



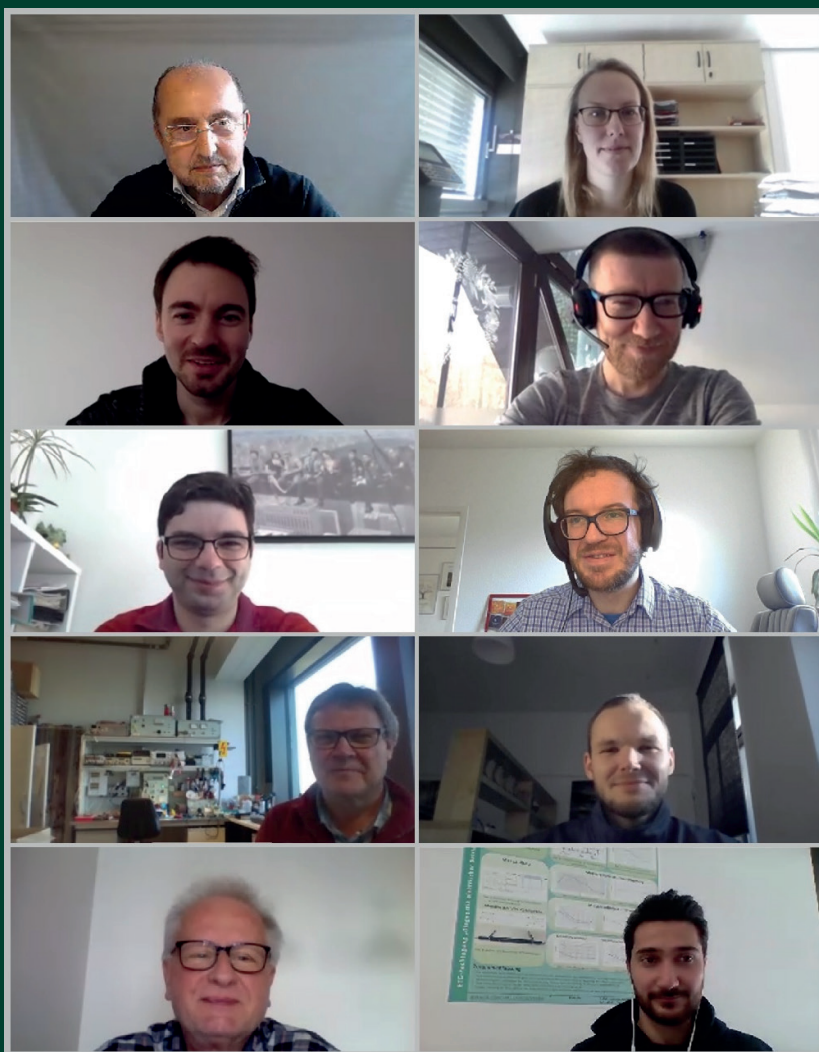
TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

# Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Professur für Energie- und Hochspannungstechnik



## Jahresbericht 2020



**Adresse:**

Technische Universität Chemnitz  
 Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
 Professur Energie- und Hochspannungstechnik  
 D-09107 Chemnitz

**Dienstsitz:**

Reichenhainer Str. 70  
 A.-F.-Weinholdbau, Raum w317  
 D-09126 Chemnitz  
 Tel.: +49 371 531 33343  
 Fax: +49 371 531 24239

**Homepage:**

<http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/>

**Anfahrt:**

<https://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/kontakt/anfahrt.html> oder Anfahrtsskizze im hinteren Einband

**Telefon, Fax, E-mail:**

Name:	Telefon:	Fax:	E-mail:
Prof. W. Schufft	+49 371 531 33343	+49 371 531 833343	wolfgang.schufft@etit.tu-chemnitz.de
Prof. D. Amft	+49 371 531 33341	+49 371 531 833341	dietrich.amft@etit.tu-chemnitz.de
Sekret.: A. Voit	+49 371 531 33142	+49 371 531 833142	antje.voit@etit.tu-chemnitz.de
Dr. A. Gürlek	+49 371 531 39859	+49 371 531 839859	akif.guerlek@etit.tu-chemnitz.de
D. Kühnert	+49 371 531 39939	+49 371 531 839939	david.kuehnert@etit.tu-chemnitz.de
B. Jacobsen	+49 371 531 30084	+49 371 531 830084	benjamin.jacobsen@etit.tu-chemnitz.de
J. Lippold	+49 371 531 33341	+49 371 531 833341	juergen.lippold@etit.tu-chemnitz.de
K. Malekian	+49 371 531 35022	+49 371 531 835022	kia.malekian-boroujeni@etit.tu-chemnitz.de
F. Safargholi	+49 371 531 31926	+49 371 531 831926	farhad.safargholi@etit.tu-chemnitz.de
S. Taghipour	+49 371 531 38450	+49 371 531 838450	siavash.taghipour-broujeni@etit.tu-chemnitz.de
Dr. J. Teuscher	+49 371 531 37752	+49 371 531 837752	jens.teuscher@etit.tu-chemnitz.de

**Titelfoto:** virtuelle Dienstberatung der Professur

# 1 Vorwort

Sehr geehrte Freunde und Partner,

hinter uns liegt das außergewöhnliche Jahr 2020. Ein Virus, das in der Millionenstadt Wuhan im fernen China das Licht der Welt erblickte, bestimmt unser Leben. Unsere partielle Rat- und Machtlosigkeit macht uns demütig und zwingt uns im Zeitalter der Globalisierung, des extensiven Verbrauchs natürlicher Ressourcen und der explodierenden Weltbevölkerung über unser Verhältnis zur Natur nachzudenken. Wir sind wohl Teil der Natur, nicht der Sieger über sie.

An der Professur Energie- und Hochspannungstechnik hatten wir tagtäglich weniger globale Herausforderungen zu bewältigen. Insbesondere war das die Lehre in den Zeiten der Corona Pandemie, nachdem mit dem Sommersemester 2020 keine Präsenzlehrveranstaltungen mehr möglich waren. Nach ersten Erfahrungen mit virtuellen Lehrveranstaltungen im Sommersemester ist uns das im Wintersemester ganz gut gelungen, auch mit positiver Resonanz seitens der Studenten. Dabei hat sich aber die Erkenntnis bestätigt, dass der direkte Kontakt zwischen Lehrenden und Lernenden unverzichtbar ist. Die universitäre Gemeinschaft von Lehrenden und Lernenden (*universitas magistrorum et scholarium*) lässt sich also nicht in die virtuelle Welt verlagern. Auch zukünftig werden virtuelle Lehrangebote wohl eher begleitenden Charakter haben.

Zudem vermissten wir den täglichen Kontakt und Austausch untereinander. Unsere persönlichen Begegnungen in Form von Dienstberatungen, Konsultationen und Doktorandenkolloquien fanden nun im virtuellen Besprechungsraum statt. Das Titelbild des Jahresberichtes ist also typisch für das vergangene Jahr. Auch hatten wir das Bedürfnis, unser tägliches Arbeitsfrühstück als Form sozialer Kommunikation in den virtuellen Besprechungsraum zu verlegen, sodass wir uns dort regelmäßig zum Smalltalk mit der Kaffeetasse in der Hand begegneten.

Im Bereich der Forschung konnten wir einigermaßen Kontinuität gewährleisten. So haben im letzten Jahr Suleiman Hadid und Akif Gürlek ihre Promotionsvorhaben zum Abschluss bringen können. Leider hatten wir einen deutlichen Rückgang bei den eingeworbenen Drittmitteln, insbesondere aus der privaten Wirtschaft, was im Wesentlichen auf die Einschränkung unsere Kommunikationsmöglichkeiten auf Grund der Corona zurückzuführen ist. Dafür konnten wir Ende des Jahres einen beträchtlichen Erfolg verbuchen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens *Infrastruktur Clean Energy City - Geräte zum Einsatz von H2-Technologien zur Sektorenkopplung* sind uns Geräteinvestitionen in Höhe von 2,3 Millionen € bewilligt worden. Mit den zu beschaffenden Geräten werden wir ein laborskaliertes Microgrid aufbauen, an dem wir Netzzrückwirkungen und dynamische Vorgänge untersuchen werden. Mehr dazu können Sie in dem gesonderten Beitrag erfahren.

Das Jahr 2020 ist mein letztes volles Berichtsjahr. Zum 31.03.2021 enden meine 21 Dienstjahre an der Professur *Energie- und Hochspannungstechnik*. Ich kann sagen, es hat Spaß gemacht, mit jungen, motivierten und sympathischen Menschen zu arbeiten. Ein kurzes Resümee finden sie nachfolgend.

Die Professur soll nun unter dem Titel *Elektroenergieversorgung und nachhaltige Elektroenergiesysteme* weitergeführt werden. Leider ist die lückenlose Wiederbesetzung der Professur zum 01.04.2021 missglückt, so dass es voraussichtlich eine einjährige Übergangszeit bis zur Wiederbesetzung geben wird. In dieser Zeit werde ich laufende Projekte und Promotionsvorhaben weiter betreuen.

