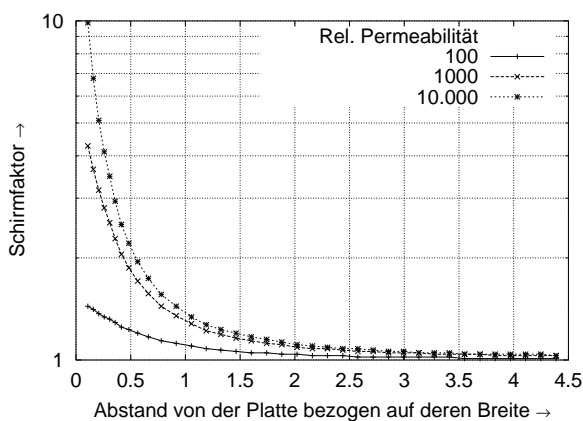
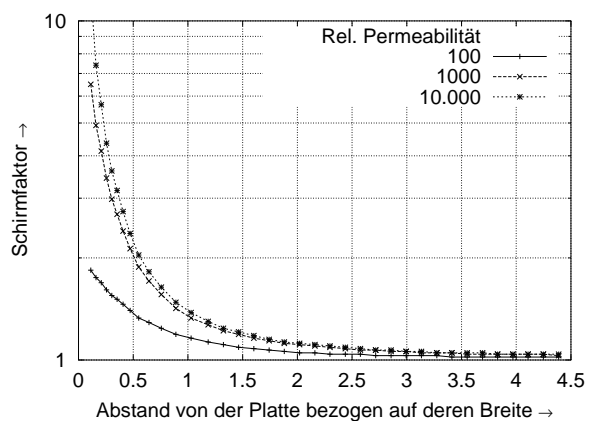


Bild 2: Magnetische Flussdichte bei Bemessungsstrom an den auf zwei Kabelpritschen liegenden MS-Kabeln

Eine Schirmung durch ebene Bleche ist möglich, allerdings wird sie nur auf eng begrenztem Raum wirksam. Eine Bewertung der Wirksamkeit von Schirmmaßnahmen vorab ist schwierig. Mit der Methode der finiten Elemente (FEM) wurden Anordnungen von einer und zwei ferromagnetischer Platten nachgebildet. Die erreichbaren Schirmfaktoren sind stark abhängig von der relativen Permeabilität des Schirmmaterials und von der Entfernung zur Schirmung. Auch bei hoher Permeabilität sind die praktisch nutzbaren Schirmfaktoren (Bild 3a) klein, da die Wirkung stark mit zunehmendem Abstand absinkt. Für eine doppelte Plattenanordnung ergeben sich nur geringfügig höhere Schirmfaktoren (Bild 3b).



(a) Blech 3mm dick



(b) Bleche 2×3mm dick

Bild 3: Schirmwirkung ferromagnetischer Bleche an Feldquellen senkrecht zur Plattenmitte (Parameter: Rel. Permeabilität  $\mu_r$ )

# Verfahren zur Berechnung der Erdschlusssentfernung durch Auswertung stationärer Fehlergrößen

Der überwiegende Teil der Mittelspannungsnetze wird mit Resonanzsternpunktterdung betrieben. Die Ursachen hierfür liegen zum einen in der historischen Entwicklung, zum anderen in der hohen Versorgungszuverlässigkeit. Die zunehmende Verkabelung vor allem im städtischen Bereich bewirkt das Ansteigen des kapazitiven Erdschlussstromes. Das führt dazu, daß sich die Zahl der Lichtbogenerdschlüsse verringert, der Anteil der Dauererdschlüsse jedoch ansteigt. Die exakte Lokalisierung dieser Erdfehler stellt eine wichtige Aufgabe für den Netzbetrieb dar. Ihr kommt hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit der Energieversorgungsunternehmen bzw. im Interesse maximaler Versorgungszuverlässigkeit entscheidende Bedeutung zu.

Es wurde ein Verfahren zur Berechnung der Erdschlusssentfernung auf Basis stationärer Strom- und Spannungskomponenten des Fehlerstromkreises entwickelt. Gegenüber den auf der Auswertung transientser Ausgleichsvorgänge basierenden Algorithmen kann so eine weitgehende Unabhängigkeit vom Fehlerwiderstand und eine nahezu unbegrenzte Wiederholbarkeit der Messung erreicht werden.

Der einpolige Erdfehler kann als Unsymmetrie der Leiter-Erde-Admittanzen betrachtet werden, welche, wie auch die kapazitive Unsymmetrie im Normalbetrieb, eine Verkopplung der drei symmetrischen Komponentensysteme (Mit-, Gegen- und Nullsystem) bewirkt.

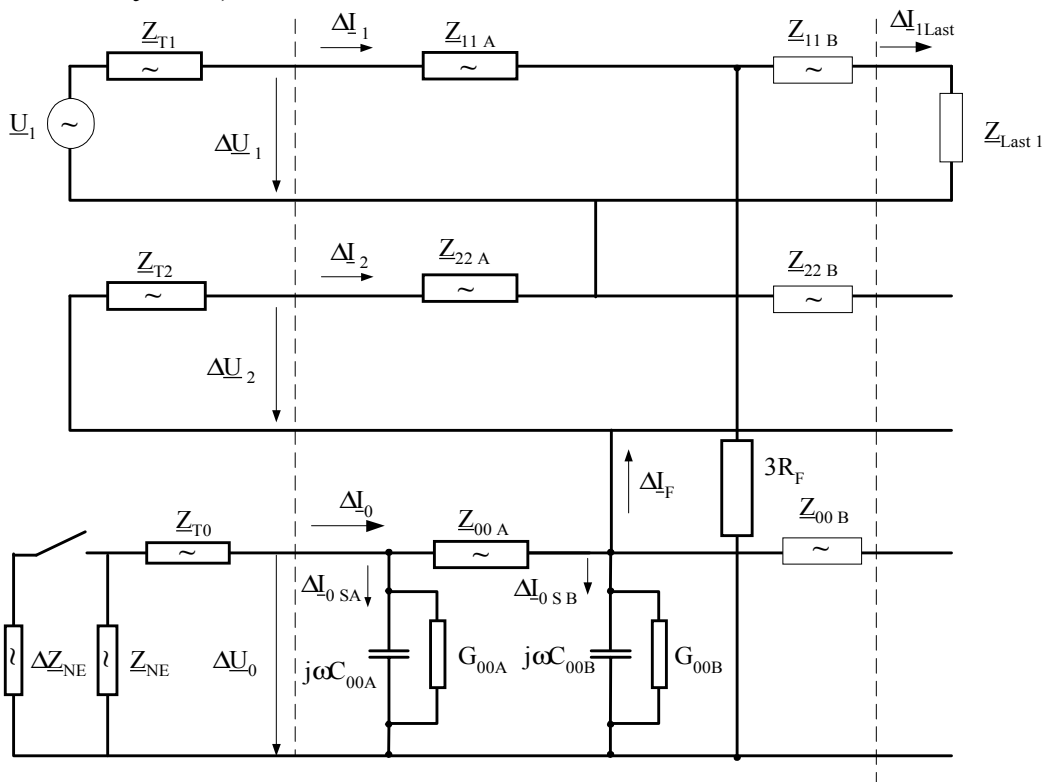


Bild 1: Symmetrische Komponenten-Ersatzschaltbild für einen einpoligen Fehler mit dem Fehlerwiderstand  $R_F$  (Strahlennetz)

Nach Abklingen der transienten Ausgleichsvorgänge werden die Leiter- und Nullgrößen bei mindestens zwei verschiedenen Fehlerströmen gemessen. Im weiteren werden die aus beiden Messungen gebildeten Differenzgrößen ausgewertet.

Durch einen definierten Eingriff in das Nullsystem können die notwendigen Veränderungen in Nullstrom, Nullspannung und damit auch im Fehlerstrom, der in allen drei Komponentensystemen fließt, erzeugt werden. Dabei ist sowohl eine direkte Verstimmungsgradänderung der Erdschlussspule, als auch das Zu- und Abschalten zusätzlicher Blindschaltetelemente im Sternpunkt möglich.

Der Vorteil dieser Differenzgrößen gegenüber den Absolutwerten liegt in der Unabhängigkeit von der kapazitiven Leitungsunsymmetrie sowie in der Verringerung des Einflusses des Laststromes auf das Auswerteverfahren.

Die Berechnung der Erdschlussentfernung erfolgt durch Lösen der Maschengleichung des resultierenden Fehlerstromkreises im System der symmetrischen Komponenten (Bild 1).

Die Genauigkeit der Berechnung wird durch die explizite Berücksichtigung des über den Fehlerwiderstand fließenden Fehlerstromes  $I_F$  erreicht, welcher anhand der gemessenen Nullgrößen und der Leitungsnulladmittanz exakt bestimmt wird.

Neben der Leitungsnulladmittanz ist die Kenntnis der bezogenen Leitungslängsimpedanz des Null- und des Mitsystems erforderlich. Letztere entsprechen den Parametrisierungsgrößen der Distanzschutzeinrichtungen in niederohmig geerdeten Netzen.

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wurde mit EMTP simulierten Erdschlüssen getestet.

Der Algorithmus erreichte für verschiedene Lastströme sowie für Fehlerwiderstände bis ca.  $1 \text{ k}\Omega$  sehr gute Ergebnisse. Die auftretenden Abweichungen hängen wesentlich von der Genauigkeit der Messung sowie der zu Grunde gelegten Leitungsparameter ab.

Hinsichtlich der praktischen Anwendung muss davon ausgegangen werden, dass auf Grund von Messfehlern Einbußen in der Genauigkeit der Entfernungsbestimmung auftreten.

Bezüglich des Einsatzes von Analog-Digital-Wandlern konnte festgestellt werden, dass bei einer Auflösung von 16 bit und einer Aussteuerung von Strom und Spannung entsprechend üblicher Überstrom-Zeitschutz-Systeme gute Ergebnisse erreicht werden.

Der Einfluss des Messfehlers induktiver Wandler auf das dargestellte Berechnungsverfahren ist noch genauer zu betrachten. Inhalt weiterführender Arbeiten soll auch die Auswertung von Oberschwingungen im Fehlerstrom zur Bestimmung der Erdschlussdistanz sein.

Gerit Eberl

# Energiemanagement lokaler Systeme mit evolutionären Algorithmen

Lokale Energiesysteme erfahren eine zunehmende Verbreitung. Sie entstehen einerseits in den Entwicklungsländern als Vorstufe eines Verbundsystems bzw. für die Energieversorgung netzferner Verbraucher. Andererseits führen die Liberalisierung des Strommarktes und die starke politische Förderung der Nutzung regenerativer Energiequellen zur zunehmenden Verbreitung auch in Industrieländern. Diese lokalen Energiesysteme zeichnen sich durch eine geringe räumliche Ausdehnung, eine Vielfalt der Energiequellen, einen hohen Anteil an Speichern, ein nur schwach ausgeprägtes Pufferverhalten, sehr starke und kurzfristige Schwankungen in Energieerzeugung und –verbrauch mit hohem stochastischen Anteil, eine kombinierte Nutzung von Wärme und Elektroenergie sowie eine überschaubare Komplexität aus. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an das Energiemanagement. Linearisierungen und Vereinfachungen sind kaum möglich. Die stochastischen Schwankungen von Energieerzeugung und –verbrauch müssen vollständig berücksichtigt werden. Da der Speicheranteil nicht vernachlässigt werden kann, können die meisten für konventionelle Energiesysteme entwickelten Optimierungsalgorithmen nicht eingesetzt werden. Die relativ geringe Komplexität des Energiesystems eröffnet die Möglichkeit einer Gesamtoptimierung auch unter Berücksichtigung der verschiedenen Energiearten.

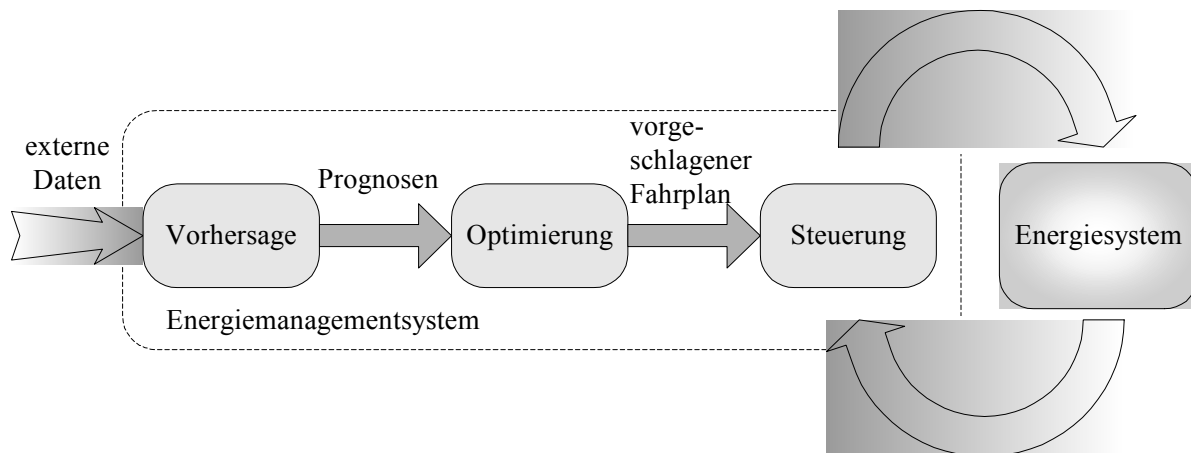


Bild 1: Prinzip des Energiemanagementsystems

Das Energiemanagement hat die Aufgabe, auf der Grundlage von Prognosen für die verbrauchte und von den regenerativen Energiequellen gelieferte Energie für einen bestimmten Zeitraum (z. B. 24 Stunden) einen Fahrplan für die Ansteuerung aller beeinflussbaren Betriebsmittel zu entwickeln, der einen kostenoptimalen Betrieb des Energiesystems ermöglicht (Bild 1).

Die Zielfunktion der Optimierung ist nichtlinear, unstetig und aufgrund des Einsatzes von Speichern auch zeitlich nicht trennbar. Da Vereinfachungen nicht möglich sind beziehungsweise nicht zu einer optimalen Lösung führen, ergibt sich eine

nichttriviale Optimierungsaufgabe. Die meisten konventionellen Optimierungsverfahren sind für diese Aufgabe nicht geeignet.

