INHALT

1. VORWORT 2

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS 6

3. LEHRE 8

3.1 VORLESUNGEN 8

3.2 PRAKTIKA 13

3.3 EXKURSIONEN 14

STUDENTISCHE ARBEITEN 16

4. PROMOTIONEN 39

5. FORSCHUNGSARBEITEN 56

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK 60

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS 84

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT 110

6. VERÖFFENTLICHUNGEN 114

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE 121

8. PRÜFEINRICHTUNGEN 124

9. LAGEPLÄNE 125

1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

mit dem Ihnen vorliegenden Jahresbericht 2014 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

Um die Entwicklung von Smart Grids in Baden-Württemberg zu fördern, haben wir mit Unterstützung des Umweltministeriums Baden-Württemberg am 25.11.2013 den Verein „Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V." gegründet. Die Mitglieder des Vereins wollen mit der flächendeckenden Einführung von Smart Grids die effiziente Einbindung erneuerbarer Energien fördern, sodass eine klimafreundliche, weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhende Energieversorgung bis 2050 möglich wird. Erfreulicherweise hat das Konzept des Vereins sehr großen Zuspruch gefunden. Mittlerweile haben wir viele namhafte Unternehmen für den Verein gewinnen können. Die drei durchgeführten Smart Grids Gespräche des Vereins waren außerordentlich gut besucht. Am 5./6. März 2015 werden wir unsere erste große Jahrestagung zum Thema „*Flexibilität ist ein Produkt*" in Mannheim durchführen.

Das Interesse an Themen der Energiewende und des Netzausbaus ist auch aus studentischer Sicht weiter ungebrochen, so dass wir hinsichtlich der Anzahl der Studierenden in unseren Vorlesungen und mit fast 100 studentischen Arbeiten eine neue Bestmarkte in diesem Jahr aufgestellt haben.

Nach 30 Jahren Leitung unseres Hochspannungslabors in Ostfildern-Nellingen haben wir im Sommer Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Köhler in den Vorruhestand verabschiedet. Er hat sich viele Jahre erfolgreich für die Belange der Hochspannungstechnik und Elektromagnetischen Verträglichkeit in Forschung und Lehre eingesetzt. Mit seinem großen Fachwissen war er immer eine außerordentliche Unterstützung für die wissenschaftlichen Mitarbeiter. Für die gemeinsame Zeit und das Erreichte möchten wir uns bei ihm herzlich bedanken. Erfreulicherweise konnten wir diese Lücke mit Herrn Dipl.-Ing. Daniel Schneider schließen, der gerade seine Dissertationsschrift zum Thema „*Pre-Compliance Prüfmethoden zur Abschätzung gestrahlter Emissionen im Komponententest*" eingereicht hat und somit bestens geeignet ist, unsere EMV-Aktivitäten weiter auszubauen.

Wir sind sehr glücklich darüber, dass wir auch den Kreis der Lehrbeauftragten um Herrn Dr.-Ing. habil. Konstantin Papailiou erweitern konnten. Seine Master-Vorlesung „*Hochspannungsfreileitungen*" wurde von den Studierenden großartig angenommen. Sicherlich auch wegen seiner lebendigen und praxisnahen Vortragsweise war diese Vorlesung eine der am besten evaluierten Vorlesungen des Fachbereichs. Wir möchten uns an dieser Stelle bei Herrn Papailiou für sein großes Engagement ausdrücklich bedanken und wünschen ihm weiterhin viel Erfolg und Freude mit unseren Studenten.

In wissenschaftlicher Sicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Neben fünf abgeschlossenen Dissertationen von Dr.-Ing. Stefan Hoek

(*Ortung von Teilentladung in gasisolierten Schaltanlagen mittels elektromagnetischer Wellen im UHF-Bereich*), Dr.-Ing. Dennis Burger (*EMV in Mittelspannungsschaltanlagen während Schalthandlungen*), Dr.-Ing. Peter Müller (*Stromschwache Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen*), Dr.-Ing. Martin Reuter (*Einfluss der Netzimpedanz von Hochvolt-Systemen auf Entstörkonzepte im Traktionsnetz von Elektrofahrzeugen*) und Dr.-Ing. Alexander Probst (*Auswirkungen der Elektromobilität auf Energieversorgungsnetze*) dokumentieren über 40 Veröffentlichungen eindrucksvoll unsere Forschungsaktivitäten. Auf der IEEE International Conference on Dielectric Liquids hat Frau M. Sc. Farzaneh Vahidi den Young Researcher Award für ihre Veröffentlichung „*Space Charge Formation in insulating liquids under DC Stresses*“ verliehen bekommen. Einen Großteil unsere Veröffentlichungen können Sie auch auf unserer Homepage (www.uni-stuttgart.de/ieh) finden.

Die erfreulich hohe Anzahl von Absolventen des IEH und die zahlreichen Anregungen aus der Industrie erlaubten es uns, in diesem Jahr drei neue Mitarbeiter einzustellen, die sich neuer Fragestellungen annehmen werden. M. Sc. Philipp Hillenbrand und M. Sc. Stephanie Hägele werden sich Fragestellungen zur EMV des elektrischen Antriebsstranges bzw. zur Charakterisierung von Transformatorölen widmen. M. Sc. Simon Eberlein wird die Dynamik von Microgrids untersuchen.

Im Frühjahr haben wir zusammen mit verschiedenen Herstellern wieder das Stuttgarter Hochspannungssymposium zum Thema „*Neue Konzepte und Systemkomponenten für die Netze der Zukunft*“ in der Filderhalle in Leinfelden durchgeführt. Hervorragende Referenten und der traditionell gute Ruf dieser im zweijährigen Turnus stattfindenden Veranstaltung führten 250 Teilnehmer hauptsächlich aus den Bereichen Energieversorger und Hersteller nach Stuttgart. Es ist damit die größte Fachtagung zur Hochspannungstechnik in Deutschland. Auf Grund der zahlreichen Nachfragen werden wir das Stuttgarter Hochspannungssymposium am 8./9. März 2016 wieder im gleichen Rahmen durchführen.

Allen unseren Freunden möchten wir an dieser Stelle recht herzlich für ihre Anregungen und ihre Hilfe danken. Mein besonderer Dank gilt jenen Firmen, die uns durch Aufträge und Spenden unterstützt haben. Wir hoffen, dass dieser Jahresbericht auch dazu beiträgt, die bestehenden Kooperationen auszubauen und neue Kontakte zu knüpfen. Dazu möchte ich besonders auf das Kapitel Studentische Arbeiten dieses Jahresberichtes hinweisen, in dem wir zu Ihrer Information auch Kurzfassungen der durchgeführten Masterarbeiten anführen.

Für das neue Jahr wünschen wir Ihnen Gesundheit, Glück und alles Gute, auch im Namen von Herrn Professor Feser und allen Mitarbeitern des Instituts.

Stuttgart, im Dezember 2014

Prof. Stefan Tenbohlen Prof. Krzysztof Rudion

PREFACE

Dear friends!

As usual, we would like to inform you about our activities with our annual report 2014.

To promote the development of Smart Grids in Baden-Württemberg, on November 15th, 2013 we founded the registered association “Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V.” in cooperation with the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg. With an implementation of Smart Grids all over the country the members want to promote the integration of renewable energies efficiently. Due to the extensive use of renewable energies a climate-friendly supply of energy should be achieved until 2050. Fortunately, the conception of the association has been very well received. We have attracted many well-known companies as members of the association. Three conferences, which we organized, were remarkably well visited. On march 5th and 6th, 2015, we will hold our first major annual convention on the issue “*Flexibility is a Product*” in Mannheim.

Also from the students’ perspective the interest in subjects of the energy turnaround and the electric power grid extension is continuing, resulting in a high number of students in our lectures. Nearly 100 students finished their degree at our institute – a record year.

After 30 years of leading our High Voltage Laboratory in Ostfildern-Nellingen, we took leave of Dr.-Ing. Wolfgang Köhler in early retirement end of July. For many years he committed himself successfully for the interests of High Voltage Engineering and Electromagnetic Compatibility in research and teaching. With his large expert knowledge he was an extraordinary assistance for the scientific researchers. We would like to thank him sincerely for the time with us and his achievements. Fortunately, we were able to fill this gap with Dipl.-Ing. Daniel Schneider, who recently submitted his dissertation on the issue „*Pre-Compliance Tests for Estimating the Radiated Emission of Component Tests*“ and who therefore is perfectly qualified for the further development of our activities in Electromagnetic Compatibility.

We are very happy about increasing the number of assistant lecturers with Dr.-Ing. habil. Konstantin Papailiou. His lecture for master students “*High-Voltage Overhead Lines*” has been greatly appreciated by the students. Surely also because of his lively and practical teaching his lecture has been evaluated one of the best lectures of the department. We would like to thank him for his great commitment and wish him furthermore success and pleasure with our students.

Once again, concerning the scientific work we look back to a very successful year. Besides five finished dissertations of Dr.-Ing. Stefan Hoek (*Localization of Partial Discharges in Gas-Insulated Switchgear using Electromagnetic Waves in the UHF-Frequency Range*), Dr.-Ing. Dennis Burger (*Electromagnetic Compatibility of Medium Voltage Switchgear during Switching Operations*), Dr.-Ing. Peter Müller (*Detection of*

Low Current Arc Faults in Low Voltage Switchgear), Dr.-Ing. Martin Reuter (*Influence of Network Impedance within Automotive High-Voltage Traction Systems on Interference Suppression Concepts*) und Dr.-Ing. Alexander Probst (*Impact of Electric Mobility on Energy Supply Networks Analyzed on the Basis of Probabilistic Network Planning*), more than 40 papers show impressively our research activities. At the IEEE International Conference on Dielectric Liquids the Young Researcher Award was presented to M. Sc. Farzaneh Vahidi for her paper „*Space Charge Formation in Insulating Liquids under DC Stresses*".

You can download most of our publications from our homepage www.uni-stuttgart.de/ieh.

The high number of graduates at the institute and numerous industrial encouragements allowed us this year to hire three new employees, who will work on new questions. M. Sc. Philipp Hillenbrand and M. Sc. Stephanie Hägele will dedicate themselves to questions of Electromagnetic Compatibility relating to the electric power train and to the characterization of transformer oils, respectively. M. Sc. Simon Eberlein will examine the dynamic behaviour of microgrids.

In springtime once again we organized together with various manufacturing companies the Stuttgarter Hochspannungssymposium on the issue "*New Concepts and System Components for the Grids of the Future*" in the Filderhalle at Leinfelden. Outstanding speakers and the traditionally good reputation of this event, which takes place every two years, lead 250 participants to Stuttgart, mainly from energy providers and manufacturers. Thus it is the biggest conference on high voltage engineering in Germany. Due to the many demands we will host the Stuttgarter Hochspannungssymposium on March 8th and 9th, 2016 in the same settings.

Finally we would like to send our sincere thanks to all our friends who have contributed to our success in many ways. Especially we would like to express our gratitude to all those partners who supported us with research contracts and donations. We hope that our annual report will strengthen existing collaboration and help to establish new contacts. For this purpose we would like to refer to chapter 3.4, where you find abstracts of our graduate´s work.

We are looking forward to continued close contact and co-operation with you also on behalf of Professor Feser and all our members of staff.

Our best wishes accompany you into the new year.

Stuttgart, December 2014

Prof. Stefan Tenbohlen Prof. Krzysztof Rudion

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

		e-mail: vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de	Telefon / phone: +49 (0)711-
Institutsleiter / Head of Institute:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan TENBOHLEN		-685-67871
Professur Netzintegration erneuerbarer Energien:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof RUDION		-685-67872
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt FESER		
Lehrbeauftragte:	Dipl.-Ing. Ulrich SCHERER *TransnetBW GmbH*		-21858-3437
	Dipl.-Ing. Thomas RUDOLPH *Schneider Electric Energy GmbH*		
	Dr.-Ing. Markus PÖLLER *Moeller & Poeller Engineering GmbH*		
	Dr.-Ing. habil. Konstantin O. PAPAILIOU		
Oberingenieure:	Dr.-Ing. Wolfgang KÖHLER (bis 31.7.2014) (*Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern)*		
	Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI		-685-67878
Akademische Mitarbeiter / Scientific Staff:	M. Sc. Ahmad ABDEL-MAJEED		685-69193
	Dipl.-Ing. Philipp ARNOLD		341 2075
	Dipl.-Ing. Michael BELTLE		685-68061
	Dipl.-Wi.-Ing. Marc BRUNNER		685-69197
	Dipl.-Ing. Simon BUROW (bis 31.3.2014)		
	M. Sc. Mohammad DJAMALI		685-68270
	M. Sc. Simon EBERLEIN (ab 1.11.2014)		685-67857
	Dipl.-Ing. Simon EILENBERGER		685-69194
	Dipl.-Ing. Katharina FREY		685-67838
	M. Sc. Mario GNÄDIG (bis 11.4.2014)		
	M. Sc. Stephanie HÄGELE (ab 6.10.2014)		685-67858

	M. Sc. Philipp HILLENBRAND (ab 1.3.2014)	685-67817
	Dipl.-Ing. Jens HOHLOCH (bis 31.7.2014)	
	Dipl.-Ing. Mark JOVALEKIC (bis 30.6.2014)	
	Dipl.-Ing. Christoph KATTMANN	-685-67874
	Dipl.-Ing. Andreas MÜLLER (bis 30.4.2014)	
	M. Sc. Mohsen NEMATI	-685-67869
	Dipl.-Ing. Nicolas SCHMIDT	-685-67809
	Dipl.-Ing. Daniel SCHNEIDER	-685-67889
	Dipl.-Ing. Martin SIEGEL	-685-67867
	M. Sc. Christian SUTTNER	-341 2075
	M. Sc. Farzaneh VAHIDI	-685-69195
	M. Sc. Pascal WIEST	-685-69196
	Dipl.-Ing. Manuel WILD	-341 2075
Sekretariat / Secretary:	*Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:*	
	Nicole SCHÄRLI	-685-67870
	Annette GUGEL (ab 1.4.2014)	-685-67880
	Hochspannungslabor Ostfildern:	
	Renate KINSKI	-341 2075
Buchhaltung / Accounting:	Hermine LWOWSKI	-685-67876
Technische Angestellte / Technical Staff:	Erwin BECK, *Mechanikermeister*	-685-67847
	Metin DEMIRHAN, *Mechaniker*	-685-67847
	Timon GOLD, *Zentralwerkstattleiter*	-685-67847
	Daniel HARTICH, *Auszubildender*	-685-67847
	Michael HERDTLE, *Mechaniker*	-341 2075
	Herbert KAUSSEN, *Elektrotechniker* (bis 30.11.2014)	
	Edona KUQI, *Auszubildende*	-685-67847
	Dieter MAJEWSKI, *Mechaniker* (bis 31.12.2014)	
	Hartmut RÖNISCH, *Elektrotechniker*	-685-67856
	Rudolf van de WEYER, *Elektromeister*	-341 2075
	Christian WÖLZLEIN, *IT-Systemkaufmann*	-685-67863

Gastwissenschaftler / Visiting scientists:

Dr. Su SU WIN, Myanmar (bis 28.1.2014)
M. Sc. Mohamad GHAFFARIAN NIASAR, KTH Stockholm (bis 30.4.2014)
Prof. Dr.-Ing. Zoran RADAKOVIC, Belgrad (10.2.-9.3.2014)

3. LEHRE

3.1 VORLESUNGEN

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN
Elektrische Energietechnik I

Sommersemester, 2 V, 1 S, für 2. Semester Bachelor

- *Aufgabe und Bedeutung der elektrischen Energieversorgung*
- *Energiewandlung in Kraftwerken*
- *Aufbau von Übertragungs- und Verteilnetzen*
- *Betriebsverhalten elektrischer Energieversorgungsnetze*
- *Kurzschlussströme und Kurzschlussstrombegrenzung*
- *Überspannungen und Isolationskoordination*
- *Sicherheitsfragen*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN
Hochspannungstechnik I

Wintersemester, 2 V, 2 S, für 5. Semester Bachelor

- *Auftreten und Anwendung hoher Spannungen bzw. Ströme*
- *Einführung in die Hochspannungsversuchstechnik*
- *Berechnung elektrischer Felder*
- *Isolierstoffe*
- *Isolierstoffsysteme in Hochspannungsgeräten*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN
Hochspannungstechnik II

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Schaltvorgänge und Schaltgeräte*
- *Die Blitzentladung*
- *Repräsentative Spannungsbeanspruchungen*
- *Darstellung von Wanderwellenvorgängen*
- *Begrenzung von Überspannungen*
- *Isolationsbemessung und Isolationskoordination*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN / PROF. DR.-ING. K. RUDION

Elektrische Energienetze I

Wintersemester, 2 V, 2 S, für 5. Semester Bachelor

- *Aufgaben des elektrischen Energienetzes*
- *Einpolige Ersatzschaltungen der Betriebselemente für symmetrische Betriebsweise*
- *Lastflussberechnung*
- *Betrieb elektrischer Energieversorgungsnetze*
- *Kurzschlussströme bei symmetrischem Kurzschluss*
- *Symmetrische Komponenten*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN
DR.-ING. U. SCHÄRLI

Elektrische Energienetze II

Wintersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Kennwerte von Drehstrom-Freileitungen und Kabeln*
- *Belastbarkeit von Kabeln*
- *Einpoliger Erdschluss und Erdkurzschluss*
- *Lastflussberechnung*
- *Zustandserkennung*
- *Netzrückwirkungen*
- *HGÜ*

PROF. DR.-ING. K. RUDION

Smart Grids

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Anforderungen der zukünftigen Energieversorgung*
- *Smart Grid Konzepte (z. B. Virtuelle Kraftwerke, Mikronetze)*
- *Regelung dezentraler Erzeuger, Speicher und Lasten (z. B. Photovoltaik und Elektrofahrzeuge)*
- *Modellierung und Simulation elektrischer Netze*
- *Versorgungsqualität*
- *Netzbetriebsführung und Systemdienstleistungen*
- *Netzanschlussbedingungen*
- *Smart Metering*
- *Informations- und Kommunikationstechnik für Smart Grids*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN
DR.-ING. W. KÖHLER
Elektromagnetische Verträglichkeit

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Bachelor-/Master-Studierende

- *Einführung, Begriffsbestimmung*
- *EMV-Gesetz*
- *EMV-Umgebung*
- *Allgemeine Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV*
- *Aktive Schutzmaßnahmen*
- *Nachweis der EMV*
- *Einwirkung auf biologische Systeme*
- *EMV im Automobilbereich*

PROF. DR.-ING. K. RUDION
Planung und Betrieb elektrischer Netze mit dezentraler Einspeisung

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Grundlagen der Netzplanung mit DEA*
- *Grundlagen des Netzbetriebes*
- *Modellierung der relevanten Betriebsmittel*
- *Windparkmodellierung*
- *Zuverlässigkeitsanalyse von elektrischen Netzen*
- *Aspekte der Elektrizitätswirtschaft und Investitionsbewertung*
- *Liberalisierter Energiemarkt*
- *Systembeobachtbarkeit und PMU*
- *DSA und BlackOut-Prävention*
- *NSM und Versorgungsicherheit*
- *Netzsimulation*

PROF. DR.-ING. K. RUDION
Expertensysteme in der elektrischen Energieversorgung

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Einführung in die künstliche Intelligenz*
- *Wissensbasierte Systeme*
- *Wissensrepräsentation und -akquisition*
- *Inferenzmechanismen*
- *Fuzzy-Logik und neuronale Netze*
- *Anwendungsbeispiele*

DR.-ING. W. R. PFAFF
Elektromagnetische Verträglichkeit in der Automobiltechnik

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Grundlagen der EMV in der Automobiltechnik*
- *EMV-Anforderungsanalyse*
- *EMV-Analyse und -Design für komplexe Systeme*
- *EMV-Messtechnik und -Prüfverfahren in der Automobiltechnik*
- *EMV-Simulation*

DIPL.-ING. U. SCHERER
Energiewirtschaft in Verbundsystemen

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Verbundbetrieb großer Netze*
- *Besonderheiten bei der Kupplung von Netzen*
- *Netzführung, Energie-Dispatching und Netzleittechnik*
- *Netzregelung in Verbundsystemen*
- *Elektrizitätswirtschaftliche Verfahren und Kostenfragen*
- *Stromhandel und Marktliberalisierung*
- *Energiewirtschaft bei Erdgas*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN
DIPL.-ING. T. RUDOLPH
Diagnostik und Schutz elektrischer Netzkomponenten

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Monitoring und Diagnose von Betriebsmitteln*
- *Asset Management*
- *Grundlagen der Schutztechnik*
- *Digitale Schutztechnik*
- *Leittechnik*
- *Kommunikationstechnik*

PROF. DR.-ING. K. RUDION
Seminar Netzintegration erneuerbarer Energien

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Vortragsübungen für Studierende zu wechselnden Themen*

DR.-ING. M. PÖLLER

Netzintegration von Windenergie

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Stromerzeugung mit Windenergie*
- *Generatoren für Windenergieanlagen*
- *Netzeinbindung von Windenergieanlagen*
- *Planung und Betrieb von Netzen mit hohem Windenergieanteil*
- *Betrieb von Inselnetzen mit hohem Windenergieanteil*
- *Studien zur Netzintegration von Windenergie*

DR.-ING. K. PAPAILIOU

Hochspannungsfreileitungen

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Planung, Wirtschaftlichkeit, Verlustberechnungen*
- *Leitungskonstanten, natürliche Leistung, HGÜ*
- *Maste und Fundamente; Erdungsfragen*
- *Seile und Armaturen, Hochtemperaturseile, Monitoring*
- *Seilschwingungen*
- *Isolatoren, Kompaktleitungen mit Silikonverbundisolatoren*
- *Bau und Unterhalt, Arbeiten unter Spannung*
- *Umweltaspekte, EMV, Korona, Designer-Maste, Hybridleitungen*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN / PROF. DR.-ING. K. RUDION UND WEITERE DOZENTEN DER FAKULTÄTEN 5, 4 UND 2

Einführung Erneuerbare Energien

Wintersemester, 4 V, 2 S, für 1. Semester des gleichnamigen Bachelorstudiengangs

- *Klimaschutz und Erneuerbare Energien*
- *Solarthermie*
- *Photovoltaik*
- *Windenergie*
- *Wasserkraft*
- *Biomasse*
- *Wasserkraft*
- *Smart Grids*

3.2 PRAKTIKA

DR.-ING. U. SCHÄRLI

Grundlagenpraktikum in Elektrotechnik

Dieses Praktikum ist Pflicht für die Studierenden des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik im 1. und 3. Semester. Auch Studierende der Technikpädagogik mit Schwerpunkt Elektrotechnik sowie Lehramtsstudierende im Fach Naturwissenschaft und Technik nehmen teil.

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

- *Sicherheitsseminar*
- *Umwandlung und Übertragung elektrischer Energie*
- *Erzeugung und Messung von Stoßspannungen*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN / PROF. DR.-ING. K. RUDION

Praktische Übungen im Labor Hochspannungstechnik und Energieübertragung

Die Praktischen Übungen im Labor am IEH umfassen Versuche mit folgenden Inhalten:

- *Erzeugung, Messung und Anwendung hoher Wechselspannungen*
- *Erzeugung und Anwendung hoher Stossspannungen*
- *Ermittlung von elektrostatischen Feldern*
- *Wanderwellen*
- *Gasentladungen und Isolierstoffe*
- *Elektromagnetische Verträglichkeit*
- *Lastflussrechnung*

DR.-ING. U. SCHÄRLI / M.SC. FARZANEH VAHIDI

Praktikum im Studiengang „Erneuerbare Energien“

Das Institut bietet in diesem Bachelorstudiengang einen Praktikumsversuch an, der die Grundprinzipien von Spannungs- und Frequenzregelung zeigt. Dabei kommt ein Inselnetz mit Batteriestromrichter zum Einsatz, in dem Netzspannung und –frequenz verändert werden können und der Einfluss von Wirk- und Blindleistung verdeutlicht werden.
Außerdem liegt die Gesamtorganisation dieses Praktikums, bei dem sieben Institute verschiedener Fakultäten mitwirken, in unserer Hand.

3.3 EXKURSIONEN

12. Februar 2014, ganztägig:
Besichtigung der „Pfisterer Kontaktsysteme GmbH“ und Fachvorträge zur Kontakttechnik von Hochspannungskabeln mit 18 Hörerinnen und Hörern der Vorlesung „Hochspannungsfreileitungen“

Die Exkursionsteilnehmer bei Pfisterer Kontaktsysteme GmbH in Winterbach.

29. April 2014, ganztägig
Besuch des Kraftwerks Altbach/Deizisau mit Rundgang; Besichtigung der 380- und 110-kV-GIS-Schaltanlage und Erläuterung der Besonderheiten; zum Vergleich auch Besichtigung der 380-kV-Freiluftschaltanlage Stuttgart-Mühlhausen

28. Mai 2014, ganztägig
Besichtigung des Kernkraftwerks Philippsburg der EnBW mit ausführlicher Diskussion aktueller Fragen zur Energiepolitik und -versorgung

10. – 13. Juni 2014: Besuch mit 30 Hörern der Fachvorlesungen bei

- ALSTOM Grid Mönchengladbach	Leistungstransformatoren
- ABB Calor Emag Ratingen	Mittelspannungsschaltanlagen
- TRIANEL Lünen	750 MW-Steinkohlekraftwerk
- HSP Troisdorf	Durchführungen

Die Exkursionsteilnehmer bei ALSTOM Grid in Mönchengladbach

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Master-/Diplomarbeiten vom 1.11.2013 bis 31.10.2014:

Abdulamir, Mohammed

Untersuchung von Pre-Compliance Methoden zur Abschätzung der Störemission von KFZ-Komponenten nach CISPR 25 auf Grundlage von Störspannungs- und Störstrommessungen

Mit Hilfe einer Transferfunktion soll durch Messung des Common Mode Stromes bzw. der Störspannung an der LISN die Abstrahlung des Kabelbaums berechnet wird. Da die Abstrahlung vom jeweiligen Störer und der Transferfunktion abhängt, werden verschiedene Störer verwendet (Schmalband- und Breitband-Störer, Scheibenwischermotor als realer Störer). Es werden verschiedene Vorhersagen für die elektrischen Felder der Störer getroffen. Zusätzlich wird der Einfluss des Messaufbaus untersucht. Abschließend werden Messungen mit verschiedenen Filtern durchgeführt. Das Ziel ist die Bewertung des Einflusses des jeweiligen Filters auf das elektrische Feld.

Investigation of Pre-Compliance Methods for the Estimation of Radiated Emission of Automotive Components According to CISPR 25 on Base of Disturbance Currents and Voltages

Procedures are studied how to create a transfer function by measuring the common mode current or the interference voltage at the LISN (Line Impedance Stabilization Network), in order to calculate the emission of the wire harness. The emission depends on the interferer and the transfer function. Various interferers are used. The transfer function predicts the electrical field of various interferers. Additionally, various factors for the measurement setup and the associated effects are analyzed. Finally, the influence of different filters are analyzed with the goal to assess how the filters influence the resulting electric field.

Eberlein, Simon

Genetischer Algorithmus für die Einsatzplanung der Anlagen in Mikronetzen unter Berücksichtigung der Netztopologie

In dieser Arbeit wurde Methode zur Optimierung des Unit Commitments und Economic Dispatch in Mikronetzen in Bezug auf die Wirk- und Blindleistung der Komponenten (thermische Generatoren, Akkumulatoren, Photovoltaik, Windkraftanlagen, regelbare Lasten) entwickelt. Da die Netztopologie einbezogen wird, sind Genetische Algorithmen (GAs) für dieses Problem gut geeignet, weil durch ihre Flexibilität Lastflussanalysen mittels Matpower einbezogen werden können. Der entwickelte, problemspezifische GA liefert gute Ergebnisse für den Wirkleistungs-Dispatch, wie ein Vergleich mit Mixed-Integer Linear Programming zeigt. Weiterhin zeigen die Simulationsergebnisse, dass der Algorithmus intelligente Lösungen für durch die Netztopologie stark beschränkte Probleme liefert.

Genetic Algorithm for Unit Commitment and Economic Dispatch in Microgrids Considering Network Topology

In this work, a method to optimize the unit commitment and the economic dispatch in microgrids with regard to the active and the reactive power output of the components (thermal generators, batteries, photovoltaics, wind turbine, shiftable loads) is developed. As the network topology is incorporated, Genetic Algorithms (GAs) lend themselves to this problem because their flexibility allows incorporating load flow analysis using Matpower. The evolved problem specific GA gives good results for the P-Dispatch, as is shown in a comparison to mixed-integer linear programming (MILP). Furthermore, the results show that the algorithm finds intelligent solutions for problems that are highly constrained by the network topology.

Ellerbrock, Arne

Datenbankgestützte Lastflussberechnung in Niederspannungsnetzen

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung einer datenbankgestützten Lastflussrechnung. Hierfür wurde eine Datenbank angelegt, welche Informationen über Netzzustände beinhaltet, dessen Lastflussergebnisse bekannt sind. Ein weiterer Netzzustand, deren Lastflussergebnisse unbekannt sind, soll mit der Datenbank abgeglichen werden, um so die Lastflussergebnisse zu bestimmen, ohne eine Lastflussrechnung durchführen zu müssen. Hierfür werden sieben verschiedene Kriterien zur Bestimmung der Ähnlichkeit von zwei Netzzuständen bestimmt und untersucht. Es wurde gezeigt, dass die optimale Größe einer Datenbank aufgrund der Genauigkeit und Geschwindigkeit zwischen 200 und 500 Einträgen liegt. Durch einen detaillierteren Vergleich der ermittelten und tatsächlichen Ergebnisse wird gezeigt, dass die Methode große Fehler hervorrufen kann, im Allgemeinen stellt sie eine geeignete Methode dar.

Database-driven Power Flow Simulation in Low-Voltage Grids

This thesis describes a database-driven power flow calculation method. A database is first made available details of electrical grid cases for which power flow results are known. A new grid case is then analyzed and compared against the database, so that it is possible to determine results without running a simulation. Seven different characteristic criteria for similarity of grid cases are identified and analyzed. It is shown that the optimal size of the database ranges between 200 and 500 entries. Through a detailed comparison of two grid cases it is shown that results obtained using the tested method can contain major errors, but is generally able to provide a suitable method for solving grid cases.

Esin, Alexey

Methode zur Evaluierung der systemeigenen EMV von Mittelspannungsschaltanlagen mit neuartigen Strom- und Spannungssensoren

Schaltanlagen für Hoch- und Mittelspannung haben während des Schaltvorgangs eine sehr starke elektromagnetische Störemission. Damit die in unmittelbarer Nähe verbaute Sekundärtechnik hiervon nicht beeinträchtigt wird, sind in der Schaltanlagennorm IEC 62271-1 Prüfungen zur Sicherstellung der (systemeigenen) EMV

vorgesehen. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die bei der Prüfung nach Norm eingekoppelten Störgrößen bei realen Schalthandlungen sowohl in der Amplitude als auch im Frequenzspektrum überschritten werden. Hauptursache dafür ist die Prüfmethode an sich, da die Impedanz der Störsenke sowie der komplette Koppelpfad nicht berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wird eine Methode angewendet, die eine verlässliche Vorhersage über die EMV in Schaltanlagen während Schalthandlungen erlaubt.

Method for evaluating the native EMC of medium voltage switchgear with novel current and voltage sensors

High voltage switchgear and control gear have, due to their working principle, a very strong emission of electromagnetic interferences during the switching process. In order to avoid any impairment of the nearby secondary systems, all panels are tested according to IEC standard 62271-1. These tests are provided to ensure the EMC of the switchgear. However, studies have shown that the disturbances tested according to the standard are exceeded both in amplitude and in the frequency range of real switching operations. The main reason for this is the test method itself, since the impedance of the susceptible equipment, as well as the complete coupling path are not taken into account. In this thesis, a method is used which allows a reliable prediction of the EMC in switchgear during switching operations.

Hägele, Stephanie

Empfindlichkeitsvergleich von elektrischer mit ultrahochfrequenter Teilentladungsmessung an einer Transformatorwicklung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung und dem Vergleich zweier Teilentladungsmessverfahren. Ziel ist es dabei, Erkenntnisse über die Aussagekraft und Anwendungsfälle der Messverfahren zu erzielen und das Verhalten der UHF-Messmethode bei Messungen mit einer höhenverstellbaren künstlichen Teilentladungsquelle in einer Wicklung in einem ölgefüllten Tank zu untersuchen. Hierzu wird eine künstliche Gasableiter-Teilentladungsquelle entworfen, welche pegel- und phasenstabiles Verhalten aufweist, um bei jeder Messung dieselbe umgesetzte Ladung zu erhalten. Diese Quelle soll sowohl für die elektrische Messung nach IEC 60270 als auch für die UHF-Messmethode einsetzbar sein. Es werden TE-Messungen an einer Transformatorwicklung nach IEC60270 und mit der UHF-Methode durchgeführt und auf Parameter wie zum Beispiel der Abhängigkeit der scheinbaren Ladung von der TE-Position entlang der Wicklung untersucht.

Sensitivity Comparison of Electrical and Ultra-high Frequency Partial Discharge Measurement at a Transformer Winding

This thesis determines two different partial discharge measurement methods: the electric measurement and the UHF measurement. The object is to evaluate the information content and application of both methods and to investigate the characteristics of the UHF method. Therefore, an artificial PD source which is variable in height in a transformer winding is developed. The artificial PD source consists of gas discharge tube in order to get PDs at constant level and phase. The artificial PD source is used for electrical measurement according to IEC 60270 and also for UHF

measurements. Electrical and UHF PD measurements are compared considering different parameters, for example the dependence of apparent charge at different positions of the source along the winding.

Heinig, Stefanie

Optimale Auslegung eines regelbaren Ortsnetztransformators mit diskretem Stufenschalter unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Spannungsqualität

Der Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen (DEA) und die hohe Volatilität deren Einspeisung führt zu hohen Spannungsschwankungen und Spannungsbandverletzungen im heutigen Verteilungsnetz, so dass eine normgerechte Betriebsführung immer schwieriger wird. Der Einsatz von regelbaren Ortsnetztransformatoren (rONT) mit diskretem Stufenschalter zählt aus techno-ökonomischer Sicht zu einer vielversprechenden Lösungsmöglichkeit für die Spannungshaltungsprobleme. In der Arbeit wird eine systematische Analyse der Spannungsbänder durchgeführt und ein Simulationsmodell für einen rONT basierend auf realen Mittelspannungsmesswerten erstellt. Mit beiden Verfahren werden unter Berücksichtigung der Spannungsqualität die technischen Merkmale und Regelparameter eines rONT optimal bestimmt und mögliche Spannungsfelder aufgezeigt.

Optimal design of a controllable distribution transformer with discrete on-load tap changer taking into account the power quality requirements

The fast expansion of dispersed generation leads to high voltage fluctuations and voltage band violations in today's distribution network. This makes a stand-ardized grid management increasingly difficult. The use of voltage controlled distribution transformers (VCDT) with discrete tap changer is one of the most promising solution for the voltage stability problems. In this work, a systematic analysis of voltage bands is carried out and a simula-tion model for a VCDT based on real voltage measurements is developed. With both methods, the technical characteristics and control parameters of a VCDT are optimally determined taking into account the voltage quality requirements.

Koppon, Stefan

Aggregation von Lastverläufen in Niederspannungsnetzen mit Photovoltaikanlagen

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird ein Niederspannungsnetz mit privaten Lasten und PV-Analgen als Erzeugern modelliert. Die Gesamtlast, die positiv oder negativ sein kann, wird am Anschlusspunkt aggregiert dargestellt, um die Simulation regionaler Verteilnetze zu beschleunigen. Die Aggregation der Gesamtlast wird für drei Regelmethoden für PV-Analgen dargestellt. Zum einen eine Begrenzung der eingespeisten Wirkleistung auf 70 Prozent der installierten Leistung. Zum anderen zwei Methoden der Blindleistungsregelung, die „cos φ(P)-Regelung“ und die „Q(U)-Regelung“. Die Ergebnisse der aggregierten Leistung am Netzanschlusspunkt liefern für alle Regelmethoden unter normalen Bedingungen zufriedenstellende

Genauigkeiten. Die Zeit zwischen Iteration und aggregierter Darstellung konnte um ca. vier Größenordnungen reduziert werden.

Aggregation of Load Patters in Low-Voltage Grids with PV Plants

In this thesis, a low-voltage network with private loads and PV-plants as generators is modeled. The total load that can be positive or negative, is presented as aggregated power at the connection point to accelerate the simulation of regional distribution grids. The aggregation of the total load is shown for three control methods for PV-plants. Firstly, a limitation of the active power fed to 70 percent of installed capacity. Secondly, two methods of reactive power control, the "cos φ(P)-control" and the "Q(U)-control". The results of the aggregated power at the grid connection point gives for all control methods under normal conditions satisfactory accuracy. The time between iteration and aggregated representation could be reduced by about four orders of magnitude.

Kurka, Christiane

Teilentladungsmuster gasisolierter Schaltanlagen bei Störstelleneinfluss unter hohen Gleichspannungen

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) für den Gleichspannungseinsatz werden in den kommenden Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnen, beispielweise für die Anbindung von Offshore-Windparks. Aufgrund ihrer kompakten Bauweise und Betriebszuverlässigkeit sind GIS ein wichtiger Bestandteil einer sicheren Energieversorgung. Um diese zu gewährleisten, werden Teilentladungsmessungen als Diagnoseverfahren eingesetzt. Unter Gleichspannung gibt es jedoch kaum Erfahrungswerte hinsichtlich des Teilentladungsverhaltens. Die klassischen Wechselspannungs-TE-Auswerteverfahren sind aufgrund des fehlenden Phasenbezugs bei Gleichspannung nicht anwendbar. In dieser Arbeit werden Störstellen in einer SF6-isolierten Schaltanlage bei Gleichspannung untersucht und charakterisiert. Dafür werden statistisch gewonnene Teilentladungsmuster entwickelt, anhand derer das Teilentladungsverhalten charakterisiert werden kann. Ausführlich wird auf freibewegliche Partikel eingegangen.

Partial discharge patterns of GIS defects under Direct Voltage Stress

Gas insulated switchgear (GIS) for DC operation will gain importance within the next years, for example realizing offshore wind farm integration. GIS are proven elements of electrical power grids due to their compactness and high reliability. To provide this, partial discharge measurement is applied as a diagnostic tool. But there is hardly experience for partial discharge behavior under DC. The phase-resolved partial discharge analysis can't be used for DC. In this thesis different defects in a SF6-insulated switchgear are investigated and characterised. Statistical partial discharge patterns are developed to enable the identification of the defect. Free moving particles are investigated in detail.

Marchenko, Mykhailo

Entwicklung eines Transformator-Online Monitoring-Systems

Zur Überwachung und Beurteilung des Zustandes eines Leistungstransformators während des Betriebes werden mehrere verschiedene analoge und digitale Sensoren eingesetzt. Die Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Moduls, das eine Schnittstelle zwischen Rechner und Sensorik eines Leistungstransformators darstellt. Mittels des eingebrachten Ethernet-Anschlusses lassen sich sämtliche Parameter bei einem Leistungstransformator online überwachen. Das System stellt eine kostengünstige, robuste und kompakte Alternative zu gängigen und meist teuren Monitoring-Systemen dar. Die Entwicklung umfasst das komplette Hardware-Design und den Entwurf der Software für den Mikrokontroller. Dieser wird als Steuerelement für das Messen, Verarbeitung, Speichern und die Bereitstellung von Daten eingesetzt.

Development of a Transformer Online Monitoring System

To monitor and evaluate the condition of power transformers, different analog and digital sensors can be installed. This thesis focuses on the design and development of a monitoring system, which works as a junction between a data processor and the sensors installed at the power transformer. Using an Ethernet connection all relevant parameters of a power transformer can be controlled online. The system is a cost-efficient, robust and compact alternative option compared to common and expensive monitoring systems. The system development covers the hardware design and the software development of the microcontroller, which acts as a control device for measurements and data processing deployed.