Immerhin stand die Wiederbesetzung dieser energietechnischen Professur an der TU Chemnitz nicht in Frage, wo man doch vielleicht meint, man könnte den deutschen Jahresbedarf an Elektroenergie (ca. 600 TWh) zukünftig durch *Künstliche Intelligenz* bereitstellen. Es kommen große Herausforderungen auf die elektrische Energietechnik zu. So frage ich mich, wie denn die zu erwartende Spitzenlast in den dunklen Abendstunden der ersten Dezembertage des Jahres 2038 (voraussichtlich mehr als 80 GW) zu decken ist, wenn kein Kohle- und Atomstrom mehr zur Verfügung steht und auch noch kein Wind wehen sollte. Zusätzlich muss noch die Ladeenergie für Millionen Elektrofahrzeuge bereitgestellt werden. Leider haben uns die Klimaaktivisten hierzu keine Lösungsvorschläge unterbreiten können. Mit Schulstreiks und Leistungsverweigerung kommen wir kaum weiter. Ich bin aber optimistisch, dass zukünftigen Ingenieursgenerationen der Ausstieg aus den fossilen Energieträgern (Dekarbonisierung) bis 2050 gelingen wird bzw. muss. Es wird also noch spannender auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik.

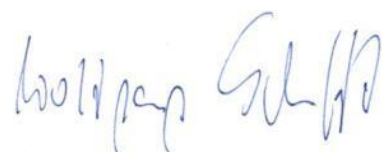
Mit großer Freude durften wir Ende Oktober erfahren, dass Chemnitz den Wettbewerb um die Kulturhauptstadt 2025 gewonnen hat. Das bedeutet einen Schub an Enthusiasmus und Optimismus, von dem auch die TU Chemnitz in Form von positiver Wahrnehmung und Außenwirkung profitieren wird. Vielleicht mögen Sie uns ja auch deshalb demnächst in Chemnitz besuchen.

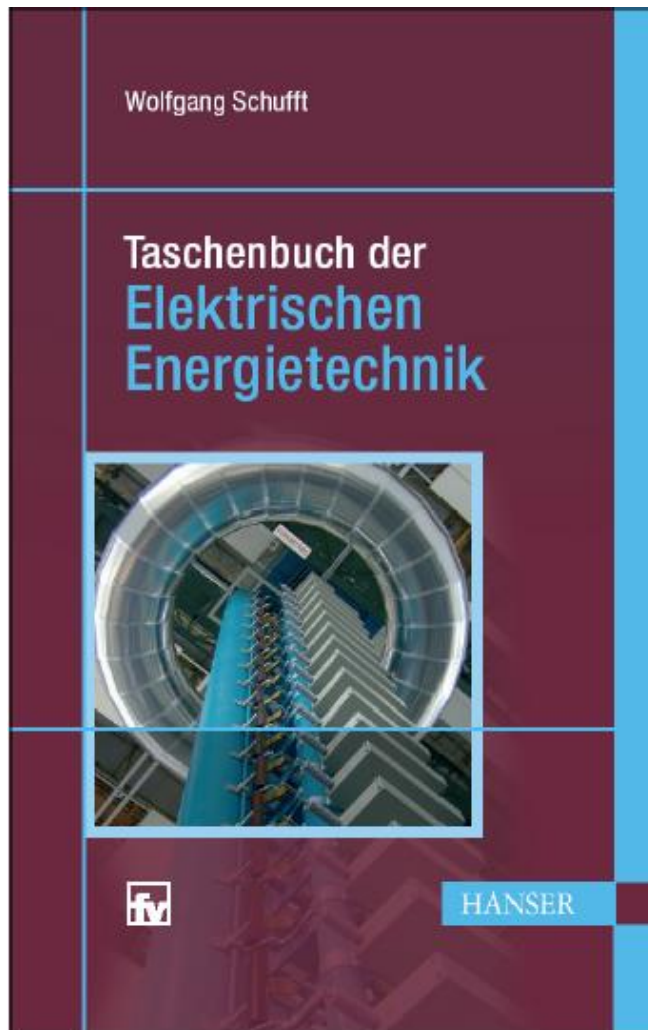
Ich blicke optimistisch ins neue Jahr, auch wenn wir alle noch nicht wissen, wie lange uns die Geißel der Corona noch in unserem Handlungsspielraum einschränkt. Bleiben Sie der Professur Energie- und Hochspannungstechnik auch in der anstehenden Übergangsphase verbunden. Wir sind nach wie vor für Sie da.

Ich wünsche Ihnen persönlich gleichfalls alles Gute, bleiben sie gesund und guter Dinge.

Chemnitz im Dezember 2020

Ihr





#### Inhalt:

1. Energiebegriff, allgemeine Grundlagen (W. Schufft)
2. Elektroenergiebereitstellung (U. Rindelhardt, T. Sander, J. Zschernig)
3. Betriebsmittel in Elektroenergienetzen (T. Hiller)
4. Planungsaspekte für elektrische Netze und Anlagen (J. Backes, H. Bauer, P. Schegner)
5. Beanspruchungen von Betriebsmitteln (W. Schufft, S. Großmann, H. Löbl)
6. Hochspannungstechnik (W. Schufft)
7. Schaltgerätetechnik (F. Berger)
8. Elektrische Maschinen und Antriebe (W. Hofmann)
9. Leistungselektronik (W. Hofmann)
10. Elektroenergieanlagen-sicherheit (K.-H. Freytag, P. Schegner)
11. Elektroenergie-wirtschaft (N. Menke)

# Inhalt

1	Vorwort.....	2
2	Personelle Besetzung .....	6
3	Resümee von Prof. Schufft vom 01.04.2000 bis 31.03.2021 .....	8
3.1	Mitarbeiter der Professur chronologisch.....	8
3.2	Lehrbeauftragte .....	10
3.3	Drittmittel .....	11
3.4	Promotionen .....	12
3.5	Doktoranden der Professur chronologisch .....	12
3.6	Veröffentlichungen .....	13
4	Lehre .....	14
4.1	Studienablaufpläne .....	14
4.2	Beschreibung der Lehrfächer der Professur .....	15
5	Forschung .....	19
5.1	Schwerpunkte .....	19
5.2	Aktuelle Promotionsvorhaben .....	22
6	Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten .....	36
6.1	Masterarbeiten .....	36
6.2	Bachelorarbeiten .....	37
7	Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge .....	39
8	Höhepunkte .....	40
8.1	Promotionsverteidigung Suleiman Hadid .....	40
8.2	Promotionsverteidigung Dr. Akif Gürlek am 30.11.2020.....	41
8.3	Acht Millionen Euro Förderung für Wasserstoff-Forschung in Chemnitz.....	42
9	Ausstattung für Praktika und Prüfungen in der Hochspannungstechnik.....	45
10	Laboraausstattung.....	48
11	Dienstleistungsangebote.....	52
11.1	Dielektrische Prüfungen.....	52
11.2	Diagnosemöglichkeiten .....	52
11.3	Prüfung der Stromtragfähigkeit .....	52
11.4	Spezielle Messaufgaben .....	52
11.5	Virtueller Stoßspannungsgenerator.....	53
11.6	Netzanalysen .....	53
12	Referenzen.....	54

## 2 Personelle Besetzung



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang  
Schufft  
Leiter der Professur



Prof. em. Dr.-Ing. habil.  
Dietrich Amft - Emeritus



B.A. Antje Voit  
Sekretariat



Dr.-Ing. Akif Gürlek  
Doktorand bis 04/20



M.Sc. Benjamin Jacobsen  
Doktorand



Dipl.-Ing. David Kühnert  
Doktorand



M.Sc. Farhad Safargholi  
Doktorand



M.Sc. Kia Malekian-Boroujeni  
Doktorand



M.Sc. Siavash Taghipour-  
Broujeni  
Doktorand bis 09/20  
seit 09/20 Externer Dokto-  
rand