Untersuchungen am Institut ergaben, dass die Verfahren der evolutionären Algorithmen für dieses Problem gut geeignet sind. Sie sind in der Lage, beliebige Zielfunktionen zu optimieren. Der Rechenzeitbedarf steigt nur linear mit der Größe und der Komplexität des Energiesystems an. Bei Bedarf kann die Berechnung jederzeit abgebrochen und die bis dahin gefundene suboptimale Lösung verwendet werden. Die besten Ergebnisse wurden mit hybriden Verfahren erzielt, die eine Groboptimierung mit Ranglistenverfahren und regelbasierten Auswahlstrategien durchführen. Für die Feinoptimierung wurden evolutionäre Algorithmen eingesetzt, welche mit Chromosomen-Reparaturverfahren arbeiten. Werden bei der Selektion der Individuen für den Crossover und die nächste Generation unterschiedliche Kriterien verwendet, ist eine multikriterielle Optimierung realisierbar.

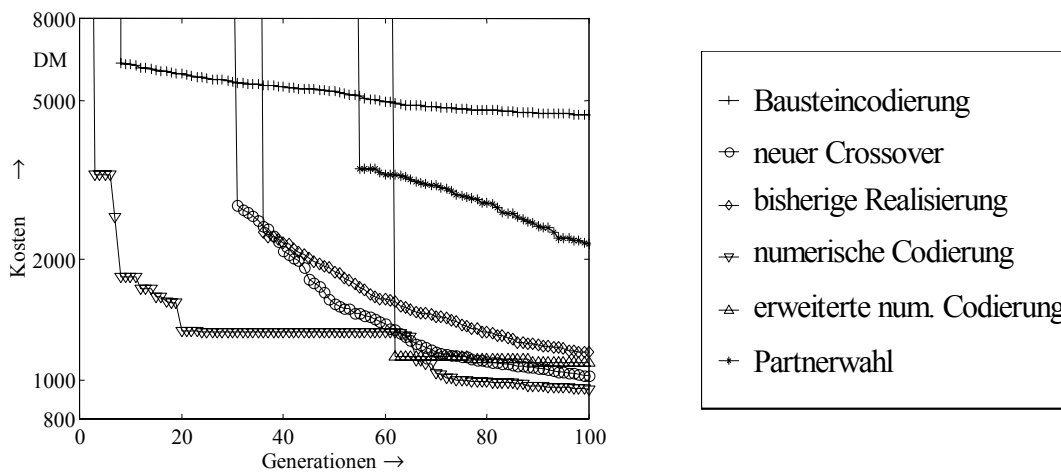


Bild 2: Konvergenz verschiedener Codierungen

Durch umfangreiche eigene Untersuchungen zur Parameteroptimierung war es möglich, die Einflussgrößen einzelner Parameter auf das Optimierungsverhalten abzuschätzen und Richtlinien für die Bestimmung optimaler Parameter zu entwickeln. Obwohl bei Wahl sinnvoller Parameter der Algorithmus bei jeder untersuchten Codierung und Parameterwahl konvergierte, zeigte sich, dass die Konvergenzgeschwindigkeit bei einer guten Codierung deutlich höher sein kann als bei einer ungünstig gewählten. Insbesondere zu Beginn der Optimierung ist der Einfluss der Codierung auf die Konvergenzgeschwindigkeit deutlich größer als die Wahl der Werte der Parameter. Nach genügend langer Rechenzeit gleichen sich die Ergebnisse immer mehr an (Bild 2).

Matthias Hable

# Netzurückwirkungen durch den verstärkten Einsatz von FACTS und HVDC in europäischen Energiesystemen

Die Anzahl und die Nennleistung der leistungselektronischen Anlagen im Elektroenergiesystem steigt drastisch. Diese nicht linearen Anlagen können in zwei Gruppen unterteilt werden: einerseits Anlagen im transeuropäischen Netz, andererseits direkt beim Verbraucher. Schon jetzt werden über 50 GW der Energie der Welt über HVDC transportiert. Die Deregulierung des Marktes der Elektroenergie brachte auch neue Anforderungen mit sich. Der Lastfluß im Netz soll nicht mehr nur von den physikalischen Gegebenheiten abhängig, sondern von dem Netzbetreiber frei einstellbar sein. Die Wirk- und Blindleistungsbilanz im Netz muß in jedem Zeitpunkt so ausgeglichen werden, daß die Spannung und Frequenz innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegen. Mit zusätzlichen Maßnahmen und Geräten kann die Leistungsbilanz so beeinflusst werden, daß bei Störungen die Stabilität des Netzes verbessert und auftretende Leistungspendelungen ausreichend gedämpft werden. Generell bemüht man sich, das Spannungsniveau möglichst konstant und hoch und damit die Verluste im Netz gering zu halten. Schnelle Änderungen der Blindleistung können auch durch das Schalten von Drosselspulen oder Kondensatoren bewirkt werden. Eine kontinuierliche oder zumindest periodische Änderung ist jedoch praktisch nur mit Stromrichterschaltungen möglich.

Im Zentrum der Forschung steht der Parallelbetrieb der leistungselektronischen Anlagen großer Leistung. Der bisherige Stand der Technik ging bei den Untersuchungen von der Annahme aus, daß in der Umgebung sich keine weiteren leistungselektronischen Anlagen befinden. Diese Voraussetzung ist jetzt nicht mehr gültig (Bild 1).

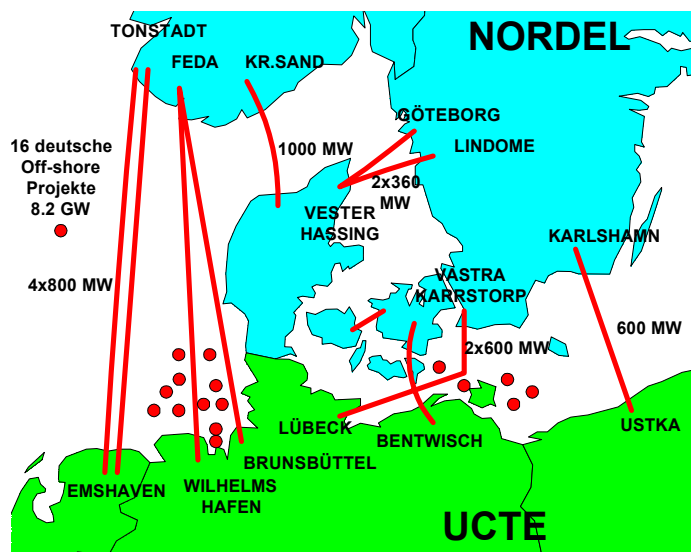


Bild 1: HGÜ's und Off-shore-windparks im norddeutschen Raum

Die elektrische Nähe und steigende Leistung der Anlagen sind eine Grundlage der gegenseitigen Beeinflussung zwischen Anlage–Anlage und Anlage–Netz. Die Problematik der Führung des Netzes, der Ansteuerung der Anlagen und Netzurückwirkungen (Harmonische) müssen untersucht werden.

Zu beachten ist, daß asynchrone europäische Systeme miteinander verbunden sind, die mit kleinen Differenzen in der Frequenz arbeiten können. Des weiteren sind Windparks vorhanden, deren Generatorfrequenz sich in Abhängigkeit vom Wind im Bereich von 7 bis 15 Hz bewegt. Sie werden über Umrichter mit dem Netz gekoppelt. Diese Gegebenheiten können nicht nur zu der bekannten Ausbreitung der für B6- und B12-Brücken charakteristischen Harmonischen führen, sondern auch zur Generierung der nicht charakteristischen Harmonischen und Zwischenharmonischen. Schwingungen niedriger Frequenz sind besonders unerwünscht. Die Überlagerung der Einspeiser der Harmonischen führt zur gegenseitigen Beeinflussung der Steuerung, zu gefährlichen Resonanzen und Addition der Harmonischen. Die Auswirkungen für das Netz können zusammengefaßt dargestellt werden:

- Leistungsschalter      Rückzündungen, verschlechtertes Löschen
- Kondensatoren      Verschlechterung der Isolation
- Steuerungstechnik
- Leitungen      Hitze
- Transformatoren      Hitze, Beanspruchung der Isolation
- Generatoren
- Maschinen      Rüttelmomente an der Welle
- Meßgeräte      Fehlmessungen
- Telefonanlagen
- Verbraucher      z. B. Flimmern der Monitore.

Besonders wichtig ist aber die Bestimmung der Harmonischen im Netz, deren winkelgemäße Addition die mechanische Beanspruchung der Generatoren und die Energiequalität beim Verbraucher maßgeblich beeinflussen.

Die Untersuchungen werden zunächst an einem vereinfachten Netz durchgeführt, so daß das Verhalten des Netzes und der Einfluß der Änderung vieler Parameter gezielt untersucht werden kann.

Besonders berücksichtigt wurde der Einfluß der Leitungslänge und der Leitungsparameter auf die Dämpfung der Schwingungen. Untersucht wurde auch die Überlagerung der Harmonischen, wobei die Auslöschung interessant ist.

Przemyslaw Janik



## Berücksichtigung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit in der dynamischen Netzäquivalentierung

Trotz der hohen Rechenleistung der heutigen Computer erfordert die Untersuchung des dynamischen Verhaltens großer Verbundsysteme häufig die Benutzung dynamischer Äquivalente. Einerseits kann die Simulation der dynamischen Vorgänge sehr zeitaufwendig sein, insbesondere wenn Inter-Area-Schwingungen untersucht werden müssen. Andererseits sind die Verbundunternehmen nicht daran interessiert, ihre Netzdaten in unverschlüsselter Form an die Verbundpartnern weiterzugeben. Außerdem kann sich im liberalisierten Energiemarkt der Leistungsfluss schnell ändern und dies kann einen negativen Einfluss auf die transiente-oszillatorische Stabilität ausüben. Deshalb muss die Stabilität des Systems überprüft werden, bevor der geplante Transit durchgeführt wird. Um das in kurzer Zeit berechnen zu können, sind vereinfachte Modelle notwendig.

Die dynamische Äquivalentierung basiert auf dem kohärenten Verhalten der Synchronmaschinen nach ausgewählten Netzstörungen. In der meistbenutzten Methode werden die Zeitverläufe der Synchronmaschinen nach einer Störung ermittelt (Bild 1) Die Kohärenz wird durch den einfachen Korrelationskoeffizient  $k_{ij}$  definiert.

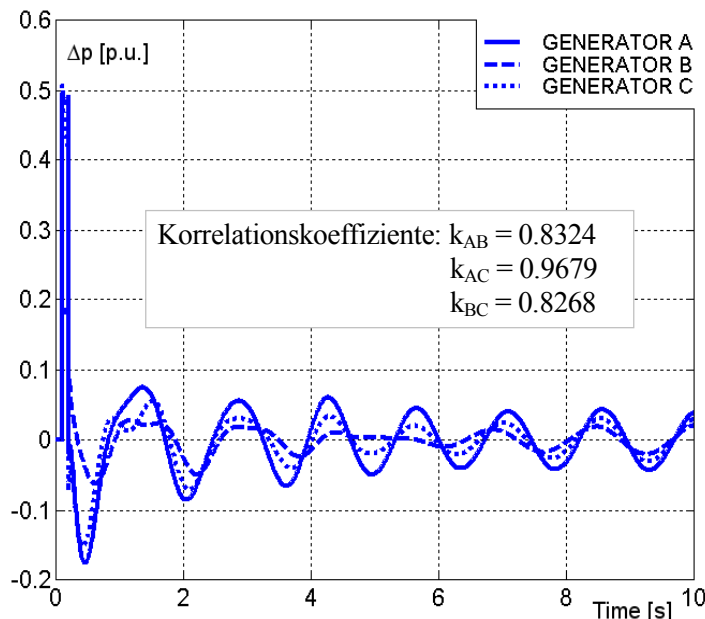


Bild 1: Kohärenzanalyse

Der Wert liegt zwischen -1 und +1. -1 bedeutet, dass die Zeitverläufe in Phasenopposition sind (sie schwingen gegeneinander), wohingegen bei +1 die Zeitverläufe eine absolute Übereinstimmung haben. Zwei Maschinen sind kohärent, wenn der Korrelationskoeffizient ihrer Zeitverläufe über einen vordefinierten Grenzwert  $k_{Grenz}$  liegt. Die Zusammenfassung dieser Maschine zu einer Ersatzmaschine muss so erfolgen, dass sich der stationäre Zustand des Systems nicht verändert. Durch die Einführung der Kenngrößen für die

Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit (Bild 2) kann die Genauigkeit der Äquivalentmodelle weiter verbessert werden. Die Steuerbarkeit gibt an, welchen Einfluss die Veränderung der Randknotenspannung auf die Winkelgeschwindigkeit einer Maschine hat. Mit der Beobachtbarkeit wird der Zusammenhang zwischen einer Polradwinkeländerung und der dadurch entstehenden Wirkleistungsänderung in den Randknoten bestimmt. Durch diese Eigenschaften können die Maschinen identifi-

ziert werden, die von den Randknoten aus weniger anregbar sind, und die auf die Randknoten einen sehr geringen Einfluss ausüben. Diese Maschinen werden ohne Berücksichtigung ihres tatsächlichen Verhaltens zusammengefasst. Dadurch kann ein höherer Reduktionsgrad und eine verbesserte Genauigkeit erreicht werden.

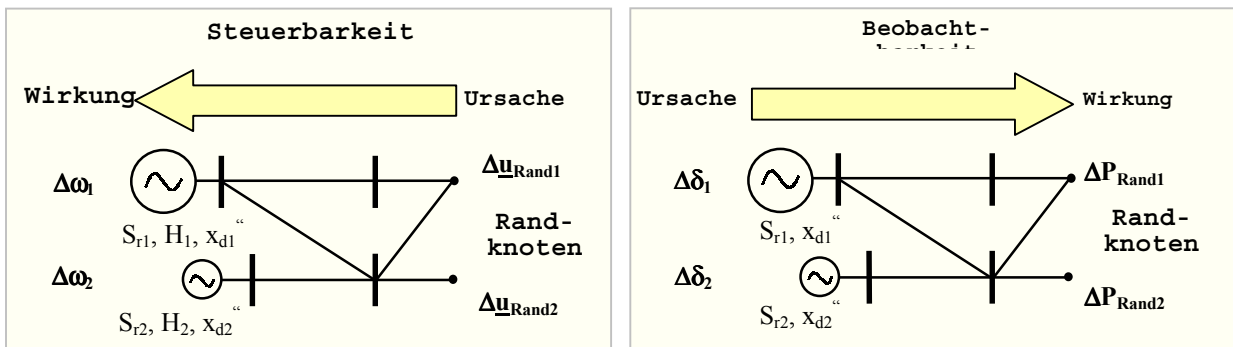


Bild 2: Definition von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

Im folgenden Beispiel dient als Testnetz das auf zwei Teile aufgeteilte europäische Verbundsystem. Das interne Netz (Deutschland) bleibt im Äquivalent unverändert, während das externe Netzteil durch ein Äquivalent ersetzt wird. Die Zeitverläufe der deutschen Generatoren nach einem Kurzschluss werden erst im vollständigen Netz und dann mit dem vereinfachten Netz ermittelt, wobei zunächst ohne (3a) und dann unter Berücksichtigung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit gerechnet wird (3b).