Mertyn, Anton

Entwicklung einer Methode zur dynamischen Netzreduktion eines ausgedehnten elektrischen Verbundnetzes

In d**er** Arbeit konnten unter Berücksichtigung der Partizipationsfaktoren verschiedene Methoden zur dynamischen Netzmodellreduktion eines ausgedehnten Verbundnetzes erarbeitet und evaluiert werden. Dabei stellte sich die Methode zur clusterweisen Zusammenfassung gleichschwingender Generatoren innerhalb von Schwunggruppen als die **g**eeignetste heraus. Dies konnte anhand des deutschen sowie eines europäischen Teilnetzes gezeigt werden. Dafür wurden verschiedene Störfälle an unterschiedlichen Orten im Netz simuliert und ausgewertet sowie die Ergebnisse des ursprünglichen Netzes mit dem reduzierten Netz verglichen.

Development of a method for dynamical grid reduction of a large distributed grid

In this thesis an evaluation of different methods to the reduction of large dynamic network models is presented. The development of the methods is based on the participation factors. The method of clustering the same oscillating generators within the swing groups is the most appropriate. This could be shown on the German network and on a part of the European interconnected network. Therefore various incidents at different locations in the network were simulated and evaluated and the results of the original network with the reduced network compared.

Mohr, Oliver

Stromverteilungsalgorithmus zur Ermittlung der Störstromverteilung auf Kabelbäumen im CISPR 25 Komponententest

Die Arbeit dient der Verbesserung einer Pre-Compliance Prüfmethode zur Vorhersage abgestrahlter elektrischer Felder von Kfz-Komponenten. Die Störstromverteilung entlang des Kabelbaums wird mit einer Stromzange gemessen und daraus mit dem Dipol- bzw. dem Transferfunktionsmodell das abgestrahlte elektrische Feld berechnet. Dazu sind viele Strommessstellen am Kabelbaum nötig. Auch wird der Strom-Phasenwinkel benötigt. In der Arbeit wird untersucht, ob sich die Messstellenanzahl entlang des Kabelbaums mit Hilfe der Leitungstheorie reduzieren lässt und ob man die fehlende Phase des Stroms berechnen kann. Dazu wird ein Algorithmus in MATLAB programmiert, der aus wenigen Messungen die komplette Stromverteilung inklusive Phaseninformationen entlang der Leitung berechnet. Der Stromverteilungsalgorithmus alleine und das Zusammenspiel mit dem analytischen Modell zur E-Feld-Berechnung wurden mit einer LTSpice-Simulation, mit einem Freiraum-Messaufbau und einem CISPR 25-Messaufbau überprüft. Der Algorithmus funktioniert in zeitinvarianten Systemen bei periodischen Störern. Er kann die Anzahl an benötigten Messstellen und die Messzeit nahezu halbieren.

Current Distribution Algorithm for the Determination of Current Distributions on Cable Harnesses in the CISPR 25 Component Test

The thesis deals with the improvement of a pre-compliance test method for predicting radiated electric fields of automotive components. The current distribution along the cable harness is measured with a current probe and is used to calculate the radiated electric field with a dipole or transfer function model. Many current measurement points along the wire harness are required to do that. In addition one needs the phase of the current. This thesis examines if the number of measurement points can be reduced and if the phase information of the current can be retrieved by using transmission line theory. Therefore an algorithm in MATLAB is programmed, which calculates the complete current distribution including phase information from a few current probe measurement points along the cable harness. The current distribution algorithm alone and the interaction with the analytical model for the calculation of the electrical field are verified with an LTSpice simulation, with a free-space measurement setup and a CISPR 25 measurement setup. The current distribution algorithm works in time invariant systems with periodic interferers and can nearly halve the number of required meas-urement points and the required measurement time.

Notz, Simon

Spannungsregelungskonzepte für Niederspannungsnetze mit Zustands-schätzer

Aufgrund des zunehmenden Ausbaus dezentraler Energieerzeugungsanlagen - ins-besondere von Photovoltaikanlagen - und deren fluktuierende Einspeisung, kommt es im Niederspannungsnetz zu hohen Spannungsschwankungen und immer häufiger auftretenden Spannungsbandverletzungen. Durch die vielen Knoten kann im

Niederspannungsnetz nur an bestimmten zentralen Punkten das Netz überwacht werden. Mithilfe eines Zustandsschätzers ist es dagegen möglich, den gesamten Netzzustand zu schätzen. Ein Zustandsschätzer benötigt dafür lediglich eine gewisse Anzahl an Echtzeitmessungen, um auf den Netzzustand schließen zu können. In der Arbeit wird ein Simulationsmodell eines realen Niederspannungsnetzes erstellt. Ein Zustandsschätzer-Algorithmus und drei Spannungsregelungskonzepte, die auf Basis der geschätzten Spannung agieren, werden darüber hinaus implementiert. Die Spannungsregelung erfolgt über einen regelbaren Ortsnetztransformator oder eine Wirkleistungsbegrenzung mit optionaler Blindleistungsbereitstellung durch Photovoltaikanlagen. Es wird untersucht, welche Auswirkungen eine zustandsschätzerbasierte Spannungsregelung bei verschiedenen Ungenauigkeiten des Zustandsschätzers auf das Niederspannungsnetz hat.

Concepts for voltage control of the low voltage grid with state estimator

The increasing expansion of distributed generation, especially photovoltaic systems, leads to high voltage fluctuations and voltage band violations in distribution grids. Because of very high numbers of nodes, monitoring takes place only at critical points. Therefore a state estimator is a promising approach, because only with a few measuring points, the overall grid state is estimated. In this thesis a simulation model of a real low voltage grid is created. A state estimator algorithm and three voltage control strategies that act on the basis of the estimated voltage are implemented. The effect of various inaccuracies of the state estimator on voltage regulation is investigated.

Perrino, Domenico

Erstellung eines Schutzkonzepts zum Betrieb eines Spannungslängsreglers im Niederspannungsnetz

Der Netzbetreiber ist laut DIN EN 50160 verpflichtet, die Spannung in gewissen Grenzen zu halten. Insbesondere in ländlichen Gebieten mit großen Leitungslängen wird dies zunehmend problematisch. Zur Behebung dieser Spannungshaltungsprobleme bietet in gefährdeten Bereichen der Einsatz eines Spannungslängsreglers eine günstige und effiziente Alternative zum kostenintensiven Netzausbau. Im Rahmen der Arbeit wird ein Simulationsmodell eines Spannungslängsreglers entwickelt und anhand eines Referenznetzes untersucht. Es wird das Verhalten des Spannungslängsreglers bei normalen, sowie anormalen Betriebszuständen, wie beispielsweise ein- und mehrpoligen Fehlern, simuliert. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse werden sicherheitstechnische Probleme, insbesondere Unterfunktion vorhandener Schutzeinrichtungen oder anstehende Spannungen nach Fehlerklärung aufgezeigt und geeignete Maßnahmen zum sicheren Betrieb des Spannungslängsreglers im Niederspannungsnetz abgeleitet.

Protection concept for the operation of voltage booster in low voltage network

In the last decades, the distribution grids witnessed a rapid expansion of integration of decentralized distribution units from renewable energies especially in the low voltage grids. These units cause some voltage stability problems especially in rural areas with long overhead lines or cables. In order to keep the voltage within the

allowed limit according to DIN EN 50160, new components have been developed and used in the distribution girds, for example the line voltage regulator. The line voltage regulators offer an efficient and convenient alternative for the voltage stability and to avoid any extra grids expansion costs. In this thesis, a simulation model of an SLR will be developed and implemented using MATLAB SimPowerSystems together with a reference low voltage grid from the “Netze BW”. The behavior of the SLR in normal as well as abnormal operating states such as single- or multi-phase faults will be simulated. With the help of the simulation results, the grid reliability requirements problems, especially existing protection devices or voltages after fault elimination is described. Suitable measures for a safe operation of SLR in the low voltage grid will be also derived. By the simulation a with further simulation software, the correctly functioning of the modeled reference network is verified.

Qiu, Yi

Ansätze zur Modellierung des thermischen Verhaltens von Leistungstransformatoren

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der 5 konventionell thermischen Modelle von Leistungstransformatoren, nämlich Lineares Modell, Ein-Körper-Modell, IEC 60354 Modell, IEC 60076-7 Modell und IEEE Modell. Darüber hinaus werden die entstandenen Abweichungen der Modelle von gemessener Temperatur zusammen miteinander analysiert und verglichen. Es wurde gezeigt, dass die Genauigkeit der untersuchten Modelle von der Training-Datei abhängt. Trotzdem bietet IEC 60076-7 in gleichen Umständen kleine Abweichung von gemessener Temperatur an.

Investigation of Different Top-Oil Temperature Models of Power Transformers

This work deals with the investigation of 5 different conventional thermal model of power transformer namely Linear Model, One-Body-Model, IEC 60354 Model, IEC 60076-7 Model, and IEEE Model. Moreover, the error between the output of each model and measured temperature has been investigated. It has been shown that the accuracy of the model depends on the training dataset; nevertheless, IEC 60076-7 represents lower deviation from measured temperature in comparison with other models in the same situations.

Rica Mendez, Florian

Feldnumerische Analyse von Multi Segment Transferfunktionen für eine Pre-Compliance Prüfmethode nach CISPR 25

Die Arbeit beschäftigt sich mit einer Vorhersagemethode (Pre-Compliance Methode) für Störemissionen, die von Komponenten im Kfz-Bereich über den angeschlossenen Kabelstrang verursacht werden. Der untersuchte Aufbau wird durch die CISPR 25 Norm festgelegt. Grundlage für die Vorhersagemethode ist ein Berechnungsmodell, das mittels Transferfunktionen und dem auf dem Kabelstrang fließenden Common-Mode Strom eine Vorhersage des entstehenden elektrischen Feldes ermöglicht. Um die Berechnung des elektrischen Feldes unabhängig von der Stromverteilung auf dem Kabelstrang zu machen, wird dieser segmentiert. Dies führt zu Multi Segment

Transfer Funktionen. Die Untersuchung der Multi Segment Transferfunktion erfolgt durch feldnumerische Simulationen. Die grundsätzliche Eignung der Simulationsumgebung CST Studio Suite® zur Modellierung von Problemen in diesem Kontext wird überprüft. Dazu wird der Wellenwiderstand der modellierten Strukturen ermittelt. Das Reflexionsverhalten des Kabelstrangs bei Abschluss mit dem Wellenwiderstand gibt Aufschluss über die Plausibilität der Ergebnisse. Der Einfluss verschiedener Leiterlängen sowie der Position des Kabelstrangs über Masse auf den Wellenwiderstand werden überprüft. Multi Segment Transferfunktionen werden bei angepasstem Leitungsabschluss erstellt. Um das Verfahren unabhängig vom Leitungsabschluss zu machen, wird ein Simulationsmodell zur Umsetzung der Impedanztransformation über die Segmente der Leitung entwickelt. In diesem Kontext werden verschiedene CST Design Studio™ Entwürfe untersucht. Zwei Port Typen, die die Signaleinspeisung in den Simulationen realisieren, sowie zwei verschiedene Simulationsansätze stehen dabei im Fokus der Betrachtung.

Field Numerical Analysis of Multiple Segment Transfer Functions for Pre-Compliance Methods according to CISPR 25

The work deals with a pre-compliance test method to predict the radiated emissions caused by electronic components and modules of the electrical system of a vehicle. Test procedures and limits are given by the CISPR 25 standard. The investigated pre-compliance test method is based on a computational model that uses transfer functions to calculate the electric field eradiated via a test harness. To accomplish this calculation, only the Common-Mode current on the harness has to be known. In a basic setup this method is highly dependant of the current distribution present on the harness during the creation of the transfer functions. To generate a higher grade of independance from the current distribution the test harness is segmented. This leads to multi segment transfer functions. The study of the multi segment transfer functions is performed via field-numerical calculations. The fundamental suitability of the simulation tool CST Sudio Suite® to generate appropriate models in this context is surveyed. Multi segment transfer functions are generated with a matched line termination. An approach to make the prediction of the radiated emissions independent of the load resistance is made. For that a simulation model, with the goal to implement the impedance transformation across the segments of the line, is developed. Different setups based on the CST Design Studio™ are investigated in this context. Two different port types that accomplish the coupling of the segment simulations are investigated as well as two differing simulation designs.

Rovira Buhigas, Jordi

Aufbau und Inbetriebnahme einer elektrischen Schaltung zur Messung kleiner Ströme bei der Leitfähigkeitsmessung der Isoliersysteme

Die Messung kleiner Ströme ist ein wichtiger Teil der elektrischen Untersuchung von Isoliermaterialien. Bei sehr kleinen Strom- und Spannungswerten wird die Messgenauigkeit sehr wichtig. Beispielsweise kann eine Veränderung von 1 nA oder 1 nV eine große Abweichung bei den Messergebnissen und den sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen verursachen. Bei diesem Ansatz werden die unterschiedlichen

Verfahren für die Messung kleiner Ströme mit pA- und nA-Werten analysiert und miteinander verglichen. Dabei wird eine Shunt-Messung mit zwei nachfolgenden Verstärkerstufen eingesetzt, welche mit Standardbauelementen dennoch kleine Ströme mit einer Genauigkeit von +/-10% messen kann (I >100pa).

Design of a proper set-up for low current measurements of insulation systems

Low-level current measurement is an important part of insulating material electrical studies. Due to the small values of current and voltage used, the precision of the values becomes very important. For example, a change of 1 nA or 1 nV can make a huge difference in results. In this approach, different ways to measure low current values of pA and nA are analyzed and compared. The aim is to design an economically affordable device with an acceptable accuracy. For this purpose, the shunt measurement technique is chosen. Furthermore, the design and implementation of the circuit with standard electronic components are performed.

Vladislav Samoylenko

Aufbau eines Messplatzes für UHF-TE-Messungen an gasisolierten Schaltanlagen im Frequenzbereich

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Messplatzes für UHF-TE-Messungen. Dafür wird die Verbindung zwischen dem PC und Spektrum-Analysator über die GPIB-Schnittstelle hergestellt. Um die Steuerung des Spektrum-Analysators am PC durchführen zu können, wird ein Programm in der graphischen Programmiersprache LabVIEW entwickelt. Das Programm ermöglicht Kommunikation sowie Steuerung des Messgeräts und verfügt über eine benutzerfreundliche Bedienungsoberfläche. In der graphischen Benutzeroberfläche des Programms kann auf die wichtigen Grundeinstellungen des Spektrum-Analysators zugegriffen werden sowie die Bildübertragung erfolgt relativ schnell. Der Spektrum-Analysator kann vom PC aus fern gesteuert werden oder es lassen sich auch Messung außerhalb des Messortes durchführen. Zur Entwicklung der Steuerung wurde die LabVIEW verwendet. Der Spektrum-Analysator arbeitet im Frequenzbereich ab 9 kHz bis 1,8 GHz. Deswegen kann mit dem Analysator praktisch das vollständige Spektrum im UHF-Bereich erfasst werden.

Setup of a frequency domain measurement system for UHF PD measurements on gas insulated switschgear

This diploma thesis is concerned with the development of a measuring station for UHF PD measurements. Therefore was built the connection between the PC and the spectrum analyzer via GPIB interface. The spectrum analyzer control was developed in graphical programming language LabVIEW. The program allows the communication and control of gauge and has a user-friendly interface. In the user interface of the developed program can be accessed on the important basic setting of the spectrum analyzer and the display update is relatively fast. The measurements with spectrum analyzer can be performed by computer remotely or locally. The program of spectrum analyzer control was developed with LabVIEW. The spectrum analyzer operation frequency range is from 9 kHz to 1,8 GHz. This operating specification allows to acquire data of the full spectrum of UHF range.

Sapetschnig, René

Vibrationsanalyse von Leistungstransformatoren

In der Arbeit wird die Möglichkeit zur Verwendung von Körperschallmessungen an Leistungstransformatoren als Monitoring- und Diagnosesystem untersucht. Die Vibrationen der Leistungstransformatoren werden mittels eines Körperschallsensors gemessen und über ein Messsystem verstärkt und aufgezeichnet. Zuerst werden der grundlegende Aufbau eines solchen Messsystems beschrieben und dessen Installation gezeigt. Danach werden Auswertungen von drei verschiedenen Leistungstransformatoren, zwei Maschinen- und einem Netzkupplungstransformator untersucht. Dafür werden die Vibrationsdaten mit den zur Verfügung stehenden Betriebsdaten, wie Last und Öltemperatur korreliert und gezeigt, dass typische Abhängigkeiten existieren. Anschließend wird gezeigt, dass diese betriebsabhängigen Vibrationsverhalten klassifiziert werden können. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die drei genannten Transformatoren untereinander vergleichen zu können, um typische Verhalten zu beschreiben und zu kategorisieren.

Vibration Analysis of Power Transformers

This thesis deals with the prospect of using vibration measurements on power transformers to determine the status of the transformer and thus use it for diagnostic purposes. The vibrations are measured using acceleration sensors. The signal is amplified, monitored and recorded using a system described in the thesis. Vibration data of three different power transformers are analyzed and compared. Therefore, operational data of the transformers are correlated with the acquired vibration data. Typical behavior patterns of the transformers for different operational conditions are observed and compensated to a certain extent in order to be able to compare the measurements obtained for the different states of the transformers and find conclusions on the vibration behavior.

Schäfer, Irina

Auswirkungen von dezentralen Wärmeerzeugern auf elektrische Verteilnetze

Innerhalb dieser Arbeit wird ein Modell entwickelt, um mit diesem verschiedene, dezentrale Wärmeerzeuger in einem elektrischen Verteilnetz zu simulieren. Die Wirkung dieser Wärmeerzeuger auf das elektrische Netz wird ebenfalls simuliert. Aus diesen Ergebnissen kann ein Einfluss der Wärmeerzeuger auf das Netz abgeleitet werden. Dies erfordert in einem ersten Schritt die Entwicklung eines Programmes zur Abbildung der Netzrealität. Dies beinhaltet sowohl Haushalte mit deren Parametern als auch verschiedene Einspeiseanlagen innerhalb eines Netzes. In einem zweiten Schritt werden verschiedene Simulationen durchgeführt, um mit diesen die Auswirkungen von dezentralen Wärmeerzeugern auf ein elektrisches Netz abschätzen zu können. Zuerst wird eine Simulation für ein großes Mittelspannungsnetz durchgeführt zur Abschätzung der Grenzen des Einflusses der Wärmeerzeuger. Danach wird für ein kleines Niederspannungsnetz für die Jahreszeiten Sommer und Winter simuliert. Dies ermöglicht in einem letzten Schritt die Abschätzung des Einflusses von dezentralen Wärmeerzeugern auf elektrische Netze.

Impacts of a dispersed heat provision on electrical distribution grids
In this paper a model for the simulation of local heating systems is developed. The effect of these heating systems to an electrical grid is simulated. Based on these results, the effect of these heating systems on the grid can be deduced. To model the grid and the local heating systems connect to it, a simulation program is developed. This includes the households with their parameters as well as electrical generation units in the grid. In a second step, simulations have been carried out to show the effect of additional electrical load by local heating units on the electrical grid. First, a distribution grid is simulated to show the boundaries of the influence of the additional load from the local heating units. Then a simulation on a low voltage grid was conducted for the seasonal intervals summer and winter to estimate the influence of local heating units on the electrical grid.

Schäfer, Jonas
Erstellung einer modularen Simulationsumgebung zur Kostennutzenbetrachtung von neuartigen Niederspannungsbetriebsmitteln und Regelstrategien
Neue Lösungen im Niederspannungsnetz (z.B. Spannungsregler) können es dem Netzbetreiber ermöglichen, den Netzausbau in Gebieten mit starker Durchdringung von dezentralen Einspeiseanlagen (DEA) durch Einbau solcher Lösungen zu verzögern. In dieser Arbeit wird eine Simulationsumgebung in PowerFactory 14/15 entwickelt um den technischen Nutzen solcher Lösungen, als auch die Kosten der Lösungen, zu bewerten. Modelle für regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT), Batteriespeicherverhalten, Blindleistungsbereitstellung und Wirkleistungsmanagment von DEA können in der Umgebung simuliert werden. Zusätzlich kann der Nutzer in der Nachbereitungsphase kritische Betriebsmittel leicht identifizieren und die zu erwartenden Ausbaukosten des Netzes aufgrund von Wahrscheinlichkeiten berechnen, um die Investitionskosten der angewandten Lösung zu bewerten.
Development of a modular simulation environment for evaluating the cost-benefit of innovative low voltage equipment
New solutions to mitigate the effects of increasing decentralized power generation promise network operators to delay the upgrade of low voltage grid sectors under load of decentralized power generators. In this work a modular simulation environment in PowerFactory14/15 is developed. The models of a transformer with on load tap changer (OLTC), electric battery storage units, active and reactive power management systems can be used in the simulation environment. In the post processing phase of the simulation workflow, the user can identify bottlenecks in the grid, as well as calculate the expected benefit based on probabilities as a result of using an innovative solution in a grid.

Seregely, Alexandra
Lastflusssteuerung und Verlustoptimierung im Übertragungsnetz mit Hochspannungsgleichstromübertragung
In dieser Arbeit wird untersucht, welchen Einfluss eine HGÜ in verschiedenen Übertragungsnetzen auf die Verluste hat. Dazu werden in MATLAB verschiedene Szena-

rien implementiert, welche durch Lastflusssimulationen mit MATPOWER und MATACDC berechnet werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt darin, zu untersuchen, ob es eine Regelgröße gibt, die einen verlustminimierten Betrieb mit einer HGÜ vereinfacht. Im Speziellen wird dabei die Spannungswinkeldifferenz zwischen den Anschlussknoten der HGÜ herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass es einen Zusammenhang zwischen den Verlusten im Übertragungsnetz und der Spannungswinkeldifferenz zwischen den HGÜ-Anschlussknoten gibt und eine dynamische Verlustoptimierung mit Hilfe der Spannungswinkeldifferenz möglich ist.

Load Flow Control and Loss Optimization in Transmission Systems with High Voltage Direct Current Transmission

This investigation deals with HVDC influences on the losses in various power transmission systems. For this purpose, a range of scenarios are modeled in MATLAB which are then analyzed by load flow calculations using MATPOWER and MATACDC. The focus is to examine whether there is a control variable that facilitates operation with HVDC to minimize losses. Specifically, the voltage angle difference between the HVDC connection nodes is investigated. It is found that there is a correlation between the losses in the power transmission system and the voltage angle difference between the HVDC connection nodes and that dynamic loss optimization is possible using voltage angle difference.

Stamenkovic, Vladimir

Untersuchung von Streukapazitäten an Hochspannungsdurchführungen als Referenz für ein Online-Monitoring-System

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein neuartiges Referenzsystem für das Online-Monitoring des Verlustfaktors tan-δ von Hochspannungsdurchführungen auf Plausibilität überprüft. Neben dem Vergleich vorhandener Referenzmethoden wird das neue System ein- und dreiphasig in CST und FEMM nachgebildet und simuliert. Zur Validierung der Simulation werden entsprechende Messanordnungen aufgebaut und mit den Simulationsergebnissen abgeglichen. Der Ausblick behandelt die Fragestellung, ob es sich bei der aufgezeigten Referenzmethode für dreiphasige Leistungstransformatoren um eine technisch sinnvoll realisierbare Methode handelt.

Determination of the Usability of High Voltage Bushings Stray Capacities as Referenz for Monitoring Systems

In context of this thesis, a novel reference system for online dissipation factor tan-δ monitoring of high voltage bushings is inspected for plausibility. In addition to highlighting existing reference methods, the new system is simulated in a single and three phase system using CST and FEMM. To validate the simulation corresponding measuring setups are designed and compared with the simulation results. A discussion of the results determines, whether the presented method is a technically sensible, realizable approach for three-phase power transformers.

Tafesh, Ahmed

Development of a Double Sided PD Measurement Software that Focuses on Energy Cable System

The aim of this thesis is the design of a PD software for verification of the communication on the HV cable system and to implement a double sided PD measurement by using a LabVIEW program over the serial port RS-232. This enables to increase the accuracy and sensitivity of a measurement. Finally, performance measurements are carried out to evaluate the new PD measurement system. The system was implemented to provide the communication interface between master and slaves.

Vaklinov, Ivan

Untersuchung einer Methode zur Datenübertragung über Energiekabel mithilfe kapazitiver Kopplung

Die vorliegende Masterarbeit untersucht eine Methode zur Datenübertragung über Energiekabel mithilfe kapazitiver Ein-/Auskopplung der Datensignale. Dies ermöglicht eine Kommunikation über ein Energiekabel, an welchem Hochspannung anliegen kann. Die zu übertragenden Daten repräsentieren die Messparameter und -ergebnisse, welche bei Teilentladungsmessungen vor Ort ermittelt werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei der Entwicklung eines Kommunikationsgeräts, welches die serielle Schnittstelle sowie Hardware zur Modulation einsetzt. Aufgrund der gewählten Frequenzmodulation wird im Rahmen dieser Arbeit auch die frequenzabhängige Signaldämpfung im Energiekabel untersucht. Zur Optimierung der kapazitiven Kopplung wird ebenfalls eine Erweiterung dieser Methode untersucht.

Investigation of a method for data transmission over energy cables by means of capacitive coupling

The present master thesis investigates a method of data transmission over power cables using indirect capacitive coupling of data signals. The transmitted signals represent the data obtained at on-side partial discharge measurements. The focus of this work is the development of a communication device using the serial interface RS-232 as well as hardware configurations for frequency modulation and demodulation. Because of the frequency modulation, the frequency-dependent signal attenuation in the power cable is investigated in detail for this work. The development of a communication device with suitable-adapted modulation/ demodulation and coupling arrangement is done, based on the obtained results.

Velasco, David

Investigation of Transformer Behavior under DC Influence with Simulation Models and Laboratory Measurements

The behavior of transformers under DC components has been long studied. One of the principal sources of these components is the AC-DC energy conversion, in which unsymmetrical direct current components can arise. Another important phenomenon are Geomagnetically Induced Currents (GIC), caused by an increased solar activity, which introduce an offset in the grounded neutral terminals of power transformers. In literature there are some investigations about the harmful effects that DC compo-

nents may cause in power transformers. The presence of a DC component induces an offset on the magnetic flux flowing through the transformer core, which can lead tosaturation effects. An increase on the magnetic field is immediate, and high associated magnetization currents appear. As a consequence of this, harmful harmonics and a distorted secondary voltage can also be observed. Furthermore, the increased magnetizing currents caused by the DC bias can lead to high leakage fluxes (increasing the losses) and local hot spots. Experimental setups and different measurements shown in this thesis can be useful in order to know in detail the behavior of transformers under DC and which are the most harmful effects that may occur during transformer operation. Towards this purpose, a MATLAB-Simulink model for a three-phase three-limb transformer is introduced, and different simulations are carried out for a verification.

Wittenberg, Bernhard

Bewertung und Optimierung von Regelkonzepten für regelbare Ortsnetztransformatoren

Ein regelbarer Ortsnetztransformator entkoppelt die Mittelspannungsebene von der Niederspannungsebene und schafft somit mehr Kapazität für weitere dezentrale Energieerzeugungsanlagen. Allerdings können bei falscher Parametrierung des Reglers negative Rückwirkungen auf die Spannungsqualität auftreten. Die vorliegende Arbeit untersucht, vergleicht und optimiert verschiedene Regelkonzepte auf Spannungshaltung und Spannungsqualität. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine leistungsabhängige Sollwertregelung einerseits die beste Spannungshaltung und demnach auch die größte Steigerung der Einspeisekapazität bewirkt. Eine leistungsabhängige Sollwertregelung verursacht jedoch andrerseits auch die meisten Schalthandlungen, was wiederum zu einer erhöhten Flickerbelastung führen kann. Infolgedessen empfiehlt es sich für die meisten Netze, eine feste Sollwertregelung einzusetzen. Die Wahl der Regelparameter kann mithilfe eines in dieser Arbeit erstellten Verfahrens erfolgen, welches die optimale Spannungshaltung bei einer definierten Flickerbelastung sicherstellt.

Evaluation and optimization of controlling methods for controllable distribution transformers

A regulated distribution transformer decouples the medium voltage level of the low-voltage level and hence enhances the hosting capacity of decentralized generation (DG). However an incorrect parameterization of the controller can result in negative effects on the voltage quality. This study examines, compares, and optimizes different control concepts on voltage maintenance and voltage quality. The results show that a power-dependent setpoint control evokes the best voltage maintenance and hence the largest increase in the DG hosting capacity. However, this power-dependent control enhances switching operations and power-line flickers. Therefore it is recommended for most networks to use a fixed setpoint control. The selection of the control parameters can be achieved by using a method created in this study which ensures the optimum voltage maintenance at a defined flicker level.

Wolski, Wasgan

Entwicklung eines Systems zur akustischen Ortung von Teilentladungen

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Systems zur Ortung von Teilentladungen innerhalb eines Transformators mittels der akustischen Abstrahlungen von Teilentladungen im Frequenzbereich von 75 kHz bis 250 kHz. Das System verwendet ein bestehendes UHF-Überwachungssystem. Um mit der Basisplatine nicht nur UHF-Signale, sondern auch akustische Signale zu verarbeiten, wird eine akustische Eingangskarte entwickelt, die aus der Versorgung der Sensoren mittels einer Phantomspeisung, einem Bandpassfilter, Peak-Detektoren und einem Analog-Digital-Wandler besteht. Zur Auswertung der akustischen Sensorsignale wird die zum Überwachungssystem gehörende Software um eine Lokalisierungsfunktion erweitert. Implementiert werden zwei Verfahren. Ein iteratives Verfahren, das mit drei Sensoren und einem UHF-Sensor arbeitet. Das zweite Verfahren verwendet vier akustische Sensoren und implementiert einen nicht-iterativen Algorithmus. Mittels Messungen an einem Öltank mit Teilentladungsquelle wird die Funktion des Gesamtsystems überprüft.

Development of an Acoustic Partial Discharge Localization System

This thesis describes the development of a partial discharge localization system. Partial discharges emit acoustic signals in the frequency range of 75 kHz up to 250 kHz. The system uses an existing UHF monitoring system. To allow a processing of acoustic signals a new input card is developed. The acoustic input card consists of a power supply for the connected sensors, a band pass filter, peak-detectors and an analog-digital converter. For the analysis of the acoustic signals the monitoring software is extended with localization functions. Two methods are implemented: The first is an iterative method which uses three acoustical sensors and an UHF sensor. The second method uses four acoustical sensors and a non-iterative algorithm. The system was tested with the help of an oil filled tank and a partial discharge source.

Yang, Zongnan

Untersuchung der elektrischen Festigkeit verschiedener Isolieröle

Im Rahmen der Arbeit wird die elektrische Festigkeit von Isolierölen untersucht. Dabei wird die Durchschlagspannung von Mineralöl, natürlichem und synthetischem Ester im quasi-homogenen Feld und entlang imprägnierter Pressboardoberflächen für Strecken bis 50 mm gemessen. Mit Hilfe von Verteilungsfunktionen werden die zugehörige mittlere Spannungsfestigkeit und die Stehspannung bestimmt und verglichen. Die Abhängigkeit der spezifischen Durchschlagfeldstärke von der Schlagweite wird dargestellt. Es werden materialabhängige Kurven mit den Weidmannkurven verglichen.

Investigation of dielectric strength for different insulating liquids

Zhao, Chong

Untersuchungen zum Verhalten des Öl / Papier-Isolationssystems bei Gleichspannungsbeanspruchung

Die Masterarbeit beschäftigt sich mit einem Ionen-Drift-Diffusionsmodell für das Verhalten des Öl / Papier-Isolationssystems bei Gleichspannungsbeanspruchung. Das Modell wird anhand einer FEM-Simulation mit Hilfe der Software COMSOL Multiphysics implementiert. Außerdem erfolgt die Simulation des Ionenverhaltens bei homogener- und inhomogener Feldverteilung. Die hierfür benötigte Ionenbeweglichkeit wird durch Messungen im Labor ermittelt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass ein Drift-Diffusionsmodell allein für die Beschreibung des Verhaltens des Öl/Papier-Isolationssystems nicht ausreichend ist. Daher erfolgt als Erweiterung des Modells im zweiten Schritt die Mitberücksichtigung der Ladungsträgerinjektion aus dem Elektrodenbereich.

Studies on the behavior of oil/paper insulation system under DC stresses

This thesis deals with an ion drift-diffusion model for the behavior of the oil / paper insulation system under DC stress. The model is implemented with FEM simulation using the software COMSOL Multiphysics and the ion behavior is simulated for homogenous and inhomogeneous field distributions. The required ion mobility is determined by laboratory measurements. The simulation results show that a drift-diffusion model for describing the behavior of oil / paper insulation system is not sufficient. Therefore, as a second step, the charge carrier injection from the electrode region is taken into account.

Abgeschlossene Bachelor-/Studienarbeiten sowie Forschungsarbeiten (*) vom 1.11.2013 bis 31.10.2014:

NAME	THEMA
Abele, Martina	Untersuchungen über die Einflüsse des Wassers auf die elektrische Leitfähigkeit des Pressboards. Studies on the effect of water on electrical conductivity of the pressboard.
Adler, Rebekka (*)	Integration von Photovoltaik in dieselgeneratorbetriebene Inselnetze. Integration of high penetration levels of photovoltaics into Diesel powered isolated grids.
Afifi, Josef	Thermohydraulische Untersuchung eines Wicklungsmodells eines Leistungstransformators. Thermo-hydraulic Investigation of a Transformer Winding Model.
Bauer, Sebastian (*)	Wirtschaftlicher Vergleich zwischen Netzausbau und Zustandsschätzung. Economical comparison between State Estimation and Grid expansion.

NAME	THEMA
Bennimar, Karima	Multikriterielle Betriebsoptimierung eines Microgrids auf der Grundlage des Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) II. Multi-criteria operation optimization of microgrids using non dominated genetic algorithm (NSGA II).
Bertelmann, Jonas	Entwicklung und Aufbau einer Ansteuerelektronik für einen KFZ-Pulswechselrichter. Development and construction of a control electronic for an automotive inverter.
Bessler, Felix (*)	Solarer Direktstromverkauf für Mieter von Mehrfamilienhäusern.
Blank, Albert	Entwicklung eines Tools zur Optimierung der Leistung und Position der Hybrid Batterie/Diesel Generator in Mikronetze. Development of a tool to optimize the power plan and position of hybrid systems in microgrids.
Bühler, Laura	Grundlegende Untersuchung der Raumladungszonen bei der Leitfähigkeitsmessung von Isoliersystemen. Experimental study on space charge effects during conductivity measurements.
Czakalla, Moritz (*)	Analyse von Wärmepumpenverbrauchsdaten. Analysis of heat pump energy consumption.
Dahlke, Chris	Entwicklung und Analyse dynamischer Komponentenmodelle von erneuerbaren Energien für Mikronetzanwendungen im RMS-Bereich. Development and analysis of dynamic component models of renewable energy resources in RMS scale in microgrids.
Deters, Christina	Wind Farm Modeling and Grid Connection Studies According to South African Rules and Standards.
Eberlein, Simon (*)	Development of beta distributed load models for British Households.
Eisenmann, Lukas (*)	Kostenoptimale Spannungsregelung durch dezentrale Erzeugungsanlagen. Cost-Optimal Voltage Regulation through Decentralized Generators.
Engelbrecht, Sophia	Erstellen eines Modells für temperaturabhängiges Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit von flüssigen Isoliermaterialien. Modeling of temperature dependent electrical conductivity behavior insulating liquids measurements.
Fitz, Nikolaj (*)	Realisierung eines dreiphasigen Zustandsschätzers. Realisation of Three phase State Estimator.
Folz, Andreas	Entwicklung eines Aufbaus zur Untersuchung typischer Teilentladungsquellen. Development of a laboratory setup for the investigation of typical partial discharge sources.
Früh, Heiner	Ermittlung der Auslastungshäufigkeiten von Betriebsmitteln im Hochspannungsnetz. Calculation of the loading density of resources in the high-voltage grid.

NAME	THEMA
Groß, Daniel (*)	Der Einfluss des Elektrodenmaterials auf die elektrische Leitfähigkeit von Isolierölen. Investigation of the influence of the electrode material on electrical conductivity of insulating oils.
Herre, Lars	Wirtschaftlichkeitsanalyse von Mikro-BHKW und Wärme-pumpen sowie deren Auswirkungen auf das Nieder-spannungsnetz. Economic viability of micro-CHP units and heat pumps and their impact on low voltage grids.
Heusel, Jannis (*)	Power Transfer Distribution Factors für den innerdeutschen Lastfluss – Anwendung am Fall Südlink- Leitung. Power Transfer Distribution Factors for German Power Flow – Application to Südlink Powerline.
Hülsmann, Leonard	Einflussnahme verschiedener Parameter auf die Optimie-rungsergebnisse eines Energiemanagementsystems in einem Mikronetz. Parameter influences of energy management system on optimization result in a microgrid.
Hümmler, Bruno	Charakterisierung von Niederspannungsnetzen am Fallbeispiel Sonderbuch. Classification of grid topologies and development of intelligent grid expansion states.
Kan, Yijun (*)	Entwicklung eines dreiphasigen Zustandsschätzers unter Berücksichtigung des Neutralleiters. Development of Three phase State Estimator with Consideration of the Return Conductor.
Kaufmann, Franz	Probabilistische Modellierung der Wirkleistungen von Umspannwerken im Hochspannungsnetz. Active power modelling of substations in the high-voltage grid.
Kleinheinz, Felix	Identifikation von Verbesserungspotenzialen durch Gesetze und Normen auf Basis aktueller Entwicklungen im Nieder-spannungsnetz. A study of room for improvement through laws and codes based on actual development in low voltage grids.
Klinke, Stefan	Erhöhung der elektromagnetischen Störfestigkeit eines Leistungsschalters mit Magnetantrieb. Improvement of the electromagnetic immunity of a circuit breaker with magnetic actuator.
Krauss, Ann-Kathrin (*)	Entwicklung eines standardisierten Ansatzes zur Klassifizierung von Verteilnetzen. Design of a standardized approach for the classification of distribution grids.
Lin, Duo	Entwicklung eines dynamischen Modells von einer Brenn-stoffzelle für Mikronetze in Matlab/Simulink und PSS Sincal. Development of dynamic model of a fuel cell for microgrid application in Matlab and Sincal.
Liu, Zhengyi	Detaillierte Modellierung eines VSC HGÜ-Konverters. Detailed Modelling of a VSC HVDC Converter.

NAME	THEMA
Maier, Markus	Bestimmung von regionalen Ausbauszenarien der erneuerbaren Energien. Calculation of regional extension of renewable energy.
Maschler, Benjamin	Entwicklung von Energiemanagementsystem mit Betrachtung der Netz-Randbedingungen mithilfe Mixed Integer Linear Programming. Development and Survey of an Energy Management System Respecting Grid Constraints using Mixed-Integer Linear Programming and Power Flow Analysis.
Mayer, David	Betriebs- und Investitionskostenoptimierung von Hybridsystemen (Generatoren + Batteriespeicher) in Mikronetzen. Operation and investment costs optimization of hybrid systems (generator + battery storages) in a microgrid.
Miller, Markus	Implementierung und Analyse eines Übertragungsnetzes. Implementation and Analysis of a Transmission Grid.
Müller, Denis	Aufbau und Analyse eines dreiphasigen VSC HGÜ-Umrichtermodells. Modeling and Analysis of a Three Phase VSC-HVDC Converter.
Münchrath, Janis	Analysis and scenario modellng of Malta's power sector until 2030: Supply-demand balance, emissions reduction economic impact and the role of energy storage.
Nauhauser, Thomas	Unsicherheiten der PV- und Windenergieerzeugung und deren Einfluss auf Energiemanagementsysteme in Mikronetzen. Uncertainties of PV & Wind Energy Production and its Impact on Energy Management Systems in Microgrids.
Oschwald, Jannic	Entwicklung eines Kostenmodells für Lithium-Ionen-Batterien zur Analyse der Einsatzmöglichkeiten im Mikronetz. Development of cost models of Lithium Ion batteries for integration in microgrids.
Ostertag, Manuel	Probabilistische Simulationen zur Untersuchung des Einflusses von Elektrofahrzeugen auf das Niederspannungsnetz. Probabilistic simulations to analyse the impact of electromobility on low voltage grids.
Perrino, Domenico (*)	Umsetzungskonzept für einen richtungsabhängigen Unterfrequenz-Lastabwurf. Implementation of a concept for load flow direction dependent load shedding in under frequency case.
Pullmann, Tim	SDLWindV-konforme Planung des Netzanschlusses von Windparks Design of the grid connection of wind farms under consideration of the German System Service Ordinance for Wind Generation - SDLWindV
Reinhardt, Maxim	Dynamisches RMS Verhalten von einphasigen Komponenten in Mikronetzen. RMS dynamic behaviour of single phase components in microgrids.