Dr.-Ing. Jens Teuscher  
Mitarbeiter



Jürgen Lippold  
Technischer Angestellter



Michael Stark  
Technischer Angestellter  
bis 12/20



Prof. Dr.-Ing. Thilo Bocklisch  
Lehrbeauftragter



Dr.-Ing. Kaveh Malekian-  
Boroujeni  
Lehrbeauftragter



Prof. Dr.-Ing. Norbert Menke  
Lehrbeauftragter



Dr.rer.nat. Ralf Pietsch  
Lehrbeauftragter



Dipl.-Ing. Eckart Wiesenhueter  
Externer Doktorand



M.Sc. Michael Würfel  
Externer Doktorand



M.Sc. Khalid Hachimy  
Externer Doktorand



M.Sc. Philipp Spindler  
Externer Doktorand



## 3 Resümee von Prof. Schufft vom 01.04.2000 bis 31.03.2021

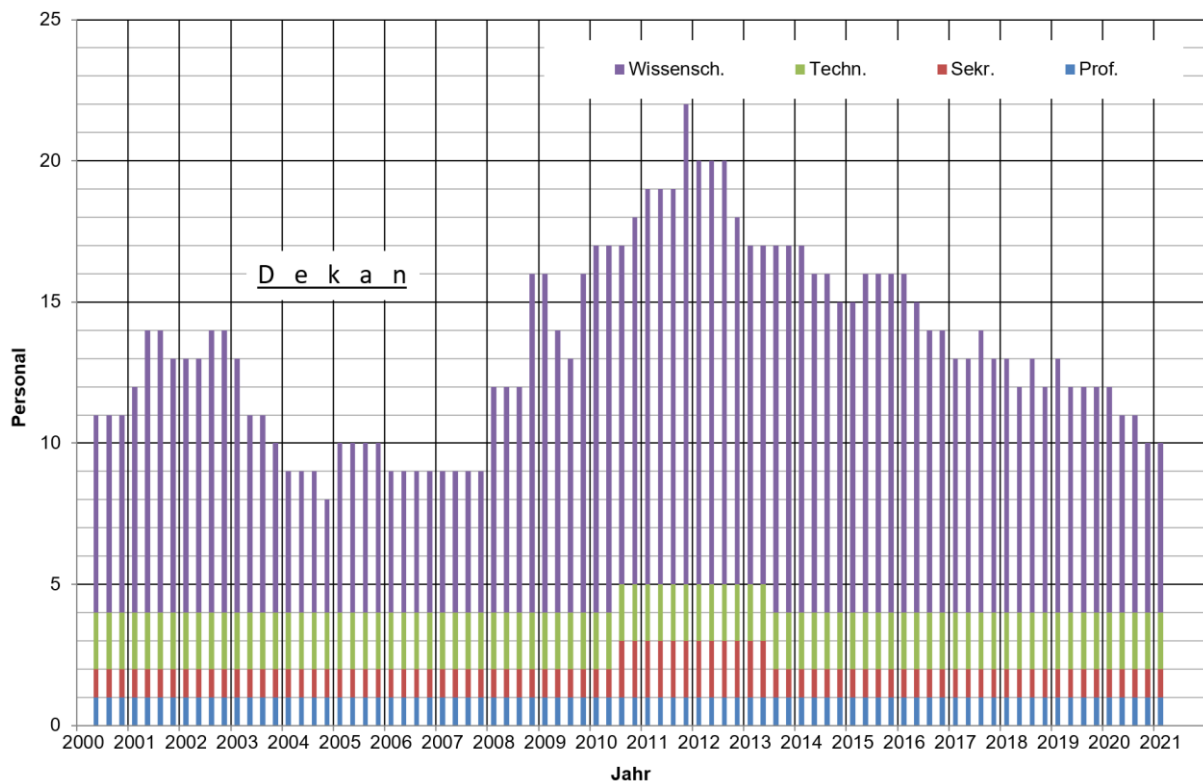
Ich fange mit den Personen an, mich eingeschlossen waren das 51. Die Zusammenarbeit hat zumeist Spaß gemacht. Viele der Ehemaligen erinnern sich gern an ihre Zeit an der TU in Chemnitz und sind der Professur verbunden geblieben.

### 3.1 Mitarbeiter der Professur chronologisch

Prof. Dr.-Ing. Rolf Hartig	bis 08/2000
Dr.-Ing. Alf Wabner	bis 09/2001
Dipl.-Ing. Jens Reichel	bis 06/2002
Dipl.-Ing. Dirk Werner	bis 02/2003
Dipl.-Ing. Dieter Breitzfeld	bis 01/2004
Prof. Dr.-Ing. Werner Hiller	bis 12/2005
Michael Stark	bis 12/2020
Jürgen Lippold	bis 12/2021
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft	von 04/2000 bis 03/2021
Angelika Wickleder	von 04/2000 bis 10/2011
Prof. Dr.-Ing. Mirko Bodach	von 05/2000 bis 08/2004
Dipl.-Ing. Frank Schreiter	von 11/2000 bis 08/2006
Prof. Dr.-Ing. Scheffler	von 01/2001 bis 03/2003
Dipl.-Ing. Uwe Jilek	von 04/2001 bis 12/2005
Dipl.-Ing. Heiko Mehlich	von 06/2001 bis 08/2003
Dipl.-Ing. Klaus Mehlhorn	von 08/2002 bis 06/2008
Dr.-Ing. Steffen Hetzel	von 12/2004 bis 02/2010
Dr.-Ing. Eva Marie Kurscheid	von 02/2005 bis 03/2009
Dipl.-Ing. Ramon Rodriguez	von 02/2006 bis 08/2006
Dipl.-Ing. (FH) Dietrich Barsch	von 10/2006 bis 10/2012
Prof. Dr.-Ing. Uwe Schmidt	von 10/2006 bis 09/2012
Dr.-Ing. Ali Shirvani	von 01/2008 bis 06/2015
Prof. Dr.-Ing. Thilo Bocklisch	von 01/2008 bis 03/2016
Dr.-Ing. Andreas Götz	von 02/2008 bis 09/2017
M.Sc. Lan Liu	von 07/2008 bis 06/2009
Dr.-Ing. Kaveh Malekian	von 10/2008 bis 02/2018
B.Sc. Selma Coban	von 10/2008 bis 06/2010
Dr.-Ing. Jens Teuscher	seit 10/2008
M.Sc. Samer Sami Mahmood Al-Maamoory	von 10/2009 bis 09/2012
Dr.-Ing. Suleiman Hadid	von 10/2009 bis 05/2018
Dr.-Ing. Abdullah Hoshmeh	von 10/2009 bis 01/2019
M. Sc. Alvaro Mateus Massunda	von 01/2010 bis 11/2011
Dipl.-Ing. Stefan Merkel-Krell	von 04/2010 bis 02/2014

Kerstin Grünert	von 07/2010 bis 09/2013
M.Sc. Anne Göhlich	von 10/2010 bis 09/2014
Dr.-Ing. Akif Gürlek	von 10/2010 bis 03/2020
Dipl.-Ing. Martin Paulitschke	von 01/2011 bis 04/2016
Dipl.-Ing. David Kühnert	von 11/2011 bis 12/2014; seit 09/18
B.Sc. Antje Voit	seit 12/2011
Josephine Kohlhaase	von 07/2013 bis 08/2013
Dr.-Ing. Michael Böttiger	von 07/2013 bis 04/2016
Stefanie Stork	von 09/2013 bis 08/2014
Dipl.-Ing. Björn Born	von 10/2014 bis 08/2018
M.Sc. Ghasem Nourirad	von 10/2014 bis 12/2016
M.Sc. Farhad Safargholi	seit 06/2015
M.Sc. Liana Maria Jacob	von 07/2016 bis 06/2019
M.Sc. Kai Jacob	von 07/2017 bis 06/2019
Franziska Kramer	von 11/2017 bis 11/2018
M.Sc. Benjamin Jacobsen	seit 07/2018
M.Sc. Taghipour	von 02/2019 bis 09/2020
M.Sc. Kia Malekian	seit 09/2019

Die Entwicklung des Personalbestandes ist in der folgenden Grafik dargestellt.



### 3.2 Lehrbeauftragte

Als Lehrbeauftragte haben unsere Lehre bereichert:

Prof. Dr.-Ing. Norbert Menke

Prof. rer. nat. habil. Udo Rindelhardt

Dr. rer. nat. Ralf Pietsch

Dr.-Ing. Dietmar Siegmund

Dr.-Ing. Rainhardt Fuchs †

Prof. Dr.-Ing. Thilo Bocklisch

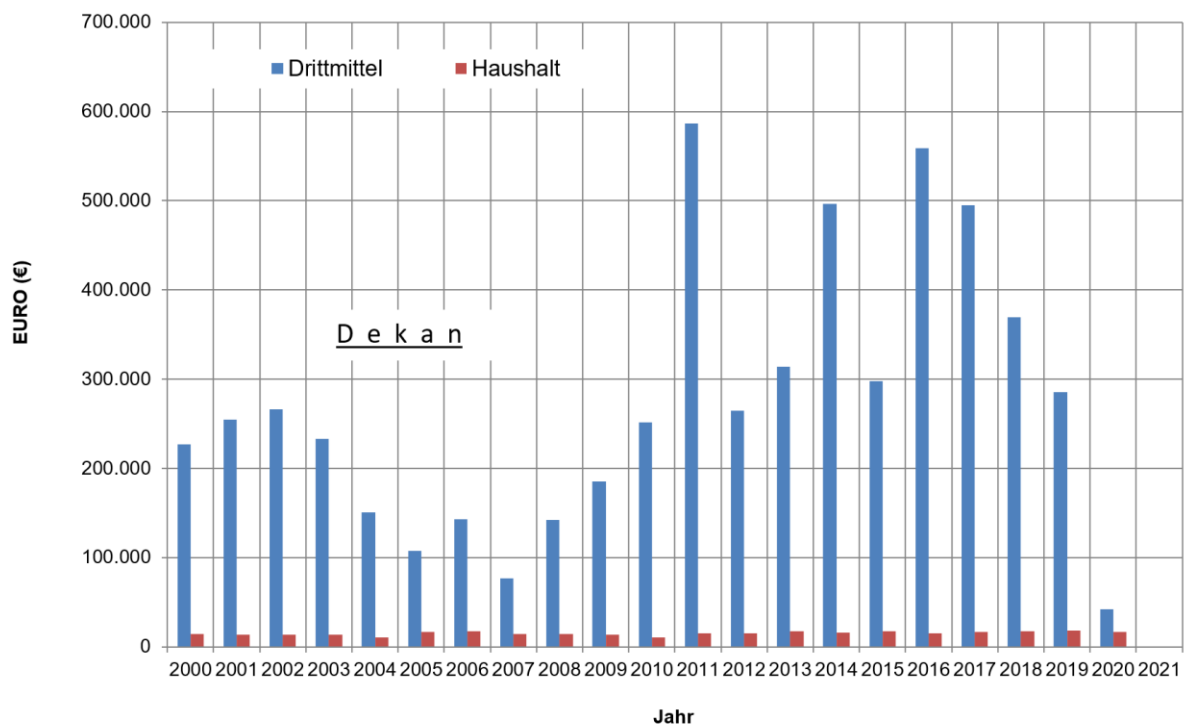
Dr.-Ing. Jens Teuscher

Dr.-Ing. Kaveh Malekian

Ihnen gilt auch an dieser Stelle nochmals mein herzlicher Dank.