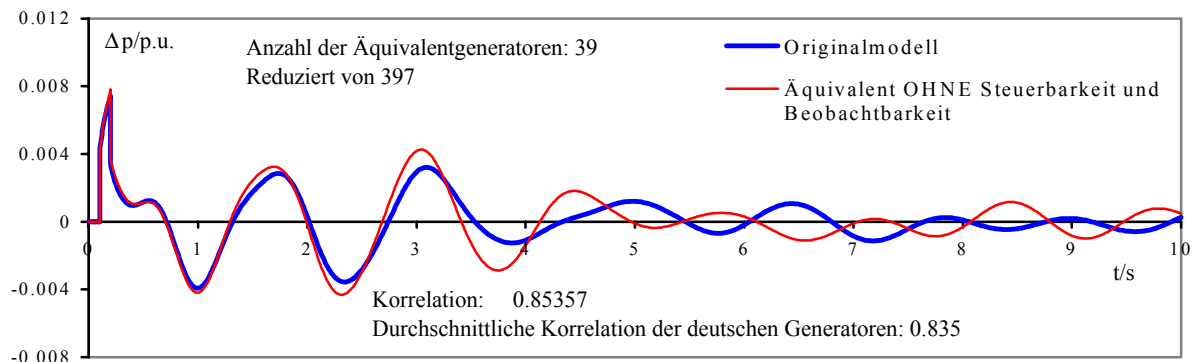


Bild 3a: Einfache Äquivalentierungsmethode

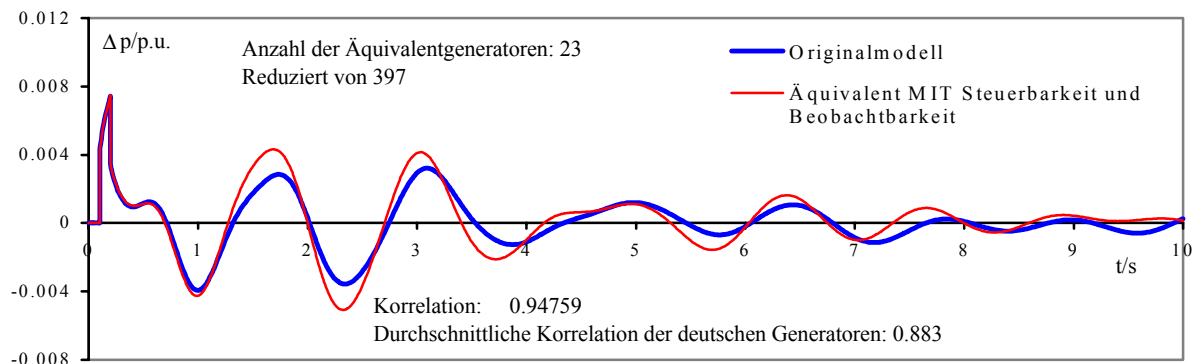


Bild 3b: Erweiterte Äquivalentierungsmethode

# Einsatz von Leitungsdifferentialschutzsystemen unter Berücksichtigung der Wandlersättigung

Die Schutztechnik in elektrischen Energieübertragungssystemen hat die Aufgabe, beim Auftreten einer Störung (z. B. Kurzschluß) durch die selektive Abschaltung des die Gefährdung verursachenden Betriebsmittels die Weiterversorgung zu gewährleisten. An die Funktionszuverlässigkeit der Schutzsysteme werden hohe Anforderungen gestellt, da sowohl die fälschliche Abschaltung eines ungestörten Betriebsmittels (Überfunktion) als auch die Nichtabschaltung gestörter Betriebsmittel (Unterfunktion) zu erheblichen materiellen Schäden und Versorgungsausfällen führen können.

Die Auslegung der Schutzsysteme basiert normalerweise auf der Berechnung stationärer Kurzschlußströme nach VDE 0102. Eine Möglichkeit der weitergehenden Synthese ist die Berechnung transienter Stromverläufe und die anschließende Simulation von Teilen des Schutzsystemes mit diesen Stromverläufen. Zum Schutzsystem gehören neben den Schutzgeräten, den Schutzwandlern und den Kommunikationsverbindungen auch die Hilfsspannungsversorgung und die gesamte Verdrahtung des Schutzsystemes. In der Regel ist deshalb die Simulation des kompletten Schutzsystemes nicht sinnvoll.

Für die Untersuchung von Differentialschutzsystemen ist insbesondere die Nachbildung der Stromwandler einschließlich ihres Sättigungsverhaltens von Bedeutung. In Bild 1 sind zwei Möglichkeiten zur Simulation dargestellt.

Bild 1a zeigt ein reines Software-Modell des Schutzsystemes. Bild 1b zeigt ein Modell, bei dem die berechneten transienten Stromverläufe über eine Datenschnittstelle und einen Verstärker generiert und anschließend dem Schutzgerät zugeführt werden.

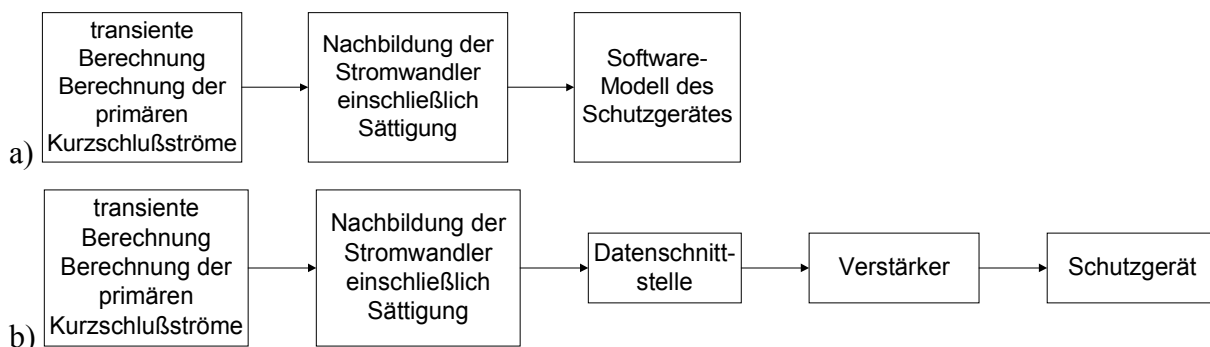


Bild 1: Modelle zur Simulation von Schutzsystemen  
a) mit Software-Modell des Schutzgerätes  
b) mit Verstärker und realem Schutzgerät

Das Software-Modell des Schutzgerätes hat den Vorteil, ohne Verstärker und Schutzgerät auszukommen, dieses Modell wurde zur Bestimmung von Kennlinienparametern, kritischen Kurzschlußströmen und kritischen Schaltzuständen des

Netzes entwickelt und eingesetzt. Das Software-Modell eines Schutzgerätes hat jedoch Grenzen, da die genaue Nachbildung eines modernen numerischen Schutzgerätes weder sinnvoll noch möglich ist. Hierfür müßten im Extremfall z. B. Signalverarbeitungs- und Signalübertragungszeiten mit modelliert werden. Deshalb müssen die Ergebnisse mit dem Aufbau nach Bild 1b verifiziert werden. Dieser Aufbau wird klassisch für die Prüfung von Schutzgeräten eingesetzt, für die Auslegung von Schutzsystemen jedoch nur in Einzelfällen.

Als Anwendungsbeispiel wird im folgenden die Prüfung der Einsatzmöglichkeiten eines Schutzgerätes unter gegebenen Randbedingungen dargestellt.

Die Aufgabenstellung kann mit Bild 2 verdeutlicht werden. Bei einem Kurzschluß außerhalb des Schutzbereiches (F2) darf die Differentialschutzeinrichtung nicht auslösen. In diesem Fall fließt der gesamte Strom über die Leitung und damit über beide Wandler. Die Schutzeinrichtung bestimmt den Differenzstrom aus den beiden Meßgrößen der Stromwandler CT1 und CT2, der primäre Differenzstrom bei einem außenliegenden Fehler ist annähernd 0. Überfunktionen sind zu erwarten, wenn die Meßfehler der Wandler zu einem großen Differenzstrom führen. Ein großer Meßfehler ergibt sich, wenn einer der beiden Wandler den Sättigungsbereich seiner Kennlinie erreichen.

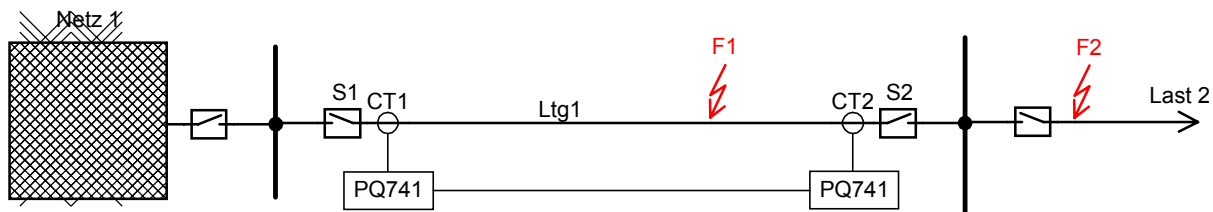


Bild 2: vereinfachte Netztopologie

Zunächst wurde mit dem Software-Modell des Schutzgerätes untersucht, welche Kurzschlußströme besonders kritisch sind. Außerdem wurden verschieden Parametrierungen des Schutzgerätes für spezielle Anwendungsfälle betrachtet.

Anschließend wurden mit den optimierten Schutzparametrierungen Messungen mit dem Prüfaufbau nach Bild 1b durchgeführt.

Für die speziellen Anwendungen konnten Vorschläge zur Schutzparametrierung gemacht werden. Außerdem konnte bewiesen werden, daß in einigen Fällen eine Anpassung des Stromwandlerübertragungsverhaltens, z. B. durch Ändern der Bürde, notwendig sein wird.

Für die allgemeine Anwendung wurde aufgezeigt, unter welchen Randbedingungen (z. B. minimaler Kurzschlußstrom, Abweichungen der Stromwandler) das Schutzgerät eingesetzt werden kann.

Rainer Luxenburger

# Hinweise zur Bewertung der Spannungsqualität nach EN 50160

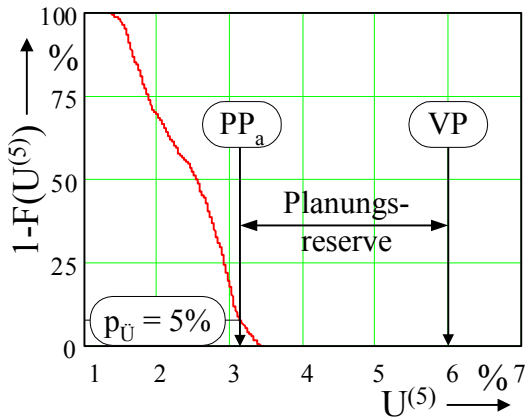


Bild 1: Quantitative Bewertung durch Planungsreserve  
 PP<sub>a</sub> – aktueller Pegel  
 VP – Grenzwert

Eine statistische Bewertung nach EN 50160 entscheidet nur, ob der aktuelle Störaussendungspegel VP kleiner oder größer als der festgelegte Grenzwert ist. Eine quantitative Bewertung des verbleibenden Abstandes zum Grenzwert erfolgt nicht. Um diese dennoch durchführen zu können, wird die Planungsreserve eingeführt (Bild 1). Insbesondere zur Bewertung der Zulässigkeit von Neuanschlüssen qualitätsmindernder Verbraucher und zur Analyse von Trendentwicklungen ist die quantitative Bewertung der Spannungsqualität unerlässlich. Letzteres ermöglicht u. a. die rechtzeitige Erkennung möglicher Überschreitungen des vor-

gegebenen Grenzwertes. Gegenmaßnahmen sind so bereits vor Schädigungen anderer Verbraucher realisierbar.

Die 10-Minuten-Mittelwertbildung nach EN 50160 ist unter der Maßgabe langsam veränderlicher, d. h. quasi-stationärer Spannungsqualitätskenngrößen festgelegt worden. In der heutigen Zeit werden jedoch in zunehmendem Maße qualitätsmindernde Verbraucher eingesetzt, die kurzzeitig (1-Sekunden-Bereich) sehr hohe, den Grenzwert überschreitende Störaussendungen verursachen. Reversible oder irreversible Schäden an sensibleren Verbrauchern sind die Folge. Bild 2 zeigt die Zeitverläufe für verschiedene Mittelungsintervalle der 11. Spannungsharmonischen über einen untersuchten Produktionszyklus. Während  $\frac{3}{4}$  der Zeit ist ein stark stochastischer Verlauf des Störaussendungspegels mit kurzzeitigen Überhöhungen bis fast zum doppelten des Grenzwertes zu beobachten. Der 10-Minuten-Mittelwert überschreitet den Grenzwert dagegen nur an 2 Zeitpunkten geringfügig. Die statistische Auswertung für die verschiedenen Mittelungsintervalle zeigt Tabelle 1.

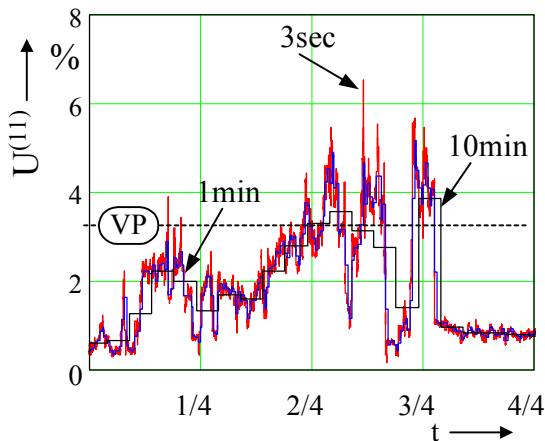


Bild 2: Spannungsharmonische ausgewählter Mittelungsintervalle

Tabelle 1 Quantile der 11. Harmonischen

	Mittelungsintervall		
	3 sec	1 min	10 min
Mittelwert	1,61%	1,61%	1,61%
Maximum	6,53%	5,17%	3,86%
q(95%)	3,42%	3,36%	<b>3,19%</b>

Während  $\frac{3}{4}$  der Zeit ist ein stark stochastischer Verlauf des Störaussendungspegels mit kurzzeitigen Überhöhungen bis fast zum doppelten des Grenzwertes zu beobachten. Der 10-Minuten-Mittelwert überschreitet den Grenzwert dagegen nur an 2 Zeitpunkten geringfügig. Die statistische Auswertung für die verschiedenen Mittelungsintervalle zeigt Tabelle 1.