NAME	THEMA
Rosenhauer, Max (*)	Untersuchung von Sampling-Verfahren und Erstellung eines Matlab-Tools zur probabilistischen Lastflussrechnung im Niederspannungsnetz. Analysis of sampling-techniques and development of a Matlab-Tool for probabilistic loadflow-calculation in low voltage grids.
Rupp, Linda	Einfluss dezentraler Wärmepumpen auf die Netzausbaukosten des Niederspannungsnetzes. Influence of dispersed heat pumps on the costs for the expansion of a low voltage grid.
Schlecht, Matthias	Betrachtung von Kernschwingungen abhängig von den Einspannkräften. Core Vibrations of Transformers and their dependence on clamping forces.
Schmid, Alexander (*)	Untersuchung und Bewertung verschiedener Einspeisemanagementvarianten im Verteilnetz für die Netzplanung. Investigation and assessment of different options for a feed-in management in distribution grids for grid planning.
Schühle, Michael (*)	Entwicklung von Messkomponenten zur UHF-Teilentladungsmessung. Development of measurement components for UHF partial discharge measurement.
Seregely, Alexandra (*)	Gegenüberstellung von DC- und AC-Lösungen zur Speicherung erneuerbarer Energien in Kurzspeichersystemen. Comparison of DC and AC solutions for saving the renewable energy in short time storage systems.
Speckmann, Friedrich (*)	Modellierung der Korrelationen zwischen Wirk- und Blindleistung in aggregierten Lastmessungen. Modelling of the correlation between active and reactive power in aggregated load data.
Stelmaszek, Florian (*)	Maschinelle Lernansätze angewendet auf die Vorhersage der oberen Öltemperatur von Leistungstransformatoren. Machine learning approaches applied on the Top-Oil Temperature Prediction of power transformers.
Stöckler, Marcel	Modellierung einer HGÜ-Station. Modeling of an HVDC Station.
Stützle ,Daniel	Modellierung von Pseudo-Messungen der PV-Anlagen des Modellnetzes Sonderbuch zur Zustandsschätzung. Modelling of Sonderbuch Pseudo-Measurements for PV-Units for State Estimation.
Tserbe, Viecheslav (*)	Untersuchung neuer Geschäftskonzepte im Bereich der dezentralen Energieversorgung. Investigation of new business models within the area of dispersed energy generation.

NAME	THEMA
Ulrich, Michael (*)	Entwicklung einer Model In The Loop Simulation für die Untersuchung von Ladestrategien eines Lade- und Lastmanagementsystems im Kontext der Elektromobilität. Development of a Model-in-the-Loop simulation for the model-based analysis of charging strategies of a charge- and load management system in the context of electromobility.
Wang, Jingjing (*)	Modellierung eines dreiphasigen Zustandsschätzers mit Berücksichtigung des Neutralleiters. Modelling of Three Phase State Estimator with Consideration of the Return Conductor.
Wang, Xiang (*)	Platzierung von Smart Metern in Niederspannungsnetzen. Smart Meter Placement in Low Voltage Grids.
Wenger, Philipp	Einfluss leitfähiger Partikel auf die DC-Durchschlagspannung SF6-isolierter GIS. Influence of condiction particles on the DC breakdown voltage of SF6-insulated GIS.
Wenzler, Felix	Entwicklung eines Nachfragemodells für den Wärmebedarf privater Haushalte. Development of a model for the heat demand of private households.
Wolter, Christoph	Aggregation von Lastverläufen in Niederspannungsnetzen mit Elektrofahrzeugen Aggregation of Load Patterns in Low-Voltage Grids with Electric Vehicles
Zhang, Wei	Platzierung von Messstationen im Niederspannungsnetz. Measurement Placement in Low Voltage Grids.
Zhao, Wengpeng	Untersuchung des Diffusionsvorgangs eines Transformators im Laborexperiment. Investigation of the diffusion process of a transformer in laboratory experiment.
Ziegler, Wilhelm	Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche mit integrierter Modell-Bibliothek zur Betriebskostenoptimierung von Mikronetzen. Development of a user friendly GUI and model library for energy management system of microgrids.
Zoll, Jens	Modellierung von Pseudo-Messungen für Mittelspannungs-umspannwerke. Modelling of Pseudo Measurements for Medium voltage substation.

4. PROMOTIONEN

▪ Ortung von Teilentladung in gasisolierten Schaltanlagen mittels elektromagnetischer Wellen im UHF-Bereich

Dipl.-Ing. Stefan Hoek

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. J. Kindersberger, TU München
Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2014

Der zuverlässige Betrieb von Hochspannungskomponenten und die Beherrschung der hohen elektrischen Feldstärken sind eine wichtige Voraussetzung zum sicheren Betrieb des elektrischen Versorgungsnetzes. Die Detektion und anschließende Ortung von Teilentladungen (TE) stellt ein wichtiges Hilfsmittel bei der Prüfung, Beurteilung und Wartung von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) dar, da sie Schwächen bzw. Schwachstellen im Isolationssystem aufzeigen kann. Die Bestimmung der Position dieser Teilentladungen ist in der Praxis eine wichtige Information, die bei der Beurteilung des Isolationssystems und für die Durchführung von schnellen und gezielten Reparaturen von Vorteil ist. Die UHF-TE-Messung ist ein sehr empfindliches Diagnoseverfahren, denn dabei ermöglicht die massive und leitfähige Kapselung eine von äußeren Störern weitgehend unbeeinträchtigte Erfassung von TE-Signalen. Dabei werden die elektromagnetischen Auswirkungen von Teilentladungen im Frequenzbereich von einigen hundert MHz bis ca. 1,5 bis 2 GHz verwendet. In der Arbeit werden unterschiedliche Methoden zur Ortung von Teilentladungen in GIS mittels Auswertung von Signalen im UHF-Frequenzbereich diskutiert.

Einleitend wird der grundlegende Mechanismus der Teilentladungsentstehung und der typischen Fehlerbilder in GIS erläutert. Auf Grund der verschiedenen physikalischen Auswirkungen dieser schnellen Entladungsprozesse können Teilentladungen mittels unterschiedlicher Messmethoden (z. B. akustisch, optisch, elektrisch etc.) detektiert werden. Gezeigt werden die verschiedenen TE-Messtechniken und ihre Einsatzmöglichkeiten am Betriebsmittel GIS.

Weiter wird die allgemeine Ortung durch Verwendung von Distanzen und Abstandsdifferenzen diskutiert und für die GIS-Anwendung vereinfacht. Eine Quelle kann geortet werden, wenn sich die Länge des Ausbreitungspfades von der Quelle zum Sensor ermitteln lässt und wenn die Geometrie der Anlage mit den Positionen der Sensoren und deren Ausbreitungspfaden bekannt ist.

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Ausbreitungsweg für die Ortung entscheidend sind, werden die grundlegenden Zusammenhänge der Anregung und Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen im UHF-Bereich in GIS beschrieben.

Mit Hilfe von geeigneten Simulationsprogrammen wird versucht, die Komplexität dieser Ausbreitungsvorgänge anschaulich darzustellen.

An einfachen Beispielen wird die Charakteristik der Ausbreitung der UHF-Impulse für verschiedene typische Elemente einer GIS gezeigt. Dabei wird die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Impulses von der Dispersion der höheren Ausbreitungsmoden deutlich. An Beispielen wird die Wellencharakteristik (bzw. die Resonanz) der UHF-Signale demonstriert, die eine Kalibrierung der UHF-Methode kaum denkbar macht.

Es wird eine Ortungsmethode im Frequenzbereich vorgestellt. Diese Methode beruht auf der Auswertung von Interferenzen, die bei der Überlagerung zweier zeitlich verschobener Messsignale entstehen. Nach Erläuterung der Grundlagen werden Vorbedingungen und Grenzen der Methode diskutiert.

Zur Analyse der Messkurven werden verschiedene Ansätze verfolgt, die eine empfindliche und genaue Auswertung der Abstandsdifferenz ermöglichen. Ein Ansatz besteht in der Verwendung der Wavelet-Transformation. Bei der Suche nach den Interferenzabständen mit Hilfe der Wavelet-Analyse wird ein Mutter-Wavelet verwendet, das als Funktionsprototyp, vergleichbar einer Schablone, mit dem Messsignal verglichen wird, um daraus die Zeitdifferenzen der Messsignale abzuleiten. Leistungsfähigkeit und Grenzen dieser Methode werden anhand mehrerer Beispiele demonstriert und diskutiert.

Zur schnellen Diagnose in gasisolierten Schaltanlagen wird eine weitere Ortungsmethode vorgestellt. Das UHF-TE-Ortungssystem arbeitet im Zeitbereich und verwendet schnelle Zähler, die die Zeitdifferenz eines TE-Ereignisses an verschiedenen Sensoren im Subnanosekundenbereich messen. Start- und Stoppsignale der Zähler werden durch die Auswertung der Leistungssprünge im Messsignal durch analoge Signalverarbeitung ausgelöst. In der Praxis hat sich dies als eine robuste und empfindliche Methode der Detektion herausgestellt.

Es wurde ein Prototyp des Messsystems aufgebaut, und es wurden Messungen an verschiedenen Anlagen durchgeführt, die die Leistungsfähigkeit und Grenzen eines solchen Systems aufzeigen. Schon für kleine Impulse in einer Größenordnung, die auch bei Empfindlichkeitsnachweisen nach CIGRE verwendet werden, konnte eine Genauigkeit im Nanosekundenbereich festgestellt werden. Die statistische Auswertung von hunderten TE-Ereignissen verbesserte noch zusätzlich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Mit Hilfe der schnellen und zuverlässigen Detektion, Identifikation und Lokalisation eines Defektes in einer GIS wird eine qualifizierte Bewertung des Isolationszustands möglich.

Localization of Partial Discharges in Gas-Insulated Switchgear using Electromagnetic Waves in the UHF-Frequency Range

Dipl.-Ing. Stefan Hoek

The reliable operation of high voltage assets and control of the high electric field strengths is an important precondition for a safe operation of electrical supply network. Detection and localization of partial discharge (PD) is an important tool for diagnostic, inspection and maintenance of gas-insulated switchgear (GIS). PD measurements have turned out to be a very powerful technique for testing and monitoring the condition of insulation systems. PD as an early breakdown indicator is generally accepted as needed for measurements and is therefore reflected in numerous standards.

Partial discharges are local electrical discharges that partially break down the high-voltage (HV) insulation and generate electric impulses as well as electromagnetic waves in a broad frequency spectrum due to their short rise time and duration. As an example, for protrusions in SF_6 rise times of impulses below 24 ps have been verified. Measurement and detection of PD is performed with different methods (e.g., acoustic, optical, electrical) involving different propagation paths, propagation mechanisms, frequency ranges and sensor principles which result in divergent transfer behavior. UHF PD measurement (the measurement in ultra-high-frequency range) ranges from a few hundred MHz up to approximately 1.5 to 2 GHz and is therefore a very sensitive diagnostic method for GIS. Using fast and reliable detection, identification and localization of a defect in a GIS, a qualified assessment of the insulation condition is possible. Several methods can be used for the localization of PD, based on different physical phenomena. The most practical methods are based on sectionizing, electrical time-of-flight measurements, acoustic measurements and a combination of them.

This thesis describes different methods for time based localization of PD in GIS using signals in the UHF frequency range in a cost effective way. Magnitude based localization is not possible because of resonances and other effects. Starting with the basic mechanism of partial discharge the typical failure patterns in GIS are explained. The different PD measuring techniques and their application on GIS are shown. Background of the time-of-flight localization is the excitation and propagation processes of the electromagnetic waves in the GIS simulated by PD pulses.

Appropriate simulation programs are used to illustrate the complexity of propagation processes. Simulation examples show the characteristics of the propagation of UHF pulses at various simple and typical GIS elements. Thereby the dependence becomes apparent of the propagation velocity and the dispersion because of the higher propagation modes. Higher propagation modes are wave modes propagating in cavities with conductive boundaries like in GIS which exist only at frequencies

above their own critical frequency / cut-off-frequency. The first higher modes can propagate at frequencies above some hundreds of MHz depending on the size of the GIS.

The first discussed method to estimate time differences for localization is using the frequency domain. It is based on the analysis of interference phenomena caused by the superposition of two time-shifted measurement signals at two UHF sensors. For analysis of the measured values, different approaches are being pursued to allow a sensitive and accurate evaluation of the localization. One method to analyse the measured spectra uses the wavelet transformation. A sensitive and robust analysis can be done by using a special adapted mother wavelet which matches to the expected superposed signal. This method is discussed by case studies and in consideration of its preconditions and its limitations.

For a fast, simple and reliable diagnosis in gas-insulated switchgear, another localization method is presented. The UHF PD measuring system operates in the time domain. The PD localizations system (PADLOS) uses simple high-speed counters, which measure the time difference of a single PD event to different UHF sensors in the sub-nanosecond range. Start and stop signals of the counters are triggered by the evaluation of measuring abrupt changes of signal power by analog signal processing units. In practice, it has proven to be a robust and sensitive method of detecting and locating PD in a GIS. A prototype of PADLOS demonstrates the performance and limitations of such a system on a different measurement setup. Even for small pulses of a magnitude which are also used for detecting sensitivity to CIGRE, accuracy could be represented in the nanosecond range. Statistical analysis of hundreds of PD events by using histograms improved the accuracy and reliability.

Using the fast and reliable detection, identification and localization of a defect in a GIS as a qualified assessment of the insulation condition is possible.

▪ Elektromagnetische Verträglichkeit in Mittelspannungsschaltanlagen während Schaltungen

Dipl.-Ing. Dennis Burger

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen, TU Darmstadt
Tag der mündlichen Prüfung: 13.02.2014

Mittelspannungsschaltanlagen sind unverzichtbare Betriebsmittel in elektrischen Energieversorgungsnetzen. Sie überwachen die elektrischen Zustandsgrößen im Netz und ermöglichen durch Schalthandlungen auf Mittelspannungsebene die Veränderung der Netztopologie sowie den selektiven Netzschutz im Fehlerfall.

Schalthandlungen in den Mittelspannungskreisen gehen mit Vor- und Rückzündungslichtbögen an den Schaltkontakten einher, die wiederum transiente Überspannungen mit großen Flankensteilheiten (engl.: very fast transients, kurz: VFTs) erzeugen. Die Überkopplungen dieser breitbandigen Transienten auf die Niederspannungsseite sind bekannt als starke elektromagnetische Störgrößen für die dort eingesetzten elektronischen Schutz- und Steuereinheiten (engl.: intelligent electronic devices, kurz: IEDs). Trotz Erfüllung aller normativ gestellten Anforderungen hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Mittelspannungsschaltanlagen werden herstellerunabhängig in einzelnen Schaltanlageninstallationen in der Praxis dennoch schalthandlungsbedingte elektromagnetische Beeinflussungen in Form von Fehlfunktionen der IEDs beobachtet.

In dieser Arbeit werden die verschiedenen Koppelpfade der EMV-Störgrößen von den hochspannungsführenden Primärleitern auf die Niederspannungskomponenten (auch Sekundärkomponenten genannt) untersucht. Besonderes Augenmerk wird auf die Kopplung über die Stromwandler auf die analogen Eingänge der IEDs gelegt, da die Störpegel an diesen Schnittstellen besonders stark sind.

Die während der Schalthandlungen auf die IED-Schnittstellen treffenden EMV-Störgrößen werden hinsichtlich verschiedener Einflussfaktoren wie zum Beispiel Schalterart, Schaltfeldtyp und Lastbedingungen untersucht. Durch Labor- und Vor-Ort-Messungen wird gezeigt, dass das Abschalten von anlagennahen, induktiven Lasten durch vakuumisolierte Leistungsschalter die amplitudenmäßig größten und gleichzeitig breitbandigsten Störgrößen auf der Sekundärseite verursachen. Ähnlich kritische Einzel-Störimpulse, jedoch pro Schaltspiel eine vielfach höhere Anzahl davon, generieren die in der Praxis sehr viel häufigeren SF6-isolierten Trennschalter in Sammelschienenkupplungsfeldern. Die beim Öffnen eines solchen Trennschalters (immer kritischer als der Schließvorgang) generierten Störgrößen stellen das Worst-Case-Szenario hinsichtlich der EMV einer Mittelspannungsschaltanlage während Schalthandlungen dar. Die Gewährleistung eines störungsfreien Schaltanlagenbetriebs erfordert die Berücksichtigung dieses Worst-Case-Schaltfalls in der EMV-Planung.

Die während der verschiedenen Schalthandlungen in den Primärkreisen gemessenen Störgrößen wurden mit den Prüfgrößen bei den normativ geforderten Störfestigkeitsprüfungen im Zeit- und Frequenzbereich verglichen. Es wird gezeigt, dass die realen Schaltstörgrößen im Frequenzbereich ab 10 MHz deutlich stärkere spektrale Anteile besitzen als während der EMV-Typprüfungen hinsichtlich der Störfestigkeit geprüft werden.

Die im realen Schaltanlagenbetrieb vorkommenden Überschreitungen der Prüfpegel werden während der EMV-Typprüfung nicht erkannt, da zum einen die im Feld zu erwartenden Störgrößen nicht abgeschätzt werden. Zum anderen sind die tatsächlich geprüften Störfestigkeitspegel nicht bekannt, denn die Ladespannungen der Prüfgeneratoren sind aufgrund der Generatorinnenwiderstände nicht als tatsächlich geprüfte Pegel anzusehen.

Auf Grundlage dieser EMV-Problemstellung wurde eine neue Methode zur systembasierten Prüfung und Quantifizierung der EMV in Mittelspannungsschaltanlagen unter Schaltbedingungen abgeleitet. Die neue Prüfung basiert auf der Abschätzung der im Schaltanlagenbetrieb maximal zu erwartenden Störpegel unter Berücksichtigung des kompletten Koppelpfades zwischen Störquelle und Störsenke. Nur wenn die abgeschätzten Maximalpegel kleiner sind als die während der EMV-Typprüfung gemessenen Prüfpegel, ist die elektromagnetische Verträglichkeit gewährleistet. Weiterhin gilt die Anforderung aus der Produktfamiliennorm IEC 62271-1, dass der berechnete Störpegel beim Schalten kleiner als 1,6 kV sein soll.

Um den Grad der elektromagnetischen Verträglichkeit quantifizieren zu können, wird der Quotient aus geprüftem Pegel und zu erwartendem Schaltstörpegel als elektromagnetischer Verträglichkeitsindex einer Schaltanlage definiert. Werte über 100 % stehen für eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit einer elektromagnetischen Beeinflussung, geringe Werte für eine hohe.

Die neue Methode wurde in allen ihren Teilschritten und Annahmen mehrfach verifiziert. Sie stellt eine zeit- und kosteneffektive Methode zur systembasierten Prüfung und Quantifizierung der EMV von Mittelspannungsschaltanlagen während Schalthandlungen dar. Durch die Verwendung handlicher Prüfmittel ergibt sich eine Anwendbarkeit der neuen systembasierten EMV-Prüfung als entwicklungsbegleitender Test während der Designphase neuer Primär- und Sekundärtechnikkomponenten.

Abschließend werden die Anwendungsgrenzen der neuen Methode aufgezeigt sowie Maßnahmen diskutiert, wie auf ein negativ ausfallendes Prüfergebnis entlang der Koppelstrecke zwischen Störquelle und Störsenke reagiert werden kann.

Electromagnetic Compatibility of Medium Voltage Switchgear during Switching Operations

Dipl.-Ing. Dennis Burger

Medium voltage switchgears are known as crucial equipment in electrical power grids. They are meant for supervising the electrical state variables of the grid and allow changing the grids topology. Further, they provide selective grid protection in case of failure by means of switching operations on medium voltage level.

Switching operations under medium voltage conditions go along with pre- and restrikes at the switch contacts and create transient overvoltages with steep wave fronts, so called very fast transients (VFTs). Electromagnetic coupling of such broad band transients to the low voltage side is known as a severe EM disturbance source for the digital protection and control units (also called intelligent electronic devices, or

IEDs). Even if all normative EMC requirements are fulfilled by the medium voltage switchgear, independently of the manufacturer, there are special sites where electromagnetic interference due to switching operations can be recognized, for example malfunctions of IEDs.

The thesis includes the investigation of the different coupling paths of the electromagnetic disturbance from the primary circuits to the low voltage (secondary) equipment. Especially, the coupling mechanism through the current transformers (CTs) to the analog measurement ports of the IEDs is focused, because the disturbance levels at the CT terminals are known to be particularly high.

The characteristics of the applied EM disturbance caused by switching operations were investigated for different kinds of switches and switchgear panels as well as in dependency of the load conditions. Both, laboratory and site measurements, have proven that switching off nearby inductive loads by vacuum circuit breakers generates at the secondary side the most severe disturbance in amplitude and bandwidth.

Comparing just single pulses, the practically more frequently used SF6 insulated disconnector switches inside bus coupler panels can create almost comparable disturbance levels, but with a much higher amount of pulses at each switching operation. Therefore, the EM disturbance due to the breaking operations of such kind of disconnector can be seen as the worst case scenario in regard to the EMC of medium voltage switchgear under switching conditions. So, aiming for an interference-free use of medium voltage switchgear needs to take this worst case switching operation into account during the EMC planning phase.

The recorded disturbance signals due to different switching operations in the primary circuits where compared in the time and frequency domain with the applied EMC stress by the normatively required susceptibility tests. For the frequency range above 10 MHz it is shown that real switching disturbances include stronger spectral contents compared to the verified IED susceptibility by the EMC type tests.

There are two reasons, why the (spectral) overshoots of the tested susceptibility level cannot be recognized by the classical EMC type test procedure: Firstly, the disturbance values under service conditions on site cannot be estimated. Secondly, the effectively tested susceptibility level is not known, because the charging voltages of the test generators cannot be seen as the applied test levels due to the internal source impedances.

A solution for this central EMC problem is given by a newly derived method for system-based checking and quantizing the EMC performance of medium voltage switchgear under switching conditions. This new test is based on the estimation of the maximally expected disturbance level under service conditions, taking into concern the whole coupling path between the disturbance source and susceptible device. Only if the estimated maximum value is smaller than the verified immunity level during EMC type test, electromagnetic compatibility is assured. Further, an

additional requirement of the product family standard IEC 62271-1 is valid: The estimated disturbance voltage level under switching conditions should be less than 1,6 kV for signal ports.

In order to quantify the degree of electromagnetic compatibility, the quotient from the verified immunity level and the expected switching disturbance level is defined as the electromagnetic compatibility index of switchgear. Values above 100 % stand for a low probability of electromagnetic interference, small EMC index values for a high probability.

The new test method was verified several times in all of its sub-steps and assumptions. It can be used as a highly time and cost-effective method for evaluating the system-based EMC performance of a medium voltage switchgear under switching conditions. Further, the use of simple means allows the application of the new test procedure as a pre-compliance test during the design phase of new primary and secondary products.

Finally, the limits regarding the applicability of the new test method are pointed out as well as approaches are discussed on how to react on a negative test result by means of measures along the coupling path between the disturbance source and the susceptible device.

▪ Stromschwache Störlichtbögen in Niederspannungs-schaltanlagen und Möglichkeiten zu deren Detektion

Dipl.-Ing. Peter Müller

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Großmann, TU Dresden
Tag der mündlichen Prüfung: 25.02.2014

Durch den steigenden Bedarf nach hoher Verfügbarkeit von Schaltanlagen und durch neue Auswertemöglichkeiten ist der Schutz vor stromschwachen Störlichtbögen, bei denen Fehlerströme im Bereich des Nennstromes der Anlage fließen, wieder mehr in den Fokus der Forschung gerückt. Diese Arbeit befasst sich mit den Möglichkeiten zur Detektion der genannten stromschwachen Störlichtbögen.

In einem ersten Schritt werden stromschwache Störlichtbögen definiert und ihre Auswirkungen auf den Schaltanlagenbetrieb diskutiert. Es kann in Schaltanlagen grundsätzlich zwischen seriellen und parallelen Störlichtbögen unterschieden werden. Beide Fehlerfälle haben unterschiedliche Ursachen und münden in einem Störlichtbogen.

Serielle Störlichtbögen in Sammelschienen können durch eine Schraubverbindung mit erhöhtem Kontaktwiderstand nachgebildet werden. Parallele Fehler treten zwischen benachbarten Sammelschienen oder spannungsführenden und geerdeten

Teilen der Schaltanlage auf. Aufgrund der geringen Spannung können diese nicht selbständig in Luft zünden, sondern benötigen eine Fremdschicht oder einen niederohmigen Widerstand, der den Lichtbogen zündet.

Mithilfe eines variablen Messaufbaus werden serielle und parallele Störlichtbögen bis 400 A Lichtbogenstrom erzeugt und die Stromverläufe über mehrere Perioden aufgezeichnet. Je nach Art des Lichtbogens (seriell oder parallel) ergeben sich dabei charakteristische Verläufe.

Parallele Lichtbögen weisen eine ausgeprägte Stromlücke auf, welche wegen der längeren Schlagweite und der damit verbundenen schnelleren Abkühlung des Plasmakanals entsteht. Serielle Lichtbögen können aufgrund der geringen Schlagweite Brücken aus geschmolzenem Kupfer bilden, welche für eine oder mehrere Halbwellen den Strom tragen und so die Lichtbogenzündung verhindern. Der Stromverlauf weist unregelmäßige Stromlücken durch Erlöschen und Wiederzünden des Lichtbogens auf.

Die charakteristische Veränderung des Stromverlaufes durch den Lichtbogen lassen sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzspektrum der gemessenen Ströme Merkmale erkennen, die in ihrer Kombination nur bei einem Lichtbogenfehler auftreten. Im Zeitbereich sind dies vor allem der stochastisch schwankende Zündzeitpunkt und die dadurch ebenfalls schwankende Lichtbogenenergie pro Halbwelle.

Im Frequenzbereich zeigt sich eine deutliche Erhöhung der Werte des Amplitudendichtespektrums im Frequenzbereich unter 10 kHz. Die breitbandige Erhöhung der Amplituden unabhängig von den Harmonischen der Grundfrequenz ist typisch für Lichtbögen und tritt bei gewöhnlichen Verbrauchern nicht auf.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die charakteristischen Merkmale von Lichtbögen fließen in vier verschiedene Detektionsverfahren ein. Jedes Verfahren kann unabhängig einen Lichtbogen erkennen. Um jedoch eine Fehlauslösung zu vermeiden, wird die Kombination von mindestens drei Verfahren empfohlen. Erst wenn drei Verfahren einen Fehler signalisieren, darf eine Notabschaltung der Anlage in Betracht gezogen werden.

Mit Hilfe der Detektion von stromschwachen Störlichtbögen kann eine erhöhte Betriebssicherheit gewährleistet werden. Auch bisher nur schwer oder sehr spät zu entdeckende Fehler wie überhitzende Sammelschienenverbindungen können nun schon beim ersten Zünden eines Lichtbogens detektiert werden, ohne dass der Lichtbogen seine zerstörerische Wirkung entfalten kann.

Detection of Low Current Arc Faults in Low Voltage Switchgear

Dipl.-Ing. Peter Müller

Due to the increasing request for highly reliable energy distribution systems and supported by new analyzing methods protection against low current arc faults became a scope of science. This thesis is dealing with all aspects regarding detection against low current arc faults in low voltage switchgear.

In a first step low current arc faults are defined and their influence on switchgear operation are discussed. Series and parallel arc faults are the two existing failure modes. Both arc faults have different root causes, however both result in a destructive arc fault. One reason for a series arc fault may be a loose screw rivet connection with increased contact resistance. Parallel arc faults appear between two adjusting phases or between energized and grounded parts of the switchgear. The low voltage prevents an arc ignition in air. Therefore, the parallel arc needs a surface or a low ohmic resistive material as an igniter.

In an adjustable measurement setup series and parallel arcs up to 400 A could be measured during several periods. Characteristic shapes could be found for each of the two arcing modes (series and parallel).

Parallel arcs have current interruption after arc extinguishing at current zero. Reasons are the longer arc gap and faster cooling of the arc plasma. Series arc faults may form bridges of molten copper due to the small gap between conducting parts. Those copper bridges are able to carry current for one or more half cycles and therefore prevent arc re-ignition. The arc current shows irregular arc extinguishing and re-ignition.

Arcing has a characteristic influence on the current shape in the time domain as well as in the frequency domain. The combination of these characteristics is unique for arc faults and therefore can be used to detect these failures. In the time domain these characteristics are mainly the stochastically changing moment of arc ignition at each half cycle.

Also, the resulting energy of each half cycle is varying. In the frequency domain increased amplitudes in the spectra up to 10 kHz are visible. Because the increased amplitudes are not in correlation with the harmonics of the basic frequency this characteristic is different from most common loads.

Four different methods for arc detection could be formed out of the gained knowledge about arc characteristics. Each method is independently able to detect an arc fault. However, it is recommended to always use the combined results of at least three methods to indicate an arc. Only if three methods could detect an arc, it is safe to recommend an emergency shutdown of the switchgear.

Due to arc fault detection of low voltage switchgear increased safety in power distribution is possible. Even failures with a low possibility of detection, such as series arc faults due to broken busbar, can be detected reliably, and the arc is not able to fully develop its destructive power anymore.

Einfluss der Netzimpedanz von Hochvolt-Systemen auf Entstörkonzepte im Traktionsnetz von Elektrofahrzeugen

Dipl.-Ing. Martin Reuter

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Frei, TU Dortmund
Tag der mündlichen Prüfung:	07.11.2014

Die zunehmende Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen vergrößert die Gefahr unzulässiger Beeinflussungen elektronischer Systeme durch den Antriebsstrang. Aus Sicherheitsgründen sowie zur Reduktion ihres Störpotenzials werden die Hochvoltsysteme elektrischer Kraftfahrzeugantriebe derzeit komplett geschirmt ausgeführt. Der zusätzliche Kabelschirm in Hochvolt-Systemen bewirkt, dass sich, im Gegensatz zu den herkömmlichen Niedervoltkabelbäumen, die Traktionsleitungen im für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) relevanten Frequenzbereich wie Wellenleiter verhalten.

EMV-Messverfahren und Entstörkonzepte müssen auf dieses geänderte Hochfrequenz-Verhalten angepasst werden, um Messfehler und unwirksame, teilweise gar kontraproduktive Entstörmaßnahmen zu vermeiden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine möglichst effiziente Gewährleistung der EMV von Hochvolt-Systemen für elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge zu ermöglichen. Dazu wird das hochfrequente Verhalten der üblicherweise im Traktionsbordnetz verwendeten Hochvolt-Kabel, Antriebsbatterie und Pulswechselrichter untersucht.

Die Auswirkung auf Messergebnisse des Komponententests sowie die Vermeidung möglicher Leitungsresonanzen aufgrund von Fehlanpassungen werden aufgezeigt. Zudem lassen sich die Wellenleitereigenschaften der Traktionskabel nutzen, um das EMV-Verhalten von Hochvolt-Systemen über Messungen auf Komponentenebene abzuschätzen und die Einfügedämpfung von Entstörfiltern vorherzusagen.

Influence of Network Impedance within Automotive High-Voltage Traction Systems on Interference Suppression Concepts

Dipl.-Ing. Martin Reuter

Currently, automotive traction systems are increasingly being revised from combustion engine drives to electric propulsion. This results in a tightened challenge to ensure the electromagnetic compatibility (EMC) of the miscellaneous and adjacent electronic systems within the car. To reduce its interference potential, the electric high voltage (HV) traction system consists of entirely shielded housings and cables.

Thus the network configuration is changed from unshielded single core multi wire harnesses into coaxial conductor layouts, and therefore also the impedance characteristics of the entire network are changed. The EMC of automotive components is measured according to CISPR 25, substituting the vehicle environment with line impedance stabilization networks (LISN). Recent research shows that LISNs, developed for low voltage networks, are not ideal to measure conducted emissions of HV components because of changed characteristic impedances and additional shielding.

A trial-and-error approach in the development process of electromagnetic interference filters can only be avoided if the influence of the network impedances within the high voltage traction harness on conducted RF disturbances is known. This contribution presents the current methodology of determining the conducted emissions of HV power inverters for electric driven cars. It highlights the differences between the traditional low voltage cable wiring and novel HV traction harnesses, and their impact on the network impedances. An adaption of the recently used LISNs to the characteristic impedance of the applied HV cables shows the influence of termination mismatch on conducted emissions within the HV traction harness. HV components employed in a car are usually supplied by a traction battery, which acts as transmission line termination. The influence of a battery's input impedances on disturbances within a component level EMC test setup is shown. The transmission line characteristics of HV cables allow to calculate the conducted emissions of HV components applied on system level. As the network impedance highly influences the insertion loss of filter structures, a method is shown enabling to consider source and load impedances for disturbance sources within HV systems for the efficient development of HV filters.

Auswirkungen von Elektromobilität auf Energieversorgungsnetze analysiert auf Basis probabilistischer Netzplanung

Dipl.-Ing. Alexander Probst

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Mitberichterin:	Prof. Dr.-Ing. N. Parspour
Tag der mündlichen Prüfung:	15.12.2014

Der fortschreitende Klimawandel hat zu weltweiten Bemühungen geführt den CO_2-Ausstoß zu senken. Dies hat die deutsche Bundesregierung dazu veranlasst die Energiewende voranzubringen, indem vermehrt erneuerbare Energien genutzt werden und der Energieverbrauch reduziert wird. Die Förderung der Energiewende verursacht hohe Kosten. Auch Elektromobilität ist ein wichtiger Teil der Energiewende, da Elektroautos es erlauben erneuerbare Energien auch im Transportsektor einzusetzen, der für ca. 30 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich ist. Jedoch könnten zusätzliche Elektromobilitätslasten Netzausbau verursachen und damit weitere Investitionen notwendig machen. Für einen kostenoptimalen Einsatz von Elektrofahrzeugen ist es wichtig, die Auswirkungen und die Kosten, die mit der erforderlichen Netzverstärkung verbunden sind, zu bewerten.

Eine erste Analyse zeigt, dass Elektrofahrzeuge vor allem Einfluss auf die Verteilnetzebene (insbesondere Niederspannung) in Deutschland nehmen. Um den Einfluss von Elektromobilität auf zukünftige Stromnetze abzuschätzen, werden probabilistische Lastmodelle für Haushalte, Photovoltaik und Elektroautos erstellt, die eine zeitreihenbasierte Betrachtung von Lastflüssen erlauben. Dabei wird eine Methodik entwickelt, Spannungsbandverletzungen und Überlastungen anhand ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit auf Basis einer probabilistischen Lastflussanalyse zu berechnen. Bei der konventionellen Netzplanung können durch die Betrachtung weniger Auslegungsfälle von einem Hoch- und Schwachlastfall Unter- bzw. Überdimensionierungen auftreten. Dabei ist es unmöglich, Aussagen über die Auftrittswahrscheinlichkeit oder die Dauer einer Überlastung zu treffen. Diese Nachteile können durch eine probabilistische Betrachtung vermieden werden, da über die Auslegungsfälle hinaus jeder mögliche Lastfall mit seiner zugehörigen Auftrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt wird. Eine probabilistische Netzplanung erfordert darüber hinaus eine Neuinterpretation bisheriger Netzplanungsprämissen, die ein toleriertes Risiko einer Überlastung zulässt. Auf diese Weise wird ein Netz erst ausgebaut, wenn das zugelassene Risiko einer Überlastung überschritten wird und nicht bereits dann, wenn eine Überlastung theoretisch möglich ist.

Um auch etwaige positive Effekte von Elektromobilität auf das Stromnetz durch Lademanagementsysteme zu analysieren, wurde die entwickelte Methodik um eine Berücksichtigung des Netzbetriebs erweitert. Durch die probabilistische Betrachtung kann die Dauer abgeschätzt werden, in der ein Leitungselement überlastet ist oder

an einem Knoten Unterspannung besteht. Damit können mögliche Kompensationskosten abgeschätzt werden, die durch die Abregelung von Elektrofahrzeugen oder auch anderen Einspeisern bzw. Verbrauchern entstehen, um den Netzbetrieb zu gewährleisten. Ist eine Leitung beispielsweise nur wenige Stunden im Jahr überlastet, kann abgewogen werden, ob ein Leitungszubau oder die Abregelung von Einspeisern im Rückspeisefall bzw. von Verbrauchern im Lastfall, wie zum Beispiel regelbaren Elektroautos, günstiger ist.

Auf der anderen Seite ist es jedoch auch möglich, dass das Stromnetz durch ein Lademanagement sogar stärker belastet wird. Beispielsweise könnte der Fahrzeughalter sein Fahrzeug zu Zeiten des günstigsten Strompreises laden wollen. Bedingt durch eine hohe Einspeisung erneuerbarer Energien kann dies jedoch auch zu Zeiten bereits hoher Netzbelastung auftreten. Die zusätzlichen und gleichzeitigen Elektromobilitätslasten könnten das Netz zu solchen Zeiten überlasten. Daher müssen die Einsparungen beim Laden des Fahrzeugs ins Verhältnis zu eventuell zusätzlich nötigem Netzausbau gesetzt werden. Wenn die Netzausbaukosten höher sind, könnte es für einen Netzbetreiber sinnvoll sein, Elektromobilitätslasten zu verschieben und die Fahrzeughalter für die teurere Ladung zu kompensieren.

Zusammengefasst sind die Ergebnisse dieser Arbeit wie folgt:

- Einfluss von Elektromobilität auf die Stromnetzinfrastruktur
- Probabilistische Lastmodellierung von Haushalten, Photovoltaikanlagen und Elektroautos
- Entwicklung einer Methodik zur Berücksichtigung des Netzbetriebs und von Lastmanagementsystemen in der Netzplanung
- Berechnung von Wahrscheinlichkeiten einer Spannungsbandverletzung oder der Überlastung von Betriebsmitteln

Diese Ergebnisse führen zu einem neuen Ansatz zur Nutzung probabilistischer Lastflussanalyse in einer probabilistischen Netzplanung. Darüber hinaus wird dieser Ansatz genutzt, um sinnvolle Anschlussbedingungen für Elektromobilität aufzustellen, die anhand einer genauen Kosten-Nutzen-Analyse verschiedener Lastmanagements bewertet werden. Die identifizierten Anschlussbedingungen beinhalten folgende Maßnahmen:

- Frequenzstützendes Laden: Wenn die Netzfrequenz unter kritische Grenzen fällt, reduzieren Elektroautos ihren Wirkleistungsbezug, um das Netz zu stützen. Darüber hinaus können Frequenzpendelungen im Übertragungsnetz durch Elektroautos gedämpft werden.
- Blindleistungsregelung: Wegen des hohen R zu X Verhältnisses in der Niederspannung kann die Spannung nur geringfügig durch Blindleistung gestützt werden. Trotzdem zeigt sich, dass die Bereitstellung von induktiver Blindleistung durch Elektromobilität sehr effektiv ist. Die Auslastung von Leitungen kann deutlich reduziert werden, indem die nötige Blindleistung für induktive

Lasten nicht aus überlagerten Netzebenen transportiert werden muss, sondern lokal gedeckt wird. Dieser Zusammenhang macht die Bereitstellung besonders effektiv in städtischen Netzen, bei denen häufig die Leitungsauslastung das kapazitätsbegrenzende Kriterium darstellt.