### 3.3 Drittmittel

Die Drittmittel summieren sich in den 21 Berichtsjahren auf ca. 5,8 Millionen €. Das sind im Durchschnitt ca. 275.000 € pro Jahr, womit wir deutlich unter dem Bundesdurchschnitt für Ingenieurprofessuren liegen. Wenn man bedenkt, dass die energietechnische Prägung der Professur erst mit dem Jahr 2000 begonnen hat und es in Chemnitz keine ausstattungs-technischen Alleinstellungsmerkmale gegeben hat, so ist dieses Ergebnis doch einigermaßen zufriedenstellend. Es ist schwieriger als gedacht, in der energietechnischen Community wahrgenommen und akzeptiert zu werden.



Die Drittmittel stammen zu etwa zwei Dritteln aus der privaten Wirtschaft und zu einem Drittel aus staatlicher Förderung (DFG, AiF, SAB/ESF). Der Großteil der Drittmittel aus der privaten Wirtschaft kam von namhaften Großunternehmen. Eine langjährige, kontinuierliche und kollegiale Zusammenarbeit verbindet uns mit der *eins energie in sachsen GmbH & Co. KG* und der *inetz GmbH*, bei denen wir uns für eine langjährige, kontinuierliche und kollegiale Zusammenarbeit bedanken.

Mit den eingeworbenen Drittmitteln konnten wir über die Jahre im Durchschnitt etwa vier Drittmittelstellen finanzieren. Die zuvor dargestellte Personalentwicklung der Professur korreliert also mit den eingenommenen Drittmitteln.

### 3.4 Promotionen

Im Berichtszeitraum wurden an der Professur 15 Dissertationen zum Abschluss gebracht, davon zwei in Fremdbetreuung (Wabner, Hartig). Eine 16. Dissertation (Würfel wurde im Januar 2021 eingereicht). Es ergibt sich damit eine Promotionsquote von 0,62 (13 Promotionen/21 Jahre).

### 3.5 Doktoranden der Professur chronologisch

Alf Wabner: *Beitrag zur Kurzschlussstrombegrenzung mit leitfähigen Polymercompounds in der Niederspannungsebene. Dissertation TU Chemnitz 2001 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. D. Amft)*

Rolf Hartig: *Untersuchungen zur Optimierung des Energiemanagements im Privatkundenbereich TU Chemnitz 2002 (Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Ebest)*

Jörg Scheffler: *Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlußleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten Dissertation TU Chemnitz 2002*

Eva Marie Kurscheid: *Zur Bereitstellung positiver Minutenreserve durch dezentrale Klein-KWK-Anlagen Dissertation TU Chemnitz 2009*

Thilo Bocklisch: *Optimierendes Energiemanagement von Brennstoffzelle-Direktspeicher-Hybridsystemen. Dissertation TU Chemnitz 2010*

Steffen Hetzel: *Zur Frage der Identifikation und Bewertung von Investitionsalternativen in Mittelspannungskabelnetzen Dissertation TU Chemnitz 2012*

Uwe Schmidt: *Frequenzabhängige Parameter von Kabeln zur Berechnung von Ausgleichsvorgängen im Zeitbereich. Dissertation TU Chemnitz 2013*

Ali Shirvani: *Ein Beitrag zum Entladungsverhalten langer Luftfunkenstrecken bei Blitzspannung. Dissertation TU Chemnitz 2014*

Jens Teuscher: *Leistungsflussoptimierendes Energiemanagement von dezentralen Energieversorgungssystemen in zukünftigen Niederspannungsnetzstrukturen. Dissertation TU Chemnitz 2015*

Andreas Götz: *Zukünftige Belastungen von Niederspannungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Dissertation TU Chemnitz 2016*

Kaveh Malekian: *Modellierung des Oberschwingungsverhaltens von Windparks mit probabilistischen Ansätzen. Dissertation TU Chemnitz 2016*

Sven Hunold: *Algorithmische Bestimmung der Alterungscharakteristik von Mittelspannungskabelmuffen basierend auf diagnostischen Messwerten und Betriebsmitteldaten. Dissertation TU Chemnitz 2016*

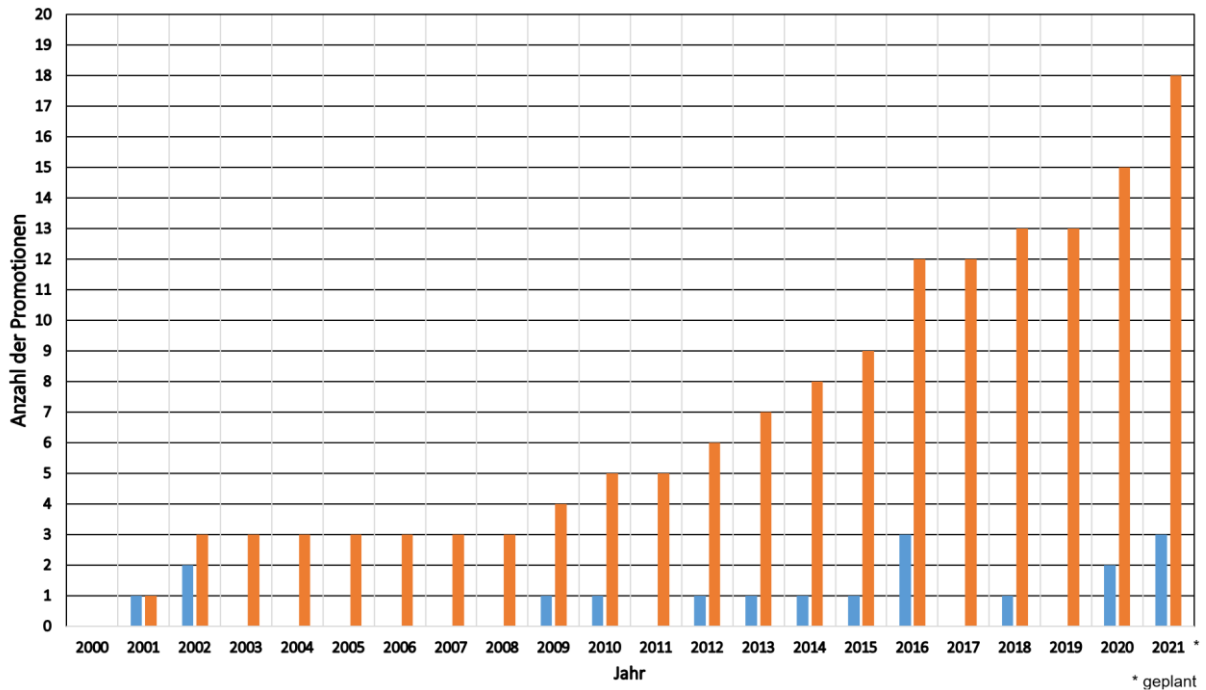
Abdullah Hoshmeh: *Entwicklung eines frequenzabhängigen Kabelmodells unter Verwendung einer komplexen -Ersatzanordnung. Dissertation TU Chemnitz 2018*

Suleiman Hadid: *Untersuchung der Einflussfaktoren auf den frequenzabhängigen Verlustfaktor an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln. Dissertation TU Chemnitz 2020*

Akif Gürlek: *Zum Entladungsprozess der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung bei standardisierter und oszillierender Blitzspannung. Dissertation TU Chemnitz 2020*

Michael Würfel: *Dynamische Berechnungen in elektrischen Netzen auf Basis symmetrischer Raumzeiger. Dissertation TU Chemnitz eingereicht im Jan. 2021*

Die Promotionen wurden in der in der Grafik dargestellten Abfolge abgeschlossen.



Insgesamt sind an der Professur 35 Personen angetreten, um zu promovieren, zwölf haben ihr Ziel erreicht, sechs arbeiten noch an ihrem Promotionsvorhaben. Fünf Promovenden haben ihr Vorhaben an anderer Stelle fortgesetzt und zwölf haben ihr Vorhaben abgebrochen.

### 3.6 Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum 2000 bis 2021 konnten wir ca. 220 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Tagungsbänden platzieren. Leider lassen sich diese hier kaum aufzählen. Sie sind aber auf der Homepage und in den Jahresberichten aufgeführt, neben Hunderten studentischer Abschlussarbeiten.

Alles in allem ziehe ich doch ein sehr positives Fazit. Bei vielleicht etwas unterdurchschnittlichem Ruhm hatte wir gemeinsam eher überdurchschnittliche Spaß an der gemeinsamen Arbeit.