Mittelwerte und  $p_{U(95)}$  – Werte für alle 3 Mittelungsintervalle sind betragsmäßig kleiner als der Grenzwert von  $U^{(11)} = 3,5\%$ . Der hervorgehobene Wert ergibt sich durch Anwendung der statistischen Bewertung nach EN 50160 und zeigt an, dass der betrachtete Netzknotenpunkt die Spannungsqualität nach EN 50160 einhält. Dennoch auftretende Schäden an angeschlossenen Geräten sind auf die kurzzeitigen Überhöhungen zurückzuführen, die erst durch Verwendung eines 3-Sekunden-Mittelungsintervalls in ihrer vollen Höhe erfasst werden. Die Untersuchung legt nahe, neben den 10-Minuten-Mittelwerten auch die 3-Sekunden-Mittelwerte bzw. den in einem 10-Minuten-Intervall gemessenen Maximalwert zusätzlich zu speichern und auszuwerten.

Nach EN 50160 muss die Auswertung der Spannungsqualitätskenngrößen über mindestens 1 Woche erfolgen. Eine Woche repräsentiert jedoch nur in den seltensten Fällen den gesamten Variationsbereich der beobachteten Kenngröße. Aus Änderungen in den Abnehmergewohnheiten und saisonalen Einflüssen resultiert eine Schwankung der Spannungsqualität, die durch eine Wochenmessung nicht erfasst

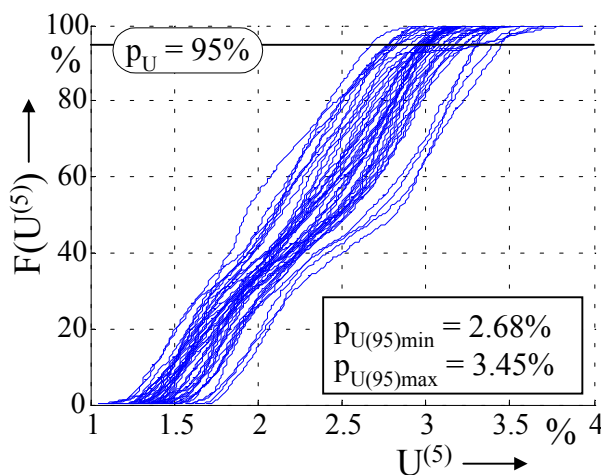


Bild 3: Varianz von 43 Wochenmessungen

werden kann. Bild 3 zeigt die Häufigkeitsverteilungen von 43 aufeinanderfolgenden Wochenmessungen. Der Wert für  $p_{U(95)}$  schwankt zwischen 2,68 % und 3,45 %. Bezogen auf den Mittelwert entspricht das einer Schwankung um 24,9 %. Insbesondere in Situationen, wo der über eine Woche bestimmte Wert für  $p_{U(95)}$  nur 10 % unter dem Grenzwert liegt, können unzulässige Überschreitungen nicht ausgeschlossen werden.

Praktisch bestehen bei mehreren vorliegenden Wochenmessungen (mehrere Werte für  $p_{U(95)}$ ) verschiedenen Möglichkeiten einen Wert  $p_{U(95)}$  zum Vergleich mit dem Grenzwert auszuwählen (Maximalwert, Mittelwert oder ein bestimmtes Quantil). Um dieser Unsicherheit des Ingenieurs zu begegnen, wird die Berechnung einer oberen Toleranzgrenze empfohlen, welche geringfügig oberhalb von  $p_{U(95)max}$  liegt und eine deutliche Verbesserung der Sicherheit bei der Bewertung der Spannungsqualität darstellt.

Praktisch bestehen bei mehreren vorliegenden Wochenmessungen (mehrere Werte für  $p_{U(95)}$ ) verschiedenen Möglichkeiten einen Wert  $p_{U(95)}$  zum Vergleich mit dem Grenzwert auszuwählen (Maximalwert, Mittelwert oder ein bestimmtes Quantil). Um dieser Unsicherheit des Ingenieurs zu begegnen, wird die Berechnung einer oberen Toleranzgrenze empfohlen, welche geringfügig oberhalb von  $p_{U(95)max}$  liegt und eine deutliche Verbesserung der Sicherheit bei der Bewertung der Spannungsqualität darstellt.

Jan Meyer

## Bestimmung der Dämpfungsparameter in Netzen mit Resonanzsternpunktterdung

In Deutschland wird ein großer Teil der 110-kV-Netze und der Mittelspannungsnetze mit Resonanzsternpunktterdung betrieben. Die Vorteile dieser Sternpunktbehandlung sind:

- selbständige Verlöschung des Lichtbogens bei einpoligen Fehlern
- langsames Wiederkehren der Spannung an der Fehlerstelle (Minimierung der Gefahr des Wiederzündens)

Eine wesentliche Voraussetzung für einen sicheren Netzbetrieb ist die genaue Kenntnis der Netzparameter Dämpfung  $d$ , der Verstimmung  $\nu$  und der Unsymmetrie  $k$  des Netzes. Mit Hilfe der Transientenerfassung moderner Schutz- und Leittechnikgeräte ist eine genaue Bestimmung der Netzparameter aus den Signalparametern der abklingenden Verlagerungsspannung nach einem einpoligen Erdschluss möglich.

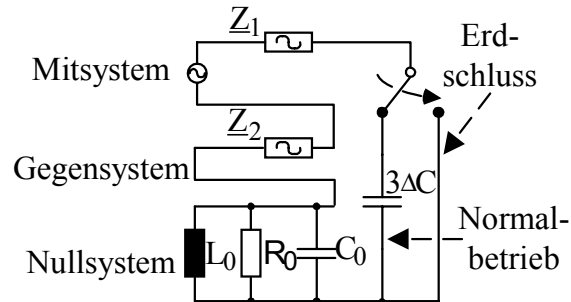


Bild 1: Ersatzschaltbild der symmetrischen Komponenten für den Erdschluss

So lange der Fehler besteht, schwingen alle Spannungen zwangsläufig mit der Netzspannung (siehe Bild 1). Wenn die Löschbedingungen erfüllt sind, dann erlischt der Lichtbogen im Stromnulldurchgang ohne Wiederzündung (Umschaltung Schalter in Bild 1). Das Mitsystem schwingt weiterhin mit der Netzfrequenz und koppelt über die Unsymmetrie des Netzes ( $3\Delta C$ ) ein. Der aus Kompensationsspule und Leiter-Erde-Kapazitäten bestehende Parallelschwingkreis des Nullsystems schwingt mit seiner Eigenfrequenz aus. Dabei verliert er durch die Dämpfungswiderstände allmählich seine Energie (Bild 2a).

Bei einer genauen Abstimmung der Kompensationsspulen auf die Leiter-Erde-Kapazitäten ist die Eigenfrequenz des Nullsystems gleich der Netzfrequenz. Im Normalfall weicht die Eigenfrequenz des Nullsystems geringfügig ab. Das Signal der Verlagerungsspannung setzt sich so aus zwei Signalanteilen zusammen, welche eine fast identische Frequenz, aber einen sehr starken Amplitudenunterschied besitzen. Dies ist an dem kleinen Schwebungstal im Bild 2a zu erkennen. Mit herkömmlichen Signalanalyseverfahren (z. B.: Fouriertransformation) können die einzelnen Frequenzen nicht ausreichend genau bestimmt werden. Aus diesem Grunde wurde bisher die eingekoppelte Komponente des Mitsystems bei Bestimmungen der Signalparameter vernachlässigt. Dies hat aber zur Folge, dass die Nullsystemkomponente und so auch die Dämpfung nicht genau bestimmt werden.

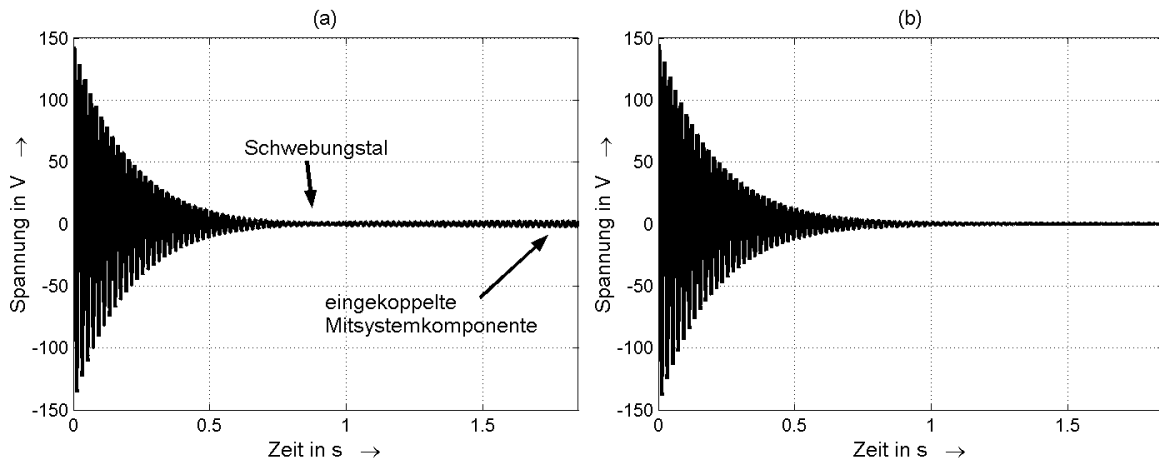


Bild 2: (a) gemessene abklingende Verlagerungsspannung  
 (b) Subtraktion des 50-Hz-Anteiles von der gemessenen Verlagerungsspannung

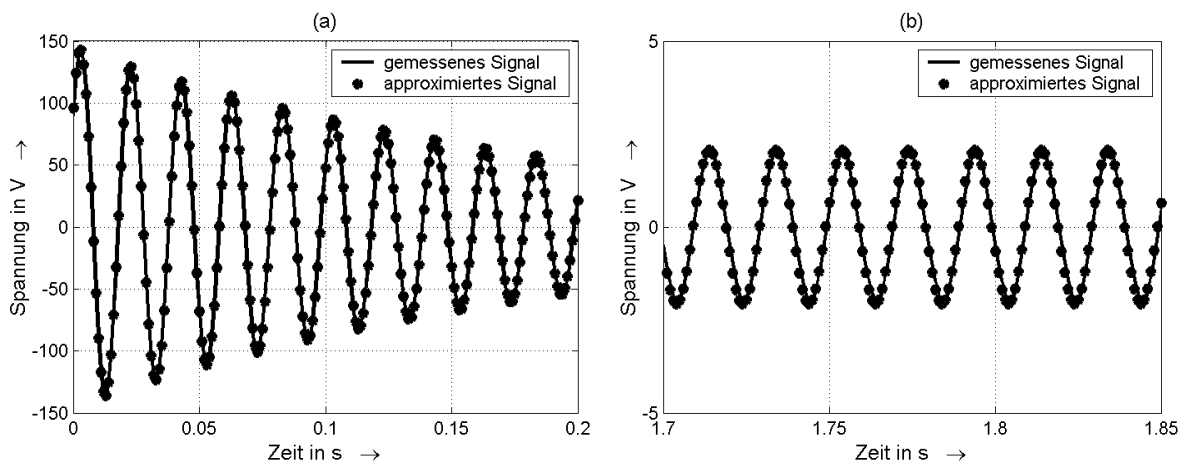


Bild 3: (a) gemessenes und approximiertes Signal am Anfang der Abtastung  
 (b) gemessenes und approximiertes Signal am Ende der Abtastung

Eine Möglichkeit der exakten Bestimmung der Signalparameter ist gegeben, wenn die beiden Signalanteile voneinander getrennt werden. Eine Filterung ist auf Grund der geringen Frequenzunterschiede aber nicht möglich. Die Voraussetzung für die Trennung der beiden Signale ist eine ausreichend lange zeitliche Aufnahme des Abklingvorganges. Man kann dann davon ausgehen, dass die letzten aufgezeichneten Perioden nur von dem konstanten Anteil der eingekoppelten Mitsystemkomponente stammen und die Komponente des Nullsystems vollständig abgeklungen ist. Die Parameter der Mitsystemkomponente können so aus den letzten Perioden der Aufzeichnung bestimmt werden. Danach kann diese Komponente in die Vergangenheit bis zum Anfang der Aufzeichnung approximiert werden. Bei anschließender Subtraktion des approximierten Signals vom aufgezeichneten Signal ist das Ergebnis der exponentiell gedämpfte Abklingvorgang des Nullsystems (siehe Bild 2b). Eine Bestimmung der Signalparameter der Nullkomponente ist nun sehr einfach möglich.

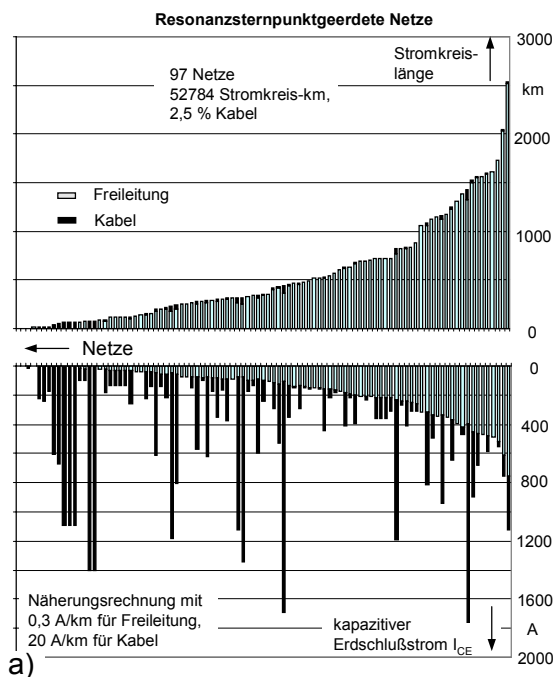
Georg Pilz



# Betriebserfahrungen in resonanzsternpunktgeerdeten 110-kV-Netzen mit großem kapazitiven Erdschlußstrom

Die Vorteile der Resonanzsternpunktterdung sind allgemein bekannt. Der größte Nutzen für den Betrieb von Verteilungsnetzen besteht darin, daß ein Lichtbogen im Allgemeinen selbständig verlischt und somit ohne Auswirkungen auf die Kunden bleibt. Die internationale Entwicklung zeigt, daß in einigen Ländern immer mehr Verteilungsnetze aufgrund dieser Vorteile mit Resonanzsternpunktterdung betrieben werden. Der größte Teil der deutschen 110-kV-Netze wird resonanzsternpunktgeerdet betrieben. In den letzten Jahren ist durch Zusammenschaltung von Teilnetzen und Zubau von Kabelstrecken der kapazitive Erdschlußstrom in einigen Netzen erheblich angestiegen.