- Wirkleistungsregelung: Durch spannungsabhängige Reduktion der Ladeleistung kann das Netz weiter entlastet werden, ohne dass sich die Ladezeit bei entsprechender Parametrisierung deutlich verlängert.

Eine Vielzahl an Lademanagementstrategien wurde anhand einer Fallstudie in einem städtischen Netz untersucht, wobei sich die hier genannten als die effektivsten herausgestellt haben. Netzbetriebsstrategien, ob die Abregelung von Photovoltaikanlagen oder die gezielte Ansteuerung von Elektromobilitätslasten, haben das Potential, Netzausbaukosten deutlich reduzieren zu können. Diese Arbeit zeigt Methoden auf, die anfallenden Kosten durch Netzbetriebsstrategien zu bewerten, um sie mit konventionellem Netzausbau ins Verhältnis setzen zu können.

Impact of Electric Mobility on Energy Supply Networks Analyzed on the Basis of Probabilistic Network Planning

Dipl.-Ing. Alexander Probst

The ongoing climate change has led to worldwide efforts to reduce CO_2 emissions. Therefore, the federal government of Germany wants to transform the energy system by increasing the usage of renewable energies and improving energy efficiency. The promotion of these technologies already results in high implementation costs. Furthermore, electric mobility is an important part of this energy transformation as electric vehicles enable the usage of renewable energies in the transport sector, which is responsible for about 30 % of the total primary energy consumption in Germany. However, the resulting additional loads of electric vehicles might require grid reinforcements and thereby demand further investments. For a cost optimal implementation of electric vehicles it is essential to assess the impact and costs associated with the required grid reinforcement.

A first analysis shows that electric vehicles mostly affect the distribution grid in Germany, especially the low voltage grid. To estimate the impact of electric mobility on future electricity networks, probabilistic load models for households, photovoltaic systems and electric vehicles were created that allow time-series analysis of load flows. For the load model representing an electric vehicle, the mobility behavior of today's car owners is consulted. This permits the prediction of the starting time and duration of the charging process, that depend on the arrival time at home and the distance travelled daily. Furthermore, a methodology is developed to calculate voltage violations and overload of power lines by a probabilistic load flow analysis.

With conventional grid planning, power lines and transformers are dimensioned to accommodate worst case scenarios, which are possible but not very likely. With this conventional approach it is impossible to assess the probability of a worst case to actually occur or the duration of overloads or voltage violations. A probabilistic approach can avoid these shortcomings by taking every possible load case into account. This also requires a new interpretation of previous network planning assumptions, which allows for a certain tolerated risk of overloading. This way, a network is reinforced when the tolerated risk of overloading is exceeded, and not already when an overload is theoretically possible.

In addition, an estimation of possible positive effects of electric mobility on the electricity grid by load management systems can be accomplished. For that purpose, the methodology is extended to account for network operation measures reducing load levels. With the probabilistic approach, average durations of overload can be estimated. When the load of electric vehicles is actively reduced by the load management system to ensure grid operation, the associated costs for compensating the vehicle owner can be estimated by consideration of the required duration. These costs can be compared with the costs of conventional power line reinforcement. With the overload only occurring a few hours a year, network operation measures by using load management systems for electric vehicles appear to be the cost-optimal solution.

However, the grid might not only benefit from a load management system. If, for example, the vehicle owner takes advantage of the load management system by charging preferably during times of low electricity prices, the grid might need to supply an increased load and thereby exceed capacity limits. Therefore, the reduction in charging costs need to be compared to eventually increased grid reinforcement costs. If the reinforcement costs are higher, it might be better for the network operator to shift electric vehicle loads and compensate the owners for their lost opportunity to charge cost optimally.

In summary, the results of this work are as followed:

- Impact of additional electric vehicle loads on electricity grid infrastructure
- Probabilistic load modeling of households, photovoltaic systems and electric vehicles
- Development of a methodology to consider network operation strategies and load management systems in grid planning
- Calculation of probabilities of voltage violations and overload of grid entities

These results propose a new approach for probabilistic grid planning and possible grid connection requirements for electric vehicles on the basis of a careful analysis of the cost effectiveness of these measures. The developed grid code for electric vehicles includes:

- Frequency controlled charging: If the frequency decreases beyond critical limits, the electric vehicles reduce their charging active power. Furthermore, frequency oscillations in the transmission grid can be dampened by electric vehicles.
- Reactive power control: Due to the high R to X ratio in low voltage grids reactive power affects the respective voltage only marginally. Nevertheless, electric vehicles feeding in reactive power show to be very effective for the grid. The load on power lines can be reduced significantly as the reactive power required for inductive loads does not need to be transferred from medium voltage and above. This makes it particularly effective in urban grids, where the load on power lines is the limiting criterion.
- Active power control: Reduction of active power according to the current voltage is an additional relief and increases charging time only slightly.

These charging strategies were tested in an urban grid case study and showed to be very effective. Finally, an active power reduction for photovoltaic systems was tested in a rural grid case study and proved to reduce necessary grid reinforcements significantly. Grid operation strategies, whether controlling photovoltaic systems or electric vehicles, can be superior to grid reinforcements, when the additional capacity is only needed a few hours a year and compensation costs are comparably low.

Condition Assessment on Power Transformers using Dielectric Response Analysis

M. Eng. Michael Jaya

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
	Prof. Dr.-Ing. G. Langhammer
Tag der mündlichen Prüfung am KIT:	10.12.2013

Smart Distribution Planung unter Berücksichtigung von residualen Lasten

Dipl.-Ing. Christian Röhrig

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. P. Schegner
	Prof. Dr.-Ing. K. Rudion
Tag der mündlichen Prüfung in Magdeburg:	09.04.2014

5. FORSCHUNGSARBEITEN

Das Institut befasst sich in seinen Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig mit Themen, die zur Sicherstellung einer zuverlässigen, kosteneffizienten und nachhaltigen Energieversorgung beitragen. Dabei werden hochspannungstechnische Aufgaben auf dem Gebiet der Isolationsfestigkeit und Diagnostik genauso bearbeitet wie Themen, die die Umstrukturierung der elektrischen Energieversorgung u.a. durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien betreffen. Ein besonderer Schwerpunkt der Forschungstätigkeit ist die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bei energietechnischen und elektronischen Systemen.

Hochspannungstechnik

Am Institut werden moderne *Messmethoden* zur Erfassung hoher Stossspannungen und schnellveränderlicher elektromagnetischer Felder untersucht und weiterentwickelt. Zu einem Schwerpunkt hat sich in den letzten Jahren die Teilentladungs-(TE)-Messtechnik entwickelt. Wir beschäftigen uns hier vor allem mit fortschrittlichen Verfahren der Störgrößenunterdrückung und Mustererkennung, der akustischen TE-Messtechnik und der UHF-Methode zur Erfassung und Ortung von TE.

Der *Betrieb* der Übertragungsnetze über Bemessungsgrenzen und projektierte Lebensdauer der Betriebsmittel hinaus bedingt eine genauere Überwachung des Betriebszustandes, um die Versorgungssicherheit weiter zu gewährleisten (Life Cycle Management). So werden zum einen die für die einzelnen Betriebsmittel notwendigen Diagnoseverfahren (z. B. Teilentladungsmessung, Frequency Response Analysis, Feuchtigkeitsbestimmung, Gas-in-Öl-Analyse, Vibrationsmessung, Online Monitoring) entwickelt und verbessert, um etwa die Überlastbarkeit und Restnutzungsdauer vorhersagen zu können. Hier stellen die Messverfahren zur Anwendung in der Schaltanlage einen besonderen Schwerpunkt dar. Zum anderen werden anlagenübergreifende Instandhaltungsstrategien entwickelt (Asset Management).

Hinsichtlich des *Designs* hochspannungstechnischer Betriebsmittel werden neue Isolierstoffe (z. B. natürliche und synthetische Ester) auf Ihre physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften hin geprüft. Durch den Einsatz moderner Softwarewerkzeuge, z. B. Finite Elemente Methode (FEM) und Computational Fluid Dynamics (CFD), wird der Ölstrom und das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren untersucht. Das Forschungsgebiet Gasförmige Isolationssysteme ist geprägt durch Themenstellungen wie die Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von SF_6 und Mischgasen, des Einflusses der atmosphärischen Bedingungen auf die Spannungsfestigkeit und die Untersuchung der Ausbreitung und Dämpfung von Very Fast Transients in GIS.

RESEARCH ACTIVITIES

Our institute's main research topics are mainly related to the reliability, cost-efficiency and sustainability of electric power supply. Thus, we deal on the one hand with tasks from the field of high-voltage insulation performance and condition assessment and on the other hand with the requirements for planning and operation of future electric power grids, which arise from the increasing use of renewable energies. A special emphasis of our research work is in the field of electromagnetic compatibility (EMC) of both power electric and electronic systems.

High Voltage Engineering

At our institute we develop and improve *measurement techniques* for the measurement of high amplitude impulse voltages and transient electromagnetic fields. In the last years one main topic in this field has become the detection and measurement of partial discharges. Here we basically deal with modern methods of noise reduction, with acoustic PD measurement techniques and with unconventional UHF partial discharge measurement and localisation techniques.

The *operation* of electric power networks above their initial dimensioning levels and longer than their estimated lifespan requires a detailed monitoring of the operating conditions to ensure a safe supply with electric power also in the future (life cycle management). For this task the diagnostic tools which are necessary for different apparatus are developed or improved (e. g. partial discharge measurement, frequency response analysis, moisture determination, dissolved gas analysis, vibration measurement, on-line monitoring). These tools can be used to predict the overload capacity and residual life time of a H.V. apparatus. On the other side service and maintenance strategies for H.V. equipment are developed (asset management).

Regarding the *design* of high voltage equipment new materials (e. g. natural and synthetic esters) are investigated concerning their physical, chemical and electric properties. By means of modern software tools, e. g. finite element analysis (FEM) and computational fluid dynamics (CFD), the oil flow distribution and the thermal behaviour of power transformers can be investigated and optimized. The research area Gaseous Dielectrics is characterized by topics like investigation of dielectric properties of pure SF_6 and SF_6-gas mixtures, the influence of atmospheric conditions on the dielectric strength of technical insulation designs and the investigation of generation and damping of very fast transients in gas-insulated switchgear.

Elektrische Energieversorgung / Smart Grids

In diesem Forschungsgebiet werden Methoden zur optimalen Planung und Betriebsführung des zukünftigen intelligenten Stromversorgungssystems mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien entwickelt, implementiert und untersucht. Wesentliche Forschungsthemen sind dabei:

- Netzplanungsmethoden unter Verwendung probabilistischer Ansätze und unter Einbeziehung von Flexibilisierungsoptionen
- Methoden zur Schaffung bzw. Verbesserung der Beobachtbarkeit der elektrischen Netze basierend auf Zustandsschätzungsalgorithmen sowie auf zeitsynchronisierten Messungen mittels Phasor Measurement Units (PMU)
- Ansätze zur Komplexitätsreduktion von Simulations- und Optimierungsverfahren bei interdisziplinärer, sparten- und spannungsebenenübergreifender Betrachtung
- Konzepte für flexible, dezentrale Netzarchitekturen (Mikronetze, virtuelle Kraftwerke, etc.) und Verfahren für deren optimierte Auslegung und Betriebsführung
- Optimale Betriebsführungsstrategien für Systeme mit hoher Penetration an volatilen Erzeugern
- Regelungsverfahren und Betriebsführungsmethoden für optimale Integration von HGÜ-Systeme in das Verbundsystem.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist am Institut seit vielen Jahren ein wichtiger Schwerpunkt. Zunächst standen Erzeugung und Messung elektromagnetischer Feldimpulse mit extrem hohen Amplituden und sehr kurzen Anstiegszeiten im Fokus, wie sie zur NEMP- oder LEMP-Nachbildung und für die Simulation von Trennerschaltungen in SF_6-Anlagen nötig sind.

Die aktuellen Forschungsarbeiten sind im Bereich der Automobil-EMV angesiedelt. Mittels Korrelationsbetrachtungen zwischen den im Automobilbereich üblichen Komponentenmessverfahren und den EMV-Messungen an Gesamtfahrzeugen wird untersucht, wie durch Messungen an einzelnen Fahrzeugkomponenten (z. B. Steuergeräten) auf das spätere Verhalten dieser Komponenten im Fahrzeug geschlossen werden kann. Eine weitere Arbeit befasst sich mit der EMV von Fahrzeugbordnetzen. Die zahlreichen elektrischen Aggregate und dabei insbesondere elektrische Antriebsstränge können neuartige impulsförmige Störgrößen aussenden, die von den bisherigen EMV-Prüfverfahren nicht abgedeckt werden. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Störgrößen zu erfassen und zu klassifizieren und neue Messtechnik zu entwickeln, mit deren Hilfe diese sporadisch auftretenden Störgrößen im Fahrzeug sicher und ohne wesentliche Störbeeinflussung aufgezeichnet werden können.

Electrical Power Supply / Smart Grids

In this research area the methods for optimal planning and operation of the future intelligent electrical power supply systems with large penetration of renewable energies are developed, implemented and analysed.
Most relevant topics on this field are:

- Methods for grid planning tasks using probabilistic approaches taking into consideration the possible flexibility options
- Methods for provision or improvement of power grid observability level based on state estimation approaches as well as time synchronized measurements with Phasor Measurement Units (PMU)
- Methods for reduction of complexity in simulation and optimization approaches with regard to interdisciplinary analysis across voltage levels and energy sectors
- Concepts of flexible decentralized power system architectures (micro grids, virtual power plants, etc.) as well as approaches for their optimized design and operation
- Optimal control strategies for systems with high penetration of stochastic generation
- Control strategies and operation methods for optimal integration of HVDC-systems into the interconnected power system

Electromagnetic Compatibility

Since many years the field of „Electromagnetic Compatibility“ has been one of the most important activities. In the beginning of this work we started with the generation and measurement of electromagnetic field impulses with extreme high amplitudes and very short rise times. The aims have been the simulation of NEMP, LEMP and the simulation of circuit breaker operations in GIS.

Recent EMC research works concentrate on the automotive EMC. One topic is the correlation between full vehicle and single component EMC emission measurement procedures. The main aim is to estimate the emission behaviour of a single component in the car which is not yet available in an early state of its development. Another topic deals with the EMC of automotive electric power networks. Due to novel high power electric devices, especially in electric vehicles, it is possible that new impulsive disturbance occur on the electric power supply of the vehicle. These impulsive disturbances may cause new disturbing potential which isn´t covered by the actual EMC susceptibility standards. The goal of this work is to detect and classify these new impulsive disturbances and also to develop new measurement tools for a convenient recording of these sporadically impulses in the automotive power network with as less coupling disturbances as possible.

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

▪ Auswirkungen von Gleichströmen auf Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Michael Beltle

Im Rahmen des Netzausbaus der Übertragungsnetze in Deutschland gewinnt die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) zunehmend an Bedeutung. Unter anderem das Repowering bestehender Trassen ist hier von Interesse, da keine zusätzlichen baulichen Maßnahmen und Eingriffe in das Landschaftsbild notwendig sind. Dabei werden ein oder mehrere AC-Systeme einer bereits vorhandenen Drehstromtrasse durch ein HGÜ-System ersetzt. Die räumliche Nähe zwischen 380 kV bzw. 110 kV Drehstromsystemen und einer HGÜ erfordert es, mögliche bisher unbekannte Wechselwirkungen beider Systeme zu betrachten. Freie Ladungsträger der HGÜ (Korona) können in die Leiterseile der AC-Systeme einkoppeln. Die Folge ist ein Gleichstrom, der über den Netzkuppeltransformator am Ende der Trasse abfließt. Für Transformatoren stellt dieser Fall eine neue, zusätzliche Belastung dar. Um die Auswirkungen von DC auf Leistungstransformatoren in einem ersten Schritt zu erfassen, werden an einem repräsentativen Versuchsaufbau, bestehend aus zwei baugleichen 110 / 10 kV, 30 MVA Dreischenkel-Transformatoren, verschiedene Szenarien mit DC-Einspeisung auf der Oberspannungsseite experimentell untersucht. Der Einfluss von überlagerten Gleichströmen auf Leistungstransformatoren mit Dreischenkelkern kann in zwei Kategorien eingeteilt werden. Symmetrische Belastungen, bei denen alle Phasen den gleichen I_{DC} erfahren und unsymmetrische Fälle mit beliebiger Verteilung des I_{DC}. Fig. 1 zeigt zwei Hysteresekurven bei gleicher DC-Belastung der Phase 2 auf 110 kV im Vergleich zum Leerlauf ohne DC.

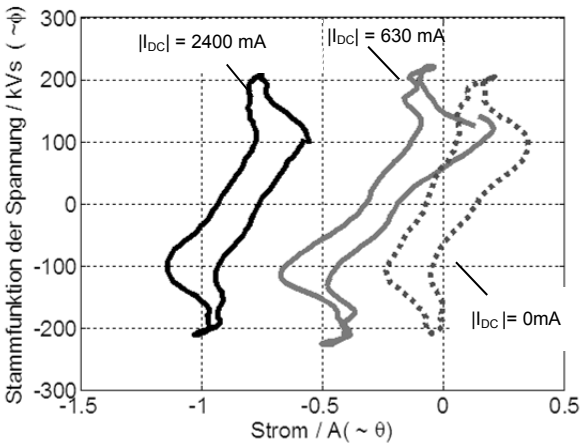


Fig. 1: Vergleich der Hysteresekurven von Phase 2 ohne und mit symmetrischem DC (gemessen auf der 110 kV Ebene).
Angegeben ist der summierte $I_{DC,ges,OS}$ aller Phasen.
Hysteresis loop of phase 2 with and without DC at 110 kV; shown is the summed DC $I_{DC,ges,OS}$ of all phases.

Influence of Direct Currents on Power Transformers

Dipl.-Ing. Michael Beltle

The growth of the German grid is essential for the integration of growing renewable energies. One aspect is the implementation of High Voltage Direct Current (HVDC) systems into the grid. In practice, the repowering of existing lines is gaining interest because neither additional structural measures nor unfavourable changes of the landscape are necessary. Repowering replaces one or more AC-systems on a line with HVDC systems. The close distances between 380 kV AC, 110 kV AC systems and HVDC on the same traverse can lead to interactions between the systems. Charge carriers originated by HVDC corona might couple into the conducting rope of AC systems causing a DC to ground through the star point of connected power transformers. The resulting effects of DC on power transformers are not known. Therefore, a setup consisting of two identical 110 / 10 kV, 30 MVA transformers connected on 110 kV is determined at different DC scenarios. The DC is injected into the 110 kV star point. Using additional ohmic resistances in the 110 kV between the transformers, the distribution of DC can be alternated. The electric response of the transformers is determined by the resulting hysteresis loop regarding half-wave-saturation on 110 kV and magnetic interactions on the 10 kV level. Changes in the mechanical oscillation given by the DC dependent magnetostriction are determined by solid borne acceleration sensors on transformer tank walls.

The influence of superimposed DC is distinguished into two cases. At symmetrical scenarios I_{DC} through all phases is equal. At unsymmetrical scenarios, I_{DC} though each phase is alternated. Fig. 1 shows the hysteresis loop of phase 2 (middle phase), 110 kV level at symmetrical I_{DC} in comparison to the hysteresis without DC.

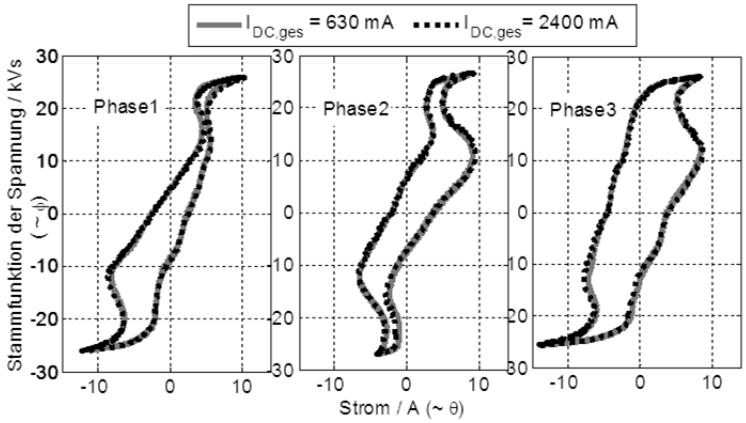


Fig. 2: Vergleich der Hysteresekurven auf der 10 kV Ebene mit symmetrischem I_{DC}, getrennt nach Phasen.
Hysteresis loop of all phases at 10 kV for two scenarios with symmetrical I_{DC} on each Phase.

Die Kurven sind aufgrund des DC verschoben, jedoch tritt keine Sättigung auf, obwohl I_{DC} deutlich über den Magnetisierungsströmen liegt. Auf die 10 kV Ebene hat der hohe DC keine Auswirkung, siehe Fig. 2. Im Vergleich dazu zeigt Fig. 4 die Hysteresekurven von 110 kV und 10 kV Ebene in einem Szenario mit hohem Gleichstrom nur durch Phase 3, was zu einer Halbwellensättigung dieser Phase führt. Dabei treten auch in der 10 kV Ebene symmetrische Sättigungen der betroffenen Phase 3 auf. Grund für das unterschiedliche Verhalten ist die Kerngeometrie des Dreischenkeltransformators. Der magnetische Fluss von symmetrischen Gleichströmen wird aufgrund der fehlenden Rückflussschenkel in den Streufluss gedrängt, weshalb das Betriebsverhalten des Kerns nicht beeinflusst wird. Für unsymmetrische Szenarien schließt sich der magnetische Gleichfluss teilweise über den Kern, was zu Wechselwirkungen führt. Die Ausprägung und Stärke der resultierenden Beeinflussungen hängen vom Gesamtgleichstrom $I_{DC,ges}$ und von dessen Verteilung auf die Phasen ab. Prinzipiell sind die entstehenden Effekte mit steigendem Strom durch eine einzelne Phase stärker. Eine Beeinflussung der 10 kV Ebene kann dazu führen, dass angrenzende Netzabschnitte, die nicht mit DC beaufschlagt sind, trotzdem von Auswirkungen der Sättigungseffekte betroffen sein können. Ob DC einen Transformator beeinflusst, kann im Betrieb durch Messung der Kesselschwingungen ermittelt werden. Typischer Weise entstehen bei überlagerten magnetischen Gleichflüssen auch Wechselwirkungen, die auf die mechanische Deformation der Magnetostriktion einwirken. Dadurch werden neben der mechanischen Grundfrequenz f_{mech} = 100 Hz (gerade Harmonische von 50 Hz) eine Subharmonische $f_{mech,sub}$ = 50 Hz und entsprechende ungerade Harmonische (150 Hz, …) erzeugt. Fig 3 zeigt die relativen Kesselschwingungen verschiedener Szenarien getrennt nach geraden und ungeraden Harmonischen. Für symmetrische Belastungen (Fig. 3, links) ändert sich das Schwingungsverhalten gegenüber dem Leerlauf ohne DC nicht. Im Falle unsymmetrischer DC-Belastungen (Fig. 3, rechts) werden bis zu 40 % des gesamten Leistungsspektrum durch ungerade Harmonische erzeugt, was eine einfache Erkennung von unerwünschtem DC ermöglicht.

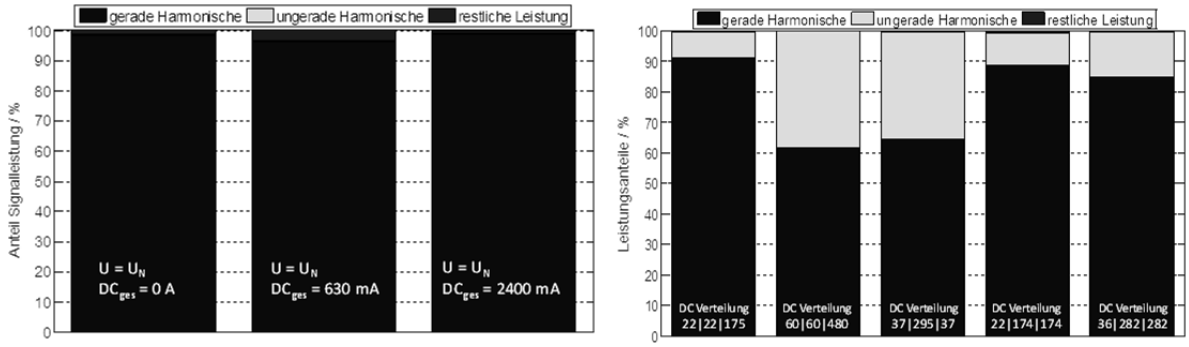


Fig. 3: Aufteilung der Signalleistung von Kesselschwingungen ohne DC und bei symmetrischer DC (links) sowie bei unsymmetrischer Belastung (rechts). Angabe der Gleichstromverteilung auf die einzelnen Phasen bei unsymmetrischer Belastung in mA.
Frequency components of tank vibrations without DC and symmetrical DC offset (left) as well as asymmetrical DC on different phases.
DC on each phase in mA (right picture).

The offset in the x-axis is caused by the measured I_{DC} component. The shape of the hysteresis is not changed although the I_{DC} component exceeds the magnetizing currents. Also the 10 kV level is not affected by high symmetric I_{DC}, see Fig. 2. Asymmetric scenarios are shown in Fig. 4. A high I_{DC} is only injected in phase 3, leading to a strong half wave saturation. In this scenario the 10 kV level is affected which leads to a symmetric saturation of phase 3.

The different transformer behavior of symmetric and asymmetric I_{DC} is caused by the 3-limb core geometry. The magnetic flux originated by DC is forced as stray flux to close its loop outside the core. Hence, there are no interactions with the core material and no change of the hysteresis. Regarding asymmetric scenarios the magnetic direct flux can partly flow through different limbs leading to saturation. The impact depends on the entire DC $I_{DC,ges}$ and its distribution on the phases. In cases with very high saturation, the magnetic coupled 10 kV level can also be influenced. This can also lead to interactions in nearby grids which do not have a DC component themselves but are indirectly affected by DC driven AC-effects.

In practice, the direct measurement of DC running through transformers is not always possible, depending on the accessibility of star points, etc. DC can be detected easily by indirect measurement of its effect on transformer vibrations. Typically, the magnetic direct fluxes change the mechanical deformation of the magnetostriction. This changes the frequency spectrum of core vibrations. Usually, the vibration spectrum consists of 100 Hz oscillations and harmonics (assuming an electric frequency f_{el} = 50 Hz). With applied DC an additional 50 Hz and odd harmonics (150 Hz,…) occurs. Fig. 3 shows the relative signal power of core vibrations separated into even (100 Hz, 200 Hz, ...) and odd (50 Hz, 150 Hz, …) harmonics at different scenarios. Symmetric scenarios which do not affect the magnetic transformer behavior do not change core vibrations (Fig. 3, left). Asymmetric scenarios lead to odd harmonics which contribute up to 40 % of the entire signal power, which enables the detection of undesired asymmetric DC currents.

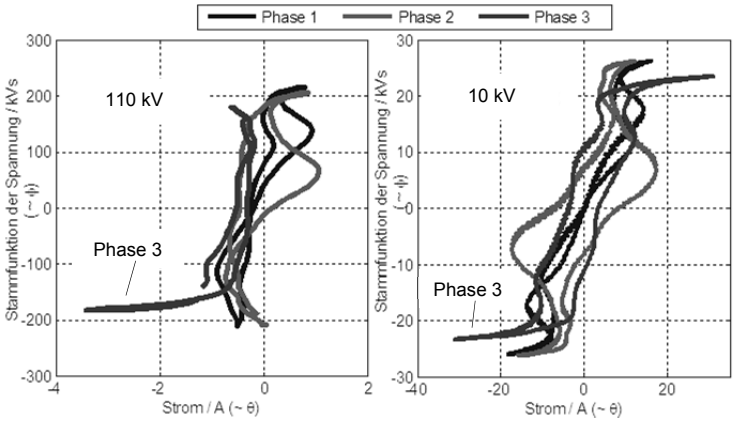


Fig. 4: Vergleich der Hysteresekurven von 110 kV und 10 kV Ebene bei unsymmetrischer Belastung der Phasen; der Hauptanteil des Gleichstroms fließt durch Phase 3.
Hysteresis of 110 kV and 10 kV level for all phases in a szenario with high DC only through phase 3.

Berechnung der oberen Öltemperatur in Leistungstransformatoren

M. Sc. Mohammad Djamali

Die Temperatur in ölgefüllten Transformatoren beschränkt ihre Belastbarkeit. Die Höchsttemperatur der Wicklung sowie die obere Öltemperatur hängen von der Belastung und der Kühlung ab und sollen unter der für die Isolierstoffklasse zulässigen Temperatur bleiben.

Um das dynamische Verhalten der Temperaturänderung in Transformatoren zu beschreiben, sind einige physikalische Modelle vorgestellt worden, welche auf der Modellierung der Wärmeübertragung durch eine einfache Differenzialgleichung basieren. Deswegen konzentrieren sich die Forschungen auf die Verbesserung der physikalischen Modelle.

Die thermisch-elektrische Analogie, die in der Literatur häufig Anwendung findet, ist in Fig. 1 dargestellt. Die Literatur beschäftigt sich in diesem Zusammenhang meist mit einer möglichst genauen Bestimmung des thermischen Widerstands. Zu diesem Zweck werden einige Wärmeübertragungsphänomene in der Forschung am IEH in Betracht gezogen. Dies sind die natürliche und erzwungene Wärmekonvektion von Öl und Luft sowie die thermische Strahlung im Kühler. Wie in Fig. 2 dargestellt, tritt Öl an der Stelle, die mit dem Punkt A gekennzeichnet ist, in den Tank des Transformators ein. Ein Teil des Öls fließt durch die Wicklung, erwärmt sich dabei und verlässt die Wicklung wieder im Punkt B. Bei der OFAF-Kühlungsmethode kommt es zu einer Mischung des durch die Wicklung erwärmten Öls mit dem zwischen der Wicklung und dem Kessel vorbeifließenden Öl. Wegen dieser Mischung kann die obere Öltemperatur nicht unmittelbar gemessen werden, weil sie üblicherweise nur von den in der Temperaturtasche verbauten Temperatursensoren erfasst wird. Deswegen ist die Temperatur des in den Kühler eintretenden Öls niedriger als die maximale Öltemperatur. Um die obere Öltemperatur genau modellieren zu können, sollte die Ölmischung ebenfalls betrachtet werden. Darüber hinaus besteht die Ursache des Ölflusses durch die Wicklung in der natürlichen und der erzwungenen Konvektion. Ebenso wird die Wärme im Kühler von Punkt C bis Punkt D durch Strahlung und natürliche sowie erzwungene Konvektion der Luft an die Umgebung übertragen.

Dieser komplexere Zusammenhang spiegelt sich in der thermisch-elektrischen Analogie in Fig. 3 wider, welche auf dem in Fig. 2 dargestellten Ölfluss durch die Wicklung und den Kühler basiert.

Die Genauigkeit von zwei Modellen kann durch die Fehlerdauerlinie verglichen werden. Fig. 4 zeigt den Vergleich zwischen „IEC 60076-7 Loading Guide“ als ein konventionelles Modell und dem in Fig. 3 dargestellten Modell.

Calculation of Top Oil Temperature in Power Transformers

M. Sc. Mohammad Djamali

The temperature in oil filled power transformers is the most limiting factor for their loading capability. The highest temperature of the winding insulation and oil depend upon the loading and cooling condition and should be below a certain value based on the insulation thermal class.

To describe the dynamic behavior of temperature change in power transformers, some models have been introduced which are based on modelling heat transfer phenomena in a transformer with simple differential equation called physical models. The high interest of researchers concerning physical models is because of their simple structure and good results. Although the results are relatively accurate, they cannot represent the reality perfectly; hence, there is always room for improvement of physical models.

The thermal-electrical analogy circuit which has been used in literature is shown in the Fig. 1. The main concentration in literature is on the determination of the thermal resistance as accurate as possible.

For an accurate determination of the thermal resistance of a transformer in this research, some heat transfer phenomena are taken into account. This comprises the natural and the forced convection of oil and air as well as the thermal radiation in the cooler. The oil enters the winding at point A shown in Fig. 2 and is heated within the winding, streams upwards and leaves the winding at top of the winding (point B in Fig. 2). The OFAF cooling method is characterized by the mixing of oil heated up in the winding and the oil streaming along the tank wall through the shunt path. Since only the mixed oil temperature can be measured by temperature sensors accommodated in the tank cover, the oil temperature coming out of the winding at the top side cannot be measured directly.

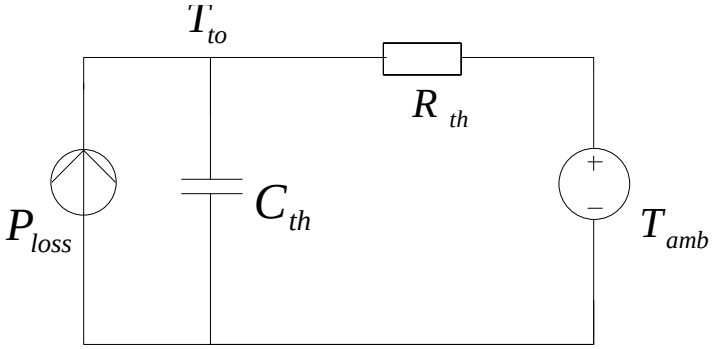


Fig. 1: Thermisch-elektrische Analogie des konventionellen Modells.
Thermal electrical analogy of conventional models.

Beide Modelle sind durch Messdaten eines im Betrieb befindlichen Transformators im Dezember parametrisiert und mit Messdaten aus dem Monat Juli verifiziert worden. Diese Weise der Parametrisierung beweist, dass die Modelle verschiedene Betriebszustände behandeln können. Wie aus der Fehlerdauerlinie in Fig. 4 hervorgeht, ergibt sich aus der genaueren Bestimmung des thermischen Widerstandes die genauere Berechnung der oberen Öltemperatur. Damit wird die genaue Berechnung der Hot-Spot-Temperatur ermöglicht, weil sich diese direkt auf die obere Öltemperatur bezieht. Damit kann eventuell die Belastbarkeit des Transformators erhöht werden.

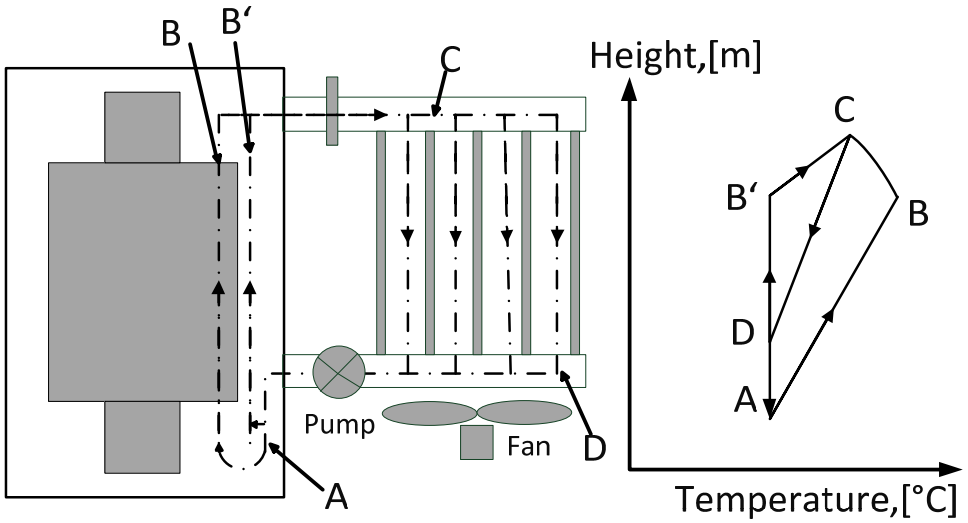


Fig. 2: Schema des Ölflusses (links) und Änderung der Öltemperatur (rechts) für OFAF-Transformatoren.
Schematic of oil path (left) and oil temperature change (right) for an OFAF transformer.

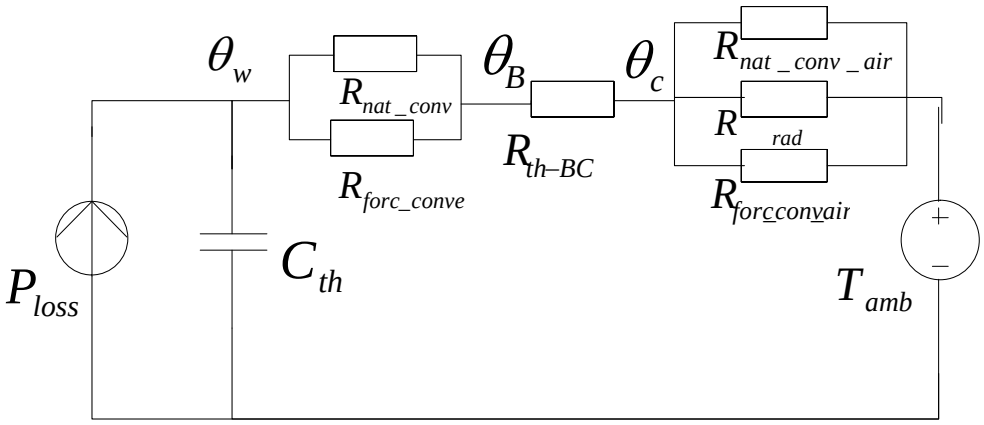


Fig. 3: Thermisch-elektrische Analogie des entwickelten physikalischen Modells.
Thermal electrical analogy of the proposed model.

Moreover, the oil entering the cooler (at point C in Fig. 2) is of lower temperature than the maximum oil temperature. Therefore, in order to model the top oil temperature precisely, the oil mixture should also be considered. There are two main forces driving oil up the winding: natural convection of the oil and the contribution of pumps to stream up the oil or forced convection. In the same way, there are three main phenomena causing dissipation of the heat from the cooler to the surrounding ambient: natural air convection, radiation and forced convection of air.

Taking these phenomena into account, the thermal electrical analogy circuit is expanded as illustrated in Fig. 3. This expanded circuit is based on the oil flow through the winding and cooler shown in Fig. 2.

The performance of two models can be compared based on their error duration curves. Fig. 4 shows the comparison between the performance of IEC 60076-7 as a conventional top oil temperature model and the performance of an advanced physical model shown in Fig. 3. Both models have been parameterized with measured data from a transformer during operation in December and verified with data from July. This way for parameterizing and verifying the models proves that the model can perform under different conditions with an acceptable error. As can be seen from the error duration curve, the precise determination of the thermal resistance results in a more accurate calculation of the top oil temperature. Thereby, due to the direct relationship between Hot-spot temperature and top oil temperature, the Hot-Spot temperature can be precisely calculated which may lead to enhancement of loading capability of power transformer.