## 4 Lehre

### 4.1 Studienablaufpläne

Lehrfach	Lehrverantwortlicher	Bachelor Elektrotechnik				Master Energie- u. Automatisierungssysteme	
		3. Sem.	4. Sem.	5. Sem.	6. Sem.	7. Sem.	8. Sem.
<b>Basismodule:</b>							
Elektrische Energietechnik/Nachhaltige Elektroenergieerzeugung	Schufft	2 1 0*					
Hochspannungstechnik	Schufft			3 1 2			
Elektroenergieübertragung u. -verteilung	Schufft				3 1 2		
<b>Vertiefungsmodule:</b>							
Netze und Betriebsmittel	Schufft				2 1 0		
Beanspruchung von Betriebsmitteln	Schufft					3 1 1	
Statistik und Isolationskoordination	Schufft						2 1 0
<b>Ergänzungsmodule:</b>							
Elektroenergiewirtschaft	Menke					1 0 0	
Netzberechnung und Schutztechnik	Teuscher						2 1 0
Diagnose- und Messtechnik	Pietsch						2 0 0
Elektroenergiespeicher und -wandlungssysteme	Bocklisch						1 0 0
Netzdynamik – HGÜ und FACTS	Malekian					1 0 0	

\* 2 1 0 bedeutet: 2 SWS (Semesterwochenstunden zu 45 min) Vorlesung, 1 SWS Übung, 0 SWS Praktikum. Wahlfächer werden für ein bestimmtes Semester empfohlen, z.B. im 8. Semester, auch eine frühere Belegung (in Klammern), z.B. im 6. Semester, ist möglich.

## **4.2 Beschreibung der Lehrfächer der Professur**

### **Elektrische Energietechnik/ Nachhaltige Elektroenergieerzeugung**

Basismodul im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik, 3. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen / 7 Übungen

#### **Prof. Schufft**

Inhalt: Energiebegriff, Überblick über das Elektroenergieversorgungssystem, Elektroenergieerzeugung in Wärmekraftwerken, Nutzung von Solarenergie, Elektroenergieerzeugung in Wasserkraftwerken, Elektroenergieerzeugung durch Windenergieanlagen, Elektroenergieerzeugung aus Bioenergie

### **Hochspannungstechnik**

Basismodul im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik, 5. Semester

Umfang: 23 Vorlesungen / 7 Übungen / 7 Praktikumsversuche

#### **Prof. Schufft**

Inhalt: Beanspruchungen von Isolierungen, Erzeugung hoher Spannungen, Klassifizierung und Berechnung des elektrischen Feldes, Entladungsphysik von Gasen, flüssigen und festen Isolierstoffen

### **Elektroenergieübertragung und -verteilung**

Basismodul im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik, 6. Semester

Umfang: 23 Vorlesungen / 7 Übungen / 7 Praktikumsversuche

#### **Prof. Schufft**

Inhalt: Aufbau, Struktur und Komponenten des Elektroenergiesystems, wichtige Berechnungsgrundlagen (wie symmetrische Komponenten) und deren Anwendung auf ausgewählte Elemente des Elektroenergiesystems

### **Netze und Betriebsmittel**

Vertiefungsmodul im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik, 6. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen / 7 Übungen

#### **Prof. Schufft**

Inhalt: Aufbau des Elektroenergienetzes, Spannungsebenen und Netzformen, Netztopologie, Systematisierung der Betriebsmittel, Aufbau und stationäres Verhalten von Betriebsmitteln, wie Leitungen, Transformatoren, Kompensationsanlagen



### **Beanspruchung von Betriebsmitteln**

Vertiefungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 1. Semester

Umfang: 23 Vorlesungen / 7 Übung / 3 Praktikumsversuche

**Prof. Schufft**

Inhalt: Klassifizierung und Beschreibung der Beanspruchungen von Betriebsmitteln durch innere und äußere Überspannungen, Wanderwellen, Lichtbögen und Kurzschlussströme, Wärmeberechnungen, Auslegungsprinzipien von Betriebsmitteln, insbesondere von Schaltern

### **Statistik und Isolationskoordination**

Vertiefungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 2. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen / 7 Übungen

**Prof. Schufft**

Inhalt: Statistische Verteilungsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung des Isoliervermögens und von elektrischen Beanspruchungen, Planung von Hochspannungsprüfungen und Testverfahren zum Nachweis der Unabhängigkeit von Messreihen, Grundzüge der Isolationskoordination, Grundbegriffe der Zuverlässigkeit einschließlich deren Berechnung

### **Elektroenergiewirtschaft**

Ergänzungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 1. Semester

Umfang: 7 Vorlesungen

**Prof. Menke**

Inhalt: Grundlagen der Energiewirtschaft, Kosten der Energieversorgung, Investitionsrechnung, Energiepreisbildung, Belastungskurven, Kraftwerkseinsatz und Lastverteilung, wirtschaftlicher Verbundbetrieb, Betriebsmittelauslastung, Least-Cost-Planning, Durchleitung, Marketing und neue wirtschaftliche Aspekte

### **Netzberechnung und Schutztechnik**

Ergänzungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 2. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen / 7 Übungen

**Dr. Teuscher**

Inhalt: Netztopologie, Leistungsflussberechnungen in Strahlen-, Ring- und Maschennetz, Methoden zur Kurzschlussberechnung (symmetrisch und unsymmetrisch), Schutzmaßnahmen im Niederspannungsnetz, Schutz im Mittelspannungsnetz, Schutzkriterien und Sensoren

### **Diagnose- und Messtechnik**

Ergänzungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 2. Semester

Umfang: 15 Vorlesungen

**Dr. Pietsch**

Inhalt: Aspekte der Instandhaltung und Qualitätssicherung, Messung des Scheitelwertes der Spannung, Transienten-Messsysteme, nichtkonventionelle Messwandler, Teilentladungs- und Verlustfaktor-Messtechnik, Diagnose und Messtechnik für Kabel, gasisolierte Schaltanlagen (GIS) und Transformatoren

### **Energiespeicher und -wandlungssysteme**

Ergänzungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 2. Semester

Umfang: 7 Vorlesungen

**Prof. Dr. Bocklisch**

Inhalt: Überblick über die Transformation des Elektroenergiesystems, Thermische Energiespeicher, Schwungradspeicher, Pumpspeicher- und Druckluftspeicherkraftwerke, Brennstoffzellen und Wasserstoffspeicher, Batterien und Doppelschichtkondensatoren, Multispeicher-Hybridsysteme

### **Netzdynamik – HGÜ und FACTS**

Ergänzungsmodul im Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme, 1. Semester

Umfang: 7 Vorlesungen

**Dr. Malekian-Boroujeni**

Inhalt: Wirk- und Blindleistungsfluss, Leistungselektronische Umrichterkonfigurationen, Leistungselektronische Komponenten bei Gleichstromübertragung (HGÜ, Leistungselektronische Komponenten bei der Drehstromübertragung und -verteilung (FACTS), Einfluss leistungselektronischer Komponenten auf die Netzstabilität und die Spannungsqualität, Anwendungen, Studien und Projekte

# 5 Forschung

## 5.1 Schwerpunkte

Die Schwerpunkte in der Forschung orientieren sich an den Anforderungen der Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber sowie der Industrie des deutschen und internationalen Marktes. Entwicklungen mit hohem wissenschaftlichem Potenzial sind dabei auf dem Gebiet der Einbindung großer Off-Shore-Windparks und der Integration dezentraler Einspeiser zu verzeichnen. Als Folge des zunehmenden Kostendrucks auf die Netzbetreiber, verursacht durch die Regulierung des Energiemarktes, werden verbesserte Systeme zur Entwicklung effizienter Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien notwendig. Zur Bedienung dieser Systeme müssen Kenntnisse vorliegen, die ein Abbild des momentanen Betriebszustandes und der Reduzierung des Isoliervermögens erlauben. Unter den genannten Forschungsschwerpunkten finden sich weitere Informationen mit Kurzfassungen zu den Tätigkeiten.



Abbildung 1: Forschungsschwerpunkte und Arbeitsgebiete der Professur

### **Netzintegration der Elektromobilität**

- Auswirkungen der Elektromobilität auf das zukünftige Elektroenergiesystem
- Konzepte für multimodale Mikromobilität unter Nutzung lokaler regenerativer Energien (Nachwuchsforscherguppen fahrE und ECoMobility)

### **Modellierung zukünftiger Niederspannungsnetze:**

- Simulation und Optimierung von Leistungsflüssen
- Belastung zukünftiger Niederspannungsnetze unter Beachtung von Verbraucher- und Erzeugerstrukturen

### **Speichersysteme für eine nachhaltige Energieversorgung**

- Intelligente dezentrale Energiespeichersysteme (Nachwuchsforscherguppe IDE)
- Konzepte zur Speicherung von Elektroenergie im Megawatt-Bereich

### **Probabilistische Netzplanung:**

- Probabilistische Untersuchung zur Bewertung der Lastsituation unter Einbeziehung dezentraler Erzeugungseinheiten
- Untersuchung der Einspeisecharakteristik von Photovoltaik und Windenergie in der Mittelspannungsebene
- Energieeffiziente Netzauslastung (Nachwuchsforscherguppe „SyNErgIT“)

### **Netzanbindung leistungsstarker regenerativer Erzeugungsanlagen**

- Einfluss großer Wind- und PV-Parks auf die Übertragungs- und Verteilungsnetze
- Implementierung leistungsstarker HVDC-Systeme
- Entwicklung geeigneter Modelle von Windenergieanlagen zur Beschreibung des Systemverhaltens