Der kapazitive Erdschlußstrom  $I_{CE}$  ist das entscheidende Kriterium bei der Angabe von Netzgrößen. In Bild 1a) ist eine geordnete Übersicht der ausgewerteten 110-kV-Netze mit Resonanzsternpunktterdung in Deutschland bezüglich ihrer Stromkreislänge und ihres kapazitiven Erdschlußstromes dargestellt. Bild 1b) zeigt in der Tabelle durch die Gruppeneinteilung den Anstieg des Anteiles der Netze mit einem kap. Erdschlußstrom über 1000 A.



		1987	1997/ 2000
Stromkreislänge	$0 < l < 500$ km	58	58
	$500 < l < 1000$ km	10	21
	$l > 1000$ km	13	18
kap. Erdschlußstrom	$0 < I_{CE} < 500$ A	54	70
	$500 < I_{CE} < 1000$ A	21	15
	$I_{CE} > 1000$ A	6	12

a) b)  
 Bild 1: Netzgrößen resonanzsternpunktgeerdeter 110-kV-Netze in Deutschland  
 a) nach Stromkreislängen geordnete grafische Darstellung  
 b) tabellarische Zusammenstellung und Gruppeneinteilung

Die Unsymmetrie der Freileitungen, die Dämpfung und die Verstimmung beeinflussen die maximale Verlagerungsspannung während des normalen Betriebes. Die Höhe des Reststromes ist abhängig von der Dämpfung, Verstimmung und den

Harmonischen. Entsprechend der Norm DIN VDE 0228 Teil 2 ist für 110-kV-Netze ein maximaler Erdschlußreststrom von  $I_{\text{Rest}} = 130 \text{ A}$  zulässig.

Im Gegensatz zu den üblichen Annahmen eines Dämpfungsfaktors des Netzes von ca.  $d = 10 \%$  ergaben die Messungen in den untersuchten Netzen einen erheblich geringeren Wert. In Bild 2a) ist die Summenhäufigkeit des Dämpfungsfaktors  $d$  von zwei untersuchten Netzen dargestellt. Deutlich wird dabei, daß alle ermittelten Dämpfungsfaktoren unter  $4,25 \%$  lagen. In dem Netz 1 liegen  $60 \%$  der ermittelten Dämpfungsfaktoren im Bereich bis  $d = 3\%$ ,  $95 \%$  aller ermittelten Dämpfungsfaktoren liegen unter  $d = 4 \%$ . Die Auswertung der Meßwerte in einem Netz 2 wies noch wesentlich geringere Werte auf.

Für einen optimalen Netzbetrieb muß sichergestellt sein, daß die Verlagerungsspannung einen Wert von  $10 \%$  der Nennspannung im Resonanzpunkt nicht überschreitet. Die durch die kapazitive Unsymmetrie hervorgerufene Verlagerungsspannung kann nur durch Symmetrierung des Netzes verringert werden. Mit den aus der Netzsimulation vorliegenden Modellen wurde überprüft, wie mit geringem Aufwand durch einfache technische Maßnahmen wie z. B. Veränderung der Leiterfolge an vorhandenen Abspannmasten eine bessere Symmetrierung der Teilnetze und damit auch des Gesamtnetzes erfolgen kann. Die Wirksamkeit der durchgeführten Veränderungen kann anhand der in Bild 2b) dargestellten Resonanzkurven nachgewiesen werden. Das Maximum der Verlagerungsspannung konnte von  $7,8 \text{ kV}$  auf  $4,7 \text{ kV}$  reduziert werden. Ziel der Verdrillungsmaßnahmen ist eine leitungsabschnittsbezogene Symmetrierung. Der permanente Betrieb mit geringer Verstimmung, überwacht durch einen Verstimmungsgradregler, hat sich für Netze mit  $I_{\text{CE}} > 1200 \text{ A}$  und hohem Kabelanteil im Gegensatz zu reinen Freileitungsnetzen als unproblematisch erwiesen. Kabel haben dabei eine symmetrierende Wirkung.

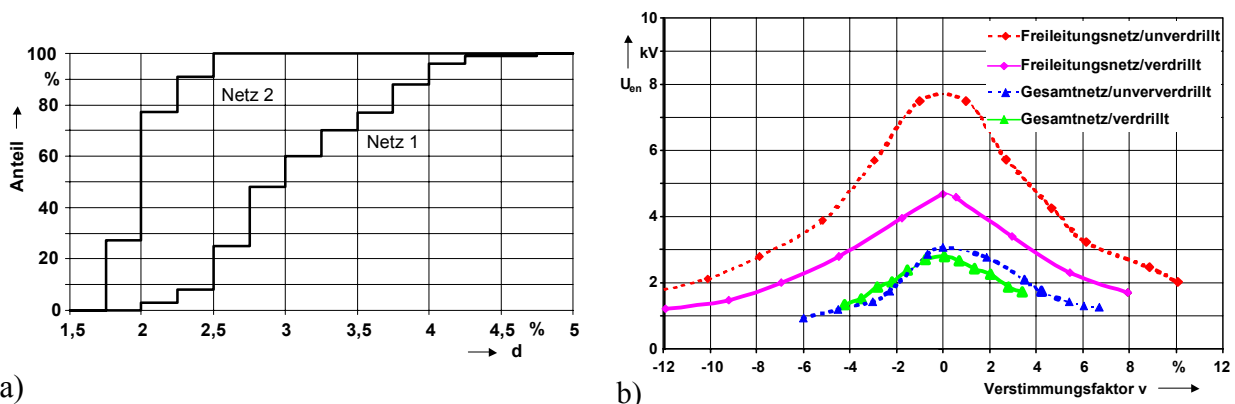


Bild 2: Wichtige Kenngrößen resonanzsternpunktgeerdeter Netze

- Summenhäufigkeitsverteilung des Dämpfungsfaktors  $d$  von 2 Netzen
- Resonanzkurve der Verlagerungsspannung vor und nach Symmetrierungsmaßnahmen in einem 110-kV-Netz

Olaf Seifert

## 3.2. Dissertationen

### Riechert, Uwe: **Eignung von Polyethylen für Gleichspannungs-Energiekabel**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger  
Prof. Dr.-Ing. Wilfried Kalkner  
Dr.-Ing. Stephan Pöhler

Kunststoffe und insbesondere Polyethylen (PE) haben sich als Isolierstoff für Drehstromkabel im Mittel- und Hochspannungsbereich bewährt und werden bis in die höchsten Spannungsebenen eingesetzt. Zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) werden für Übertragungsspannungen größer als 100 kV ausschließlich Masse- oder Niederdruck-Ölkabel eingesetzt. Kunststoffisolierten Kabeln kann in Zukunft eine große Bedeutung bei der HGÜ zukommen, da sich die entsprechenden Kabelanlagen durch wesentliche ökologische und ökonomische Vorteile auszeichnen.

Bei der Anwendung der homogenen, extrudierten Kunststoffisolierung für Gleichspannungs-Energiekabel ist zu berücksichtigen, daß neben wesentlich höheren Betriebsfeldstärken (30 kV/mm bis 40 kV/mm) auch gänzlich andersartige Beanspruchungen im Vergleich zu den klassischen Wechselspannungsisolierungen sicher beherrscht werden müssen. Die Fähigkeit von Kunststoffen, langzeitstabile Raumladungen auszubilden, wird als einer der wesentlichen Gründe dafür angesehen, daß PE bis heute auf den Einsatz als Isolierstoff für HGÜ-Kabel mit einer Betriebsspannung kleiner als 100 kV/mm beschränkt ist.

Ausgehend von dieser Problematik wurden im Rahmen der Arbeit Untersuchungen über das Kanaleinsatzverhalten in Nadel-Platte-Anordnungen und über das Durchschlagverhalten sowohl von Isolierstoff-Folien in Kugel-Kugel-Anordnungen als auch von realen Kabelanordnungen bei Beanspruchung durch hohe Gleichfeldstärken unter verschiedenen, betriebsrelevanten Bedingungen durchgeführt. Als Versuchsmaterialien wurden in der Hochspannungs-Kabeltechnik gebräuchliche Polyethylen-Compounds unterschiedlicher Dichte eingesetzt, die in vernetzter oder un- vernetzter Form vorlagen. Zum Teil waren dem Basispolymer verschiedene Copolymere beigemischt.

Die Kanaleinsatz- oder Durchschlagspannung bei Gleichspannungsbelastung ist wesentlich größer als bei Blitzstoßspannungsbelastung oder bei Wechselspannungsbelastung. Allein aus den sehr hohen Werten bei Gleichspannung kann jedoch eine Eignung von PE für HGÜ-Kabel nicht abgeleitet werden. Vielmehr wird die elektrische Durchschlagfestigkeit durch bipolare Überlagerungen einer Gleichspannung mit einer Stoßspannung, durch Stoßentladungen oder Polaritätswechsel

mit einer Anstiegszeit der wiederkehrenden Gleichspannung von etwa 20 ms erheblich gemindert.

Die Versuchsergebnisse belegen damit auch den dominierenden Einfluß von Raumladungen auf das elektrische Durchschlagverhalten. Wird die Gleichspannungsbelastung kurzzeitig entfernt oder die Polarität gewechselt, entscheidet insbesondere der Zeitbedarf für den Abbau und den erneuten Aufbau einer homopolaren und damit feldschwächenden Raumladung.

Neben der Spannungsform wurden im Rahmen der Arbeit weitere mögliche Einflußfaktoren auf das Durchschlagverhalten untersucht. In erster Linie sind dabei Temperatur, Polarität, Dauer und Höhe der Gleichspannungsvorbelastung, Spannungssteigerungsgeschwindigkeit, Isolierungsdicke, Form und Häufigkeit der überlagerten Stoßspannung zu nennen.

Ein wichtiger Gesichtspunkt für die Anwendung der an Modellanordnungen erzielten Ergebnisse auf technische Isolierungen ist die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf reale Kabel. Verglichen mit den Versuchsergebnissen an Isolierstoff-Folien zeigen Kabel ein ähnliches Durchschlagverhalten. Dies gilt sowohl für bipolare Überlagerungen einer Gleichspannung mit einer Stoßspannung als auch für Stoßentladungen mit einer Anstiegszeit der wiederkehrenden Gleichspannung von etwa 20 ms. Bei Beanspruchung durch sehr hohe Gleichfeldstärken können im Kabel zudem multiple Durchschläge entstehen, die als Folge des elektrischen Versagens der Kabelisolierung neben dem eigentlichen Durchschlagkanal auftreten.

Die elektrische Durchschlagfestigkeit kunststoffisolierter Kabel hängt wesentlich von der Leiteroberflächentemperatur und von der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenleiter ab. Für den Feldstärkeverlauf im elektrischen Strömungsfeld zeichnet die spezifische Gleichstromleitfähigkeit, die sowohl von der Temperatur als auch von der elektrischen Feldstärke abhängt, verantwortlich. Auf der Basis von Messungen der Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur und der elektrischen Feldstärke, war es über die Bestimmung der Leitfähigkeitsparameter möglich, die makroskopische Feldverteilung innerhalb der PE-Isolierung des Kabels zu berechnen. Bei Gleichspannungsbelastung können schon bei radialen Temperaturdifferenzen von wenigen Kelvin Feldüberhöhungen am Außenleiter auftreten (Feldstärke-Inversion), die eine Verringerung der Durchschlagspannung zur Folge haben.

Uwe Riechert

# Meisenbach, Christine: Beitrag für ein intelligentes Elektroenergiemanagement lokaler Energiesysteme

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Winkler  
Prof. Dr.-Ing. habil. J. Zschernig  
Dr.-Ing. R. Bitsch

In der Dissertation wird ein intelligentes Energiemanagementsystem entwickelt, mit dem der Lastbedarf dezentraler Energiesysteme mit der geforderten Versorgungszuverlässigkeit automatisch gedeckt wird unter Beachtung energetischer, ökonomischer und ökologischer Gesichtspunkte (Bild 1).

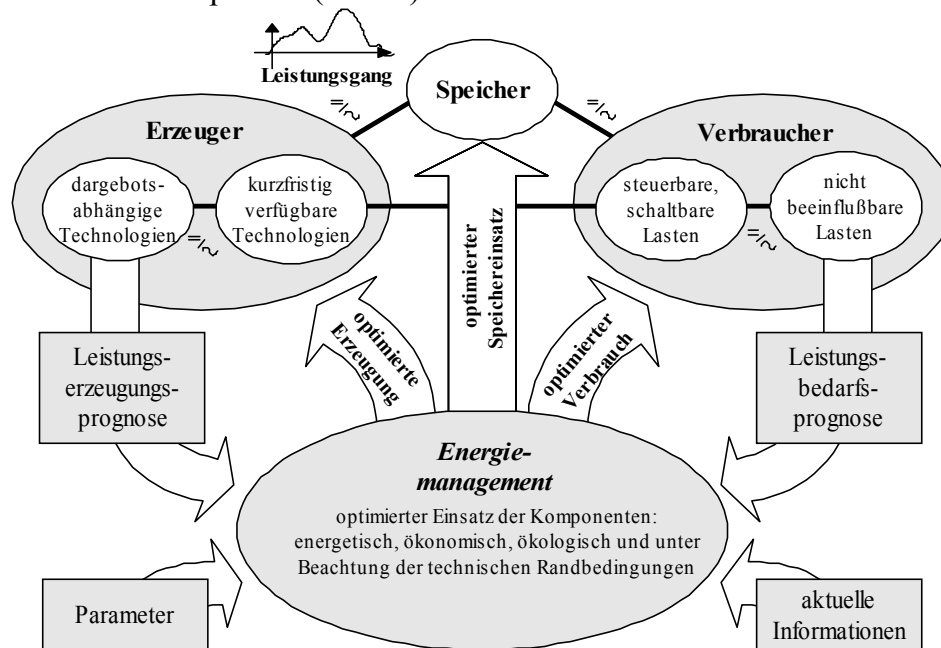


Bild 1: Funktionsprinzip des lokalen Energiemanagementsystems

Auf der Grundlage von Leistungsprognosen sowohl für die von den regenerativen Erzeugungsanlagen erzeugte Leistung wie auch für den Lastbedarf wird der Energieeinsatz für den Folgetag vorausgeplant. Das entwickelte Managementsystem minimiert sowohl das Leistungsdefizit als auch die nicht genutzte Energiemenge. Unnötige Betriebszeiten und -zyklen werden vermieden; ein Betrieb der Anlagen mit maximalem Wirkungsgrad optimiert den Brennstoffbedarf. Die Lebensdauer der Anlagen steigt. Umwelt und Ressourcen werden geschont.