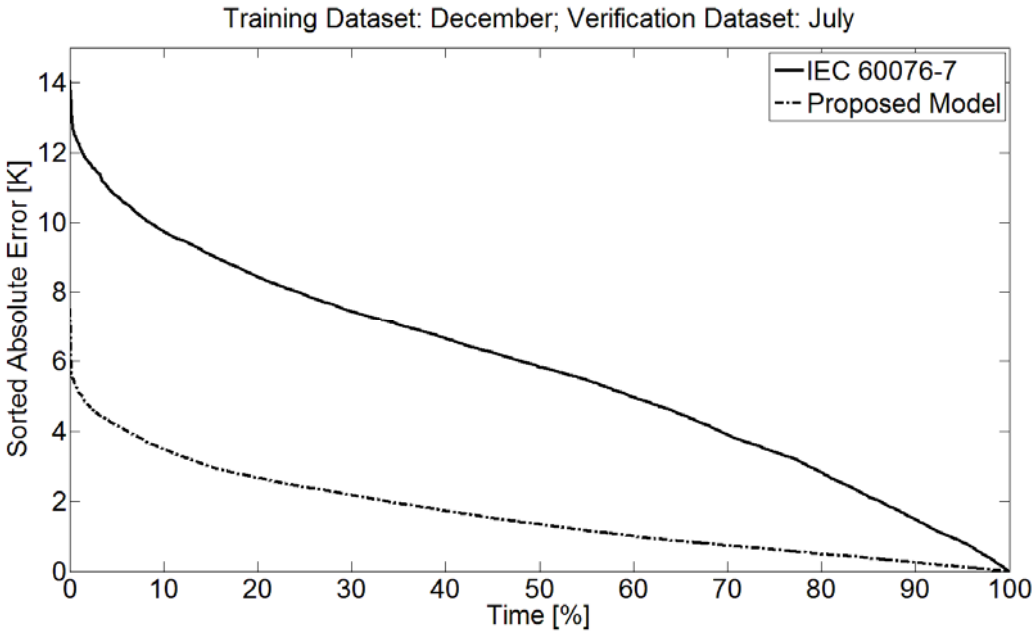


Fig 4: Fehlerdauerlinie der oberen Öltemperaturberechnung für einen OFAF gekühlten Transformator.
Error duration curve of top oil temperature calculation for an OFAF transformer.

Untersuchung der Temperaturverteilung in Öl-gekühlten Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Transformatoren stellen eine Schlüsselkomponente bei der Verteilung elektrischer Energie in Stromnetzen dar. Ihre Belastbarkeit und Lebensdauer hängt dabei maßgeblich von thermischen Gesichtspunkten ab. Obwohl heutige Transformatoren bereits sehr effizient sind, müssen ihre Kühlsysteme beträchtliche Mengen an Wärme abführen, die in den Wicklungen während des Betriebs freigesetzt werden. Je höher das aus einer bestimmten Belastung resultierende Temperaturniveau liegt, desto schneller altern die verwendeten Isolationsmaterialien bei dieser Belastung. Ausschlaggebend für einen thermischen Fehler ist dabei allerdings nicht der durchschnittliche Alterungszustand der gesamten Isolation, sondern der durch die maximale Temperatur am stärksten gealterte Teil der Isolation. Detaillierte Kenntnisse über die Temperaturverteilung im Inneren einer Transformatorwicklung stellen daher eine entscheidende Voraussetzung für die zweckmäßige Bestimmung der Nennleistung und Lebensdauer von Transformatoren dar.

Direkte Temperaturmessungen innerhalb der Wicklungen realer Leistungstransformatoren eignen sich für eine detaillierte Analyse der Temperaturverteilung nur bedingt. Nachteilig wirken sich neben der kostenintensiven Sensorinstallation und Messtechnik auch die realisierbare Messgenauigkeit und die schwer zu kontrollierenden Randbedingungen aus. Daher werden für die thermische Analyse von Leistungstransformatoren in erster Linie experimentelle und numerische Wicklungsmodelle herangezogen.

Während numerische Modelle vergleichsweise einfach für breit angelegte Studien parametrisiert werden können, ist eine Kontrolle der damit gewonnenen Erkenntnisse nicht ohne experimentelle Messungen möglich. Zu diesem Zweck wurde am Institut ein experimentelles Wicklungsmodell konzipiert und aufgebaut, welches sowohl Einblick in die Temperaturverteilung als auch in die Ölstromverteilung gewährt. Fig. 1 zeigt das Wicklungsdesign des experimentellen Modells bestehend aus 3 Passagen mit je 6 Scheiben. Jede Scheibe ist dabei aus 4 Leitern aufgebaut, von denen jeder definiert beheizbar und mit einem Temperatursensor versehen ist. Mit Hilfe eines Laboraufbaus wird am Modelleintritt unterhalb der ersten Passage ein definierter Ölstrom mit frei zu wählender Eintrittstemperatur eingebracht. Die gemessene Temperaturverteilung bei zwei unterschiedlichen Betriebspunkten mit für OD-gekühlte Transformatoren repräsentativen Randbedingungen ist in Fig. 2 dargestellt. Dabei beziehen sich die Angaben des Ölstroms $\dot{m}_{oil}$ auf den Ölstrom durch die gesamte Wicklung und die Verluste P_{losses} auf die Heizleistung, die in jeder einzelnen Leiterwindung eingeprägt wurde. Bei beiden untersuchten Betriebspunkten zeigt sich ein Temperaturverlauf mit steigender Tendenz in Richtung des geführten Ölflusses.

Investigation of the Temperature Distribution in Oil Cooled Power Transformers

Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Power transformers are key components applied for the power distribution in electrical networks. Their power rating and life-cycle characteristics are strongly dependent on thermal aspects. Although today's transformers are highly efficient, their cooling systems still have to discharge non-negligible amounts of heat dissipated in their windings. The higher the evolving temperature levels at a given loading rate are settling, the faster the insulation materials will age at that loading rate. Moreover, a thermal failure results not from the overall condition of the insulation but from the most degenerated part of the insulation caused by the highest local temperatures. Therefore, a profound knowledge about the temperature distribution inside a transformer is crucial for an appropriate assessment of the component's power rating and life-cycle.

Applying temperature sensors directly within the windings of real power transformers proves to be a fairly limited approach to analyse the temperature distribution in detail. Aside from monetary aspects connected to the sensors and their respective assembly, additional dis-advantages result from the low measurement accuracy of suitable sensors and the limited control of prevailing boundary conditions. For that reason, the thermal analysis of power transformers is mostly carried out with experimental and numerical winding models.

While numerical models can be parameterized relatively easy to suit broad studies, a validation of the resulting outcome still requires some experimental measurements. For that purpose an experimental winding model was planned and created at the institute giving insight into the temperature and oil flow distribution. Fig. 1 shows the chosen winding design of the experimental model consisting of 3 passes with 6 discs per pass. Each disc is composed of 4 conductors that can be heated independently with a specified power and are equipped with a temperature sensor. An appropriate laboratory setup provides a defined and temperature controlled oil flow rate to the inlet below the first pass.

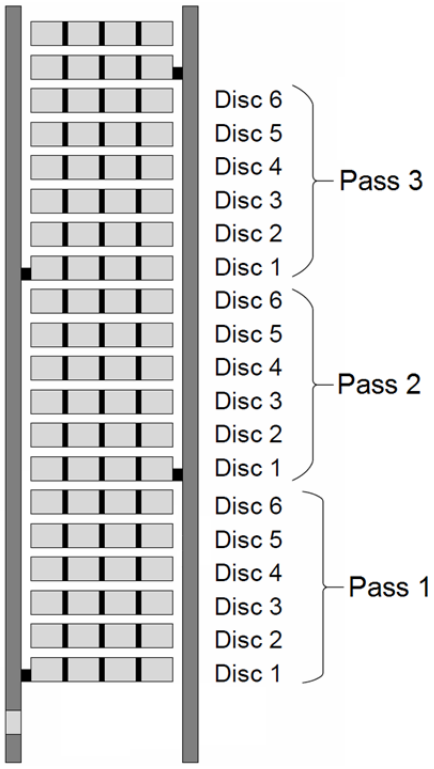
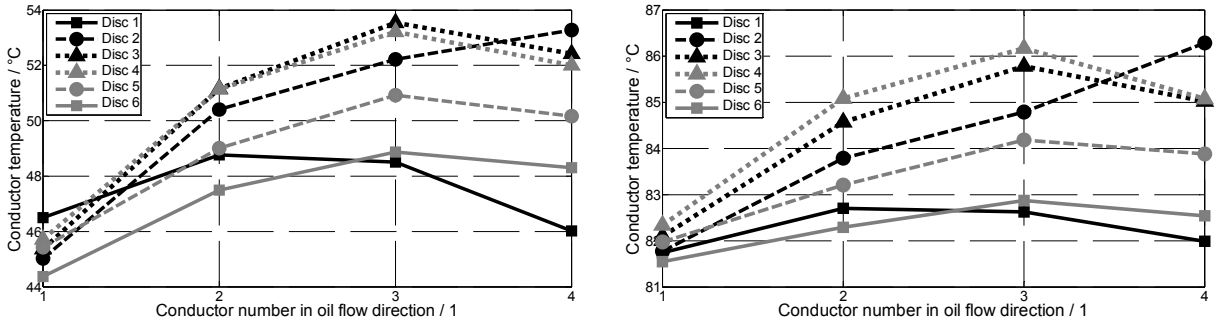


Fig. 1: Wicklungsdesign des experimentellen Modells. Winding design of the experimental model.



a) $\dot{m}_{oil}$ = 9.0 kg/s, ϑ_{in} = 40°C, P_{losses} = 360 W b) $\dot{m}_{oil}$ = 18.0 kg/s, ϑ_{in} = 80°C, P_{losses} = 180 W

Fig. 2: Leitertemperaturen in Passage 3 mit geführter Ölströmung vom äußeren zum inneren Wicklungsdurchmesser bei unterschiedlichen Randbedingungen . Measured conductor temperatures in pass 3 with oil led from the outer to the inner winding diameter at various boundary conditions.

Je nach Scheibenposition fällt die Temperatur dann am letzten Leiter der jeweiligen Scheibe nochmal etwas ab. Darüber hinaus weisen die ersten Leiter in Richtung des geführten Ölstroms einer Scheibe innerhalb einer Passage sehr ähnliche Temperaturen auf. Ausgehend von den auf diese Weise erfassten Temperaturen ist eine Analyse von Abhängigkeiten der Wärmeübertragung von den untersuchten Randbedingungen möglich. Exemplarisch zeigt Fig. 4 die Wärmeübergangskoeffizienten von jedem Leiter in Passage 3 unter Einbezug der jeweiligen wärmeübertragenden Fläche, der jeweils eingeprägten Wärme und dem jeweils entstehenden Temperaturgradienten zwischen Leiter und dem Öl am Eintritt in die Passage 3. Es zeigt sich, dass lediglich die erste Scheibe, welche die Barriere der Passage beinhaltet, einen stärker abweichenden Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten aufweist. Davon abgesehen fallen die Wärmeübergangskoeffizienten in allen anderen Scheiben in Richtung des geführten Ölflusses ab.

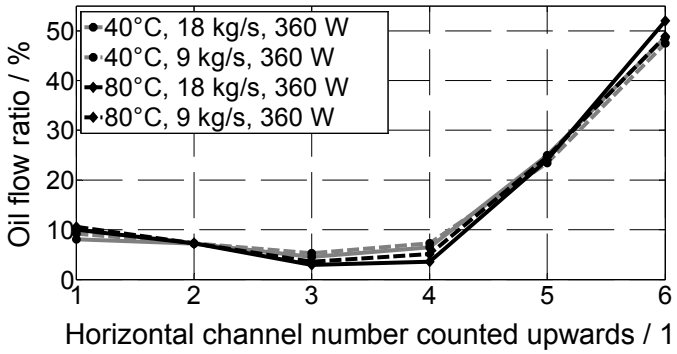


Fig. 3: Verteilung des Ölstroms auf die horizontalen Kanäle der Passage 3. Oil flow distribution within the horizontal channels in pass 3.

Neben der Validierung mittels Temperaturmessungen bietet das konzipierte experimentelle Wicklungsmodell die Möglichkeit, die Ölstromverteilung auf die horizontalen Kanäle einer Passage mittels sogenannter Tracerpartikeln zu beobachten. Fig. 3 zeigt Ergebnisse dieser Untersuchung bei unterschiedlichen Randbedingungen in Passage 3.

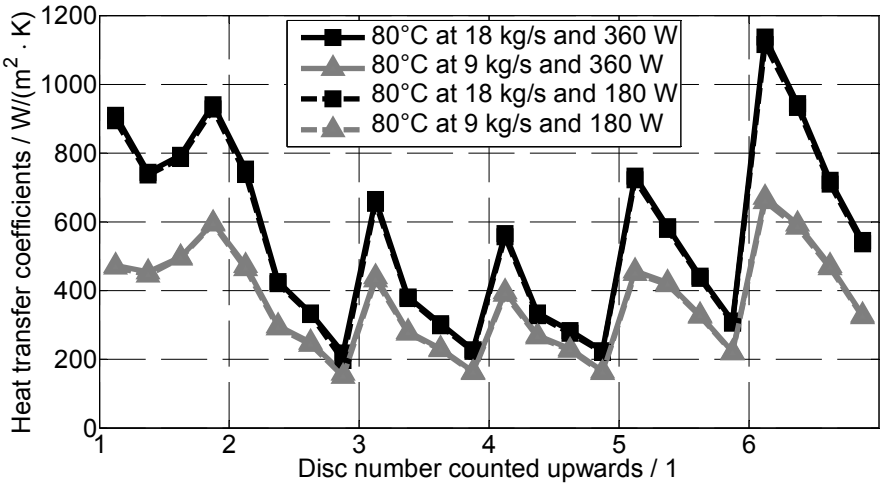


Fig. 4: Wärmeübergangskoeffizienten in Passage 3 mit geführter Ölströmung vom äußeren zum inneren Wicklungsdurchmesser bei ϑ_{in} = 80°C und unterschiedlichen Ölflussraten und eingeprägten Verlusten.
Heat transfer coefficients in pass 3 with oil led from the outer to the inner winding diameter at ϑ_{in} = 80°C and various oil flow rates and losses.

The measured temperature distribution at two operating conditions with representative boundary conditions for OD-cooled transformers is displayed in Fig. 2. The given values concerning the oil flow rate $\dot{m}_{oil}$ describe the oil led through the entire winding and the given losses P_{losses} represent the heat dissipated by each single conductor turn. At both operating points the measured temperatures within most discs are rising in oil flow direction and declining again at the last conductor in oil flow direction. In addition, all the first conductors in oil flow direction of the 6 discs in a pass show a similar temperature. Based upon the collected data, dependencies of the heat transfer on investigated boundary conditions can be analyzed. As an example, Fig. 4 gives the heat transfer coefficients at each conductor in pass 3, taking the respective heat transferring surface, the dissipated heat and the occurring temperature gradients between the respective conductor and the oil entering pass 3 into account. It can be noted, that only the first disc equipped with the oil washer shows a strongly diverging behavior concerning the heat transfer coefficients. Apart from that disc, the heat transfer coefficients within all other discs are steadily declining in oil flow direction.

Besides a possible validation with temperature measurements the created experimental winding model offers the opportunity to observe the oil flow distribution between the horizontal channels of a pass by applying so-called tracer particles. Fig. 3 shows the results of this investigation at various boundary conditions in pass 3.

Empfindlichkeitsvergleich von elektrischer und UHF-Teilentladungsmessung zur Diagnose von Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Martin Siegel

Um lokale Schäden der Isolation an Leistungstransformatoren frühzeitig erkennen zu können und dadurch die Ausfallgefahr zu minimieren, eignet sich die Teilentladungs-(TE) Messung. Neben der konventionellen TE-Messung nach IEC 60270, die elektrisch den Ladungsumsatz der TE bestimmt, gewinnt die elektromagnetische Messmethode zunehmend an Bedeutung. Hierbei wird mit einer in den Transformatorkessel eingebrachten Antenne im ultrahochfrequenten Bereich (UHF: 300 MHz – 3 GHz) die Abstrahlung von TE gemessen. Diese Methode eignet sich auch für eine dauerhafte Überwachung von Transformatoren (Monitoring), da sie durch die elektromagnetische Schirmwirkung des Transformatorkessels weniger empfindlich gegenüber externen Störern ist. Die CIGRE Working Group WG A2-27 empfiehlt in ihrer Broschüre 343 an neuen Transformatoren Einrichtungen für die Installation von UHF-Sensorik (DN50 Flansche oder dielektrische Fenster) vorzusehen. Ein grundlegender Unterschied der beiden Messverfahren ist die Messgröße. Bei der elektrischen Messung wird durch Integration des gemessenen Nachladestroms die sogenannte scheinbare Ladung bestimmt, die in pico-Coulomb (pC) gemessen wird. Bei der UHF-Methode erzeugt die elektromagnetische Abstrahlung der TE an der UHF-Antenne eine Spannung, die in Millivolt (mV) gemessen wird. Da sowohl bei der elektrischen als auch bei der UHF-TE-Messung nicht direkt an der Fehlstelle gemessen werden kann, bleibt der tatsächliche Pegel der TE im Transformator immer unbekannt. Eine Kalibrierung kann nur bis zum Anschlusspunkt an den Transformator erfolgen. Elektrische TE-Signale, die entfernt vom Kalibrierpunkt entstehen, werden durch den Ausbreitungsweg im Transformator beeinflusst. Dieser ist nicht genau bekannt und kann nicht kalibriert werden. Bei der UHF-Messmethode verhält es sich prinzipiell ähnlich, allerdings handelt es sich um einen gestrahlten Ausbreitungsweg. Aus diesem Grund kann bei beiden Mess-verfahren kein Rückschluss auf die tatsächlich umgesetzte Energie an der Fehlstelle gezogen werden. Daher ist es bei jeder TE-Messung schwierig nur durch den gemessenen Pegel eine Aussage zu treffen, ob es sich um eine kritische oder tolerierbare Fehlstelle handelt. Hilfreich kann hierbei die Analyse der Teilentladungsmuster sein. Ein linearer Zusammenhang zwischen scheinbarer Ladung und Antennenfußpunktspannung kann bei gleich bleibendem Aufbau nachgewiesen werden, daher enthalten beide Messgrößen theoretisch denselben Informationsgehalt. Allerdings gibt es TE, die im UHF-Bereich nicht abstrahlen und nur konventionell gemessen werden können.

Sensitivity Comparison of Electrical and UHF Partial Discharge Measurement for Power Transformer Diagnosis

Dipl.-Ing. Martin Siegel

PD measurement is suitable to detect damages in the insulation of power transformers at an early stage and thereby helps minimizing the risk of failure. In addition to the conventional PD measurement according to IEC 60270, which determines the electric charge of PD, the electromagnetic measurement method becomes increasingly important. The electromagnetic emission of a PD is measured using an UHF antenna which is inserted into the transformer tank. Due to the Farady shielding of the transformer tank this method is less sensitive to external interferences compared to the electrical method and therefore also suitable for measurements in noisy environments, e.g. for onsite/online measurements and monitoring. Since PD detection and location techniques are still evolving, the CIGRE Working Group WG A2-27 recommends in brochure 343 to provide DN50 valves for the later fitting of UHF probes because valves provides the greatest flexibility for the future. Alternatively, dielectric windows can be provided for UHF sensors. The fundamental difference between the two measurement methods is the physical value. The apparent charge level of the electrical measurement is determined by integration of the recharging current. For UHF the electromagnetic radiation of the PD is measured using antennas. The actual level of PD (pC or mV) remains unknown in a power transformer, because both methods cannot measure directly at the defect site. A calibration can only include the signal path between the signal recorder and the connection point of the sensor at the transformer. For the electrical measurement the connection point is the bushing. PD signals which originate far from the calibration point are influenced by the propagation path. This path is unknown and cannot be calibrated. In principle, the same applies for the UHF method, but with a different propagation path. Also, in the UHF measurement PD can be measured in the direct vicinity of the sensor with approx. its actual signal level. Considering distant sources, the electromagnetic waves pass through an unknown complex system before they can be measured at the sensor. A conclusion cannot be drawn between the measured signal and the actually converted energy at the fault by both measurement methods. Therefore, it is difficult to make a statement whether there is a critical or tolerable PD source only by the measured PD level with both measurement methods. A linear correlation between apparent charge and the antenna voltage can be demonstrated in a constant laboratory setup but not for complex structures. Both measured variables theoretically contain the same information. However, some PD sources do not radiate in the UHF range and can only be measured electrically, and electrical signals from PD that are located deep in the winding, are strongly

Andererseits können elektrische Signale von TE, die tief in der Wicklung liegen, stark gedämpft werden (siehe Fig. 1) und an der Messstelle fälschlicherweise zu sehr kleinen scheinbaren Ladungen führen oder sogar vollständig im Rauschen verschwinden. Der Einfluss der TE-Position auf die Amplitude von TE-Signalen wird anhand eines Laboraufbaus untersucht. Als Messobjekt wird ein runder, etwa 1,2 m hoher Tank verwendet, der mit einer Transformatorwicklung und einer von außen in der Höhe verstellbaren TE-Quelle ausgestattet ist. Die Wicklung liegt auf Hochspannungspotential, das untere Wicklungsende ist nicht geerdet. In Fig. 2 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Die TE-Quelle ist auf einer Seite mit Masse verbunden und besteht aus zwei Kupferplättchen, die durch einen Kondensator und einen gasgefüllten Überspannungsgasableiter (ÜsAg) verbunden sind. Diese künstliche TE-Quelle wird verwendet, da sie einen reproduzierbaren, konstanten Ladungsumsatz erzeugt. Die Position der TE-Quelle kann von außen entlang der Wicklung verstellt werden. In Fig. 1 und Fig. 2 sind die an diesem Aufbau gemessenen Pegel der scheinbaren Ladung nach IEC 60270 bei breitbandiger und schmalbandiger Messung und die UHF-Maximalamplitude zu sehen. Wird die Empfindlichkeit von elektrischer mit UHF-TE-Messung verglichen, fällt zunächst auf, dass bei der Kalibrierung am Transformator Unbekannte im Signalpfad bestehen bleiben, die nicht kalibriert werden können. Die Messungen am Versuchsaufbau mit einer pegelstabilen, künstlichen TE-Quelle zeigen, dass sowohl breitbandige als auch schmalbandige elektrische TE-Messungen nach IEC 60270 von der TE-Position entlang der Wicklung stark beeinflusst werden. Die UHF-Messung hängt weniger von der Position entlang der Wicklung, sondern eher direkt vom Abstand TE-Quelle zu UHF-Sensor ab. Obwohl beide Messmethoden die TE-Quelle an allen Positionen entlang der Wicklung detektieren können, lassen beide keinen direkten Rückschluss auf die tatsächlich umgesetzte Energie in der Fehlstelle zu. Vorteil der elektrischen Messung ist die bestehende Norm, die zu anerkannten Prüfpegeln für elektrische Betriebsmittel geführt hat. Wie dieser Beitrag jedoch zeigt, sind diese Prüfpegel im Speziellen für Transformatoren kritisch zu betrachten.

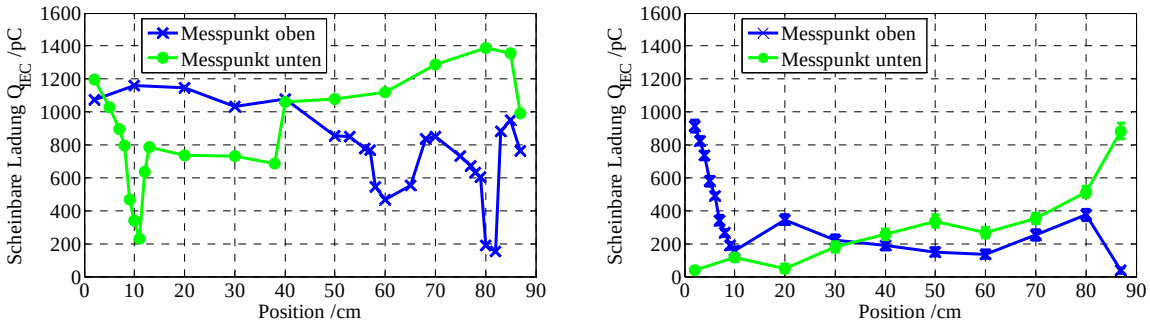


Fig. 1: Links: Breitbandige Messung nach IEC 60270: f_M = 250 kHz, Δf = 300 kHz;
Rechts: Schmalbandige Messung nach IEC 60270: f_M = 1 MHz, Δf = 30 kHz.
Left: Broad band measurement according IEC 60270;
Right: Narrow band measurement according IEC 60270.

damped and lead to small apparent charges at the calibrated measuring point which can be below noise level. The influence of the location of the PD on its electrical signals is determined using a laboratory setup. A cylindrical steel tank is equipped with a winding and an artificial PD source which is adjustable in height. The winding is on high voltage potential, the lower winding exit is not connected to ground. Fig. 2 shows the experimental setup. The artificial PD source is connected to ground on one side and consists of two copper plates connected through a capacitor and a gas-filled discharge tube (ÜsAg). It is used because it provides a reproducible, phase stable, constant charge conversion. The constant charge is given by the product of the capacity and the constant response voltage of the ÜsAg. The PD source is fixed on a threaded rod which can be adjusted in height along the winding. In Fig. 1 and Fig. 2 the measured apparent charge according IEC 60270 with broad band and narrow band measurement and the maximum UHF amplitude is shown. If the sensitivity and calibration of electrical and electromagnetic PD measurement methods are compared, unknowns in the signal path remain unavoidable in both cases. The advantage of the electrical to the electromagnetic measurement is its calibration up to the connection point to the power transformer. Although calibration does not provide the knowledge of the actually converted charge level, a common acceptance level for the apparent charge has become widely accepted, especially for factory routine tests. As this contribution shows, the apparent charge value is less meaningful in electrically complex equipment such as power transformers.

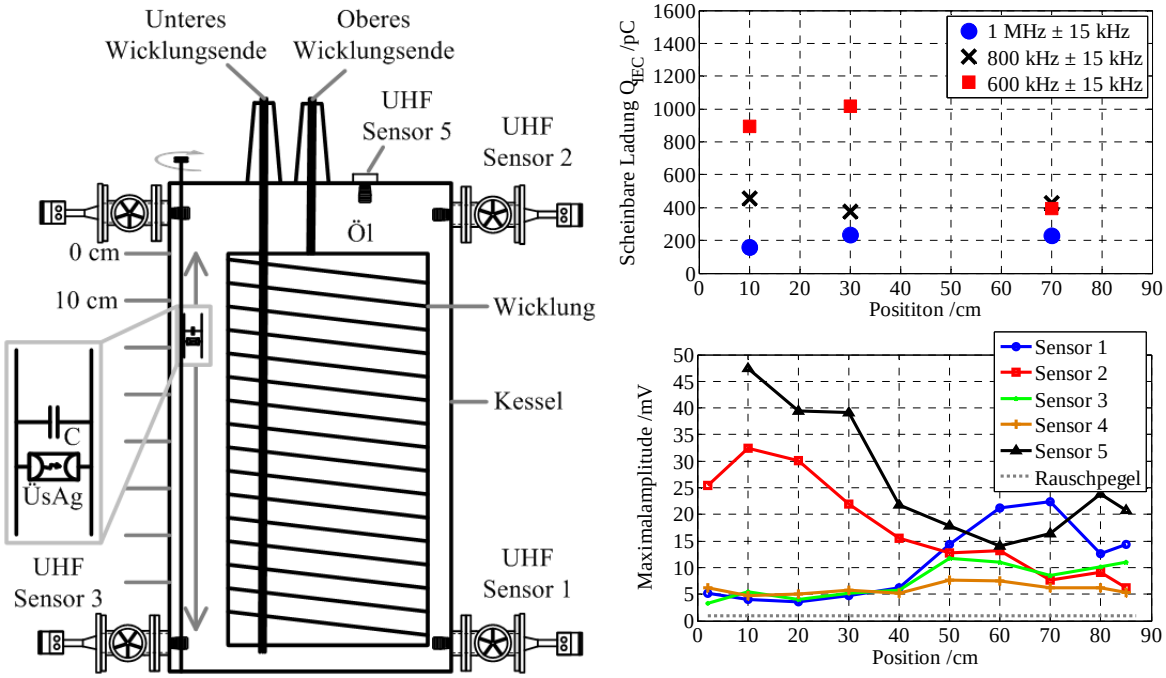


Fig. 2: Links: Versuchsaufbau mit höhenverstellbarer künstlicher TE-Quelle;
Rechts: Schmalbandige Messung nach IEC 60270 bei verschiedenen Mittenfrequenzen f_M und UHF-Messung an fünf Sensorpositionen.
Left: Laboratory setup with artificial PD source adjustable in height;
Right: Narrow band measurement according IEC 60270 with different center frequencies f_M and UHF measurement at five sensor positions.

Einfluss des Elektrodenmaterials auf die elektrische Ölleitfähigkeitsmessung

M. Sc. Farzaneh Vahidi

Das Isolationssystem für Transformatoren hat eine Schlüsselrolle beim optimierten Design und sicheren und langfristigen Betrieb dieser Netzkomponenten. Aufgrund des steigenden Einsatzes der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) und damit verbundenen Mischbeanspruchungen ist das Wissen über das grundsätzliche Verhalten der Isoliermaterialien bei Gleichspannung notwendig. Unabhängig davon, ob eine reine DC-Beanspruchung oder eine Mischfeld-Beanspruchung vorliegt, muss für das vollständige Verständnis der Vorgänge in einem HGÜ-Isoliersystem nicht nur die Permittivität, sondern vor allem auch die Leitfähigkeit aller Komponenten nicht nur hinsichtlich ihrer Größe, sondern auch hinsichtlich des Verhaltens im Laufe des Betriebs bekannt sein. Dies trifft besonders für die Leitfähigkeit von flüssigen Isolierstoffen zu. Diesbezüglich haben die Grundlagen der Leitfähigkeitsmechanismen von unpolaren dielektrischen Flüssigkeiten wie auch die Messung von sehr großen Widerständen, was gleichbedeutend mit der Bestimmung von sehr kleinen Leitfähigkeiten ist, eine zentrale Bedeutung. Dieses Wissen fließt später in die Entwicklung von HGÜ-Isolationssystemen ein.

Genau wie Isolierstoffe sind auch die unter Spannung stehenden Elemente eines Hochspannungsmoduls stets Ansatzpunkte für Optimierungen, sowohl in mechanischer als auch physikalischer Hinsicht. Die Untersuchungen beschreiben den Einfluss des Elektrodenmaterials auf die elektrische Leitfähigkeit von Isolierölen. Die Ermittlung der spezifischen Leitfähigkeit erfolgt hierbei durch einen Gleichspannungssprung, dem das Isolieröl in einer Labor-Messzelle ausgesetzt wird.

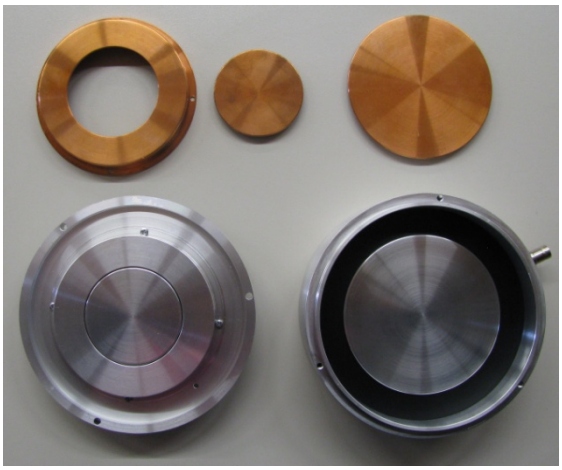


Fig. 1: Plattenförmige Testzelle mit einstellbarem Spaltabstand und verschiedenen Elektrodenmaterialien.
Plate-shaped test cell with adjustable gap and different electrodes.

Influence of Electrode Material on Conductivity Measurements of Insulating Liquids

M. Sc. Farzaneh Vahidi

The insulation system of power transformers is a key topic which has to be taken into account in order to achieve an optimized design and safe long-term operation. The design of feasible insulation for high voltage direct current (HVDC) transformers requires the understanding of field distributions in insulating materials in both AC and DC operation because the transient stresses are dependent on both conductivities, permittivities and also geometry. The steady state DC field stresses are determined by the conductivity of the insulating material which is normally a combination of oil and paper. Therefore knowledge about the conductivity of the oil is of great importance for design and safe operation in DC case.

The complex conduction mechanisms in dielectric liquid lead to an enormous amount of empirical information about the fundamental properties of these materials. For a better understanding of phenomena, which occur during the conduction, different parameter dependencies of oil conductivity can be investigated. Using this information, the basic process occurring in insulating liquid can be understood and this knowledge will be used in the design and optimization of HVDC converter.

In order to calculate the electrical field under all kinds of stresses, the material properties have also to be known. The common metals exposed to noteworthy electric stress inside power transformers are copper (conductors) and aluminum (shields). Stainless steel is a material which is often used in dielectric material test arrangements. In typical arrangements bare metals as well as metals covered with insulators are found.

In this investigation the influence of different bare electrode materials onto the conductivity values of mineral oil and onto their function of time is investigated. The used electrode materials are stainless steel (X5CrNI18-10), copper (Cu-ETP) and aluminum (EN AW - 2007). The insulation oil is a mineral oil (Nytro Lyra X by NYNAS), which is used as insulating oil in transformers as well (Fig. 1).

The behavior of each electrode material is also investigated at different measuring temperatures which shall be representative for the conditions of insulation during transformer operation.

The temperature is an important dependency of conductivity which has direct influence on variation of conductivity in insulating liquid. The dependency of long duration conductivity can be generally described with a bath curve that consists of decreasing and increasing regions. The temperature affects the increasing and decreasing rate of the bath curve.

Die temperaturabhängigen Messungen (Fig. 2) deuten eine Zunahme der Langzeitleitfähigkeit mit der Temperatur unter Anwendung von allen drei unterschiedlichen Elektroden an.

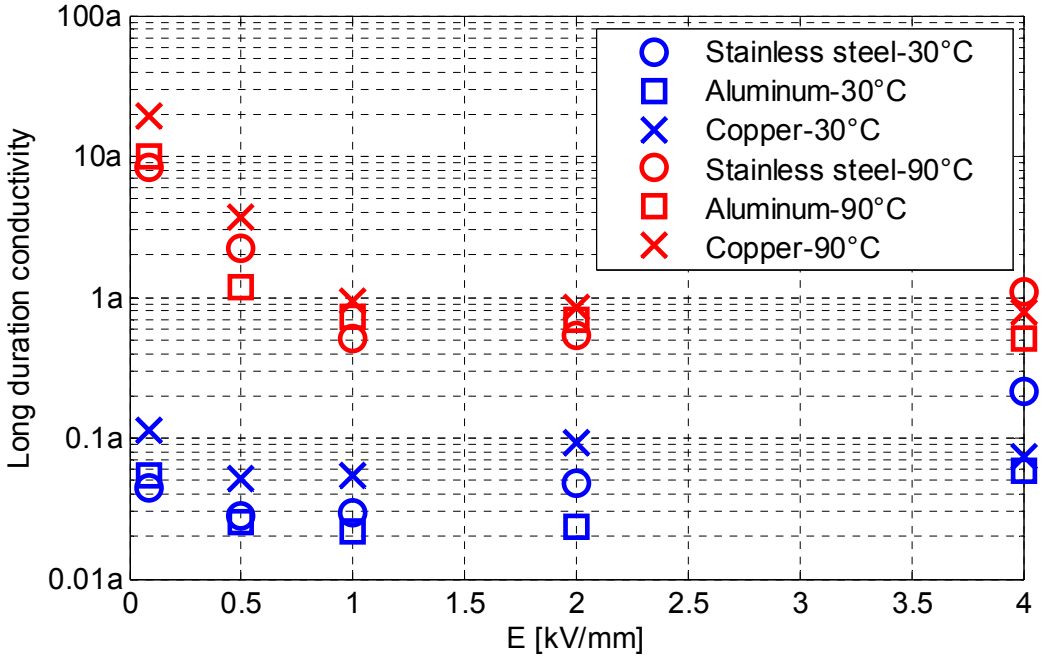


Fig. 2: Temperaturabhängigkeit der Langzeitleitfähigkeit abhängig von der Feldstärke für ein typisches Mineralöl mit verschiedenen Elektrodenmaterialen in einer plattenförmigen Testzelle.
Temperature dependency of long-term conductivity dependent on different field strength for a typical mineral oil measured with different electrode materials in a plate-shaped test cell.

Zunächst wurden alle Messungen für ein Mineralöl durchgeführt. Der nächste Schritt der Forschung wird sich auf weitere Isolierflüssigkeiten konzentrieren. Ebenfalls soll ihr Verhalten bei verschiedenen Testbedingungen beschrieben werden. Diese Messdaten können später für die Erstellung eines empirischen Ölmodells verwendet werden.

The dependency of long duration conductivity on temperature using different electrode materials is shown in Fig. 2.

This investigation is performed for one high grade mineral oil. The next stage of our research will be the investigation of other insulating liquids regarding to their behavior in different test conditions to provide a data base for completing an oil model which can describe the electrical conductivity and its properties.

Neue Methoden zur Vor-Ort-Teilentladungsmessung von Energiekabelanlagen mit großer Länge

Dipl.-Ing. Manuel Wild

Die Energieübertragung in der Mittel- und Hochspannungsebene ist vielfach auf die Verwendung von isolierten Kabeln anstatt des Einsatzes von Freileitungen angewiesen. Als Isolation werden verschiedene Materialien eingesetzt, welche den spannungsführenden Leiter zu seiner Umgebung hin umschließen. Im Fall von Mittel- und Hochspannungskabeln ist die unmittelbare Umgebung ein elektrisch leitender Schirm mit Erdpotential. Dabei herrschen im Isolationsmedium sehr hohe Feldstärken von mehr als 10 kV/mm. Selbst kleinste Veränderungen (Verschmutzungen, Lufteinschlüsse, Deformierungen …), sogenannte Fehlstellen, führen im Bereich der Isolation zu einer lokalen Erhöhung des elektrischen Feldes und somit zu einer stärkeren Beanspruchung des Isolationsmediums. Übersteigt der Wert der Feldstärke die Durchschlagsfestigkeit des Isolationsmediums an der Fehlstelle, so treten Entladungen in Form von kleinen Durchschlägen auf. Ein solches Vorkommen wird Teilentladung (TE) genannt. Auch wenn dabei die Isolationsstrecke nicht vollständig überbrückt wird, so entsteht durch Zerfallsprozesse und thermische Belastung im Bereich dieser Entladung eine dauerhafte Schädigung der Isolationstrecke.

Zur Bestimmung des Zustandes der Isolation von Mittel- und Hochspannungskabeln kann die Teilentladungsmessung eingesetzt werden. Dabei wird durch geeignete Messtechnik bestimmt, ob im Isolationsmedium eines Kabels Teildurchschläge stattfinden (Fig. 1). Messtechnisch wird hierfür der Vorgang der Ladungsumsetzung in der TE-Fehlstelle ausgenutzt. Jeder Teildurchschlag im Isolationsmedium verschiebt eine gewisse Menge an Ladungsträgern. Diese Ladungsverschiebung regt einen Impuls an, welcher sich längs des Kabels, in beide Richtungen weg von der Fehlstelle ausbreitet. Dieser Impuls ist an den Kabelenden messbar und kann zur Detektion von Teilentladungen verwendet werden.

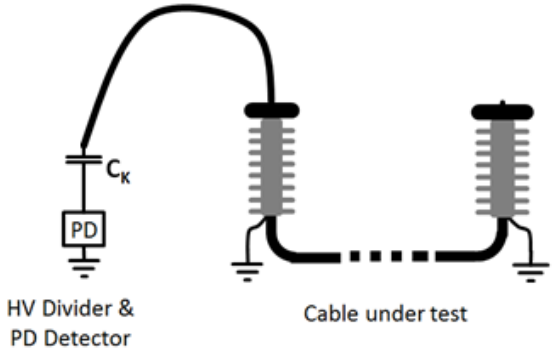


Fig. 1: Einseitige Teilentladungsmessung an einem Kabel.
Single sided partial discharge measurement.

New Methods for Partial Discharge Measurements for On-site Testing of Cable Systems with Long Lengths

Dipl.-Ing. Manuel Wild

The electrical power transmission in the medium- and high voltage level often relies on the use of insulated cable systems instead of overhead lines. As insulation various materials are used which enclose the live conductor from its surroundings. In the case of medium and high voltage cables the environment is the conducting shield on ground potential. Thereby the electrical field strength is up to 10 kV/mm in the insulating medium. Smallest imperfections (moisture, air enclosures and deformations) can lead to local increase of the electrical field strength and therefore more stress for the insulation material. If the value of the electrical field strength exceeds the dielectric strength of the material, small discharges occur in the form of small punctures. This process is called partial discharge (PD). Even if the insulation distance does not fully break down, the small discharges degrade the material due to decomposition and thermal processes.