### **Zustandsbewertung und Asset-Management**

- Lebensdaueranalysen von Anlagegütern in Bezug auf den Gesamtanlagenbestand
- Untersuchung der Auswirkungen auf die Restlebensdauer von Mittelspannungs-Massekabeln durch Masseverarmung in Gefällestrrecken
- Optimierung von Instandhaltungsstrategien
- Labor-Untersuchungen an Mittelspannungskabeln und -garnituren und Isoliersystemen
- Mess-, Diagnose- und Prüfverfahren (Teilentladung, Verlustfaktor, Stufentests, Dauer Versuch, ...)
- Modellierung von Betriebsmitteln
- Vor-Ort-Untersuchungen mit einem mobilen Diagnose- und Messsystem

**Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem**

- Transiente Ausgleichsvorgänge auf langen Kabelstrecken in der HS- und HöS-Spannungsebene
- Berechnung von Überspannungen bei Schalt- und Fehlvorgängen im Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz

**Isolationskoordination**

- Isolationskoordination in ausgedehnten Industrieanlagen und Netzen
- Untersuchungen zur Ausbreitung von Blitzströmen im Hoch- und Höchstspannungsnetz unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Parameter von Betriebsmitteln

**Oberschwingungsverhalten regenerativer Erzeugungsanlagen**

- Überlagerung verschiedener Erzeugungseinheiten (Verbundprojekt Netzharmonie)
- Modellierung frequenzabhängiger Parameter der Netzkomponenten
- Optimierung der Umrichter-Modulationstechnik zur Verbesserung des Oberschwingungsverhaltens am Netz

## 5.2 Aktuelle Promotionsvorhaben

In der folgenden Übersicht sind die Arbeitsthemen der aktuellen Promotionsvorhaben genannt. Einen Eindruck über diese Themen und deren Bearbeitungsfortschritt sollen die darauffolgenden Beiträge vermitteln.

- Aldiab, A.\*:** Optimierter Betrieb von STATCOMs zur Verbesserung der Elektroenergiequalität unter besonderer Berücksichtigung von Oberschwingungen
- Hachimy, K. \*:** Der potential der Trennstellenverlagerung in Niederspannungsnetze
- Jacobsen, B.:** Flexibilitätsmarkt – Wie ein exemplarischer Markt für Spannungsqualität die Flexibilität des Elektroenergienetzes erhöht
- Kühnert, D.:** Entwicklung einer intelligenten Ladesteuerung für Elektrofahrzeuge in einem Mobility-On-Demand-Konzept unter der Nutzung lokaler regenerativer Energien
- Malekian, K.:** Oberschwingungs-Modellvalidierung einer Energieerzeugungseinheit
- Safargholi, F.:** Ansätze zur Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle am Netzanschlusspunkt
- Spindler, P.:** Erstellung eines Planungsleitfades für Niederspannungsnetze mit effizienter Anwendung von Lastflussberechnungen
- Taghipour Broujeni, S. \*:** Korona Einsetzspannung in Abhängigkeit von der Spannungsform
- Wiesenhütter, E.\*:** Untersuchung der Auswirkungen von Oberschwingungen höherer Ordnung auf elektrische Betriebsmittel in Energieverteilungssystemen, insbesondere auf Transformatoren
- Würfel, M.\*:** Universelle dynamische Netzberechnung

\* externe Promotion



## **Entwicklung einer intelligenten Ladesteuerung für Elektrofahrzeuge in einem Mobility-On-Demand-Konzept unter der Nutzung lokaler regenerativer Energien**

M.Sc. Khalid Hachimy

---

Der starke Ausbau dezentraler erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen, wie zum Beispiel: Blockheizkraftwerke (BHKWs) oder Photovoltaikanlagen (PV), führt zu einer stark fluktuierenden Stromeinspeisung. An sonnenreichen Tagen findet an den Ortsnetzstationen (ONS) deshalb eine Lastumkehr statt, so dass die überschüssige Energie in das Mittelspannungsnetz zurückgespeist wird. Die hohen Schwankungen in der Last durch Bezug und Rückspeisung verursachen hohe Schwankungen in der Spannung, die i.d.R. durch den Einbau eines rONTs (regelbares Ortsnetztransformator) ausgeglichen werden.

Dies ist allerdings keine absolute Lösung des Problems, da die überschüssige Energie in das Mittelspannungsnetz zurückgespeist wird und somit die Spannungsanhebung dort geschieht. Um dies komplett zu vermeiden, wird hier der Ansatz verfolgt, die temporäre hohe Einspeisung aus dezentralen Anlagen in benachbarten Netzgebieten durch automatisierte Umschaltungen an den relevanten KV's weiterzuleiten. Zu erwarten ist eine wirtschaftliche und effiziente Energielast-Verschiebung, so dass die Netzbetreiber keine Leistungseinbußen und Energieverluste in Kauf nehmen müssen.

Dieses wird real am starren Netz an einem Stadtteil der Stadt Reutlingen im Land Baden-Württemberg eingesetzt. Der Stadtteil ist in acht Netzgebiete unterteilt. Das Projekt fokussiert sich auf zwei Netzgebieten. Die zu betrachtenden Gebiete sind Lange Morgen und Deger-schlachter Straße.

Der Ortsnetzteil Lange Morgen wird von der ONS „Lange Morgen“ mit Strom versorgt. Die Station verfügt über einen Transformator mit der Bemessungsleistung 630 kVA (siehe Tabelle 1). Die Spitzenlast vom Transformator beträgt 89,4 kW. Im Ortsnetzteil Lange Morgen sind 30 Häuser bzw. Industrieeinheiten gebaut, welche in Summe auf einen jährlichen Stromverbrauch von 240 MWh kommen. In diesem Gebiet sind fünf PV-Anlagen installiert. Insgesamt verfügen die installierten PV-Anlagen über eine Nennleistung von knapp 119 kWp und speisen eine Energie von ca. 109 MWh im Niederspannungsnetz ein.

Im Ortsnetzteil Lange Morgen beträgt der Anteil an PV-Strom 45 Prozent vom jährlichen Strombedarf. Bei Erfüllung der Standart-Testbedingungen (STC, bedeutet Sonneneinstrahlung von 1000W/m<sup>2</sup>, Luftmasse 1,5 und Zelltemperatur von 25°C <sup>1</sup>) kann mit einer Einspeiseleistung von ca. 119 kW gerechnet werden. Dieser Wert überschreitet deutlich die Spitzen-

---

<sup>1</sup> Rebhan, E. (2002): Energiehandbuch: Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=jQLuuqi-4OwC>.



last im ganzen Gebiet, die auch sicherlich nicht in den STC-Stunden verbraucht wird. Bei diesem Szenario muss die elektrische Energie aus dem NS-Netz ins MS-Netz zurückgespeist werden.

Im benachbarten Ortsnetzteil ist ebenso eine Ortsnetzstation mit einer Bemessungsleistung von 630 kVA installiert. Die Station versorgt 102 Häuser mit Strom und hat damit einen höheren Spitzenlastwert, der bis zu 158,7 kW steigt. Der jährliche Stromverbrauch im Gebiet Degerschlachter Straße beträgt 454 MWh. In diesem Gebiet sind aufgrund der höheren Häuseranzahl 20 PV-Anlagen auf den Dächern installiert. Die dezentralen Erzeugungsanlagen verfügen über eine Nennleistung von ca. 140 kWp und speisen im Jahr bis 125 MWh elektrische Energie im NS-Netz. Das führt zum Grünstrom-Anteil von 27,5 Prozent am gesamten Energieverbrauch.

Parameter	Lange Morgen	Degerschlachter Straße
Transformatorleistung	630 kVA	630 kVA
Spitzenlast	89,4 kW	158,7 kW
Anzahl Häuser	30	102
Jährlicher Strombedarf	240,5 MWh	454 MWh
Anzahl PV-Anlagen	5	20
Gesamte PV-Leistung	118,7 kWp	140,3 kWp
PV-Einspeisung	108,3 MWh	125 MWh
PV-Anteil	45 %	27,5 %

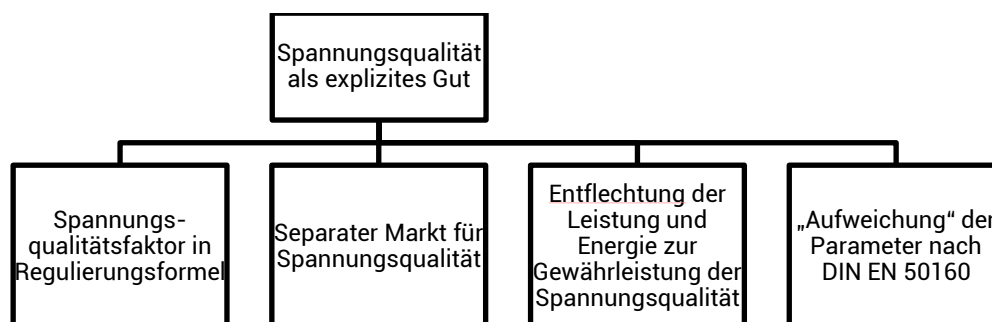
**Tabelle 1: Vergleich der Netzgebiete „Lange Morgen“ und „Degerschlachter Straße“**



## Flexibilitätsmarkt - Wie ein exemplarischer Markt für Spannungsqualität die Flexibilität des Elektroenergienetzes erhöht