Für jedes Optimierungsintervall wird mit Hilfe evolutionärer Algorithmen ein optimales Schaltschema für alle Betriebsmittel bestimmt, das die Kosten für den Betrieb des Systems am Folgetag minimiert. Dabei werden neben den Kosten für die Leistungserzeugung konstante Kosten für nichterfüllte Nebenbedingungen und exponentiell mit der Wahrscheinlichkeit einer Leistungsunterdeckung ansteigende Kosten berücksichtigt. Das Management verarbeitet prognostizierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Leistungsdargebotes der regenerativen Erzeugungsanlagen sowie des Leistungsbedarfs der Verbraucher. Bei einer Optimierung auf eine ausgeglichene Leistungsbilanz lassen sich Aussagen über die in jedem Optimierungsintervall vorzuhaltende Regelreserve ableiten, um

mit der geforderten Versorgungszuverlässigkeit eine mindestens ausgeglichene Energiebilanz zu gewährleisten. Steht keine Regelreserve zur Verfügung, muß vom Management zu jedem Zeitpunkt der Leistungsüberschuß geplant werden, mit dem die geforderte Versorgungszuverlässigkeit eingehalten werden kann.

Ein Vergleich verschiedener Prognoseverfahren zeigt Vorteile beim Einsatz künstlicher neuronaler Netze gegenüber herkömmlichen mathematischen Verfahren. Systematische Untersuchungen ermöglichten, klare, allgemeingültige Entwurfsregeln für neuronale Leistungsprognosesysteme aufzustellen. Eine neu gefundene Methode, bei der die Prognose den Mittelwert der Prognosen einzelner Netze darstellt, übertraf alle Variationen (Bild 2). Als Netze kommen dabei Multilayer Perceptrons mit wenigen Neuronen in einer verdeckten Schicht zur Anwendung.

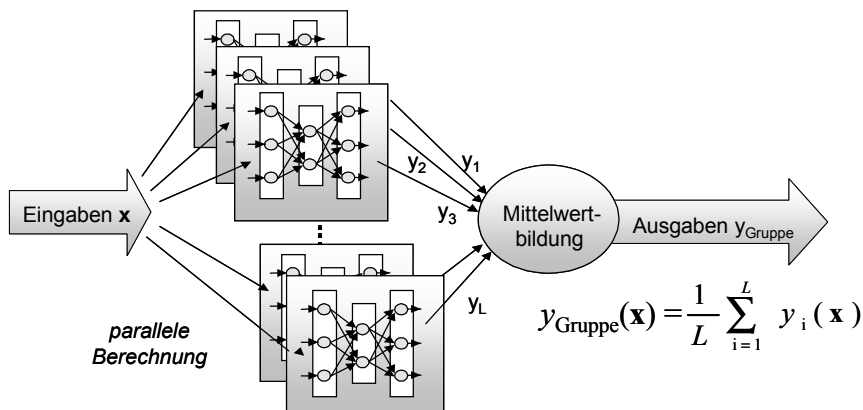


Bild 2: Funktionsweise der Netzgruppen

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Leistung wird aufgrund der Normalverteilung der Prognosefehler bei einem optimal gestalteten Prognosesystem durch die Parameter Erwartungswert und Standardabweichung bestimmt, die mit zwei getrennten neuronalen Netzgruppen ermittelt werden. Man erhält Prognosebänder, in denen die aktuelle Leistung mit einer definierten Wahrscheinlichkeit liegt (Bild 3).

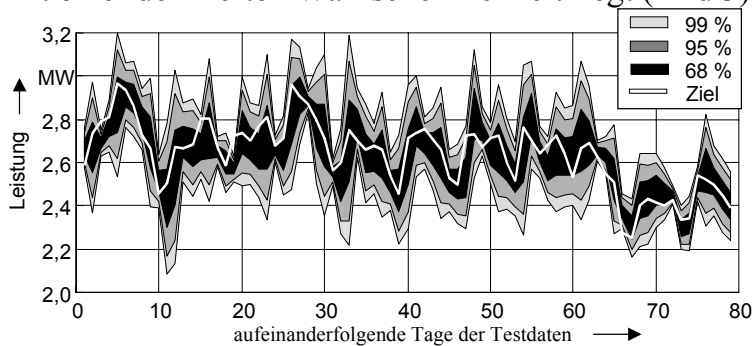


Bild 3: Prognostizierte Wahrscheinlichkeitsbänder eines Dorfes in Alaska

Mit steigender Größe der betrachteten Energiesysteme nimmt der stochastische Anteil an der Last ab, was zu geringeren Prognosefehlern führt. Die Leistungsbedarfsprognosen wurden an einem Modellsystem und an mehreren bestehenden Systemen getestet. Der mittlere absolute Fehler lag meist unter 3 % der Höchstlast. Bei den Prognosen der Leistungsbereitstellung von Windenergie- und Photovoltaikanlagen traten Fehler bis 20 % auf.

Christine Meisenbach

# **Nitzschke, Detlef: Analyse transienter Störspannungen in Schaltanlagen und Modellbildung für die Simulation**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. K.-H. Gonschorek  
Prof. Dr.-Ing. D. Peier  
Dr. rer. nat. B. Jäckel

An die Funktionszuverlässigkeit digitaler Schutz- und Leittechnik in Schaltanlagen werden hohe Anforderungen gestellt. Diese Zuverlässigkeit kann bei nicht ausreichender elektromagnetischer Verträglichkeit durch transiente Störspannungen in den Sekundärkreisen einer Schaltanlage beeinträchtigt werden. Aus vorangegangenen Untersuchungen sind Richtwerte für Amplituden und Frequenzanteile der Störspannungen sowie eine Orientierung über den grundsätzlichen Verlauf während einer vollständigen Trennerschaltung bekannt. Anhand von Messungen in einer gasisolierten Schaltanlage wurde zudem gezeigt, dass die Frequenzanteile der Störspannungen abhängig vom zündenden Trennerpol sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Modellbildung für die Entstehung und Ausbreitung transienter Störspannungen in Sekundärkreisen von Schaltanlagen durchgeführt. Durch ausführliche Analyse umfangreicher Messdaten aus gas- und luftisolierten Schaltanlagen bei Trennerschaltungen wurden zunächst Einflussgrößen auf die Amplituden und Frequenzen sowie dominierende Störpfade ermittelt. Um eine Zuordnung gemessener Frequenzanteile zu Parametern der Primäranlage zu ermöglichen, waren zusätzliche Messungen an einer einseitig geerdeten Sammelschiene einer 380-kV-Schaltanlage bei Trennerschaltungen der Nachbarsammelschiene erforderlich.

Der gesamte Verlauf der Störspannungen an den Eingangsklemmen von Sekundärtechnik wurde untersucht und auch für luftisolierte Anlagen bestätigt, dass bei den Schaltungen jede Zündung eines Trennerpoles zu einem trennerpolspezifischen Störspannungsimpuls führt. Dadurch können die Einzelimpulse drei Gruppen für je einen Trennerpol zugeordnet werden. Die Simulation einer einzigen Trennerpolzündung ist ausreichend, um die maximale Störbelastung zu ermitteln. Die Erkenntnisse waren Voraussetzung für die anschließende Modellbildung.

Es wurde festgestellt, dass die Modellierung aller wesentlichen physikalischen Vorgänge nicht geschlossen möglich ist, sondern unterschiedliche Modelle genutzt werden müssen. Nach stufenweiser Vereinfachung wurde deshalb zunächst ein geeignetes Modell für das Primärsystem einer Freiluftschaltanlage gewählt. Es zeigte sich, dass die Momentenmethode die transienten Vorgänge in diesem Anlagenteil am besten beschreibt. Die Parametrierung dieses Teilmodelles wurde durchgeführt und ist wesentliche Grundlage für die anschließende stufenweise Verfeinerung zum Gesamtmodell. Die Modellierung der Primäranlage erfordert zwingend die Berücksichtigung des umfangreichen Erdernetzes der Schaltanlage, auch wenn sich dadurch die Anzahl der Unbekannten und die Rechenzeit vervielfacht. Die Simulationsergebnisse wurden mit Messwerten der transienten Beeinflussungsspannungen an einseitig geerdeten Nachbarsammelschienen bei Schalthandlungen in der Anlage verglichen und Abweichungen analysiert.

Rückwirkungen des Sekundärsystems auf die Primäranlage werden vernachlässigt, deshalb können die Kabelschirme in die Modellierung mit der Momentenmethode einbezogen werden. Teilergebnis dieser Simulation sind die Stromverteilungen auf den Kabelschirmen sowie die primäre Wandlerspannung (Spannung zwischen einer Primärklemme und Erde). Die Ein-

kopplungen in die Kabeladern ergeben sich durch Multiplikation der Schirmströme mit der Kabeltransferimpedanz sowie durch Multiplikation der primären Wandlerspannung mit der Wandlerübertragungsfunktion. Die Berechnung der Störspannungsausbreitung im Sekundärkabel erfolgt nach der Leitungstheorie unter Berücksichtigung der Einkopplungen und der Abschlussimpedanzen des Kabels. Auch dieses Teilmodell wurde separat parametrisiert und der Einfluss der Modellparameter auf das Simulationsergebnis analysiert. Dominierenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse im Sekundärbereich hat die Wandlerübertragungsfunktion. Zum Vergleich mit der Simulation wurden Messwerte der Störspannungen in Sekundärkreisen der Schaltanlage genutzt, für die zeitgleich die transienten Spannungen im Primärbereich gemessen wurden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist noch nicht die exakte Nachbildung gemessener Störspannungen in den Sekundärkreisen beliebiger konkreter Schaltanlagen. Vielmehr waren Modelle zur Simulation dieser Störspannungen abzuleiten und ihre grundsätzliche Tauglichkeit zu prüfen. Die unterschiedliche Abhängigkeit der Simulationsergebnisse von zahlreichen Parametern wurde gezeigt und analysiert, welche Anlagendaten Voraussetzung für die Analyse einer realen Schaltanlage sind.

Mit dem parametrisierten Modell einer konkreten Anlage wurden Simulationsergebnisse ermittelt, die in der Größenordnung des Streubereiches gemessener Verläufe liegen. Um das Verfahren abschließend bewerten zu können, sind vergleichende Untersuchungen für weitere Freiluft-Schaltanlagen erforderlich. Es ist zu untersuchen, in welchen speziellen Fällen nicht-lineare Elemente im System (Korona, Überspannungsableiter) die Ergebnisse beeinflussen.

Bei Kenntnis aller maßgeblichen Parameter soll es mit dem vorgestellten Algorithmus zukünftig möglich werden, die EMV von Sekundärtechnik einer Anlage bereits in der Planungsphase zu beurteilen, Variantenvergleiche durchzuführen sowie nicht messbare Beeinflussungsfälle, wie z. B. Blitzeinschlag in der Anlage, zu simulieren. Schon jetzt können mit Simulationen für konkrete Schaltanlagen die Messergebnisse der Störspannungen an den Sekundärkabeln ergänzt werden. Durch Parametervariationen sind bessere Aussagen über den zuverlässigen Betrieb digitaler Schutz- und Leitechnik in der Anlage möglich. Auch Entscheidungen über einen befristeten Weiterbetrieb alter Steuerkabel bei Einbau digitaler Schutz- und Leitechnik können vorbereitet werden.

Durch die vorgestellten Erkenntnisse ist es möglich, zukünftige Messprogramme sehr zielgerichtet aufzustellen. Die Anzahl der erforderlichen Schaltheaktionen und Messorte kann reduziert und dennoch die kritische Konstellation von Schalt- und Messort mit den maximalen Störspannungen für die konkrete Anlage ermittelt werden.

Das erweiterte Teilmodell einer Freiluftanlage ist die Grundlage für eine Erweiterung zum komplexen Modell einer gasisolierten Schaltanlage. Die Übertragbarkeit des Algorithmus auf die Modellierung der kritischen transienten Störspannungen in Sekundärkabeln von gasisolierten Schaltanlagen wurde geprüft. Die Verknüpfung von Momentenmethode und Leitungstheorie ist für diese Simulation ebenfalls geeignet. Die Modellierung der Vorgänge auf den Innenleitern der GIS muss jedoch mit der Leitungstheorie erfolgen. Die Kopplung zur Kapselung wird mit der inversen Kabeltransferimpedanz beschrieben. Die weitere Berechnung erfolgt analog zum hier vorgestellten Verfahren. Der erweiterte Algorithmus ist zu präzisieren und durch Messungen zu verifizieren.

Detlef Nitzschke



## **Berghänel, Dietmar: Das Verhalten elektrischer Kommutatormaschinen für Haushalt und Gewerbe bei Speisespannungen mit Frequenzen > 50 Hz**

Gutachten: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Winkler  
Prof. Dr.-Ing. habil. D. Oesingmann  
Prof. Dr.-Ing. M. Liese

Die vorliegende Arbeit enthält Untersuchungen des Bürstenverschleißes von Kommutator-Reihenschluß-Maschinen (KRM) am idealen und gestörten Netz sowie unter dem Einfluß von Speisespannungen höherer Frequenz. Wegen der großen Fertigungsstückzahl ist dieser Motortyp für solche Untersuchungen besonders interessant.

Zunächst konzentrieren sich die Arbeiten auf das Verschleißverhalten des kommutierenden Kohlebürstengleitkontaktes unter Bemessungsbedingungen. Es werden die Kommutierungsfähigkeit von Bürstenmaterial und das dynamische Laufverhalten von Kohlebürsten und Kommutator analytisch untersucht. Das Ergebnis dieser Studie ist eine Voraussetzung zum Verständnis des theoretischen und experimentellen Teils der Arbeit.

In einem für diese Untersuchungen eingerichteten Versuchslabor werden Messungen an Motoren und kompletten Geräten zur Prüfung ihrer Immunität gegenüber niederfrequenten leitungsgebundenen Störgrößen durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchungen steht der Frequenzbereich 50 Hz bis 700 Hz. Für diesen experimentellen Teil der Arbeit werden zweckmäßige Verfahren zur Messung der Betriebseigenschaften kleiner Elektromotoren und insbesondere der Kohlebürsten entwickelt und angewendet.

Anhand von Fachliteratur und Laboruntersuchungen wird der frequenzabhängige Bürstenverschleiß auf Grundlage des Frequenzverhaltens der Einzelverschleiße theoretisch abgeleitet. Die Verschleißgleichung beschreibt den Kohlebürstenverschleiß in Abhängigkeit von der Frequenz der Speisespannung innerhalb vorgegebener Grenzen. Zwischen Rechnung und Verschleißmessung ist Übereinstimmung festzustellen. Die Gleichung des frequenzabhängigen Bürstenverschleißes findet ihre Anwendung in einem technisch und ökonomisch vorteilhaften Einlaufverfahren für Kohlebürsten in KRM. Grundlage für dieses Verfahren sind die vom transformatorischen Anteil der Spannungen in der kurzgeschlossenen Ankerspule entscheidend abhängigen Querströme in der Gleitzone der Kohlebürste. Die definitiv mit den Einlaufparametern einstellbaren Einzelanteile ( $V_{\text{mech}}$ ,  $V_{\text{Snf}}$ ,  $V_{\text{LBE}}$ ) des Gesamtverschleißes erlauben in der Einlaufphase der Motoren ein Verschleißoptimum zur zeitlichen und energetischen Reduzierung des Bürsteneinlaufes in der Fertigung zu erreichen. Für die Anwendung des Verfahrens in der Praxis wird ein Algorithmus zur Bestimmung der Einlaufparameter entwickelt. Damit sind unter

Berücksichtigung wichtiger Einflußgrößen, wie z. B. Bürstenqualität, Leistung, Drehzahlbereich, Belastung der Maschine und technologischer Faktoren die Einlaufparameter durch Messung, Rechnung und Experiment vorbestimmbar. Die Ergebnisse aus Rechnung und Versuch werden in dieser Arbeit vorgestellt und diskutiert. Innerhalb der vorgegebenen Grenzen ist gute Übereinstimmung festzustellen.