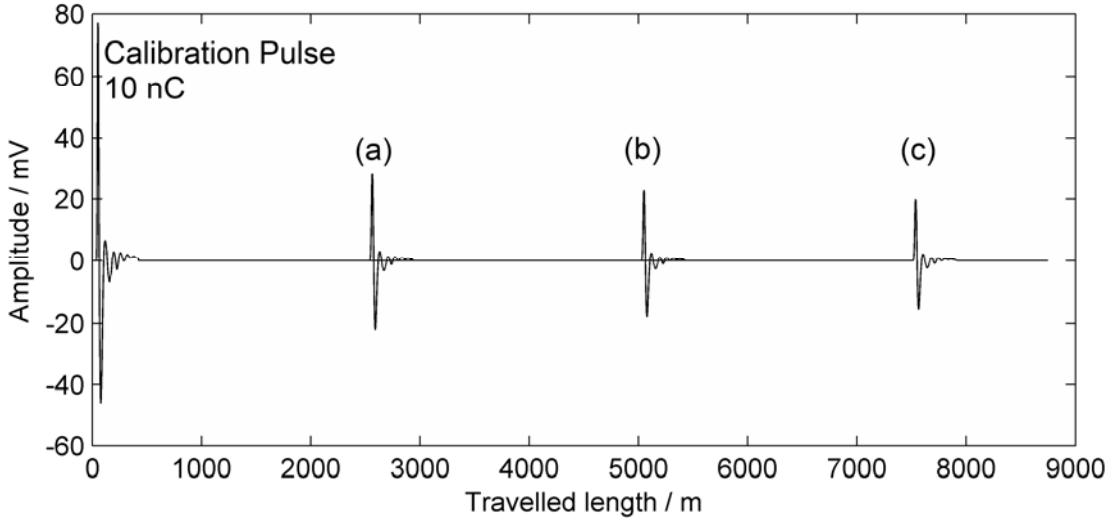


Fig. 2: Kalibrierimpuls mit 10 nC und die gemessenen Pulse im Abstand 2550 m, 5100 m und 7150 m.
Calibration pulse of 10 nC and the measured pulses at the distances 2550 m, 5100 m and 7150 m.

The condition of the insulation in medium and high voltage cables can be determined by the partial discharge measurement. The partial discharges can be detected by applicable measurement techniques. Therefore the transfer of charge in the PD fault can be measured. Every discharge in the insulation medium displaces a small amount of electric charge. This charge displacement stimulates a pulse that propagates along the cable, in both directions away from the fault. The pulses are detectable at the cable ends and can be used for partial discharge detection.

Mit Kenntnis über die Laufzeit des Teilentladungspulses im Kabel, also die Zeitdauer, die ein Puls zum Zurücklegen der Strecke zwischen Entstehungsort und Messgerät benötigt, kann die Fehlerstelle exakt geortet werden. Da der Zeitpunkt der Teilentladung unbekannt ist, kann die Laufzeit vom Entstehungsort zum Messgerät nicht direkt ermittelt werden. In Vor-Ort-Messungen, bei vom Netz getrennten Kabelanlagen, ist das vom Messgerät entfernte Ende in der Regel offen. Der dort eintreffende Puls erfährt eine Reflexion und wird sich zurück in Richtung Messgerät ausbreiten (Fig. 4). Nun kann die Differenz zwischen direktem und reflektiertem Puls (t_A-t_B) ermittelt werden und damit der Ort der Fehlerstelle (Abstand X_{PD} vom Messgerät).

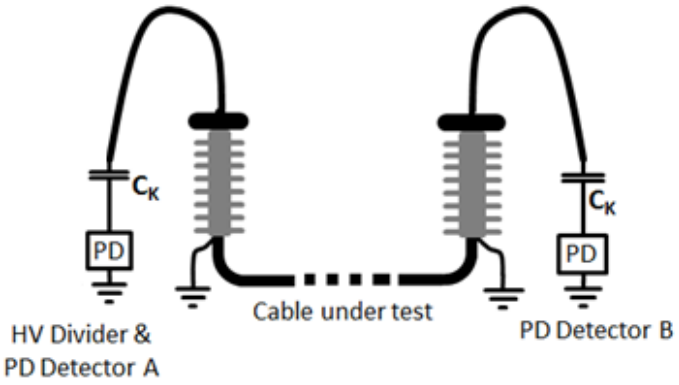


Fig. 3: Zweiseitige TE-Messung mit einem Kabel.
Double-sided PD measurement on a cable.

Bei langen Kabeln ist die messtechnische Erfassung des reflektierten Pulses jedoch nicht immer möglich, da die Pulse bei ihrer Ausbreitung im Kabel eine Dämpfung und Dispersion erfahren. Ist der direkt ausgebreitete Impuls noch über dem Rauschpegel erkennbar, so kann der reflektierte Impuls, welcher mindestens die einfache Kabellänge zu durchlaufen hat, oft nicht mehr detektiert werden. Abhilfe schafft hier eine zusätzliche Messstelle, die zum Beispiel am Ende des Kabels angeschlossen wird (Fig. 3). Durch Synchronisierung können die beiden Messdaten - mit einem zeitlichen Versatz der einfachen Pulslaufzeit zwischen den beiden Messstellen - kombiniert und oben beschriebene Berechnungsmethode angewendet werden. Dies steigert die Empfindlichkeit von Vor-Ort-Messungen und ermöglicht präzisere Aussagen zum Zustand des Kabelsystems.

Using the knowledge about the travelling time of the partial discharge pulse between the PD origin and the measurement device, the fault can be localized exactly. Since the absolute time of the pulse excitation is unknown, the travelling time from the fault location to the measurement device could not be determined directly. In most cases of on-site measurements, the far end of the cable is disconnected from the grid and has an open end (high-impedance) character. Then the far end reflects the incoming pulse and the reflection is detectable at the measurement device on the left side (Fig. 4). Now the time difference of the direct and reflected pulse can be determined (t_A-t_B) and the fault location can be calculated (distance X_{PD} from the measurement device).

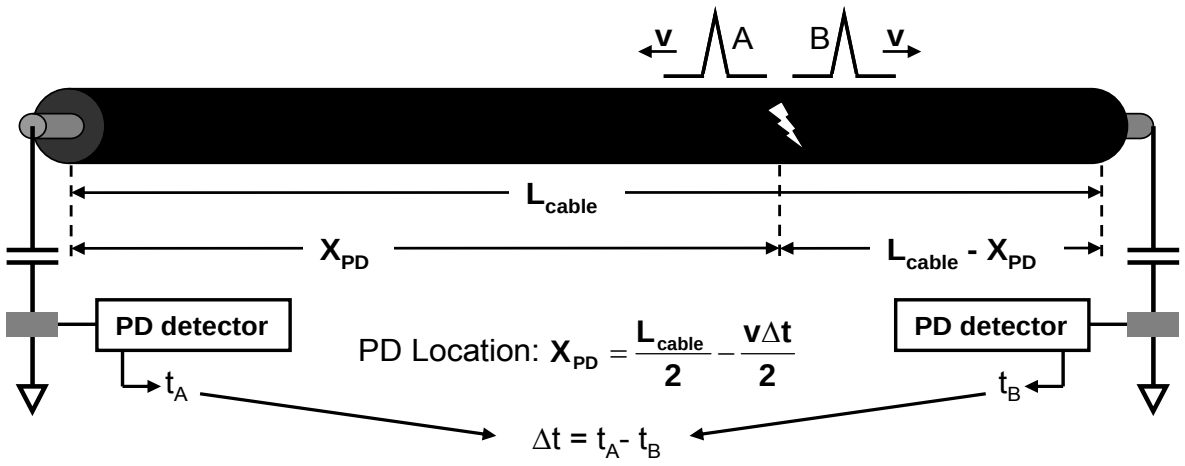


Fig. 4: Zweiseitige Teilentladungsmessung an einem Kabelstück mit Fehlstellenortung durch Laufzeitbestimmung und synchronisierte TE-Detektoren.
Double sided partial discharge measurement on a cable with fault location detection by time domain reflectometry (TDR) with synchronous PD-detectors.

The detection of the reflected pulse on long cables is not always possible, because of attenuation and dispersion for the travelling pulse through the cable. Even if the directly propagated pulse is well detectable, the reflection at the far end could disappear in the noise level of the measurement device. The measurement can be improved by using a second measurement device at the far end of the cable (Fig. 3). Knowing the travelling time through one cable length, the two measurement signals can be combined with a time delay and the same calculation method as mentioned above can be used. This improves the sensitivity of on-site measurements and affords more precise PD measurements at large cable lengths and thereby a better condition assessment.

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

▪ Modellierung eines dreiphasigen Zustandsschätzers mit Berücksichtigung des Neutralleiters

M. Sc. Ahmad Abdel-Majeed

Die derzeitige Entwicklung in der Energieversorgung ist geprägt durch eine starke Zunahme variabler dezentraler Energieerzeugungsanlagen, stationärer Speichersysteme und Elektrofahrzeuge. Davon werden einige 1-phasig, andere 3-phasig an das Netz angeschlossen. Aufgrund des unsymmetrischen Anschlusses einzelner Haushalte und Photovoltaikanlagen wird das Niederspannungsnetz unsymmetrisch belastet. In der Regel wird das Netz als Vierleitersystem – drei Phasenleiter und ein Neutralleiter – betrieben. Die Betrachtung des Stromflusses im Neutralleiter ist entscheidend bei der Qualitäts-, Sicherheits- und Verlustanalyse. Der optimale Betrieb von Stromnetzen erfordert ein Analysetool, welches den aktuellen Zustand des Netzes bestimmt und dessen Reaktion auf zukünftige Laständerungen vorhersagen kann. Im Allgemeinen werden Lastflussberechnungen zur Netzanalyse verwendet. Für Echtzeituntersuchungen sind diese jedoch nicht geeignet, da sehr präzise Last- und Erzeugungsdaten für jeden Netzknoten benötigt werden. Die dafür notwendige Messinfrastruktur stellt keine wirtschaftlich sinnvolle Lösung dar. Eine weitere verlässliche und präzise, dafür jedoch wesentlich kostengünstigere Alternative für Niederspannungsnetze ist die Zustandsschätzung.

Die Zustandsschätzung ermöglicht den Netzzustand auf Basis verschiedener Messdaten mit unterschiedlicher Ungenauigkeit zu ermitteln und die Fehler in Messaufbau und Netzwerktopologie zu identifizieren.

Ziel der Zustandsschätzung ist es, die Differenz zwischen den gemessenen Werten und den berechneten Schätzwerten zu minimieren. Verwendet wird dabei die Weighted Least Square Methode (WLS-Methode). Mithilfe des Prinzips der Äquivalenzstrommessung wird das Zustandsschätzungsverfahren für das dreiphasige System unter Berücksichtigung des Neutralleiters abgeleitet. Um die Berechnungszeit zu verkürzen, wird die Jacobi-Matrix nur für die erste Iteration berechnet, für alle weiteren Iterationen durch Umwandlung der Zustandsgrößen von Betrag und Phasenwinkel in Wirk- und Blindanteil der Spannung konstant gehalten.

Fig. 1 zeigt den Berechnungsablauf der Zustandsschätzung für ein dreiphasiges Vierleitersystem.

Modelling of Three Phase State Estimator with Consideration of the Neutral Conductor

M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed

The current development in the power systems is characterized by a rapid expansion in integration of DG (Decentralized Generation) units, stationary storage systems and electrical vehicles. Based on their power capacity, these loads and generators are connected either single-phase or 3-phase to the grid. This leads to a significant asymmetry in the distribution grids especially in the low voltage level. Because of asymmetry between the phases, the distribution grid is typically built up as a three phase - four wire system. The analysis of the current in the neutral conductor is important for the quality, safety and losses analysis. The focus of this research is the development a three-phase four wire state estimation for low voltage grids.

The optimal operation of power systems requires an analysis tool which determines the current state of the network and can predict its response to loads changes. Power flow calculations are mainly used for grid analysis. However, power flow calculations are not suitable for real-time analysis in LV grids because very accurate load and generation data are required for each node, and the required measurement infrastructure is not an economically viable solution. A more reliable and accurate alternative for LV grids, at much lower costs, is the state estimation algorithm based on WLS (Weighted Least Square) method. It has the ability to determine the network condition based on a variety of different measurement data with different uncertainties. It is also able to identify the error in the measurement setup and network topology changes.

The objective of the state estimation based on the WLS method is generally to minimize the difference between the measured values and the calculated state variables. In this research, a new current based state estimation algorithm based on the principle of equivalent current measurement transformation will be developed. The calculation time can be shortened through converting of the state variables of the magnitude and phase angle into real and imaginary components of the voltage. As a result the Jacobian matrix is calculated for the first iteration only and held constant for the next iterations.

Fig. 1 shows the calculation process of the developed three phase state estimation algorithms for four wire system.

The state estimation results can be used for DMS (Distribution Management Systems). Thereby enabling new control possibilities for PV-Units or stationary energy storage units, these control possibilities needs to know the network state at every node which is determined through the three phase state estimation algorithms. These applications, their functionalities and use are shown in Table 1.

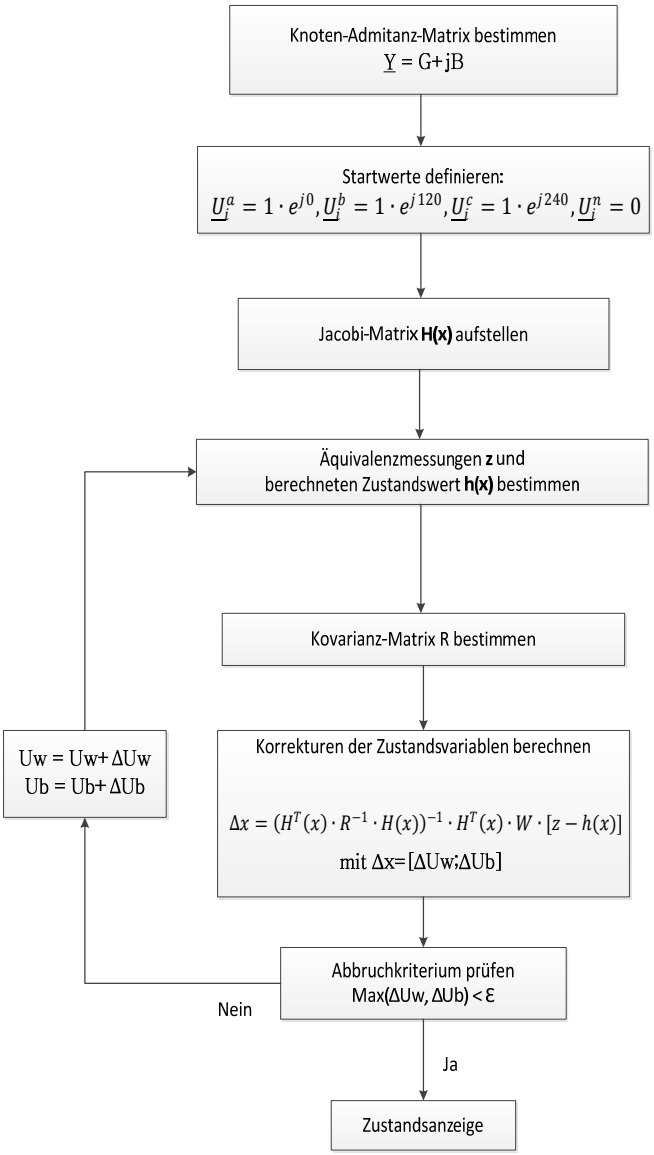


Fig. 1: Flussdiagramm der dreiphasigen Zustandsschätzung.
Flow diagram of the three phase state estimation.

Die Zustandsschätzung kann in Niederspannungsnetzen als Verteilnetzmanagementsystem angewandt werden. Dadurch ergeben sich auf Basis der ermittelten dreiphasigen Netzzustände neue Regelmöglichkeiten für Photovoltaikanlagen, stationäre Speicheranlagen etc. Funktionalität und Nutzen dieser Regelmöglichkeiten zeigt Tabelle 1.

Tab. 1: Funktionalitäten und Nutzen fortschrittlicher Verteilnetzmanagement-Anwendungen durch Einsatz von Zustandsschätzung.
Functionalities and benefits of advanced distribution management applications through the use of state estimation.

DMS- Application	Functionality	Use
Asymmetric load flow analysis	Determination of the currents and voltages in the lines and nodes for the entire distribution system, either online or offline in simulation mode.	▪ Improved network observability ▪ Improved equipment utilization ▪ Improved emergeny planning
Fault location	Identification of possible fault locations in the network	▪ Improved efficiency of the crews in the handling of failures ▪ Reduced outage duration (CAIDI) und unavailability (SAIDI) for the customers
Voltage/ Reactive power regulation	Monitoring and control of capacitors banks, voltage regulators and load tap changers to reduce the peak load and system losses	▪ Reduced customer-side demand peak at peak times ▪ Reduced system losses ▪ Improved voltage profile
Remote operation and restoration	Automatic feeder reconfiguration taking account of system operating conditions	▪ Reduced CAIDI and SAIDI ▪ Reduced system losses

Integration von Wärmeerzeugungsanlagen in elektrische Verteilnetze

Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

Wärme- und Kälteanwendungen haben innerhalb Deutschlands über alle Sektoren (Haushalte, Industrie, Gewerbe und Verkehr) einen Anteil von ca. 50 % am Bruttoendenergieverbrauch. Große Teile dieses Energiebedarfs werden bisher durch Gas oder Öl gedeckt. Wird ein Teil dieses hohen Wärmeenergiebedarfs elektrisch gedeckt, erscheint es plausibel, dass im Vergleich zu einer rein elektrischen Betrachtung die simultane Berücksichtigung der Wärmebereitstellung bei der Auslegung und Berechnung von elektrischen Verteilnetzen flexiblere Möglichkeiten des elektrischen Netzbetriebs bzw. der elektrischen Netzplanung bietet.

Soll diese Flexibilität im Sinne elektrischer Netze genutzt werden, beispielsweise um erzeugte Energie aus Photovoltaik lokal durch den Betrieb von Wärmepumpen aufzunehmen, stellen die unterschiedlichen monatlichen Werte einerseits hinsichtlich der erzeugten Energiemenge aus Photovoltaik und andererseits hinsichtlich der benötigten Energiemenge für Raumwärme eine Herausforderung dar. Fig. 1 verdeutlicht den Zusammenhang.

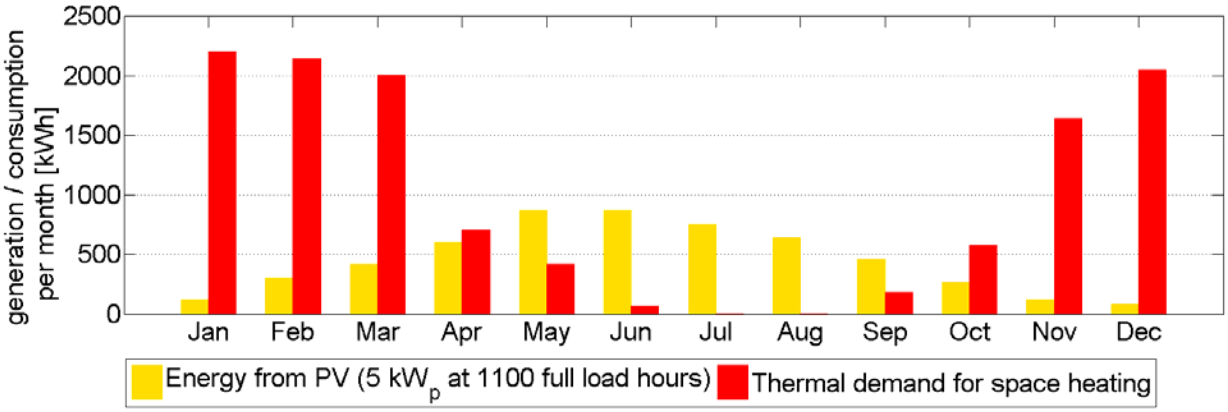


Fig. 1: Exemplarische Darstellung verschiedener erzeugter bzw. verbrauchter Energiemengen - PV: 5 kW_p mit 1100 Volllaststunden, Wärmeenergie für ein typisches Einfamilienhaus.
Exemplary depiction of the different provided respectively consumed amounts of energy - PV: 5 kW_p at 1100 full load hours, thermal energy for a typical detached house (Source: own calculations and energymap.info).

Am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik ist zur Beurteilung der Auswirkungen einer elektrischen Wärmebereitstellung auf elektrische Verteilnetze ein Simulationsmodell entwickelt worden, welches die elektrische Simulation der Verteilnetze mit der thermischen Simulation der Haushalte koppelt.

Integration of Heat in Electrical Distribution Grids

Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

The demand for heating and cooling energy makes up for approximately 50% of Germany's final energy demand across all sectors (households, industry, trade and traffic). So far, the major part of this demand is covered by gas or oil. If parts of this demand are covered electrically, it seems plausible, that compared to an exclusively electrical view, more flexible possibilities for the operation and planning of the grid arise when considering the thermal heat demand simultaneously with the design respectively the calculation of power grids.

To take advantage of this flexibility for the grid, e.g. to use the energy produced by photovoltaics in order to operate heat pumps, the different monthly amounts of energy produced by photovoltaics on the one hand side and energy consumed for space heating on the other hand side are a challenging fact. Fig. 1 illustrates this relationship.

At the Institute of Power Transmission and High Voltage Technology a simulation model has been developed in order to assess the impact of an electrical provision of heat on electrical distribution grids by coupling the electrical simulation of distribution grids with the thermal simulation of households.

	week 1	week 2	week 3	week 4	overall
thermal demand	401,5 kWh	124,9 kWh	72,7 kWh	100,7 kWh	699,8 kWh

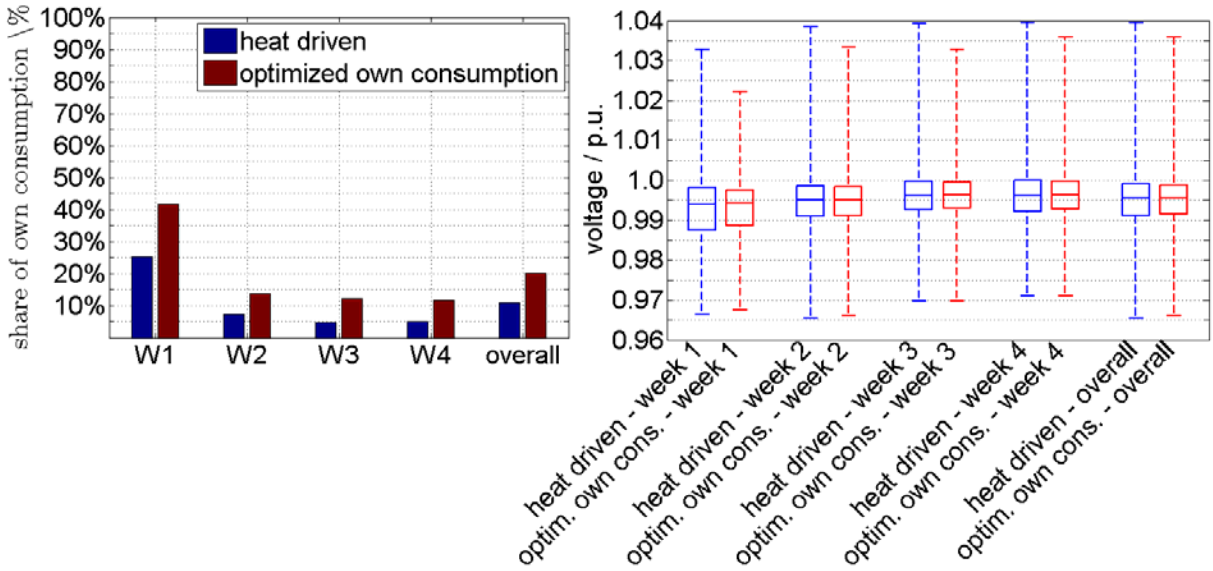


Fig. 2: Ergebnisse einer gekoppelt elektrisch-thermischen Simulation.
Results of a coupled electrical-thermal simulation.
(Source: Brunner et al.: Auswirkungen unterschiedlicher Jahreszeiten auf den Beitrag von Wärmepumpen zur Spannungshaltung, VDE-Kongress 2014).

Fig. 2 zeigt Ergebnisse einer solchen gekoppelt elektrisch-thermischen Simulation. Dargestellt sind die Auswirkungen von Wärmepumpen auf elektrische Verteilnetze für den Monat April.

Es werden zwei Betriebsweisen der Wärmepumpen verglichen: Die wärmegeführte Betriebsweise deckt den Wärmebedarf der Haushalte ohne hierbei von weiteren Größen beeinflusst zu werden. Vergleichend wird eine sogenannte Eigenverbrauchsregelung dargestellt, welche neben der zu jederzeit gewährleisteten Deckung des Wärmebedarfs der Haushalte zusätzlich die lokale PV-Einspeisung berücksichtigt. Zielsetzung hierbei ist es, möglichst viel der lokal erzeugten Energie aus Photovoltaik durch den Betrieb der Wärmepumpen zu nutzen.

Die Auswirkungen eines derartigen Betriebs auf ein exemplarisches Niederspannungsnetz sind auf der rechten Seite von Fig. 2, jeweils differenziert nach Wochen mit verschiedenem Energiebedarf für Raumwärme, dargestellt.

Es zeigt sich, dass ein verhältnismäßig hoher Wärmebedarf wie in Woche 1 („W1“) einen nennenswerten Einfluss auf die Reduktion der Spannungsanhebung durch Photovoltaik hat. Dies erklärt sich direkt durch den höheren Anteil der durch den Betrieb der Wärmepumpen lokal verbrauchten Energie aus Photovoltaik (Eigenverbrauch mit Eigenverbrauchsregelung bei mehr als 40 %).

Werden jedoch alle 4 Wochen im April („overall“) betrachtet, zeigt sich, dass im Mittel der Eigenverbrauch durch Wärmepumpen zwar ca. 20 % mit einer geeigneten Regelung erreicht, die Auswirkungen auf die Spannung jedoch verhältnismäßig gering sind. Dies zeigt sich darin, dass die während der 4 Wochen maximal im Netz auftretende Spannung um weniger als 0,5 % absolut reduziert werden konnte. Erklärbar wird dies direkt durch den geringen Wärmebedarf ab Woche 2.

Allgemein kann vermutet werden, dass sich Wärmepumpen zur Netzstabilisierung nur in der Winter- bzw. Übergangszeit eignen und sich im Sommer nur ein verhältnismäßig geringes Potential ergibt. Es ist darauf hinzuweisen, dass die gezeigten Analysen den Wärmebedarf für Warmwasser nicht berücksichtigen. Künftige Analysen werden Warmwasser daher als zusätzlichen Wärmebedarf berücksichtigen.

Das Projekt ist ein mit dem Stuttgart Research Centre for Simulation Technology (SimTech) assoziiertes Projekt. Die Förderung des Vorhabens erfolgte durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.

Fig. 2 shows results of such a coupled electrical-thermal simulation. It also shows the impact of heat pumps on electrical distribution grids for the month of April. Two modes of operation are being compared: the heat driven mode covers the thermal energy demand of households without being affected by other variables. In comparison to this, an operation mode increasing the share of own consumption is applied ("optimized own consumption"). Besides the coverage of the thermal energy demand of households, this mode of operation incorporates the local power-infeed of photovoltaics. The objective is that the heat pumps consume as much energy as possible generated by photovoltaic systems.

The impacts of such a mode of operation on an exemplary low voltage distribution grid are depicted at the right hand side of Fig. 2, differentiated by weeks with different energy demands for space heating.

It can be seen, that a relatively high thermal energy demand as given for the first week ("W1") does have a considerable impact on the reduction of the voltage rise induced by photovoltaics. This can be directly explained by the higher share of own consumption (own consumption with corresponding mode of operation higher than 40 %).

By considering all four weeks in April ("overall"), it can be observed that although the share of own consumption reaches approximately 20 % for an appropriate control, the impact on the maximum voltage level is relatively low - because the reduction of the maximum observable voltage level within the grid was lowered by less than 0.5 % (absolute). This is explicable as the thermal energy demand becomes relatively low as of week 2.

In general, it can be assumed that heat pumps are only suitable throughout the winter and transitional period for grid stabilization and that the potential is relatively low throughout the summer months. It should be noted, that the shown analyses did not consider the thermal demand for hot water. Future work will therefore consider the additional thermal demand for hot water.

The Institute of Power Transmission and High Voltage Technology (IEH) collaborates with the Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER). The project is associated with the Stuttgart Research Centre for Simulation Technology. It was funded by the Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.

Analyse des Systemverhaltens von Smart Grids und deren veränderte Anforderungen für einen optimierten Verteilnetzbetrieb

Dipl.-Ing. Simon Eilenberger

Von der Gesetzgebung getrieben wird durch den kontinuierlichen Zubau von speziell erneuerbaren Energieerzeugern (EE), technisch gesehen, ein neues Zeitalter der Energieversorgung eingeleitet. Da die photovoltaische Anschlussleistung mit 90 % vorwiegend im Niederspannungsnetz anfällt, ist bei stetiger Integration naheliegend, dass besonders die Verteilnetzstrukturen deutliche Auswirkungen spüren.

Bereits heute führt ausgeprägte lokale, solare Einstrahlung zu rückwärtigen Energieflüssen. Dies ruft hauptsächlich an exponierten Netzknoten Spannungen hervor, welche sonst so nicht entstehen könnten. Speziell im Einspeisefall steigt die Auslastung, aber vor allem die Spannung am Ende der von Einspeisern geprägten Netzstränge deutlich über die im Lastfall höchsten Spannungswerte hinaus.

Folgen des geänderten Systemverhaltens sind u. A. potenzielle Spannungsbandverletzungen in Hochzeiten der Erzeugung. Hinzu kommt eine grundsätzliche Änderung für den Netzbetreiber bezüglich des optimalen Verteilnetzbetriebs, da das klassische Top-Down-Versorgungsprinzip aufgebrochen wird. Annäherungen an normativ vorgegebene Grenzen zwingen Netzbetreiber zu Investitionen in den konventionellen Netzausbau. Diese signifikanten Kosten können aber teils durch den gezielten Einsatz neuartiger Komponenten und Techniken vermieden werden. Gegenstand dieser Arbeit ist unter anderem die Untersuchung genannter Komponenten und Beeinflussungspotenziale, die ein Verzögern und Vermeiden von klassischen, kostenintensiven Netzausbauten ermöglichen können.

Die Möglichkeiten reichen neben Batteriespeichersystemen (BSS) und Spannungslängsreglern (SLR) bis zu regelbaren Ortsnetztransformatoren (rONT) und in der Wirk- und Blindleistung steuerbaren PV-Wechselrichtern. Diese Komponenten können je nach Technologie lokale bis regionale Beiträge zur Spannungsqualität leisten. Der Feldtest eines Batteriespeichers (Fig. 2) in Sonderbuch zeigt, dass ein BSS Energiemengen aus kritischen Tageszeiten verlagern und diverse lokale Optimierungen vornehmen kann. Im selben Netz ermöglicht der rONT durch Variation des Übersetzungsverhältnisses eine Netzentkopplung. Eine Optimierung der Spannung, abhängig von der Reglerart, auch Anpassungen an Lastsituationen im unterlagerten NS-Netz, sind möglich. Durch eine Abregelung der solaren, eingespeisten Jahresenergiemenge um bis zu 5 % könnte eine signifikante Erhöhung der Aufnahmekapazität für PV-Anlagen erzielt werden. Die genannten Komponenten und Techniken könnten also auch bei konstanter Spannungsbeeinflussung das Integrationspotenzial von EE-Anlagen in bestehenden Netzstrukturen erhöhen.

Analysis of the System Performance of Smart Grids and their Changing Requirements for an Optimized Distribution Network Operation

Dipl.-Ing. Simon Eilenberger

Pushed by legislation, the continuous expansion of renewable energy sources in Germany leads to a new era of decentralized electrical power supply. Because 90% of connected generation in low voltage grids is photovoltaic, it is easy to understand that there is a big influence on the low and middle voltage grid.

It can already happen today, that a regional high solar irradiation is reversing the load flow in the lower grid-levels changing the behaviour from a consumer to a power supplier. Because of these reversed load flows the voltage deviations increases significantly at the outer nodes, how would have never been happened before. At least in case of generation the voltage at the feeders rises to values barely not exceeding voltage limitations but being much higher than ordinary voltage levels at the substation in case of consumption.

Consequences of these changed load flows and voltage conditions are potential violations of voltage band limitations during peak generation periods. Over and above changing requirements for an optimized distribution network operation have to be faced by the network operator because of fundamental changes to the classical top-down supply principle. The resulting load flow fluctuations induced in the grid are driving the distribution network more often into exceed the voltage limits, enforcing sumptuous capital expenditures for grid operators in terms of a system expansion. But could they be possibly avoided or postponed by adding novel components and techniques into the distribution grid scenery? Subject of this work is amongst others the analysis of these grid components and influencing methods, which are possibly able to delay or even avoid classical, cost intensive grid reinforcements.

Potential technologies to be considered are battery energy storage systems (BSS), voltage regulation transformers, controllable distribution transformers (rONT) and PV inverters which could make a contribution to power quality / voltage stability issues by providing (re-) active power management services. Depending on the technology the components contribute either local or regional to the voltage quality. The field test of a BSS (Fig. 2) shows the capability to shift energy and perform local voltage quality optimizations. In the same grid a rONT optimizes the voltage levels, even depending on load flow conditions via changing the transformation ratio in active operation. By limiting the yearly PV infeed energy by 5% a significant increase of the PV intake capacity can be achieved. All components or methods (Fig. 1) can participate in influencing the voltage bands in their own specific way that physical limitations to a distribution grid operation are not exceeded increasing the overall intake capacity.

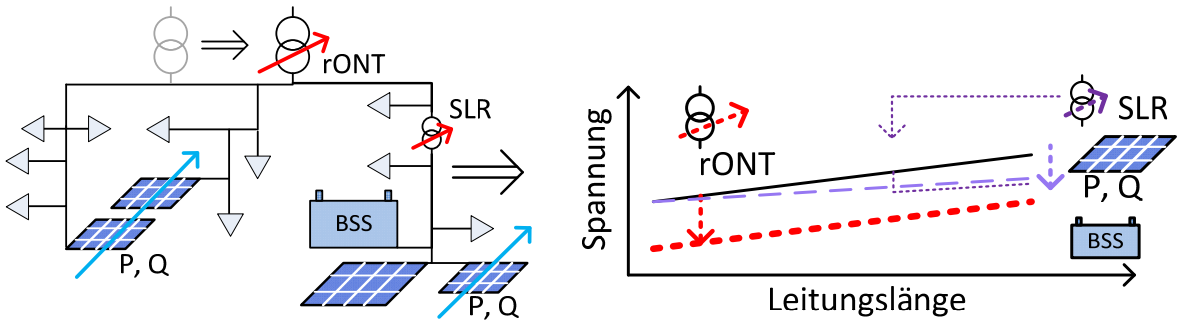


Fig. 1: Schematische Darstellung eines Niederspannungsnetzes mit PV-Einspeisern sowie innovativen Netzkomponenten und deren Wirkungsweise.
Schematic illustration of a distribution network with PV devices and innovative network components and their potential effect.

Intelligente Regelsysteme für die aktiven Netzteilnehmer maximieren den Netznutzungsgrad und können die Ausbaukosten für klassischen Netzausbau weiter signifikant reduzieren oder sogar vermeiden.

Fig. 1 zeigt eine Kombination der beschriebenen Maßnahmen. Mit der Entwicklung des sog. Spannungslängsreglers (SLR) können in Zukunft einzelne Stränge bzw. Abgänge von Ortsnetzstationen entkoppelt werden. Diese Entkopplung kann von Vorteil sein, wenn sich einzelne Netzabschnitte durch ein gegensätzliches Verhalten zum restlichen Netzgebiet unterscheiden. Eine derartige Entkopplung ist also nur notwendig, wenn die zulässigen Spannungsbänder durch besondere Last- oder Erzeugerverhältnisse beeinflusst werden. Diese Inhomogenität innerhalb einer Ortsnetzstation hat den Einsatz eines rONTs im besagten Falle verhindert, da dieser nicht abgangsweise Spannungslevel verändert, sondern das gesamte darunterliegende Netz beeinflusst. Die Entkopplung kann jetzt den Einsatz eines rONT an der problematischen Ortsnetzstation ermöglichen, da der effektiv nutzbare Stellbereich vergrößert wird und so ein technisch und finanziell sinnvoller Betrieb ermöglicht wird. Fig. 2 zeigt eine durch Simulation ermittelte Parametrierung des rONTs für das Teilnetz „Kirche“ im Ortsnetz Sonderbuch. Die Kennlinie passt die Spannung an der Niederspannungssammelschiene an den Leistungsfluss durch den rONT an und wirkt so einer Spannungsveränderung entgegen. Die verwendete Methodik zur Ermittlung dieser Kennlinie ist allgemein anwendbar und ermöglicht eine Parametrierung für eine Vielzahl an Netzen. Mit Hilfe von repräsentativen Niederspannungsnetzen, die aus der Datenbasis der Netze BW erzeugt wurden, können im nächsten Schritt Aussagen für eine größere Teilmenge elektrischer Netze getroffen werden, da die „Referenznetze“ – die Repräsentanten der Clustergruppe – zahlreiche Eigenschaften der untersuchten Netze verkörpern.

Die angerissenen Untersuchungen zeigen Potenziale neuartiger Technologien, die für eine Energiewende „aus dem Verteilnetz“ heraus teils notwendig sind. Deswegen müssen schon heute Modellregionen analysiert werden, um bereits bestehende Probleme zu verstehen, zukünftige Anforderungen an intelligente Netze zu identifizieren und mit dem gewonnenen Wissen einen effizienten Übergang zum intelligenten, aktiven Netz entsprechend schneller und effizienter zu gestalten.

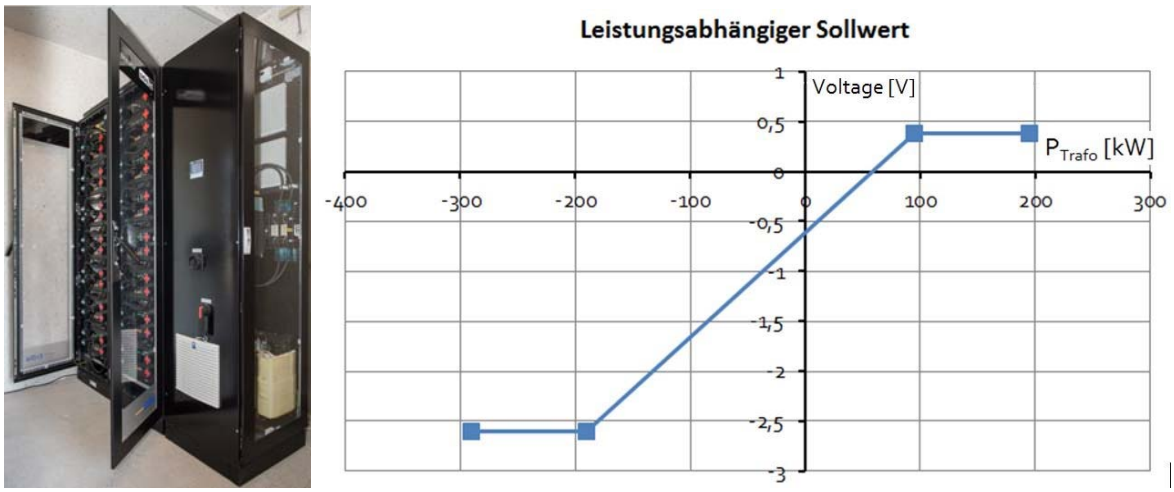


Fig. 2: Batteriespeichersystem (BSS) in Sonderbuch,
Regelkennlinie: lastflussabhängige Sollwertanpassung des rONTs (rechts).
Battery storage system (BSS) in Sonderbuch,
Characteristic curve: load depended control algorithm of the rONT (right).