M. Sc. Benjamin Jacobsen

Die Versorgung mit elektrischer Energie ist eine Grundsäule für die Sicherstellung der Bruttowertschöpfung sowie der Innovationskraft von Industrienationen und ist damit von entscheidender Bedeutung [1]. Die Güte bzw. Unterbrechungsfreiheit der Elektroenergieversorgung wird mit dem Begriff der Versorgungszuverlässigkeit beschrieben. Im Allgemeinen beschreibt diese Kennzahl die Sicherstellung der Versorgung mit elektrischer Energie am jeweiligen Netzanschlusspunkt. An dieser Stelle gibt es verschiedene Auffassungen, welche Bedingungen bzw. Voraussetzungen für eine entsprechende Versorgungszuverlässigkeit erfüllt sein müssen. Eine originelle und logische Beschreibung wird durch Krämer und Westermann gegeben, indem sich die Versorgungszuverlässigkeit aus der Netzzuverlässigkeit und der Produktqualität der elektrischen Energie zusammensetzt [2]. Mit dieser Auffassung wird dem Inhalt der Anreizregulierungsverordnung gefolgt. Auf dieser Grundlage werden die Erlösobergrenzen der Netzbetreiber festgelegt. Dazu ist innerhalb der Verordnung eine Gleichung festgelegt, die verschiedene Aspekte der Aufgaben von Netzbetreibern berücksichtigt. Unter anderem wird mit dem Qualitätselement die Versorgungszuverlässigkeit berücksichtigt. An dieser Stelle baut sich ein Spannungsfeld auf. Bereits lang bevor eine negative Beeinflussung der Spannungsqualität zu einer Beeinflussung der Versorgungszuverlässigkeit führt, werden die Grenzwerte für Parameter der Spannungsqualität nach DIN EN 50160 überschritten und müssen durch Netzbetreiber kompensiert werden. Somit entstehen den Netzbetreibern durch die in DIN EN 50160 festgesetzten Grenz- und Sollwerte mit ihren Ausnahmen erhebliche Aufwendungen, ohne dass eine direkte Berücksichtigung durch die Anreizregulierung stattfindet. Mit dieser Erkenntnis erscheint es zielführend die Entflechtung der Energieversorgung insoweit voranzutreiben, dass die Spannungsqualität als explizites Gut, wie beispielsweise Regel- oder Blindleistung ausgelagert und gehandelt wird. Zur Umsetzung der Auslagerung der Spannungsqualität mit ihren Parametern können zunächst vier Grundstrategien vorgeschlagen werden.



**Abbildung 2: Varianten um Spannungsqualität als explizites Gut zu etablieren**

Zusammenfassend ist aus aktuellen Perspektiven eine Entflechtung (auch als Unbundling bezeichnet) der Energie und Leistung zur Gewährleistung der Parameter der Spannungsqualität am erfolgversprechendsten. Eine Erweiterung der Regulierungsformel wurde durch die

Bundesnetzagentur regelrecht ausgeschlossen. Eine Evaluierung der Anreizregulierungsverordnung im Jahr 2020 hat ergeben, dass auch zukünftig keine Berücksichtigung des Aufwandes für die Einhaltung der Parameter der Spannungsqualität stattfinden soll [3]. Von einer „Aufweichung“ der Parameter der Spannungsqualität sollte ebenfalls abgesehen werden. Einer solche Maßnahme wäre ohnehin nur für einzelne Parameter möglich. Parameter, die netzweit konstant (wie die Netzfrequenz) oder bereits über andere Märkte gehandelt werden (wie Regel- und Blindleistung) kommen aufgrund der zu erwartenden hohen Auswirkungen nicht in Frage. Weiterhin sollten für eine Auslagerung Parameter genutzt werden, die quantifizierbar sind. Somit bietet sich die Untersuchung der Flexibilisierung von Oberschwingungen an.

Entsprechend dem Ziel der Erhöhung der Flexibilität des Energieversorgungsnetzes werden die Auswirkungen der Entflechtung bei der Regelung des Oberschwingungsgehalts betrachtet. Grob umrissen, soll es sich dabei um einen separaten Markt handeln, auf dem, ähnlich wie auf dem Markt für Blind- und Regelleistung, Energie- und Leistungsmengen gehandelt werden. In diesem Zusammenhang wird weiter untersucht, mit welchen Betriebsmitteln Oberschwingungen kompensiert werden sollten und ob eine eher zentrale oder dezentrale Anordnung dieser Systemelemente effizienter ist. Über die zu erwartenden Netzverluste, sollten die Oberschwingungsspannungen nicht (ausreichend) kompensiert werden, werden Kennlinien zur Regelung der einzusetzenden Leitung erstellt. Auf dieser Grundlage werden weiterhin Geschäfts- und Erlösmodelle entwickelt, die auf der um eine Marktperspektive erweiterten Methode zur integrierten Technologie- und Geschäftsmodellentwicklung [4] erstellt werden.

Der so entwickelte Markt zur Regelung des (regionalen) Oberschwingungsgehalts kann damit als Beispiel für eine Auslagerung weitere Spannungsqualitätsparameter dienen. Es wird gezeigt, welches Flexibilisierungspotential in einer aktiven Beeinflussung der Spannungsqualität liegt.

- [1] A. J. Schwab, *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*, 5th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55316-9>
- [2] M. Krämer and R. Westermann, "Die Qualitätsregulierung im Strombereich aus der Perspektive großstädtischer Verteilnetzbetreiber," in *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, pp. 16–19.
- [3] Bundesnetzagentur, *Evaluierung und Berichte der Bundesnetzagentur*. [Online]. Available: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Netzentgelte/Anreizregulierung/Evaluierung\\_Anreizregulierung/EvaluierungAnreizregulierung-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Netzentgelte/Anreizregulierung/Evaluierung_Anreizregulierung/EvaluierungAnreizregulierung-node.html) (accessed: Oct. 7 2020).
- [4] B. Jacobsen, H. Finke, S. Rother, U. Götze, and T. Von Unwerth, "Integrierte Geschäftsmodell- und Technologieentwicklung für Brennstoffzellensysteme," in *Konferenzband der ersten FC<sup>3</sup> Fuel Cell Conference Chemnitz*, W.-G. Drossel and T. Von Unwerth, Eds., Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz, 2019, pp. 231–239.



## Entwicklung einer intelligenten Ladesteuerung für Elektrofahrzeuge in einem Mobility-On-Demand-Konzept unter der Nutzung lokaler regenerativer Energien

Dipl.-Ing David Kühnert

Der Wandel des Mobilitätssektors ist aus wissenschaftlicher Sicht vor allem durch die Endlichkeit fossiler Ressourcen und der damit zusammenhängenden Nachhaltigkeit getrieben. Ein häufig gewähltes Maß zur Bewertung der Nachhaltigkeit sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Untersuchungen zeigen, dass Elektrofahrzeuge trotz ihrer höheren ökologischen Belastung bei der Herstellung nach wenigen Jahren bereits nachhaltiger sind, als konventionell angetriebene Fahrzeuge. Einen sehr wichtigen Einfluss hat dabei das Aufladen der Fahrzeuge. Die Elektrofahrzeuge sollten möglich ausschließlich oder zu einem sehr großen Teil mit Elektroenergie aus erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen geladen werden, ohne dabei zu einer erheblichen Mehrbelastung des Elektroenergiesystems und damit zu einem Netzausbau zu führen. Ziel des Dissertationsvorhabens ist es, eine intelligente Laderegulation zu entwickeln um genau diese Punkte und den Mobilitätsbedarf der Fahrzeugnutzer zu verbinden. Es wurde Fokus auf die Steuerung der Ladezeitpunkte gelegt, was mit der Beschränkung der Mode-3-Kommunikation begründet ist. Das Hauptziel der Arbeit ist es die Ladezeitpunkte so zu optimieren, dass der Anteil erneuerbarer Energie in der Ladeenergie eines Fahrzeuges maximal ist.

Die Arbeit stellt Ansätze vor, welche zur Optimierung der Ladezeitpunkte untersucht werden. Das gesamte Problem lässt sich mit Hilfe eines Regelkreises beschreiben, dargestellt in Abbildung 1. Die bekannten Eingangsgrößen (grün dargestellt) sind 15-Minuten-Werte der Verteilnetzlast und erneuerbarer Energie, sowie der zu ladende Energiebedarf. Die Beschränkungen für die Regelung (rot dargestellt), sind die Ladeleistung (definiert durch Mode 3 und den technischen Limitationen des Fahrzeuges) sowie Mobilitätsbedarf. Die Stellgröße um die Ladung eines Elektrofahrzeuges zu beeinflussen ist der Ladezeitpunkt (blau dargestellt).