Mit Kenntnis der physikalischen Vorgänge in der Gleitzzone der Kohlebürste läßt sich über eine Frequenzanalyse des Kommutierungsstromes der Zustand von Kohlebürsten beurteilen. Es wird empfohlen, mit Hilfe einer Hüllkurve über dem Frequenzspektrum eine Bewertung des aktuellen Motorzustandes in der Prüf- bzw. Einlaufphase vorzunehmen. Auf diese Weise kann außer im Labor auch die Stückprüfung in der Motorenfertigung erfolgen.

Hinsichtlich EMV-Normung besteht Handlungsbedarf. Die aus den Kommutierungsfrequenzen resultierenden leitungsgebundenen Störgrößen liegen in Frequenzbereichen, welche in der internationalen Normung noch nicht berücksichtigt sind. Eine Berücksichtigung finden die Kommutierungsfrequenzen gegenwärtig nur indirekt mit der Störspannungsmessung ab 150 kHz.

Dietmar Berghänel

### 3.3 Veröffentlichungen und Vorträge

Herzberg, C.; Engelmann, E.; Rödel, H.: Leitfähige Schutzausrüstung schützt vor starken elektrischen Feldern. BW Technics 2/01, S. 6-7 (deutsch) und S. 89 (engl.)

Herzberg, C.; Rödel, H.; Engelmann, E.: New shielding protective equipment for live working. International Journal of Clothing Science and Technology, Volume 13, Number 3/4 2001, S. 301-308

Winter, A.; Kindersberger, J.: Elektrische Oberflächenladungen auf plattenförmigen Isolierstoffen. ELEKTRIE Berlin 55 (2001) 10-12, S. 536-541

Schoft, St.; Löbl, H.; Kindersberger, J.: Abbau der Verbindungskraft in Aluminium-Hochstromverbindungen durch Kriechen des Leitermaterials. ELEKTRIE Berlin 55 (2001) 10-12, S. 470-477

Rogler, R.-D.; Löbl, H.; Fricke, D.: Bestimmung der Restnutzungsdauer elektrotechnischer Verbindungen in Elektroenergieanlagen mit dem Diagnosesystem RELITE. VDI-Berichte Nr. 1641, 2001, S. 125-134

Fricke, D.; Rogler, R.-D.; Löbl, H.: Restnutzungsdauer – Diagnose von elektrischen Verbindungen. etz Heft 21/2001, S. 38-45

Hable, M.: Intelligentes Energiemanagement in dezentralen Energiesystemen. Vortrag im Graduiertenkolleg „Lokale innovative Energiesysteme“, 25. Januar 2001, Technische Universität Dresden

Meyer, J.: Anforderungen und Realisierungsmöglichkeiten an ein Messsystem zur Überwachung der Spannungsqualität nach EN 50160. TU Dresden, IEEV, 02.02.2001

Nitzschke, D.; Bauer, H.: Simulation of transient disturbance voltages in substations with combination of MoM and TLT. EMC Zürich, 20.-22.02.2001, Tagungsband

Bauer, H.; Langer, G.: Analyse und Maßnahmen zu EMV bei der Baugruppen- und Geräteentwicklung. EMV 2001, 13.-15.03.2001, Augsburg, Workshop 25

Bauer, H.; Grützner, J.; Steimel, H.-P.: Nachweis der Feldbelastung an und in Elektroenergieanlagen entsprechend 26. BImSchV, BGV B11 und EN/DIN-VDE. EMV 2001, 13.-15.03.2001, Augsburg, Workshop 33

Seifert, O.: Auswertung der Erdschlussmessungen vom 14.05.2000 im 110-kV-Netz der ESAG und DREWAG, Untersuchung zur Einkopplung von Verlagerungsspannungen vom 110-kV-Netz in MS-Netze, Simulationen zur Netzausbauplanung im 110-kV-Netz der ESAG und DREWAG, ESAG Dresden, 22.03.2001

Seifert, O.: Methoden zur automatischen Bestimmung der Kenngrößen kompensiert betriebener Netze. Dresdner Kreis, Duisburg, 30.03.2001

Pilz, G.: Signalanalyse mit Hilfe der Prony Methode. Dresdner Kreis, Duisburg, 30.03.2001

Seifert, O.: Forschungsk Kooperation mit HUT und VTT, Finnland; Vorträge Auswertung der Erdschlussmessungen vom 14.05.2000 im 110-kV-Netz der ESAG und DREWAG, Untersuchung zur Einkopplung von Verlagerungsspannungen vom 110-kV-Netz in MS-Netze, Dresden, 26.-28.04.2001

Löbl, H.: Der Multikontakt LA-CuT für den Einsatz in Hochspannungs-Schaltanlagen, Vortrag Siemens, 09.05.2001, Berlin

Meyer, J.: IMEDA - Ein Messsystem zur Erfassung, Analyse und Bewertung der Elektroenergiequalität. VDE-Arbeitskreis „Netzurückwirkungen“, 12./13.05.2001

Löbl, H.: Wärmenetzmethode – ein Modell zur Dimensionierung von Hochstromanlagen. Vortrag ABB, 07.06.2001, Zürich

Schenk, M.: Der Einsatz der Wärmenetzmethode und der CFD-Programme zur Bestimmung der Strombelastbarkeit elektrotechnischer Geräte, Vortrag ABB, 07.06.2001, Zürich

Löbl, H.: Dimensionierung und Langzeitverhalten elektrotechnischer Verbindungen in Hochstromanlagen, Vortrag ABB, 07.06.2001, Zürich

Haim, K.-H.; Löbl, H.: Zuverlässigkeit der Schirmverbindung in modernen Muffen. Diskussionsbeitrag, CIRED, 18.-21. Juni 2001, Amsterdam

Winkler, G.; Meisenbach, C.; Meier, P.; Hable, M.: Intelligent energy management of electrical power systems with distributed feeding on the basis of forecasts of demand and generation. CIRED, 18.-21. Juni 2001, Amsterdam

Meyer, J.; Mühlwitz, M.; Winkler, G.: Advanced power quality rating under the conditions of deregulated markets. CIRED, 18.-21. Juni 2001, Amsterdam, Session 2: Power quality and EMC, Paper 2.51

Märtel, P.; Radtke, H.-J.; Schegner, P.; Seifert, O.: Results of earth fault measurements in an earth fault compensated 110-kV-system. 16<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 18.-21. Juni 2001, Amsterdam

Seifert, O.: Results of earth fault measurements in an earth fault compensated 110-kV-system, 16<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution (CIRED); 18.-21. Juni 2001, Amsterdam

Winkler, G.: CIRED-Sitzung 4: Dezentrale Erzeugung – Management und Nutzung der elektrischen Energie. Elektrizitätswirtschaft (100), Heft 22, S. 48-51

Achenbach, S.; Winkler, G.; Müller, H.; Balzer, G.: New aspects of inspecting commutation angles of high-voltage direct current systems. Electrical Engineering (83), Heft 5/6, S. 327-333

Winkler, G., Meisenbach, C., Hable, M.: Intelligent short term energy management of local systems using evolutionary algorithms and neural networks. ISAP 2001, 18.-21. Juni 2001, Budapest

Schöley, T.; Eberl, G.; Schegner, P.; Seifert, O.: Auswertung von Erdschlußmessungen im 110-kV-Netz der ESAG und DREWAG. 5. AK-Symposium Netzleittechnik, 20.-21.06.2001, Rostock

Engelmann, E.: Elektrische und magnetische Feldbelastung beim Arbeiten unter Spannung im Hochspannungsnetz. 9. Hochspannungs- und Anlagentechnisches Kolloquium, 29./30.06.2001, Darmstadt

Schenk, M.: Berechnung der Erwärmung und Strömung in elektrotechnischen Anlagen mit CFD. 9. Hochspannungs- und Anlagentechnisches Kolloquium, 29./30.06.2001, Darmstadt

Schoft, St.: Berechnung und Visualisierung des Abbaus der Verbindungskraft durch Kriechen des Leitermaterials Aluminium in Hochstromverbindungen der Elektroenergie-technik. 9. Hochspannungs- und Anlagentechnisches Kolloquium, 29./30.06.2001, Darmstadt

Pauer, R.: Untersuchungen zum Kriechen des Kupfers in Verbindungen der Elektroenergie-technik. 9. Hochspannungs- und Anlagentechnisches Kolloquium, 29./30.06.2001, Darmstadt

Winter, A.: Bestimmung von Oberflächenladungsdichteverteilungen auf plattenförmigen Isolierstoffprüflingen. 9. Hochspannungs- und Anlagentechnisches Kolloquium, 29./30.06.2001, Darmstadt

Löbl, H.; Schenk, M.; Gramsch, Ch.: Dimensionierung von Niederspannungsgeräten mit thermischen Modellen. Kolloquium 10./11.07.2001, TU Dresden

Kindersberger, J.; Winter, A.: Surface Charge Density Distributions on Insulating Plates under Pressurized Gases. 12<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering – ISH 2001, August, Bangalore/Indien, Volume 2, S. 343-346

Riechert, U.; Vogelsang, R.; Kindersberger, J.: Temperature Effect on DC Breakdown of Polyethylene Cables. 12<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering – ISH 2001, August, Bangalore/Indien, Volume 2, S. 537-540

Seifert, O.: Forschungskoooperation mit HUT und VTT, Vortrag: Results of earth fault measurements in an earth fault compensated 110-kV-system, Espoo, Helsinki/Finnland, 01.-08.09.2001

Meyer, J.: Mobile Messung und Auswertung von Oberschwingungen. Seminar Power Quality, LEM Instruments GmbH, Dresden, 12.09.2001

Winter, A.; Kindersberger, J.: Measurement of Double Layer Surface Charge Density Distributions on Insulating Plates with Capacitive Probes. APTADM'2001, September, Wroclaw/Polen

Meyer, J.; Winkler, G.: Advanced power quality rating using statistical tolerance intervals. EPQU'01, September 2001, Krakau/Polen, Proceedings, S. 71-78

Löbl, H.; Pauer, R.: Langzeitverhalten elektronischer Verbindungen. Kolloquium Siemens, 25.09.2001, Leipzig

Schoft, St.: Zum Einfluß des Kriechens im Leitermaterial auf die Alterung von Hochstromverbindungen. 8. Assistentenkolloquium, 06.10.2001, Dresden

Winter, A.: Einflußgrößen auf die Aufladung von Isolierstoffoberflächen. 8. Assistentenkolloquium, 06.10.2001, Dresden

Schenk, M.: Strombelastbarkeit und Erwärmung der Geräte in Netzstationen. 8. Assistentenkolloquium, 06.10.2001, Dresden

Böhme, H.; Löbl, H.: 50 Jahre Institut für Hochspannungs- und Hochstromtechnik. 8. Assistentenkolloquium, 06.10.2001, Dresden

Löbl, H.: Langzeitverhalten elektrischer Verbindungen. Vortrag VDE-Arbeitskreis Hochspannungsgeräte, 12.10.2001, Dresden

Kasztel, Z.; Erlich, I.: Dynamic Equivalents for Stability Studies in the European Interconnected Power System. Present-day problems of power engineering. APE '01 Jurata, Polen, 2001

Kasztel, Z.; Erlich, I.: Consideration of Controllability and Observability of Generators in the Coherency-based Dynamic Equivalencing. IEEE Porto PowerTech 2001, Porto, 2001

Märtel, P.; Schulze, L.; Schegner, P.; Seifert, O.: Betriebserfahrungen in erdschlusskompensierten 110-kV-Netzen mit großem kapazitiven Erdschlussstrom. ETG-Kongress 2001, 23.-24.10.2001, Nürnberg

Eberl, G.: Ermittlung der Erdschlußentfernung durch Auswerten stationärer Strom- und Spannungsverläufe. ETG-Kongress, ETG-Fachtagung Schutz- und Stationsleittechnik, 23.-24.10.2001, Nürnberg

Seifert, O.: Betriebserfahrungen in erdschlusskompensierten 110-kV-Netzen mit großem kapazitiven Erdschlussstrom. ETG-Kongress 2001, 23.-24.10.2001, Nürnberg

Engelmann, E.: Stand und Tendenzen des Arbeitens unter Spannung (AuS). Sitzung der VDEW-Landesgruppe Sachsen, 25.10.2001, Dresden

Speck, J.: Bewertung der Umrichtertauglichkeit von Niederspannungs-Asynchronmaschinen. 40 Jahre VEM, 14.-16.11.2001, Wernigerode

Kasztel, Z.: Berücksichtigung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit von Generatoren bei der dynamischen Äquivalentierung. DFG-Kolloquium, November 2001, Dortmund

Hable, M.: Energiemanagement mit evolutionären Algorithmen. Vortrag im Graduiertenkolleg „Lokale innovative Energiesysteme“, 29. November 2001, Technische Universität Dresden

Engelmann, E.: AuS international – Stand und Tendenzen. ETG-Fachbericht 86 (2001), Arbeiten unter Spannung (AuS), S. 13-20

Kübner, K.; Kasztel, Z.; Erlich, I.; Wilfert, H.-H.; Schegner P.: Damping control of inter-area oscillations in the European power system using aggregated models. Electrical Engineering 83 (2001), Springer-Verlag 2001, S. 275-285

Bauer, H.; Gebhardt, D.; Hoppe-Oehl, H.; Oehring, M.; Schubert, H.; Walther, Th.: IEC 61850 – Genormte Kommunikation für die gesamte Stationsleittechnik. Elektrizitätswirtschaft 99 (2000), H. 23, S. 28-32

Bauer, H.; Bohn, Th.: Magnetfeldberechnung im Vergleich zu -messung – Vor- und Nachteile für die Bewertung der Magnetfeldbelastung an und in Transformatorstationen. EMC Kompendium 2001, S. 273-276