Fig. 1 shows a combination of the described actions. With the development of the voltage controller (SLR) a decoupling of single lines and feeders can be achieved. This decoupling yields advantages for parts of the grid which do not behave similar to the rest of the distribution grid or behave oppositional. Therefore a decoupling like this is only necessary if the voltage limitations are close to be exceeded by special load or generation conditions. This described inhomogeneity within the distribution substation prevented the usage of a rONT because the rONT adjusts the voltage levels for all feeders connected to the low voltage bus bar in the same way. The decoupling therefore enables the usage of a rONT at the problematic distribution substation because the effectively usable controlling range gets increased and therefore a technically and economically reasonable operation can be achieved. Fig. 2 shows a calculated parameterization within a simulation for the subnetwork “Kirche” in the low voltage grid Sonderbuch. The characteristic curve adjusts the voltage at the low voltage bus bar accordingly to a power flow through the transformer and antagonises voltage variations. The used methodology to determine the characteristic curve is generally applicable and facilitates a parameterization for a variety of low voltage grids. With the help of representative low voltage grids which were generated from the database of the Netze BW, in a following step it is possible to generate statements for a larger amount of grids because these reference grids typify the characteristics of many grids.

The marked out researches allow a glance at the potential of this new technologies which are of immense value for an energy revolution “out of the distribution grid”. Therefore, the necessity of analysing exemplary regions exists already today in order to understand existing problems, identify future requirements in smart grids and finally, with this knowledge, to shape a fast and highly efficient transition to a intelligent, active grid.

Optimale Betriebsführungskonzepte von HGÜ-Strecken

Dipl.-Ing. Katharina Frey

Die angestrebte Energiewende in Deutschland bringt einen großen Ausbau der Windenergie im Norden Deutschlands mit sich. Diese Verlagerung der Energieerzeugungsanlagen weg von den eigentlichen Lastzentren führt dazu, dass das Übertragungsnetz wesentlich mehr Leistung transportieren muss und damit stärker beansprucht sein wird. Die Abschaltung der Atomkraftwerke und der stetige Ausbau der erneuerbaren Energien werden häufiger zu Engpässen im deutschen Übertragungsnetz führen. Dies kann zu Überlastungen der Betriebsmittel führen.

Eine mögliche Gegenmaßnahme ist das Herunterregeln der Windenergieanlagen zu windstarken Zeiten, was jedoch dem ursprünglichen Ziel der Energiewende entgegensteht. Ansonsten kann ein großflächiger Netzausbau die sichere und zuverlässige Energieversorgung gewährleisten. Somit ist der Netzausbau von den Netzbetreibern vorgesehen. Der Transport der Leistung aus dem Norden Deutschlands in den Süden kann auch über Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) erfolgen.

Ein entscheidender Vorteil dieser Technologie ist, dass die Übertragung über weite Strecken verlustärmer ist als die herkömmliche Drehstromübertragung. Zudem kann unter der Verwendung von selbstgeführten Umrichtern die zu übertragene Wirkleistung exakt eingestellt und zusätzlich die Blindleistung durch die Konverterstationen dem AC Netz zur Verfügung gestellt werden. Dies bringt es mit sich, dass die Leistungsflüsse unabhängig voneinander vorgegeben werden können. Hierfür müssen jedoch die Leistungssollwerte ermittelt werden und an die Steuerung der Umrichter übergeben werden.

Die Forschung in diesem Gebiet beschäftigt sich unter anderem mit der Bestimmung dieser Sollwerte, um die HGÜ möglichst effizient und optimal innerhalb eines synchronlaufenden Netzes zu betreiben. So können diese Sollwerte zum Beispiel direkt an die Windprognose gekoppelt werden. Die zu übertragene Leistung wird in diesem Fall durch einen Fahrplan vorgegeben, abhängig von der aktuellen Windprognose eingestellt und durch weitere Größen des Netzverbundes ermittelt. So wird bei starkem Wind und einer hohen Einspeisung automatisch mehr Energie transportiert, als bei wenig Wind.

Demnach kann die Entlastung der Drehstromleitungen als Zielgröße für den optimalen Betrieb angesetzt werden, so dass die gesamte Windenergie genutzt werden kann und keine Windenergieanlagen heruntergeregelt werden müssen.

Gleichzeitig können über die ursprüngliche Sollwertvorgabe weitere Größen optimiert werden. So kann das Netz möglichst verlustarm betrieben werden oder die Stabilität des AC-Netzes verbessert werden.

Optimal Operation Strategies of HVDC-Links

Dipl.-Ing. Katharina Frey

The energy turnaround in Germany includes a large expansion of wind energy in the North of Germany. This shift of power plants away from the actual load centers causes that transmission networks have to carry much more power and thus need more capacities. The shutdown of conventional nuclear power plants and the constant expansion of renewable energy will lead to bottlenecks in the German transmission system. This can result in overload of equipment and has to be prevented.

A possible countermeasure is the down-regulation of wind turbines during strong wind periods, but this is contrary to the original purpose of the energy policy. On the other hand, a large-scale network expansion can ensure the safe and reliable energy supply. Thus, the network expansion is planned by the network operators and includes high voltage direct current transmission lines (HVDC) to transport the power from Northern Germany in the South.

A key advantage of this technology is that the transmission over long distances evokes fewer losses than the conventional three-phase transmission. In addition, under the use of self- commutated converters, the transmitted active power can be regulated independently in each link and additionally the reactive power can be provided by the converter stations to the AC grid. This has the advantage that the power flow can be set exactly. For this, however, the power reference values must be determined and passed to the control system of the converter stations.

The research in this area is now dealing with the estimation of these set points for the HVDC to operate in an efficient and optimal way. One possibility to estimate these set points is to couple them directly to the wind forecast. The required power is given in this case by a schedule, depending on the current wind forecast and determined by other factors of the meshed network. Thus more energy is automatically transported during strong winds and high infeed compared to times with lower wind. Thus, the relaxation of the three-phase lines can be set as a target for the optimal operation, so that the entire wind energy can be used and no wind turbines have to be turned down.

Weiterhin unterstützt die Blindleistungsbereitstellung der Umrichter die Spannungshaltung. Zusätzlich kann das Detektieren von Kurzschlüssen durch die Bereitstellung von Kurzschlussleistung durch den Umrichter verbessert werden. Die Überlastung des Drehstromnetzes wird vermieden, und das ursprüngliche Ziel der Energiewende und die Integration der erneuerbaren Energien wird ermöglicht.

Mit Blick in die Zukunft sollte das gesamte Konzept so ausgelegt werden, dass eine modulare Erweiterung und Anpassung des Steuerungssystems möglich ist.

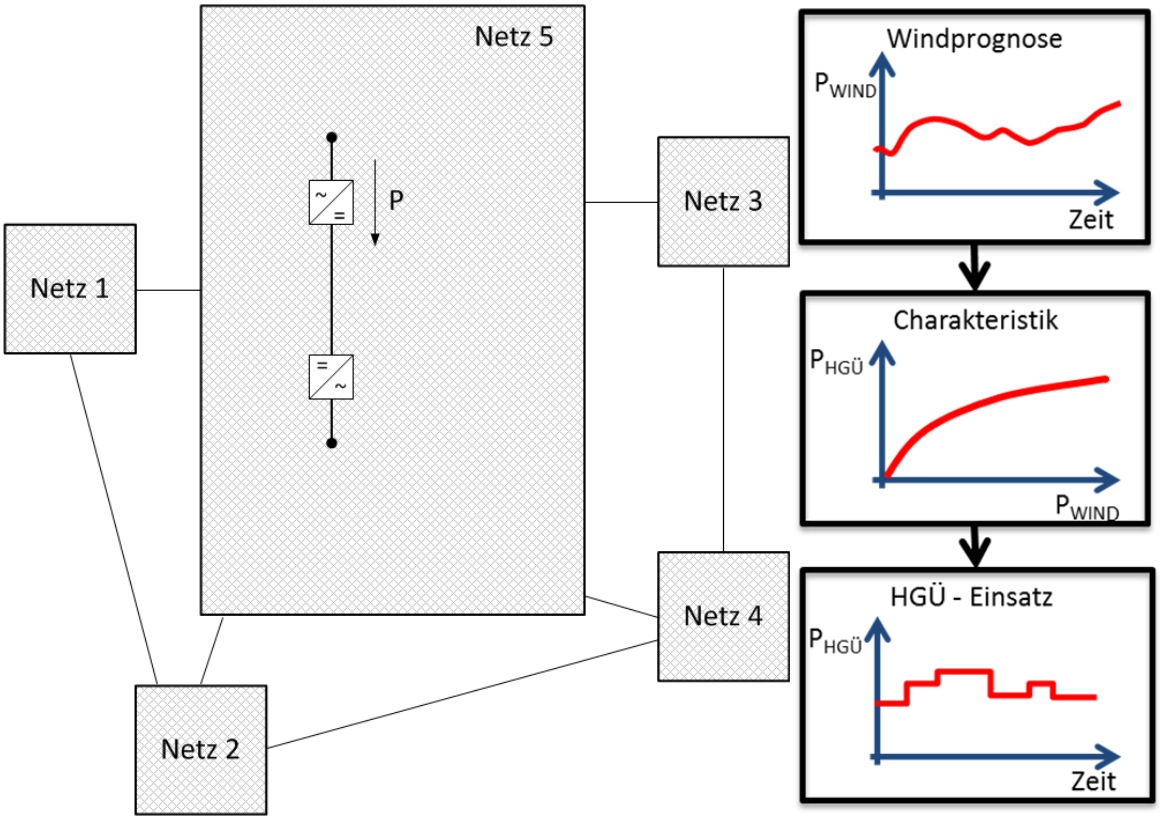


Fig. 1: Integration einer HGÜ-Verbindung in ein Drehstromnetz.
Integration of an HVDC-Connection in an AC Grid.

Fig. 1 zeigt die Integration einer HGÜ-Strecke in ein Drehstromnetz. Es ist dabei ersichtlich, dass die HGÜ-Sollwerte mithilfe einer Übertragungscharakteristik zwischen der Windprognose und der zu übertragenen Leistung auf Basis der Windprognose erstellt werden.

It is also possible to optimize other characteristics by changing the set points. The network can operate with minimal losses or the stability of the AC grid can be improved. Furthermore, the reactive power supply of the inverter supports the voltage stability and the detection of short circuits can be improved through the converter by providing short circuit power. In addition, congestions of the three-phase system can be avoided and the original goal of energy turnaround and the integration of renewable energies can be reached. The whole concept should be designed so that a modular extension and adaptation of the control system is possible.

Fig. 1 depicts the integration manner of a HVDC link in a three-phase system. As the chart shows, the HVDC set points are created using a transfer characteristic between the wind infeed and the transmitted power based on the wind forecast.

Effiziente Lastflussrechnung in Niederspannungsnetzen

Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

Die im elektrischen Netz erwarteten Entwicklungen wie geregelte Photovoltaikanlagen, intelligentes Lastmanagement oder spannungsstützende Wärmeanlagen basieren alle auf der Kenntnis des aktuellen Netzzustandes, insbesondere der gerade herrschenden Spannungen. Soll der Einfluss dieser Anlagen in Simulationen abgeschätzt oder die verwendeten Regelalgorithmen offline optimiert werden, so müssen diese Spannungen anhand angenommener oder gemessener Lasten berechnet werden.

Die Berechnung der Spannungen in Niederspannungsnetzen setzt eine komplexe Lastflussrechnung voraus, bei der viele Vereinfachungen, die im Übertragungsnetz anwendbar sind, nicht mehr gelten. Außerdem macht die schiere Anzahl an Niederspannungsnetzen und die heterogene Struktur eine Berechnung sehr aufwändig. In umfassenden Simulationen des deutschen Stromnetzes werden dabei die Verteilnetze meist als aggregierte Lasten dargestellt und die unterliegende Komplexität ignoriert. Falls, zum Beispiel für Optimierungsaufgaben, doch eine große Anzahl an Niederspannungsnetzen simuliert werden muss, erfordert dies meist schnelle, teure Rechner oder großen Zeitaufwand.

In einem grundlegenden Forschungsprojekt werden daher am IEH Verfahren erforscht, die Lastflussrechnung zu beschleunigen. Dabei wird beispielsweise mit den Methoden der künstlichen Intelligenz versucht, zeitliche Abschnitte der Berechnung durch Clusteranalyse automatisiert zusammenzufassen, um so die wiederholte Berechnung immer gleicher Abschnitte zu vermeiden. Ein weiterer Ansatz ist es, die standardmäßig angewandte Newton-Raphson-Iteration für Lastflussrechnung auf die speziellen Anforderungen der Berechnung von Niederspannungsnetzen mit geregelten Elementen anzupassen.

Die Komplexität der Lastflussrechnung wird stark verringert, wenn die Topologie des betrachteten elektrischen Netzes reduziert wird. Insbesondere können Verästelungen aufgelöst und die Knotenanzahl in Strahlennetzen auf drei reduziert werden, ohne stark an Genauigkeit bei der am äußeren Knoten anliegenden Spannung zu verlieren.

Das Ziel dabei ist immer, eine Möglichkeit zu bieten, die Komplexität, die durch die zunehmende Verbreitung von Photovoltaik- und weiteren Anlagen im Niederspannungsnetz entstanden ist, darzustellen und für umfassende Netzsimulationen in vertretbarer Rechenzeit nutzbar zu machen.

Efficient Load Flow Simulation in Low Voltage Grids

Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

The expected developments in the electric grid like controlled photovoltaics plants, intelligent demand side management systems or voltage-supporting heat pumps are all based on knowledge about the current state of the grid, especially the voltages. If the influence of these installations is to be estimated or the utilized algorithms are to be optimized offline, these voltages have to be calculated using assumed or measured loads.

The calculation of voltages in low voltage grids requires complex load flow simulations, where many simplifications that are valid in transmission grids do not hold. Additionally, the sheer number of low voltage grids and their heterogeneous structure render the calculations even more difficult. In expansive simulations of the German power grid, the distribution grids are hence usually represented by aggregated loads and the underlying complexity is ignored. If, for instance for optimization tasks, a big number of low voltage grids has to be simulated, this mostly requires fast, expensive computers or a long time.

In a research project at IEH, principles and methods for speeding up load flow simulations are developed and evaluated. Amongst other approaches, methods of artificial intelligence research are used to aggregate periods of the calculations using cluster analysis in order to avoid the repeated simulation of similar periods in the considered timeframe. Another approach is the adaptation of the standard Newton-Raphson iterative method to the special requirements of low voltage grids with controlled elements.

The complexity of load flow simulations is highly diminished if the topology of the considered electric grid is reduced. In particular, branches can be decomposed and the number of nodes in straight beam grids can be reduced to three. Using the right techniques, these simplifications barely influence the accuracy of the calculation of the voltages of the outermost nodes, which are usually the most critical.

The overarching goal of this research project is the correct representation of the complex behavior of new elements in the electric grid for extensive grid simulations in an acceptable timeframe.

Optimale Einsatzplanung dezentraler Anlagen in Mikronetzen durch ein Energiemanagementsystem

M.Sc. Mohsen Nemati

Ein Mikronetz ist ein lokaler Verbund dezentraler Energieerzeuger und Verbraucher auf der Nieder- oder auch Mittelspannungsebene. Sie sind flexibel und modular aufgebaut und enthalten eigene dezentrale Erzeuger, Speichersysteme, regelbare Lasten sowie ein Monitoring- und Regelungssystem. Mikronetze werden des Weiteren durch ihre Fähigkeit charakterisiert, sowohl autonom (Inselnetzbetrieb) als auch im Verbund mit einem übergeordneten Netz arbeiten zu können. Dadurch ist eine höhere Zuverlässigkeit und Qualität der Energieversorgung möglich. Weiterhin kann das Konzept des Mikronetzes, abhängig vom Anwendungsfall, eine erhöhte Flexibilität und Effizienz für die Strategie und den Betrieb des Systems bedeuten. Typische Anwendungsfälle sind Krankenhäuser, Universitäten, Militärstützpunkte sowie Industriekomplexe.

Ein Mikronetz-Energiemanagementsystem (MEMS) dient in erster Linie der Optimierung des Betriebs innerhalb des Mikronetzes. Ziel ist es, den Einsatz der dezentralen Generatoren und Speichereinheiten im Hinblick auf Optimierungskriterien zu planen. Der Energieverbrauch muss unter Berücksichtigung der technischen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen gedeckt werden. Dies wird meistens als Unit Commitment (UC) und Economic Dispatch (ED) bezeichnet. Das UC impliziert Entscheidungen über den Status der Einheiten, d.h. ihre An- und Aus-Zeiten, wobei technische Beschränkungen (min. An/Aus-Zeiten) berücksichtigt werden. Das UC wird normalerweise in stündlichen Intervallen und Planungshorizonten von Tagen bis Wochen durchgeführt. ED bezeichnet die möglichst wirtschaftliche Verteilung der benötigten, zu erzeugenden Leistung auf die laufenden Einheiten. Die Betrachtungszeiträume variieren für das ED üblicherweise zwischen Minuten und einigen Stunden. Darüber hinaus sollen von Seiten des EMS die Entscheidungen über den Verlauf der Austauschleistung mit dem übergeordneten Netz getroffen werden. Falls verschiebbare Verbraucher an das Mikronetz angeschlossen sind, werden sie gleichfalls vom EMS gesteuert, um einen optimalen und passenden Betriebszustand für das System zu erbringen. Dies wird als Demand Side Management bezeichnet.

Die im vorangegangenen Absatz beschriebenen Eigenschaften, Möglichkeiten und Herausforderungen in Mikronetzen unterscheiden ein MEMS von jenen in herkömmlichen Energiesystemen und machen die Fahrplanoptimierung der Komponenten zu einer komplizierten Aufgabe. Die entscheidenden Ziele der optimalen Betriebsweise verschiedener Mikronetzteile differieren je nach Interessen und stehen eventuell in Konflikt zueinander.

Optimal Operation of Distributed Energy Resources in Microgrids by a Smart Energy Management System

M.Sc. Mohsen Nemati

The microgrid (MG) is a cluster of distributed generators and loads which are connected together in low voltage and medium voltage grids. They are flexible and modularly built and contain decentralized generators and storage systems, controllable loads as well as monitoring and control systems. It is possible to operate the microgrid in two different modes; there is a parallel operation mode when the microgrid is connected with a main grid and an islanded mode; in which the microgrid can operate as isolated system. Hence a higher level of reliability and quality of supply is possible. Furthermore dependent on different cases of microgrid more flexibility and efficiency of the system can be achieved. Typical use cases are applied to hospitals, military regions, university campuses as well as industrial complexes.

The Microgrid Energy Management System (MEMS) is first of all responsible for operation optimization of the system. It schedules the integration of different generators and storage systems into the grid. The aim is to supply the critical loads (energy demand) taking into consideration such aspects as economic efficiency, environmental compatibility and technical constraints. It is generally described as Unit Commitment (UC) and Economic Dispatch (ED). The UC includes solutions on which kind of generators should be in use in appropriate time interval in order to cover the loads under the technical conditions. These decisions take place hourly with a time horizon of days to weeks. ED tries to distribute the necessary energy production in an economic way in compliance with active units. The considered time interval for ED consists of minutes to hours. Furthermore the EMS has to take decisions concerning transmission of electricity from the interconnecting network. If controllable loads exist in the MG, they will be managed from EMS with the aim to optimize the operation of system (DSM).

The mentioned characteristics, potentials and challenges in microgrids differentiate MEMS from the conventional energy systems and make the optimization problem too complicated. The various important objectives of optimum operation differentiate in compliance with perspective of system study or use cases and sometimes they are in conflict with each other. For example one of the goals of system operator can be the avoidance of additional network construction costs, minimization and enhancement of voltage and frequency quality. But the owner of decentralized energy generators, without any care about network, wants to have the maximum profit of his generators; as an example he prefers to operate the generators in maximum efficiency point. The consumers wish to have the higher reliability, flexibility of consumption and of course the lowest electricity bills.

So wäre zum Beispiel das Ziel eines Netzbetreibers, zusätzliche Netzbaukosten zu vermeiden, Netzverluste zu minimieren und die Spannungs- bzw. Frequenzqualität im Mikronetz zu sichern. Für private Besitzer von dezentralen Erzeugeranlagen steht, ungeachtet des Einflusses auf das Netz, der Profit aus dem Verkauf der erzeugten Energie im Vordergrund. Für die Endkunden sind die Höhe der Stromrechnung, die Versorgungszuverlässigkeit und die Flexibilität der Stromnutzung von entscheidender Bedeutung. Diese Optimierungszwecke können dem zufolge von verschiedenen technischen, ökonomischen oder auch ökologischen Aspekten abhängig sein. Fig. 1 zeigt die Mehrdimensionalität des optimalen Systembetriebs.

Die Netzbetreiber verwenden verschiedene Methoden, um UC und ED zu optimieren. Wegen der Komplexität des Problems und der wirtschaftlichen Vorteile, die durch die verbesserten Lösungen entstehen können, wurden erhebliche Anstrengungen zur Lösung dieses Optimierungsproblems unternommen.

Die unterschiedlichen Optimierungsmethoden und Techniken in diesem Bereich können grob in zwei Haupt-Kategorien unterteilt werden: Mathematische Methoden und heuristische Techniken. Erstere Algorithmen werden meist ausgewählt, wenn die Eigenschaften möglicher Lösungen und ihre Nützlichkeit bekannt sind. Ist das nicht der Fall oder ist die Dimension des Suchraums zu groß, wird die Lösung mit mathematischen Algorithmen schwierig, weshalb in diesem Fall zu heuristischen Ansätzen tendiert wird. Diese versuchen, sich dem Optimum mittels zufalls- und wahrscheinlichkeitsabhängigen Mechanismen anzunähern. Eine Gefahr dieser Methoden ist das Finden eines lokalen Optimums, das nicht als Global erkannt wird. Zur mathematischen Kategorie zählen Methoden wie Prioritätsliste, Dynamic Programming, Branch and Bound Mixed Integer Programming, Lagrangian Relaxation und Bender Decomposition. Zur Gruppe der heuristischen Optimierungsalgorithmen gehören naturanaloge Algorithmen wie Particle Swarm Optimization, Ant Colony Optimization und genetische Algorithmen.

Ziel dieser Forschung im Bereich der Mikronetze ist ein intelligentes, flexibles und modulares MEMS zu entwickeln, das den Betrieb des Systems in verschiedenen Zeitbereichen (Sekunden, Minuten, Stunden bis Tage) steuern und optimieren kann. Für diesen Zweck sollen verschiedene der oben erwähnten Optimierungsmethoden für den stationären Fall entwickelt und analysiert werden. Stellvertretend wurden drei Techniken aus den genannten Kategorien ausgewählt, um ihre Anwendung auf das Mikronetz im Detail zu betrachten und die Ergebnisse auszuwerten. Diese Vertreter sind das Mixed Integer Linear Programming, das Dynamic Programming und die Genetischen Algorithmen. Darüber hinaus wurden verschiedene dynamische Modelle und Regelungskonzepte im RMS-Bereich für EE-Komponenten entwickelt, um das Verhalten des Systems in kritischen Fällen und die Reaktion des Regelungskonzepts zu untersuchen. Für ein sicheres und wirtschaftliches MEMS sollen die zentralen und lokalen Steuerungseinheiten in richtiger Weise miteinander gekoppelt werden.

These mentioned optimization objectives can be categorized into three major aspects namely technical, environmental and economic aspects. Fig. 1 shows these important objectives and aspects of MEMS.

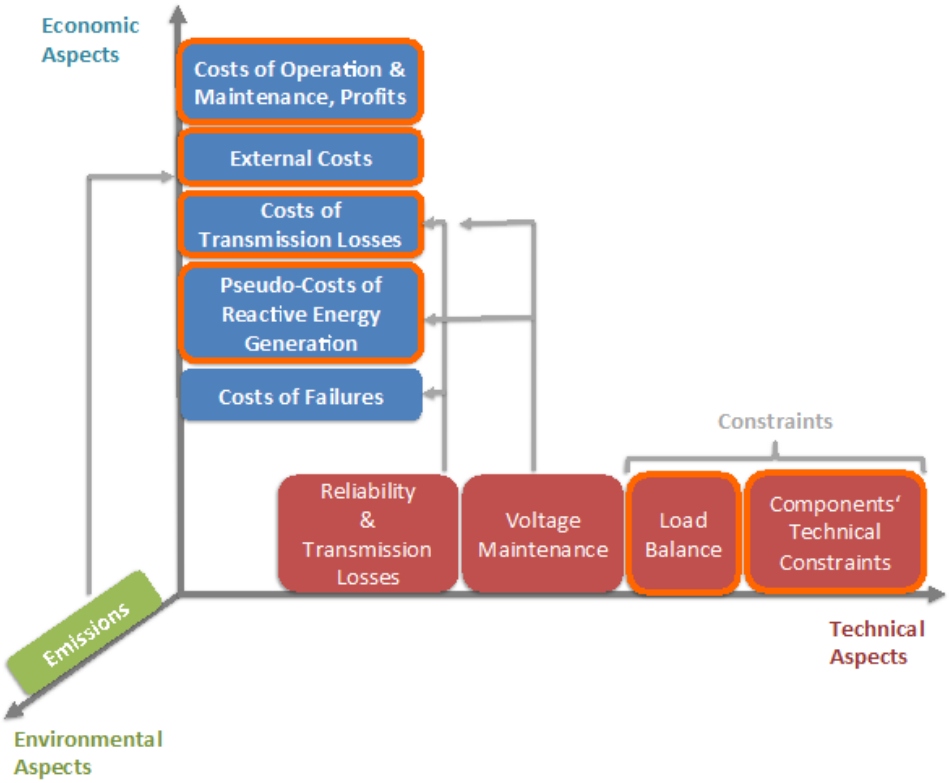


Fig. 1: Berücksichtigte Ziele und Aspekte eines MEMS.
Considered objectives and aspects of MEMS.

The network operators use different methods to optimize the UC and ED. These methods have two main categories; mathematic and heuristic technics. The mathematic methods are just suitable for smaller search spaces. The heuristic methods use the probabilistic searching mechanism to find the optimum. Some Mathematic methods like priority list, mixed integer linear programming, lagrangian relaxation and bender decomposition are frequently used. In heuristic group some methods like particle swarm, ant colony and genetic algorithms are more famous.

The main aim of research in this field is to develop a smart, flexible and modular MEMS, which is able to control and enhance the operation of system in different time scales (seconds, minutes and hours to days). For this purpose some of the above mentioned methods like mixed integer linear programming, dynamic programming and genetic algorithm have been developed, as modular as possible formulated and the results have been evaluated and compared.

Furthermore the dynamic models of renewable energy sources and storages and their proper local control concepts in RMS time scale have been developed and their functionality in critical case studies has been investigated. For reliable and economic MEMS the both central and local management and control units should work in a smart cooperated way to ensure the advantages of microgrids.

Probabilistische Planung von Hochspannungsnetzen

M. Sc. Pascal Wiest

Die zunehmende Erzeugungsleistung der erneuerbaren Energien stellt die Verteilnetzbetreiber aktuell vor die Herausforderung, ihre Netze auf die hohe installierte Leistung an dezentralen Erzeugungsanlagen auszulegen. Aus dieser Entwicklung resultiert eine notwendige Erhöhung der Übertragungskapazität der elektrischen Energienetze. Aufgrund des volatilen Charakters der erneuerbaren Energien bedeutet dies für die elektrischen Netze, dass sie auf jede mögliche Erzeugungsleistung aus regenerativen Energiequellen in Kombination mit jeglichen Lastsituationen dimensioniert werden müssen. Diese Anforderung ist mit den heutigen Planungsrichtlinien nicht mehr umsetzbar, da diese auf definierten Szenarien beruhen, welche mit einer hohen Anzahl an dezentralen Erzeugungsanlagen nicht mehr gebildet werden können.

Am IEH werden probabilistische Ansätze für die Netzplanung untersucht, um das volatile Verhalten der erneuerbaren Energien zu berücksichtigen. Diese Forschung verfolgt das Ziel, eine ökonomisch sinnvolle Netzplanung bei einer hohen Anzahl an dezentralen Erzeugungsanlagen zu gewährleisten. Die probabilistischen Ansätze bieten den Vorteil, dass die elektrischen Energienetze nicht mehr auf einen Extremfall dimensioniert werden, sondern für diese Betrachtung jegliche Betriebsfälle berücksichtigt werden. Mithilfe des verwendeten probabilistischen Ansatzes wird die Auftrittswahrscheinlichkeit jedes Betriebszustandes und der daraus resultierenden Auslastung des elektrischen Netzes berechnet.

Nach den gültigen Planungsgrundsätzen wird das Hochspannungsnetz mithilfe von deterministischen Auslegungsszenarien, einem Starklastfall und einem Rückspeisefall, dimensioniert. Im Starklastfall wird überprüft, ob eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie gewährleistet ist, und im Rückspeisefall, ob die Einspeiseleistung, bei gleichzeitiger Schwachlast, abgeführt werden kann. Diese deterministischen Auslegungsszenarien werden auf Basis der Leistungsmessungen an den Übergabestellen zum Mittelspannungsnetz ermittelt. Besonders im Rückspeisefall einzelner Mittelspannungsnetze bildet die Wahl eines Szenarios die Realität nur ungenügend ab, da nicht sichergestellt werden kann, dass dieses Szenario für jedes Betriebsmittel die maximale Belastung darstellt.

Probabilistic Planning of the High Voltage Grids

M. Sc. Pascal Wiest

The additional expansion of the renewable energy sources (RES) poses a challenge for system operators when dimensioning their power grids. As a consequence from the previous development, there is a need to increase the transport capacity of the distribution grid. The volatile character of RES reveals new requirements regarding the expansion of the grid. This means that the grids have to handle with every feed-in of RES in combination with every load situation. Due to the pre-defined scenarios for grid planning, this requirement is incompatible with the actually valid planning guidelines. Research at the IEH in this subject area aims at new probabilistic approaches for grid expansion planning (GEP) to deal with the high amount of RES. This research aims to provide an economically reasonable grid planning. One important advantage of the probabilistic approaches is that the GEP considers every state of the system and not just extreme scenarios. As a result of the probabilistic approach, the probability of occurrence of the states is used in the loading of the electric grid.

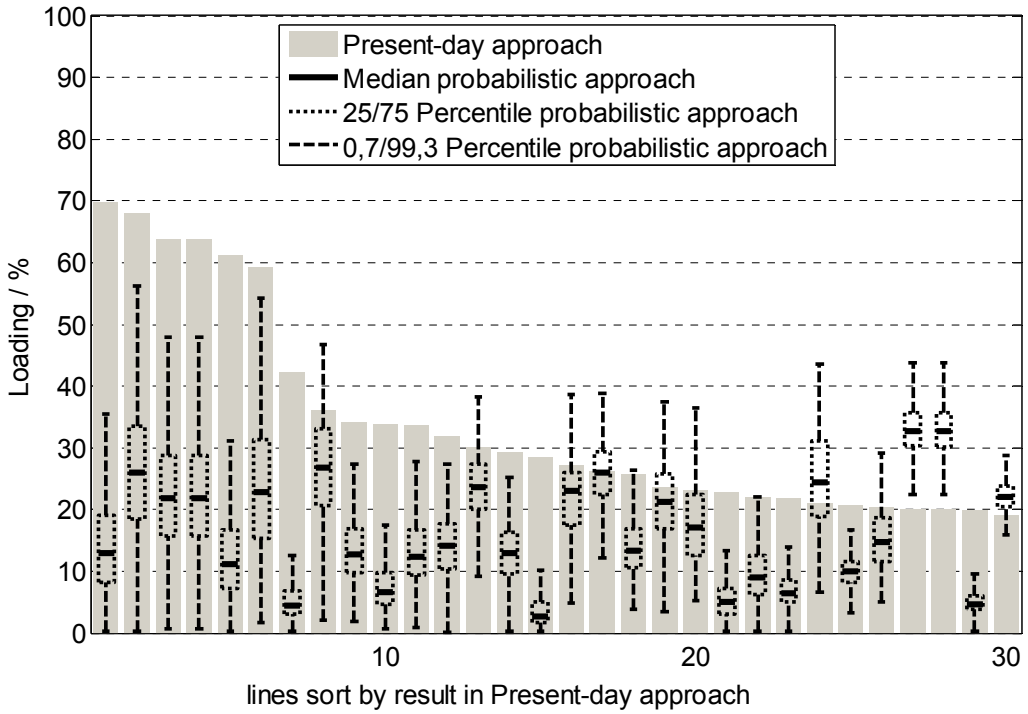


Fig. 1: Vergleich der Leitungsauslastung zwischen dem deterministischen Auslegungsfall und der probabilistischen Netzplanung.
Comparison of the line loading in the case of deterministic and probabilistic grid planning.

In Fig. 1 ist das Ergebnis einer Vergleichsrechnung zwischen den Leitungsauslastungen im deterministischen Auslegungsfall und dem probabilistischen Ansatz der Netzplanung dargestellt. Bei der probabilistischen Methode wird die Leitungsauslastung mit einer 15-minütigen Auflösung über einen Tag berechnet. Dabei werden die zeitlichen Lastverläufe zufällig variiert, um das statistische Verhalten zu berücksichtigen. Die resultierenden maximalen Leitungsauslastungen variieren sehr stark zwischen der probabilistischen Planung und den deterministischen Auslegungsszenarien. Auffällig an Fig. 1 ist, dass die deterministischen Auslegungsszenarien nahezu ausschließlich über dem Median der probabilistischen Planung liegen. Dies ist für die Dimensionierung verlangt, da auch in Extremfällen eine sichere Versorgung gewährleistet sein muss.

Wie Fig. 1 anhand des Boxplots jedoch ebenfalls zeigt, werden die 7 höchsten Leitungsauslastungen im deterministischen Auslegungsfall in der probabilistischen Planung nicht erreicht. Eine Verteilnetzplanung mit den deterministischen Auslegungsszenarien würde diese Leitungen überdimensionieren. Auffallend demgegenüber ist, dass Leitungen mit einer niedrigeren Leitungsauslastung im deterministischen Auslegungsfall in der probabilistischen Planung häufig stärker belastet sind. In diesen Fällen würde die Verteilnetzplanung mit deterministischen Auslegungsszenarien die Leitungen unterdimensionieren. Dies verdeutlicht, dass eine Netzplanung mit deterministischen Auslegungsszenarien bei einem hohen Anteil an dezentraler Erzeugung die Realität nicht adäquat abbildet und damit einzelne Leitungen potentiell über- oder unterdimensioniert werden.

Present-day approaches calculate grid expansion based on pre-defined scenarios, one for high load and one for reversed power flow. In the high load scenario it will be tested whether the supply of electric energy is guaranteed. In contrast to this, it will be tested whether the feed-in of RES can be transported at low load in the reversed load flow scenario. The power values for those scenarios are based on substation measurements from the previous year. The reverse load flow scenario in particular does not properly depict reality due to the high fluctuation and volatile character of the power feed-in from RES.

Fig. 1 shows a comparison of line loadings between the present-day and the probabilistic approach. Therefore, the bar chart represents the higher result of the high load or reversed power flow scenario and the box plot shows the same for the probabilistic approach. In the probabilistic approach, 96 load flows for one day are calculated at a resolution of 15 minutes. With a monte-carlo-method, the loads at the substations are varied independently to build the statistic behavior of the whole system. The results of the two methods vary strongly. For example, the present-day approach calculates higher loadings than the median of the probabilistic approach results in most cases. This is necessary for GEP because even in the extreme scenarios a secure supply with electricity is required.

However, the boxplot in Fig. 1 shows that the loadings of the present-day approach will not be reached in the probabilistic approach for the seven highest loadings. With the present-day approach, this would result in an oversized grid expansion for these lines. On the other hand there are lines with higher loadings in the probabilistic approach compared to the present-day approach. In these cases the GEP would calculate an undersized grid. This illustrates that the present-day approach does not properly depict reality due to the high fluctuation of RES and single lines would not be dimensioned in a proper way.

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

▪ Vorhersage leitungsgebundener Störgrößen in Hoch-Volt-Kfz-Bordnetzen

M. Sc. Philipp Hillenbrand

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Kraftfahrzeugen bringt neue Herausforderungen beim Thema elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) mit sich. Wie in Fig. 1 dargestellt, besteht ein solcher Antriebsstrang aus einer HV-Batterie, einem Inverter und einer elektrischen Maschine. Zur Wandlung der Batteriegleichspannung in eine dreiphasige Wechselspannung werden im Inverter Leistungselektronikschalter eingesetzt. Für eine hohe Effizienz des Inverters werden schnelle Schaltvorgänge mit Schaltzeiten von typischerweise weniger als 1 µs benötigt, auch wenn durch diese hochfrequente Spektralanteile entstehen, die bis in den Frequenzbereich von Funkdiensten reichen. Die Störungen breiten sich über verschiedene Koppelpfade im gesamten Antriebsstrang aus und regen Systemresonanzen an. Die dadurch resultierenden Störspannungen an der Bordnetznachbildung (BNN) können mit einem Messempfänger gemessen werden. Das Messverfahren wird genutzt, um die Komponenten des Antriebsstrangs hinsichtlich ihres EMV-Verhaltens zu charakterisieren. Fig. 2a) zeigt dazu das Spektrum der Störspannung an HV+ der BNN beim Betrieb eines IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) Inverters mit einer Maschinennachbildung als Last. Dieses Störspektrum resultiert aus zwei Komponenten. Zum einen aus dem Spektrum der Anregung (Frequenzanteile der Schaltflanke, vgl. Fig. 2b), zum anderen aus dem Übertragungspfad bis zur BNN (Systemresonanzen). Für eine Vorhersage der Störspannung an der BNN ist es daher wichtig, beide Komponenten zu untersuchen. Ausgehend von einem verifizierten Simulationsmodell kann eine Parametervariation der wichtigsten Systemgrößen durchgeführt werden. Diese zeigt, welchen Einfluss z.B. das Design des Leistungsmoduls, die Aufbau- und Verbindungstechnik der Kommutierungszelle und die Ansteuerung des Leistungsschalters auf das Störspektrum haben. Die Ergebnisse geben Aufschlüsse darüber, wie zukünftig EMV-optimierte Inverter entwickelt werden können.

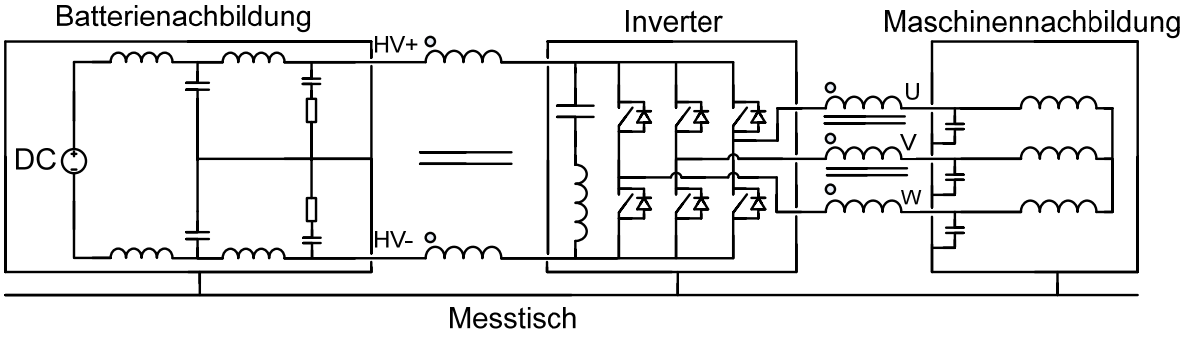


Fig. 1: Nachbildung des elektrischen Antriebsstrangs für den Komponententest.
Simplified equivalent circuit of an electric drive train.

Simulation of Conducted Emissions in Automotive High Voltage Networks

M. Sc. Philipp Hillenbrand

The electrification of the automotive drive train brings new challenges related to electromagnetic compatibility (EMC). As shown in Fig. 1, the drive train consists of a high voltage battery, an inverter and an electric machine. To convert the battery's DC voltage into a three-phase AC voltage, power electronic switches are used in the inverter. To increase the efficiency of the inverter fast slew rates with switching times of typically less than 1 µs are needed, however they cause radio frequency (RF) spectral components with high amplitude. These disturbances propagate through various coupling paths throughout the drive train and stimulate system resonances. The resulting disturbance voltage at the Line Impedance Stabilization Network (LISN) can be measured with an EMI test receiver. This measurement method is used to characterize the drivetrain components with respect to their EMC behavior. Fig. 2a) shows the spectrum to the noise voltage at the HV+ Pin of the LISN during operation of an IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) inverter. In this case an artificial network is used as load instead of the electric machine. For a better understanding of the noise spectrum it can be separated into two components. The first part is the spectrum of the excitation (frequency components of the switching edge, see Fig. 2b) and the second part is the transmission path from the disturbance source to the LISN (system resonances). For predicting the noise voltage at the LISN it is therefore important to investigate and understand both components. Based on a verified simulation model a parameter variation of the main system variables can be performed. This shows among others the impact of the power module's design, the assembly and interconnection technology inside the inverter and the control algorithm of the of the power electronic switches on the noise spectrum. The aims of the investigation are guidelines for the development of an EMC optimized inverter.

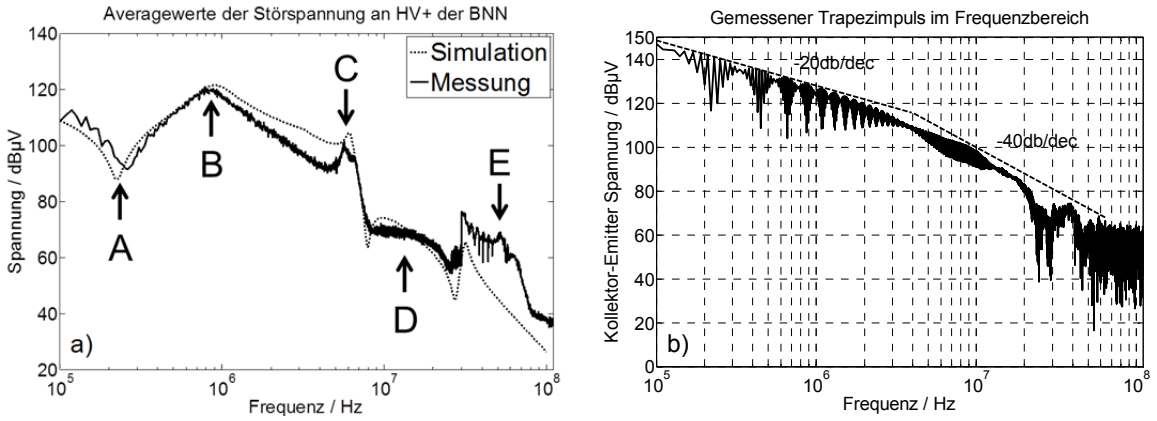


Fig. 2: links) Störspektrum an HV+; rechts) Frequenzspektrum der Schaltflanke.
left) Disturbance voltage at HV+; right) Frequency spectrum of switching edge.

Elektromagnetische Verträglichkeit in Mittelspannungsschaltanlagen

M. Sc. Christian Suttner

Mittelspannungsschaltanlagen werden in elektrischen Verteilnetzen eingesetzt, um in der Mittelspannungsebene Erzeuger und Lasten zu schalten. Der Bereich der Mittelspannung umfasst in der elektrischen Energietechnik Spannungen von 1 kV bis 40 kV. Durch den Einsatz von Vakuumschalttechnik und Schwefelhexaflourid (SF_6) als Isolationsmedium können praktisch wartungsfreie Schaltfelder mit sehr geringem Platzbedarf realisiert werden. Aus Sicht der Elektromagnetischen Verträglichkeit bringen diese Technologien jedoch, insbesondere im Hinblick auf die Einführung kompakter Sensoren und moderner Kommunikationstechnologien, neue Herausforderungen mit sich. Einerseits erzeugen sowohl Vakuumleistungsschalter als auch gasisolierte Trennschalter, aufgrund der höheren Durchschlagfeldstärke gegenüber Luft, deutlich breitbandigere transiente Störgrößen. Andererseits sind durch die geringeren Isolationsabstände Primär- und Sekundärelemente näher zusammengerückt, wodurch effektivere Koppelpfade auf die Sekundärtechnik entstehen.

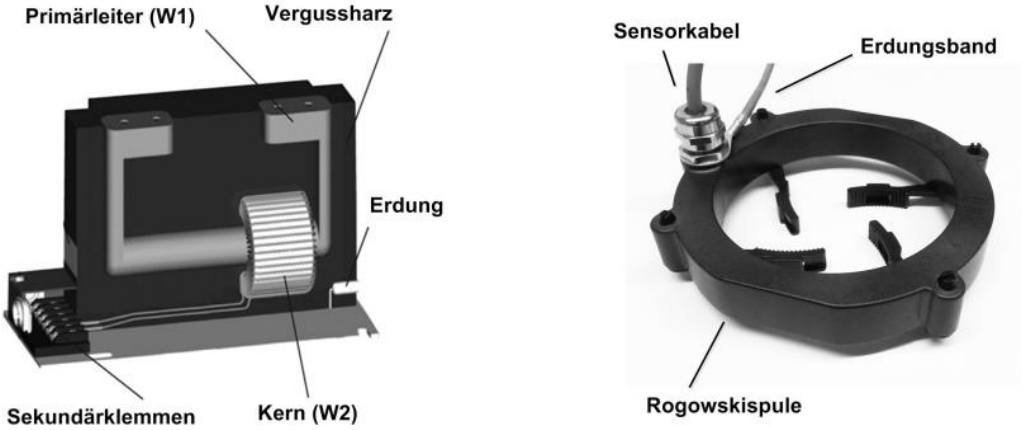


Fig. 1: Konventioneller Stromwandler (links) und kernloser Stromsensor (rechts).
Conventional current transformer (left) versus rogowski sensor (right).

Die zunehmende Verbreitung von leichten kernlosen Strom- und Spannungssensoren mit niedrigen Signalpegeln sowie der Einsatz von modernen Kommunikationsbussystemen zur Messwertübertragung in der direkten Umgebung der Schaltfelder verschärfen diese Problematik zusätzlich.

Ziel der Forschung ist es, umfassende Klarheit über die elektromagnetischen Vorgänge während Schaltvorgängen in Mittelspannungsschaltanlagen zu schaffen. Es sollen Konzepte zur Überprüfung und Sicherstellung der EMV abgeleitet werden und die bestehenden normativen EMV-Anforderungen auf ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf die neue Sensorgeneration untersucht werden.

Electromagnetic Compatibility of Medium Voltage Switchgear

M. Sc. Christian Suttner

Medium voltage switchgears are used in power distribution grids to connect and disconnect electric energy consumers and producers to the medium voltage network. In power grids the medium voltage level ranges from 1 kV up to 40 kV. By the use of vacuum technology and sulphur-hexafluoride (SF_6) as an insulating medium, nearly maintenance-free panels can be realised with very little use of space. From the perspective of electromagnetic compatibility these technologies have led to some new challenges, particularly with regard to the introduction of new current sensors and advanced communications technologies.

On the one hand vacuum breakers and gas insulated disconnectors generate more broadband transients due to the higher breakdown field strength of their insulating medium compared to air. On the other hand due to the reduced insulation distances the primary and secondary parts of the equipment moved closer together. Therefore the electromagnetic interference levels on the secondary side become more severe.

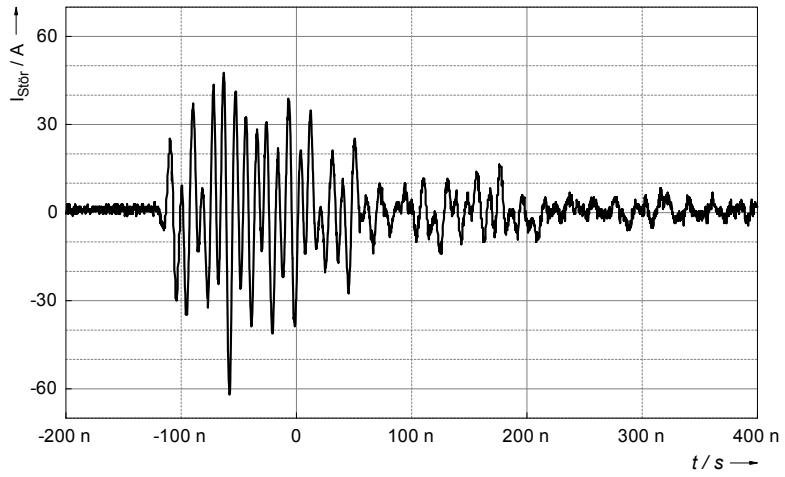


Fig. 1:
Transienter Gleichtakt Störstrom auf der Stromsensorleitung (sekundärseitig) während der Trennung eines leerlaufenden Sammelschienenabschnitts.
Transient common mode disturbance current in the secondary wiring of the current sensor during a disconnector's opening operation.

The increasing spread of small coreless current and voltage sensors with low signal levels as well as the installation of modern communication bus systems in the close surrounding of the panels intensify this problem further.

The aim of this research is to establish comprehensive clarity on the electromagnetic processes during switching operations in medium voltage switchgear. Concepts for the verification of the EMC shall be derived. Furthermore the existing normative requirements shall be examined for their applicability to the new generation of unconventional voltage and current sensors.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

Die folgenden Beiträge können im Internet unter www.uni-stuttgart.de/ieh abgerufen werden.

M. Beltle, M. Siegel, M. Gnädig, S. Tenbohlen, U. Sundermann, F. Schatzl
Beeinflussung von Leistungstransformatoren in Hybridnetzen.
Internationaler ETG Kongress, Berlin, 5.-6. November 2013, Beitrag Nr. P54

T. Straub, M. Brunner, S. Tenbohlen
Einfluss von Nachtspeicheröfen auf elektrische Verteilnetze.
IEEE Power and Energy Summit (PESS) 2014, Stuttgart, 22.-24. Januar 2014

S. Sultani, M. Brunner, S. Tenbohlen
Nutzung saisonaler Wärmespeicher zur Stabilisierung elektrischer Verteilnetze.
IEEE Power and Energy Summit (PESS) 2014, Stuttgart, 22.-24. Januar 2014

T. Nauhauser, M. Nemati, S. Tenbohlen
Unsicherheiten der PV- & Windenergieerzeugung und deren Einfluss auf Energiemanagementsysteme in Mikronetzen.
IEEE Power and Energy Summit (PESS) 2014, Stuttgart, 22.-24. Januar 2014

P. Wiest, S. Eilenberger, S. Tenbohlen
Ausfallarbeit bei einem Einspeisemanagement für Photovoltaikanlagen im Niederspannungsnetz.
IEEE Power and Energy Summit (PESS) 2014, Stuttgart, 22.-24. Januar 2014, S. 78-84

M. Reuter, S. Tenbohlen, W. Köhler
The Influence of Network Impedance on Conducted Disturbances within the High-Voltage Traction Harness of Electric Vehicles.
IEEE Transactions on EMC, Vol. 56, No. 1, February 2014, pp. 35-43

J. Harthun, T. Stirl, M. Jovalekic, S. Tenbohlen
Einsatz umweltfreundlicher Isolierflüssigkeiten in Leistungstransformatoren unter Berücksichtigung tiefer Temperaturen.
Stuttgarter Hochspannungssymposium 2014, 11.-12. März 2014, S. 115-123

W. Ebbinghaus, C. Suttner, D. Burger, S. Tenbohlen
Systembasierte EMV-Prüfung für Mittelspannungsschaltanlagen – Grenzen der geltenden Störfestigkeitsanforderungen.
Stuttgarter Hochspannungssymposium 2014, 11.-12. März 2014, S. 173-186

M. Siegel, S. Tenbohlen
Kalibrierbarkeit verschiedener TE-Messverfahren für Leistungstransformatoren.
Stuttgarter Hochspannungssymposium 2014, 11.-12. März 2014, S. 239-249

M. Szewczyk, J. Pawlowski, K. Kutorasinski, S. Burow, S. Tenbohlen, W. Piasecki
Identification of rational function in s-domain describing a magnetic material frequency characteristics.
9th IET International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM 2014), March 31-April 1, 2014, London, UK, Paper No. P1-06

M. Nemati, L. Tao, T. Nauhauser, H. Müller, M. Braun, S. Tenbohlen
Optimal operation and sizing of battery storage systems for microgrid peak shaving applications.
7th International Conference on PV-Hybrids and Mini-Grids, Bad Hersfeld, Germany, 10.-11. April 2014, S. 182-187

M. Nemati, L. Tao, T. Nauhauser, H. Müller, M. Braun, S. Tenbohlen
Optimal microgrid energy management strategies concerning uncertainties of renewable energy generation.
7th International Conference on PV-Hybrids and Mini-Grids, Bad Hersfeld, Germany, 10.-11. April 2014, S. 208-213

E. Fohry, A. Müller, M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen
Neue Methodik der Zustandsüberwachung von Transformatoren mithilfe von Online-TE-Messung und Vibrationsmonitoring.
VGB Powertech KELI 2014, Konferenz Elektrotechnik, Leittechnik, Informationsverarbeitung im Kraftwerk, Landshut, 6.-8. Mai 2014

A. Ciuriuc, P. Notingher, M. Jovalekic, S. Tenbohlen
Experimental study on vegetable and mineral transformer oils properties.
14th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2014), May 22-24, 2014, Brasov, Romania, pp. 169-174

M.G. Niasar, R.C. Kiiza, N. Taylor, W. Xiaolei, H. Edin, S. Tenbohlen
Effect of partial discharges on thermal breakdown of oil impregnated paper.
Proceedings of 2014 International Conference on Electrical Insulating Materials (ISEIM), June 1-5, 2014, Niigata City, Japan, pp. 196-199

F. Vahidi, M. Jovalekic, S. Tenbohlen, M. Rösner, C. Perrier, H. Fink
Influence of Electrode Material on Conductivity Measurements under DC Stresses.
18th IEEE international Conference on Dielectric Liquids, Bled, Slovenia, June 29 - July 03, 2014, Paper No. 189

F. Vahidi, M. Jovalekic, S. Tenbohlen, M. Rösner, C. Perrier, H. Fink
Space Charge Formation in Insulating Liquids under DC Stresses.
18th IEEE international Conference on Dielectric Liquids, Bled, Slovenia, June 29 - July 03, 2014, Paper No. 190

P. Arnold, M. Hering, S. Tenbohlen, W. Köhler, U. Riechert, U. Straumann
Discharge Phenomena at Partially Damaged Dielectric Electrode Coatings in SF_6-Insulated Systems at AC and DC Stress.
20th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Orléans, France, 6.-11.7.2014, Paper No. B-9

S. Eilenberger, J. Schäfer, P. Wiest, S. Tenbohlen, D. Schöllhorn
Power management systems for voltage control in probabilistic simulations.
PMAPS 2014, 13th International Conference on Probablistic Methods Applied to Power Systems, Durham, UK, July 7-10, 2014, Paper No. 026, ISBN 978-1-4799-3561-1/14

A. Abdel-Majeed, C. Kattmann, R. Saur, S. Tenbohlen
Usage of Artificial Neural Networks for Pseudo Measurement Modeling in Low Voltage Distribution Systems.
IEEE Power & Energy Society General Meeting 2014, Washington, D.C., USA, July 27-31, 2014, Paper No. 961

C. Kattmann, A. Abdel-Majeed, S. Tenbohlen
Database-Assisted Load Flow Simulation for Low Voltage Grids Using a Model Reduction Approach.
IEEE Power & Energy Society General Meeting 2014, Washington, D.C., USA, July 27-31, 2014, Paper No. 148

P. Lombardi, C. Röhrig, K. Rudion, R. Marquardt, M. Müller-Mienack, A. S. Estermann, Z. A. Styczynski, N. I. Voropai
An A - CAES pilot installation in the distribution system-A technical study for RES integration.
Journal on Energy Science & Engineering, Wiley, Volume 2, Issue 3, August 2014, S.116-127

M. Djamali, S. Tenbohlen
A priori Metrics to Select the Best Training Dataset of Top-Oil Temperature Models of Power Transformer.
International Conference on High Voltage engineering and its Applications (ICHVE), Poznan, Poland, September 8-11, 2014, Paper No. B-6-1

P. Arnold, S. Tenbohlen, W. Köhler, U. Riechert, U. Straumann
Fixed Particles in Coaxial SF6 Arrangements at Various Voltage Stresses.
International Conference on High Voltage engineering and its Applications (ICHVE), Poznan, Poland, September 8-11, 2014, Paper No. A-1-4

M. Wild, S. Tenbohlen, B. Quak
Comparison of Partial Discharge Behavior with Alternating Current and Damped Alternating Current at Different Frequencies.
CMD 2014, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, Korea, September 21-25, 2014, Paper No. OD2-03, P. 513-516

M. Wild, S. Tenbohlen, E. Gulski, R. Jongen
On-site Testing and Diagnosis of Distribution and Transmission Power Cables Using Damped AC Voltages.
CMD 2014, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, Korea, September 21-25, 2014, Paper No. PD-33, P. 722-725

M. Wild, S. Tenbohlen, E. Gulski, R. Jongen, J. Erbrink
Degradation Effects and Diagnosis of On-load Tap Changer in Power Transformers.
CMD 2014, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, Korea, September 21-25, 2014, Paper No. PB-32, P. 942-945

M. Siegel, S. Tenbohlen
Comparison between Electrical and UHF PD Measurement concerning Calibration and Sensitivity for Power Transformers.
CMD 2014, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, Korea, September 21-25, 2014, Paper No. OB1-02

M. Siegel, S. Tenbohlen
Design of an Oil-filled GTEM Cell for the Characterization of UHF PD Sensors.
CMD 2014, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, Korea, September 21-25, 2014, Paper No. PB-31

S. Burow, U. Straumann, W. Köhler, S. Tenbohlen
New Methods of Damping Very Fast Transient Overvoltages in Gas-Insulated Switchgear.
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 5, October 2014, pp. 2332-2339

M. Nemati, M. Imran, H. Müller, M. Braun, S. Tenbohlen
Frequency and Voltage Control in Microgrids: Modeling and Simulations in Islanded Mode.
ISGT 2014, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Istanbul, Turkey, 12.-15. Oktober 2014, Paper No. 556

M. Nemati, S. Eberlein, L. Tao, H. Müller, M. Braun, S. Tenbohlen
Optimale Einsatzplanung dezentraler Anlagen in Mikrostromnetzen mittels genetischem Algorithmus.
VDE-Kongress „Smart Cities – intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft“, Frankfurt, 20.-21. Oktober 2014, Beitrag Nr. P12.4

M. Brunner, I. Schäfer, K. Rudion, S. Tenbohlen
Auswirkungen unterschiedlicher Jahreszeiten auf den Beitrag von Wärmepumpen zur Spannungshaltung.
VDE-Kongress „Smart Cities – intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft“, Frankfurt, 20.-21. Oktober 2014, Beitrag Nr. 4.2.1

B. Wille-Haussmann, M. Brunner, N. Gerhardt, M. Kleimaier, P. Mayrhofer, A. Poehlmann, J. Rummeni, S. von Roon, J. Werner
Wärme- und Kälteversorgung in Städten und Regionen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien in der Stromversorgung.
VDE-Kongress „Smart Cities – intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft“, Frankfurt, 20.-21. Oktober 2014, Beitrag Nr. 3.4.2

G. Walker, A.-K. Krauss, S. Eilenberger, W. Schweinfort, S. Tenbohlen
Entwicklung eines standardisierten Ansatzes zur Klassifizierung von Verteilnetzen.
VDE-Kongress „Smart Cities – intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft“, Frankfurt, 20.-21. Oktober 2014, Beitrag Nr. 5.2.2

A. Abdel-Majeed, S. Tenbohlen, K. Rudion
Modellierung eines dreiphasigen Zustandsschätzers mit Berücksichtigung des Neutralleiters.
VDE-Kongress "Smart Cities - intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft", Frankfurt, 20.-21. Oktober 2014, Beitrag 6.2.3

A. Abdel-Majeed, S. Notz, K. Rudion, M. Khattabi
Zustandsschätzungsbasierte Spannungsregelung im NS-Netz.
VDE-Kongress "Smart Cities - intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft", Frankfurt, 20.-21. Oktober 2014, Beitrag 6.2.4

M. Beltle, M. Schühle, M. Siegel, S. Tenbohlen
Auswirkungen von Gleichströmen auf Leistungstransformatoren.
6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. 1.3

M. Beltle, S. Tenbohlen
Schwingungsmessung an Leistungstransformatoren.
6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. P1.4

F. Vahidi, S. Tenbohlen
Statistical Failure Analysis of European Substation Transformers.
6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. P1.2

M. Wild, S. Tenbohlen, B. Quak
Vergleich des Teilentladungsverhaltens zwischen AC und DAC bei verschiedenen Frequenzen.
6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. 7.4

M. Siegel, M. Beltle, S. Tenbohlen
Aufbau einer ölgefüllten GTEM-Zelle zur Vermessung der Empfindlichkeit von Sensoren zur UHF-Teilentladungsmessung.
6. ETG-Diagnostik-Fachtagung 2014, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. P3.6

U. Schichler, W. Koltunowicz, et. al., S. Tenbohlen (CIGRE WG D1.03 / TF 09)
Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics.
6. ETG-Diagnostik-Fachtagung 2014, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. 0.1

M. Siegel, S. Hägele, M. Beltle, S. Tenbohlen
Empfindlichkeitsvergleich von elektrischer und UHF-Teilentladungsmessung zur Diagnose von Leistungstransformatoren.
6. ETG-Diagnostik-Fachtagung 2014, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. 0.3

P. Arnold, S. Tenbohlen, M. Hering, U. Riechert
Detektion freibeweglicher, leitfähiger Partikel in SF_6 unter Gleichspannung.
6. ETG-Diagnostik-Fachtagung 2014, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. 6.1

M. Hering, J. Speck, K. Backhaus, S. Großmann, P. Arnold, U. Riechert
Untersuchungen zur Detektion von festen Störstellen auf Isolatoren in gasisolierten Systemen bei Gleichspannungsbelastung.
6. ETG-Diagnostik-Fachtagung 2014, Berlin, 25.-26. November 2014, Beitrag Nr. 6.3

P. Wiest, K. Rudion, A. Probst
Optimierung der Verteilnetzplanung mit hohem Anteil an dezentraler Erzeugung.
Ingenieurspiegel 4/2014, S. 42-44

A. Abdel-Majeed, M. Brunner, K. Frey, C. Kattmann, P. Wiest, K. Rudion
Optimale Netzintegration erneuerbarer Energien.
Forschungsreport Elektrotechnik in Baden-Württemberg, Ausgabe WS 2014/15, S. 42-44

J. Smajic, A. Shoory, S. Burow, W. Holaus, U. Riechert, S. Tenbohlen
Simulation-Based Design of HF Resonators for Damping Very Fast Transients in GIS.
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 6, December 2014, pp. 2528-2533

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

seit 2013	VDE ETG Task Force „Strom im Wärmemarkt“: M. Brunner
23.-24.1.14	IEEE Student Summit, organisiert vom IEH, Thema „Energietechnik“
11.-12.3.14	Stuttgarter Hochspannungssymposium „Neue Konzepte und Systemkomponenten für die Netze der Zukunft“, Filderhalle Leinfelden-Echterdingen, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, Prof. Rudion, M. Jovalekic, M. Siegel, C. Suttner
11.-13.3.14	EMV 2014, Düsseldorf, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Teilnehmer/Beiträge: J. Hohloch, Dr. Köhler, D. Schneider
12.3.14	Vortrag auf dem Kongress Stromnetzausbau in Baden-Württemberg, Fellbach, Prof. Rudion
18.-19.3.14	Vorträge bei Technische Akademie Esslingen, Prof. Tenbohlen
30.4.14	Smart Grids Gespräche für Stadtwerke bei den Stadtwerken Ulm/Neu-Ulm, Professoren Rudion und Tenbohlen
6.-8.5.14	VGB Powertech KELI 2014, Konferenz Elektrotechnik, Leittechnik, Informationsverarbeitung im Kraftwerk, Landshut, Teilnehmer/Beiträge: M. Beltle, M. Siegel
13.5.14	Sitzung des FB Q2 und des Diagnostik Programmausschusses, Frankfurt, Prof. Tenbohlen
13.-16.5.14	EMC 2014, Tokyo, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beiträge von J. Hohloch, D. Schneider
27.5.14	CIGRE JWG D1/B3.57 “Testing of Gas-Insulated HVDC-Systems”, Meeting, Graz, Austria, Teilnehmer/Beiträge: P. Arnold
28.5.14	CIGRE WG D1.51 “Dielectric Performance of Eco-Friendly Gas-Insulated Systems”, Meeting, Graz, Austria, Teilnehmer: P. Arnold
4.-6.6.14	Energie Talks Ossiach/Österreich „Energiewende – Im Trüben fischen“, Prof. Tenbohlen
12.6.14	1st Innovation Workshop “TRANSFORMer 2025” mit Maschinenfabrik Reinhausen, Frankfurt, Prof. Tenbohlen
16.6.14	Tagung der Acatech-Fachgruppe “DSM im Strommarkt”, Frankfurt, Prof. Rudion
16.-17.6.14	Sitzung der CIGRE Arbeitsgruppe D1.37 in Berlin, Prof. Tenbohlen
30.6.-3.7.14	IEEE ICDL 2014, The 18th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, in Bled, Slovenien, Beitrag von F. Vahidi
6.-11.7.14	20th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Orleans, Frankreich, Beitrag von P. Arnold
7.-10.7.14	13th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Durham, UK, Beiträge: S. Eilenberger, P. Wiest

23.7.14	6. Vorstandssitzung Smart Grids Plattform Baden-Württemberg im Umweltministerium BW, Stuttgart, Prof. Tenbohlen; weiterhin am gleichen Ort: „Smart Grids Gespräche für Netzbetreiber“, Professoren Rudion und Tenbohlen
27.-31.7.14	IEEE Power & Energy Society General Meeting 2014, Washington DC, USA, Co-Chair - Supper Session “Implications of Large-Scale Wind Energy on Power Systems & Supporting Measures for Better Integration”, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Rudion, A. Abdel-Majeed, C. Kattmann
24.-29.8.14	CIGRE-Session 2014 in Paris, Prof. Tenbohlen
8.-11.9.14	International Conference on High Voltage Engineering and its Applications, Poznan, Poland, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, P. Arnold, M. Djamali
12.9.14	Tagung der Acatech-Fachgruppe “DSM im Strommarkt”, Frankfurt, Prof. Rudion
15.-20.9.14	Prof. Tenbohlen hielt auf Einladung Vorträge am Kyushu Institute of Technology in Fukuoka und bei Mitsubishi in Japan
21.-25.9.14	2014 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) in Jeju/Südkorea, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, Herren Siegel und Wild.
25.-26.9.14	CMD Workshop 2014, Seoul, Korea, Teilnehmer: M. Siegel, M. Wild, Beitrag: Prof. Tenbohlen
23.9.14	Vortrag im Rahmen Network^2-Gruppe, Stuttgart, Prof. Rudion
24.9.14	8th EERA (European Energy Research Alliance) JP Wind Steering Committee Meeting, Amsterdam, Niederlande, Prof. Rudion
25.-26.9.14	Bundesnetz-Agentur-Kongress - Wissenschaftsdialog 2014 in Bonn, Prof. Rudion, K. Frey, P. Wiest
9.10.14	TE-Schulung, Firma Pfisterer, Winterbach, Beiträge: S. Tenbohlen, C. Suttner, M. Siegel
12.-15.10.14	ISGT Europe Konferenz, Istanbul , 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), M. Nemati
16.10.14	Vortrag beim Kundenforum „Effizientes Verteilnetz“, Waiblingen, Prof. Rudion
20.-21.10.14	VDE-Kongress 2014 „Smart Cities - intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft“, Frankfurt/Main, Professoren Rudion und Tenbohlen, Beiträge von A. Abdel- Majeed, M. Brunner, S. Eilenberger, M. Nemati
29.10.14	Sitzung des ETG-Beirates in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
18.11.14	öffentliche Antrittsvorlesung von Prof. Rudion: „Smart Grids 2.0 – Quo Vadis?“
20.11.14	Tagung der Acatech-Fachgruppe “DSM im Strommarkt”, Frankfurt, Prof. Rudion

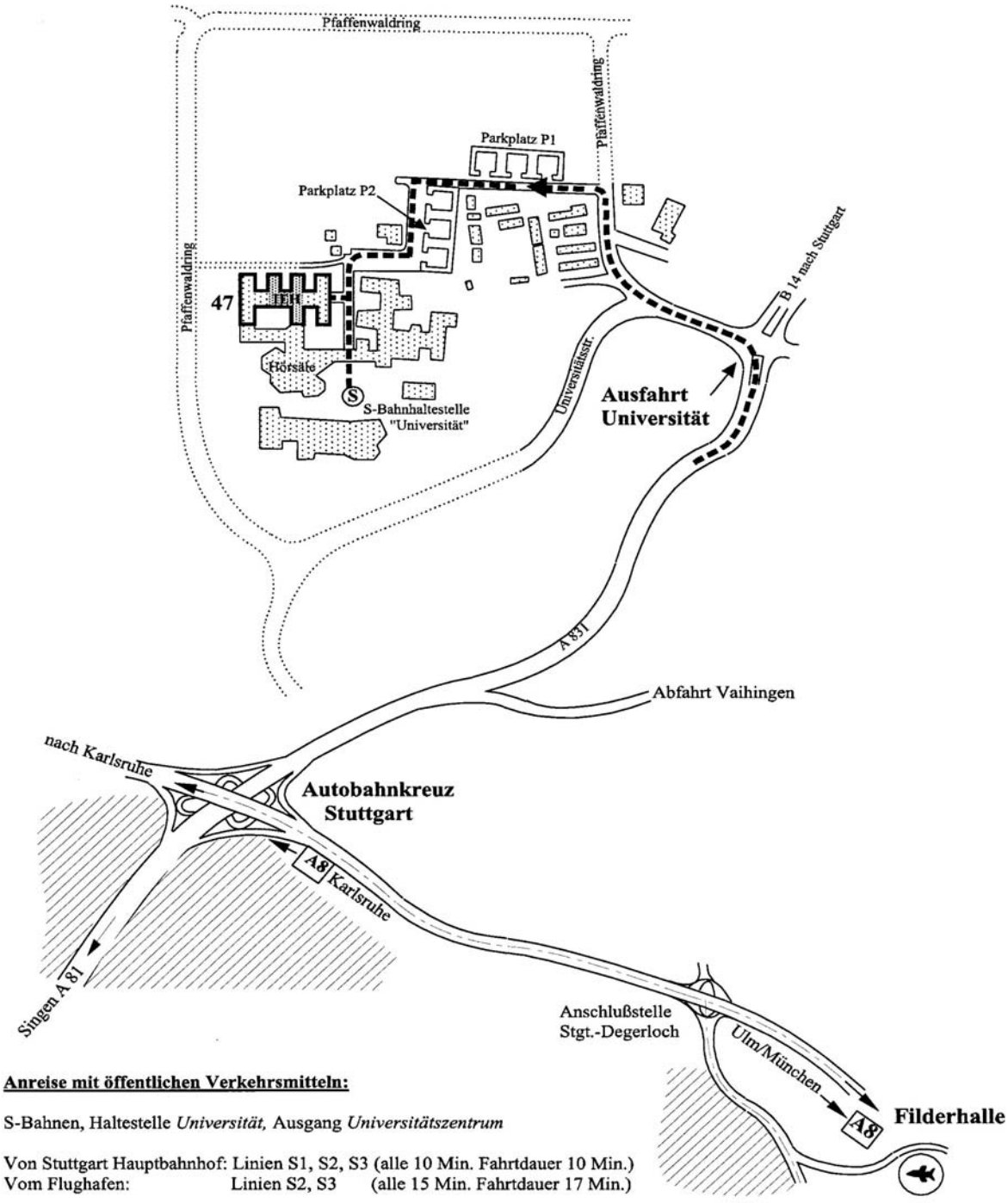
20.-21.11.14	Sitzung der CIGRE Arbeitsgruppe D1.37 in Stuttgart, Prof. Tenbohlen
24.11.14	Kongress „Energie und Energiespeichertechnologien“ des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Liederhalle Stuttgart, Professoren Rudion und Tenbohlen
25.-26.11.14	„Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 6. ETG-Fachtagung in Berlin, Prof. Tenbohlen war Tagungsleiter. Beiträge von P. Arnold, M. Beltle, M. Djamali, M. Siegel, F. Vahidi und M. Wild
2.12.14	„Kompetenz Smart Grids-Tag“ der EnBW in Stuttgart, Professoren Rudion und Tenbohlen
3.12.14	Kongress „Energiewende mit intelligenten Netzen – Smart Grids in Baden-Württemberg“ in Fellbach, Professoren Rudion und Tenbohlen

8. PRÜFEINRICHTUNGEN

Stoßspannungsanlagen	bis 2000 kV, 100 kJ
Schwingende Blitzstoßspannung	bis 1200 kV (transportable Anlage für Vor-Ort-Prüfungen)
Stoßstromanlage	bis 200 kA, 100 kV, 80 kJ
Wechselspannungskaskade	2 x 400 kV/2 A, 1500 kVA Speiseleistung
Wechselspannungsanlage	300 kV, 0,2 A mit Teilentladungsmessplatz
Gleichspannungsanlage	bis 600 kV, 10 mA
EMP-Generator	bis 800 kV, 5 ns/200 ns bzw. 2,3 ns/23 ns mit Freiluftantenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m^3 (B x L x H)
Spannungsteiler	gedämpft kapazitive Spannungsteiler bis 1600 kV (transportable Einheiten für Überspannungsmessungen im Netz)
E/H-Feldmeßsysteme	mehrere, Frequenzbereiche von 5 Hz bis 500 MHz (für Spannungs- und Feldstärkemessungen im Netz)
EMV-Prüfgeräte	div. kleinere für die Nachbildung elektrostatischer Entladungen, Einkopplung von Störspannungsimpulsen ins Netz zur Prüfung von Bauteilen und Geräten
EMV-Absorberräume	10 m und 3 m Messabstand, mit Leistungsverstärkern, div. Antennen, Feldmesssystem, Videoüberwachung über LWL, Messempfänger bis 3 GHz, TEM-Messzelle
Klimakammer	3 x 3 x 3 m^3, Spannung bis 650 kV, Temperatur von -20° bis +65°C
Einpolige SF6-Anlage	Un = 525 kV, Länge mit Abzweigen ca. 25 m
Einpolige SF6-Anlage	Un = 245 kV, Länge mit Abzweigen ca. 5 m
Digitale und analoge Messgeräte für periodische und einmalige Vorgänge mit Abtastraten bis über 20 GHz, Netzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren, Signalgeneratoren	
Teilentladungsmessgeräte zur phasenaufgelösten Messung und Interpretation	
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlagspannungsmessgerät, Gaschromatographen
Power Quality Analyzer	dreiphasige Strom- und Spannungsmessung bis zur 50. Harmonischen, Transienten bis 2 MHz

9. LAGEPLÄNE

Lageplan
des Institutsteils Stuttgart-Vaihingen
Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, Telefon: +49 (0)711 685-67870

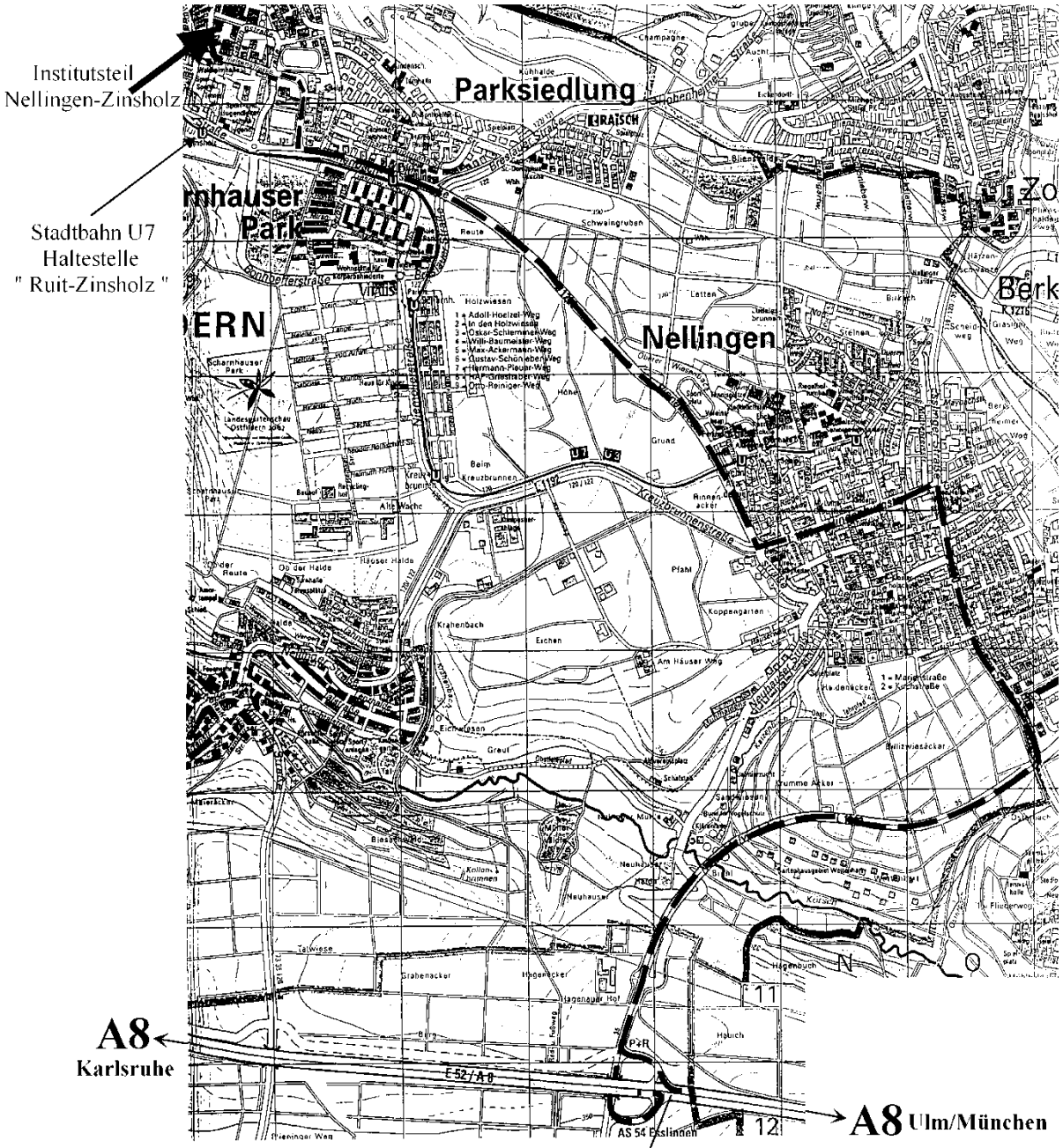


Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

S-Bahnen, Haltestelle *Universität,* Ausgang *Universitätszentrum*

Von Stuttgart Hauptbahnhof: Linien S1, S2, S3 (alle 10 Min. Fahrtdauer 10 Min.)
Vom Flughafen: Linien S2, S3 (alle 15 Min. Fahrtdauer 17 Min.)

Lageplan
des Institutsteils Ostfildern (Nellingen-Zinsholz)
Nielsenstr. 18, 73760 Ostfildern, Telefon: +49 (0)711 341 20 75



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

Anschlußstelle
54 Esslingen/Ostfildern

Von Stuttgart Hauptbahnhof: Stadtbahn U7
(Fahrtdauer 20 Min.)