## 4 Externe Aktivitäten und Kontakte

### 4.1 Teilnahme an Fachtagungen und Kolloquien

ETG-Fachtagung „Schaltanlagen für Verteilungsnetze unter neuen Rahmenbedingungen“, Hamburg, 14./15.02.01	Prof. Schegner, Dr. Engelmann, PD Dr. Löbl, Dr. Mach
Weltenergiespartag, Wels/Österreich, 01./02.03.01	Herr Hable
Terratec, Enertec, Leipzig, 14.03.01	Herr Hable
Dresdner Kreis, Duisburg, 29.-31.03.01	Prof. Schegner, Prof. Winkler, Doz. Dr. Bauer, Frau Eberl, Herr Kasztel, Herr Pilz, Herr Seifert
CIGRE, SC 15-Meeting, Dubai/VAE, 06.-10.05.01	Prof. Kindersberger
ISAP, Budapest/Ungarn, 18.-21.06.01	Herr Hable
CIREN 2001, Amsterdam, 18.-21.06.01	Prof. Schegner, Prof. Winkler, Herr Meyer, Herr Seifert
AK-Symposium Netzleittechnik, Rostock, 21.-22.06.01	Frau Eberl
ETG-Workshop „Monitoring und Diagnose elektrischer Maschinen und Antriebe“, Frankfurt/Main, 28.06.01	Dr. Speck
9. Hochspannungs- und Anlagentechnisches Kolloquium, Darmstadt, 29./30.06.01	Prof. Kindersberger, Dr. Engelmann, Dr. Speck, Herr Pauer, Herr Schenk, Herr Schoft, Herr Winter
ISH 2001, Bangalore/Indien, 19.-25.08.01	Prof. Kindersberger, Herr Winter
Forschungskooperation mit HUT und VTT, Espoo, Helsinki/Finnland, 01.-08.09.01	Prof. Schegner, Frau Eberl, Herr Seifert
IEEE Porto Power Tech, Porto/Portugal, 10.-13.09.01	Prof. Schegner

Konferenz APTADM'2001, Wroclaw/Polen, 16.-19.09.01	Prof. Kindersberger, Herr Winter
Jubiläumsveranstaltung HS Zittau/Görlitz „50 Jahre Elektrotechnik-Ausbildung in Zittau“, 27./28.09.01	Prof. Schegner, Doz. Dr. Bauer, Dr. Mach
ETG-Kongress 2001, Nürnberg, 23.-24.10.01	Prof. Schegner, Doz. Dr. Bauer, Frau Eberl, Herr Seifert
Kabelseminar, Hannover, 23.-24.10.01	Herr Bohn
Niederspannungs-Fachtagung, Dresden, 06.11.01	Prof. Winkler, Doz. Dr. Bauer, Dr. Freytag, Dr. Mach
Symposium „40 Jahre VEM“, Wernigerode, 15./16.11.01	Dr. Speck
DFG-Kolloquium, Dortmund, 20./21.11.01	Prof. Schegner, Prof. Winkler, Herr Kasztel, Herr Janik
Workshop „Eplan 5.0“, Dresden, 27.11.01	Dr. Mach
4. Fachtagung „Arbeiten unter Spannung (AuS)“, Dresden, 13./14.12.01	Prof. Schegner, Doz. Dr. Bauer, Dr. Engelmann

## 4.2 Veranstaltungen des Instituts

- 11.01.01 Schnupperstudium für einen Tag
- 28.04.01 Uni-Tag 2001
- 06.10.01 8. Assistentenkolloquium der Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik in Dresden
- 06.11.01 21. Niederspannungs-Fachtagung
- Am 06. November 2001 veranstaltete der „Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik“, Bezirksverein Dresden e. V., in Zusammenarbeit mit der Energietechnischen Gesellschaft und dem Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik der TU Dresden die 21. Niederspannungs-Fachtagung in Dresden. Die Tagung verfolgte das Ziel, die Fachleute der neuen Bundesländer - vom projektierenden Ingenieur bis zur ausführenden Elektrofachkraft - sowohl vorrangig mit aktuellen DIN-, EN-Normen bzw. DIN-VDE-Bestimmungen, Unfallverhütungsvorschriften und den Technischen Anschlußbedingungen vertraut zu machen, als auch über neueste Entwicklungstendenzen zu informieren.
- Die Tagung wurde von ca. 350 Teilnehmern besucht.
- Die 22. Niederspannungs-Fachtagung findet im Herbst 2003 statt.
- Themenschwerpunkte waren:
- Neues aus der Normenreihe DIN VDE 0100
  - Unfallverhütungsvorschrift BGV A2 „Elektrische Gefährdung“
  - Neue Technische Anschlußbedingungen
  - Planungsnormen für elektrische Anlagen in Gebäuden
  - Selektivität durch Einsatz von Haupt-Leitungsschutzschaltern
  - Neutralleiterbelastung durch Oberschwingungen
- 13./14.12.01 4. Fachtagung „Arbeiten unter Spannung (AuS)“ in Dresden

## Wissenschaftliche Kolloquien:

- 16.01.01 Dipl.-Ing. Groll, Thüringer Energie AG  
„Die Elektroenergiewirtschaft im Freistaat Thüringen in Vergangenheit und Gegenwart“
- 10.04.01 Dipl.-Ing. Meyer, TU Dresden  
„Praxisorientierte Verfahren zur zentralen Erfassung, Bewertung und Archivierung von Meßdaten zur Spannungsqualität in EVU“
- 22.05.01 Prof. Dr. Hofmann, envia Chemnitz  
„Herausforderungen für einen regionalen Energiedienstleister durch die Liberalisierung des Energiemarktes“
- 12.06.01 Dipl.-Ing. Gauger, Vulkan Energiewirtschaft Eisenhüttenstadt und  
Dipl.-Ing. Ehrich, WEMAG Schwerin  
„Erhöhung der Sicherheit/Zuverlässigkeit in resonanzsternpunktgeerdeten Netzen durch die aktive Sternpunktbehandlung (Erdschlußreststromkompensation)“
- 10.07.01 Dipl.-Ing. Hable, TU Dresden  
„Intelligentes Energiemanagement in dezentralen Energiesystemen“
- 30.10.01 Dr.-Ing. Unger, Siemens AG Erlangen  
„Power Quality – Aktuelle Problemstellungen und Lösungsansätze“
- 13.11.01 Dr.-Ing. habil. Hauschild, HIGHVOLT Prüftechnik Dresden  
„Die zukünftige Hochspannungstechnik aus Sicht eines Prüfanlagenherstellers“
- 11.12.01 Dipl.-Ing. Eberl, TU Dresden  
„Erdschlußdistanzbestimmung – Theoretische Lösungsansätze und praktische Realisierungsmöglichkeiten“

### 4.3 Weiterbildung

- 22./25.10.01 Dr. Löbl  
Zustandsabhängige Instandhaltung und Infrarotdiagnose für  
Verbindungen in der Elektroenergietechnik  
München; veranstaltet vom Haus der Technik Essen
- 06./07.11.01 Dr. Löbl, Herr Gramsch, Herr Schenk  
Arbeitskreis „Netzstationen“, Dresden

### 4.4 Mitarbeit in Gremien

#### **Prof. Dr.-Ing. P. Schegner**

- persönliches Mitglied der FGH
- Mitglied der CIRED Advisory Group
- Gleichstellungsbeauftragter der Fak. Elektrotechnik und Informationstechnik
- Vorsitzender des Programmausschusses der ETG-Fachtagung „Schutz- und Stationsleittechnik“

#### **Prof. Dr.-Ing. habil. G. Winkler**

- Arbeitsausschuß „Spannungsqualität“ der VDEW
- Fachbereich 2 „Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“ der Energietechnischen Gesellschaft im VDE
- Deutsches Komitee CIRED im Fachbereich 2 der Energietechnischen Gesellschaft im VDE
- Fachbereich 5 „Leistungselektronik“ der Energietechnischen Gesellschaft im VDE
- Vorsitzender des Arbeitskreises „Netzurückwirkungen“ im VDE-Bezirksverein Dresden

#### **Prof. Dr.-Ing. habil. H. Pundt**

- Vorsitzender VDE-Bezirksverein Dresden
- Gesellschaft von Freunden der TU Dresden

#### **Doz. Dr.-Ing. H. Bauer**

- Stellvertretender Obmann des DKE – K 122 „Isolationskoordination“
- VDE-Arbeitskreis „Sicherheits- und Unfallforschung“
- Vorsitzender des Arbeitskreises „Koordination der Isolation“ im VDE-Bezirksverein Dresden

- Forschungsverbund „Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme“
- ITG – FA 5.5 „Prozeßdatenübertragung
- Persönliches Mitglied CIGRE, FGH, DEMVT

**Dr.-Ing. K.-H. Freytag**

- UK 221.1 „Schutz gegen elektrischen Schlag“ im Komitee 221 „Errichten von Starkstromanlagen bis 1000 V“
- Vorstandsmitglied im VDE-Bezirksverein Dresden
- Vorsitzender des Arbeitskreises „Starkstromanlagen bis 1000 V“ im VDE-Bezirksverein Dresden
- Mitglied des Konzils der TUD und des Fakultätsrates der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

**Dr.-Ing. F. Mach**

- Arbeitskreis „Hochspannungsschaltanlagen“ im VDE-Bezirksverein Dresden
- EMTP Usergruppe

**Dr.-Ing. E. Engelmann**

- Komitee 251 „Blitzschutzanlagen“ im DKE
- Fachbereich 2 „Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“ der Energietechnischen Gesellschaft im VDE
- AK „Arbeiten unter Spannung“ des VDE Bezirksvereins Dresden

**PD Dr.-Ing. habil. H. Löbl**

- UK 121.2 „Mechanische und thermische Kurzschlußfestigkeit“ im DKE

## 5 Prüf-, Meß- und Labortechnik des Instituts

- Wechselspannungs-Prüfanlagen bis 1200 kV, 1200 kVA
- Stoßspannungs-Prüfanlagen bis 2400 kV, 120 kJ
- Gleichspannungs-Prüfanlagen bis 1200 kV
- Stoßstrom-Prüfanlage bis 70 kA
- Berechnungsanlagen für Regenprüfungen von Freiluft-Hochspannungsisolierungen
- Transienten-Meßsystem mit 100 MHz Abtastrate, 10 Bit-Auflösung
- Digitaloszilloskope bis 1 GHz
- E- und H-Feldmeßsysteme bis 100 MHz Bandbreite
- breitbandige Teilentladungsmeßtechnik für Spannungen bis 400 kV
- Störspannungsmeßtechnik bis 30 MHz
- Meßtechnik zur Ermittlung von Isolierstoffkennwerten (z. B. Verlustfaktor, Dielektrizitätszahl, Oberflächen- und Volumenwiderstand) nach IEC- und DIN VDE-Normen
- Prüf- und Meßtechnik für Lebensdaueruntersuchungen an Isolierstoffen
- Hochstrom-Prüfanlagen bis 50 kA Stoßkurzschlußstrom, 15 kA Kurzzeitstrom und 10 kA Dauerstrom
- Prüf- und Meßtechnik für Erwärmungsuntersuchungen an elektrotechnischen Betriebsmitteln
- Prüf- und Meßtechnik für Untersuchungen der Stromtragfähigkeit von Kontakten und Verbindungen
- Infrarotkamera Varioscans 2011
- Prüf- und Meßtechnik zur Untersuchung der mechanisch-dynamischen Beanspruchung elektrotechnischer Betriebsmittel
- Referenz-Meßsysteme nach IEC 60060-2 für 500 kV Stoßspannung, 200 kV Wechselspannung und 125 kV Gleichspannung
- Kalibrator für elektrische Meßmittel

- 20 Versuchsstände für Lehre und Forschung an der Professur Elektroenergieversorgung
- Dreiphasiges Dynamisches Netzmodell:
 

Zeitmaßstab	1 : 1
Spannungsmaßstab	1 : 500
Strommaßstab	1 : 20

Das Netzmodell besteht aus: Modellbausteine für 2 Turbogeneratoren je 63 MVA, 150 km 220-kV-Doppelleitung und drei Schaltstationen. Es ist ausgerüstet mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung SIMATIC S 400 für die Systemsteuerung und Betriebsmessung, mit digitalem Netzschutz und digitaler Stationsleittechnik.
- Netzgekoppelte Photovoltaikanlage:
 

Gr. 1	0,3 kW Poli-c, nachgeführt
Gr. 2	1,1 kW mono-c, 45° Süd
Gr. 3	1,1 kW mono-c, 40 ... 55° Süd

mit unterschiedlichen, selbst- und netzgeführten, Wechselrichtern sowie rechnergekoppelter Meßtechnik für elektrische und meteorologische Daten
- Transientenrecorder:
 

Die wesentlichen technischen Daten sind:  
14 isolierte Eingangskanäle; Abtastraten bis 100 kHz; Genauigkeit von 16 Bit; Speichertiefe von 1 GByte
- Vierkanalige Digitaloszilloskope mit Abtastraten bis 2 GS/s
- Batteriegespeiste B-Feld-Sonde für niederfrequente dreidimensionale Messungen 0 bis 10 kHz, in den Meßbereichen 10 mT, 1 mT und 300 µT, mit Auswertegerät für die digitale Abtastung und Speicherung (einschließlich Uhrzeit auf Diskette oder Memory-Card)
- Batteriegespeiste E-Feld-Sonde für niederfrequente eindimensionale Messungen 10 Hz bis 10 kHz in den Meßbereichen 10; 1 und 0,1 kV/m mit Infrarot-Fernbedienung und digitaler Speicherung auf Memory-Card
- Versuchsstand für numerische Schutzgeräte mit Leitungsnachbildung und Fehlersimulation durch PC und dreikanaligen Leistungsverstärkern für Ströme und Spannungen
- Transportabler Prüfkoffer für die Prüfung von Schutzrelais
- Dreiphasiger Energiequalitätsanalysator für harmonische Analysen bis zur 99. Oberschwingung und Flickerbestimmung nach IEC 868 mit Steuerrechner zur Meßwertspeicherung und Auswertung einschließlich Protokollerstellung
- Einphasiges Oberschwingungsmeßgerät bis zur 50. Harmonischen mit statischen Auswerteverfahren und Protokolldrucker



- Burstgenerator 3 bis 8 kV
- ESD-Pistole 8 bzw. 15 kV
- Elektroenergiequalitätsanalysator TOPAS 1000 der Firma LEM zur Messung im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz. 8 galvanisch getrennte Eingangskanäle, serielle Schnittstelle, Ethernetanschluß und umfangreiche Auswertesoftware
- Optisches Impulsreflektometer Anritsu MW9070B zur Überprüfung der Qualität von Lichtwellenleiterverbindungen bis 100 km Länge
- Netzqualitätsanalysator mit Transientenfunktion Dewetron PNA 3000, 8 galvanisch getrennte Kanäle zur Spannungs-, Strom-, Leistungs-, Oberschwingungs-, Spektrum- und Flickeranalyse