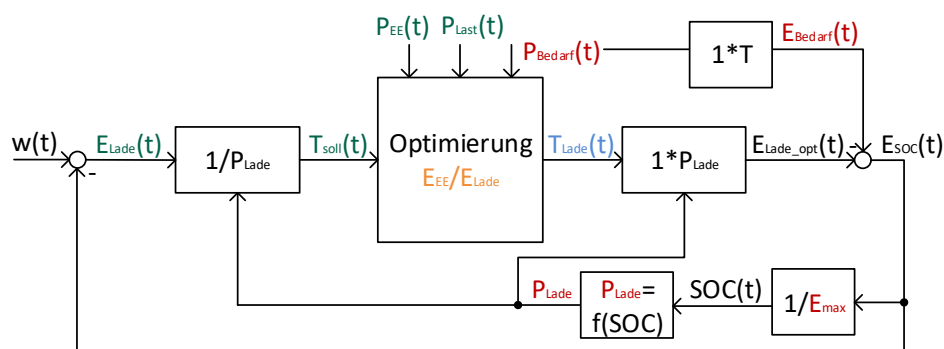


Abbildung 3: Regelkreis zur Beschreibung einer Laderegulation eines Elektrofahrzeuges aus energie-technischer Sicht

Ein möglicher Ansatz zur Optimierung sind mathematische Optimierungsalgorithmen welche mittels Schwarmintelligenz eine Vielzahl von Lösungen betrachten. Das Problem von Optimierungsalgorithmen ist, dass eine definierte Zielgröße möglichst optimal erreicht werden soll. Eine Laderegulierung soll jedoch auch Ladezeitpunkte berücksichtigen, ohne dass ein Energiebedarf besteht, d.h. ohne dass eine Zielgröße definierbar ist. Setzt man den untersuchten Ameisenalgorithmus ein, erhält man keine relevante Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie in der Ladeenergie. Mit Hilfe dieser Erkenntnis wurde der Ansatz der Priorisierung von Ladezeitpunkten entwickelt. Im Fall eines nicht vorhandenen Energiebedarfes gibt der Ansatz einen Schwellwert für das Verhältnis aus erzeugter erneuerbarer Energie und Last des Verteilnetzes vor, welcher dynamisch anhand historischer Verhältnisse angepasst wird. Im Bedarfsfall werden die Verhältnisse von erzeugter erneuerbarer Energie und der Last des Verteilnetzes mit Faktoren beaufschlagt, um Prognosefehler zu berücksichtigen. Es entsteht eine Rangfolge für Ladezeitpunkte, so dass an den besten benötigten Zeitpunkten geladen wird.

Der zweite Ansatz nutzt, wie bei einer klassischen Optimierung eine Gütefunktion. Die Gütefunktion  $G$  ist dabei durch Erfahrungen empirisch hergeleitet. Jede Einflussgröße kann mit einer separaten Teilgütefunktion berücksichtigt werden. In der Gütefunktion  $G$  wurden erneuerbare Energien, Verteilnetzlast und Ladezustand in separaten Teilgütefunktionen berücksichtigt. Die Wichtungsfaktoren und Exponenten wurden mittels Variantenvergleich und genetischer Optimierung bestimmt.

$$G = \frac{1}{A + B + C} \cdot \left( A \cdot \left( \frac{P_{EE}}{P_{EE_{max}}} \right)^a + B \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_{Last}}{P_{Last_{max}}} \right)^b \right) + C \cdot \left( 1 - \left( \frac{E_{SOC}}{E_{SOC_{max}}} \right)^c \right) \right)$$

Ein weiterer Ansatz ist es, die Gütefunktion in einem Scheduling-Algorithmus zu verwenden, um die Ladezeitpunkte zu optimieren. Scheduling-Algorithmen werden vor allem in der Prozess- und Maschinenbelegungsplanung genutzt. Im Anwendungsfall der Ladesteuerung stellen die Einflussgrößen die verfügbaren Ressourcen dar. Durch die Transformation der Gütefunktion  $G$  in eine Zielfunktion kann an jedem Zeitschritt eine Optimierung innerhalb des Prognosezeitraumes erfolgen, auch ohne eine bestimmte Zielgröße. Hierfür müssen entsprechende Schranken definiert werden.

$$g = - \sum_{k=0}^n G(k) \cdot P(k)$$

Mit dem empirischen Ansatz und der Priorisierung von Ladezeitpunkten konnten sehr gute Verbesserungen des Anteils erneuerbarer Energie an der Ladeenergie erzielt werden. Der Scheduling-Algorithmus liefert bessere Ergebnisse, als bei einer ungesteuerten Ladung, aber schlechtere Ergebnisse als die anderen beiden Ansätze. Bei einem Zubau erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen konnte eine gute Skalierung der Ansätze gezeigt werden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 dargestellt.

	Anteil erneuerbarer Energie		
	2012	2013	2014
Ungesteuert	5,71 %	5,73 %	6,31 %

Empirischer Ansatz	17,33 %	18,38 %	22,17 %
Scheduling-Algorithmus	11,74 %	11,85 %	15,05 %
Priorisierung von Ladezeit- punkten	18,00 %	17,89 %	21,43 %

---

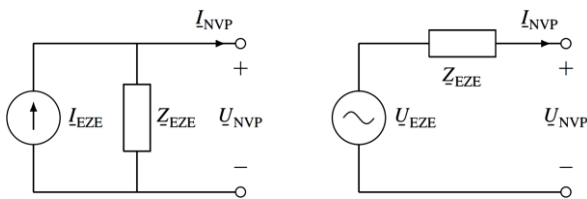
**Tabelle 2: Ergebnisse der Laderegung mit den entwickelten Ansätzen**



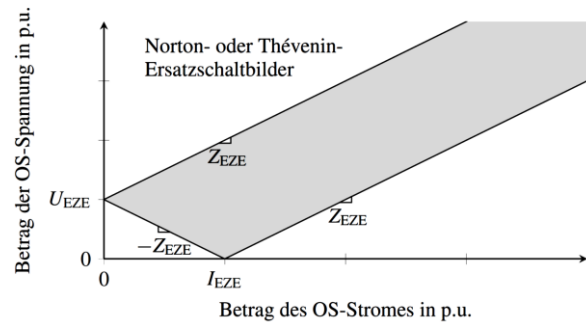
Eine Validierungsmethodik für Oberschwingungsmodelle ist erforderlich, um zu überprüfen, ob die Modelle ihren beabsichtigten Zweck erfüllen können. Die Validierung von Oberschwingungsmodellen für Erzeugungseinheiten (EZE) ist eines der wichtigsten Themen bei der Entwicklung von Oberschwingungsmodellen. Obwohl aus theoretischer Sicht die Validierung nicht kompliziert erscheint, stellen dennoch vor allem praktische Aspekte, wie die EZE-Vermessung und die Vielzahl der Modellstrukturen, eine Herausforderung dar.

In [1] wurde einer Validierungsmethodik mit dem Fokus auf Oberschwingungsmodelle von Energieerzeugungseinheiten im Frequenzbereich (nicht im Zeitbereich) entwickelt. Durch Vernachlässigung der Kopplung zwischen verschiedenen Oberschwingungsordnungen wird der Validierungsprozess für jede Ordnungszahl separat durchgeführt. Um die Gültigkeit eines EZE-Oberschwingungsmodells nachzuweisen, werden gemessene Oberschwingungen am Netzverknüpfungspunkt (NVP) der EZE verwendet. Eine allgemeine gültige Modellvalidierungsmethodik soll von Modellstruktur unabhängig sein.

Ein Oberschwingungsmodell beschreibt, wie die Oberschwingungsspannungen und -ströme bei einer bestimmten Oberschwingungsordnung zusammenhängen. Um die Abhängigkeit zwischen Oberschwingungsspannungen und -strömen zu visualisieren, können sie in der Spannung-Strom-Ebene aufgetragen werden (zum Beispiel y-Koordinate: Oberschwingungsspannung & x-Koordinate: Oberschwingungsstrom). In [1] wurde für jedes Oberschwingungsmodell ein entsprechender Bereich in der Spannung-Strom-Ebene definiert, in dem die Oberschwingungs-Spannung-Strom-Paare am NVP theoretisch lokalisiert werden können. Der entsprechende Bereich wurde in [1] als „Oberschwingungs-Spannung-Strom-Charakteristik“ des Modells bezeichnet. Bei einer gültigen Modellcharakteristik der EZE wird erwartet, dass die Oberschwingungs-Spannung-Strom-Paare am NVP innerhalb der Modellcharakteristik liegen. Der Grundgedanke des vorgeschlagenen Ansatzes besteht darin, zu beweisen, ob die Oberschwingungs-Spannung-Strom-Paare, die am NVP gemessen werden, auf der Spannung-Strom-Ebene in dem Bereich liegen, der durch das Modell vorhergesagt wird. Wenn ein gemessenes Oberschwingungs-Spannung-Strom-Paar nicht innerhalb der Modellcharakteristik liegt, stimmt das gemessene Spannung-Strom-Paar und die Modellcharakteristik nicht überein. Wenn das gemessene Oberschwingungs-Spannung-Strom-Paar innerhalb der Modellcharakteristik liegt, kann das Modell „gültig“ sein. Das heißt, das Lokalisieren des gemessenen Spannung-Strom-Paares innerhalb der Modellcharakteristik ist für die „Modell-zu-Daten-Übereinstimmung“ notwendig, aber keine ausreichende Bedingung. Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen den OS-Modellstruktur bzw. deren Spannung-Strom-Charakteristik einer beispielhaften Norton- oder Thevenin-Modelle.



**Abbildung 4: Norton- oder Thevenin-Ersatzschaltbilder.**



**Abbildung 5: Oberschwingungs-Spannung-Strom-Charakteristik der Norton- oder Thevenin-Modelle einer EZE für eine Oberschwingungsordnung (Beispielhaft).**

Die entwickelte Modellvalidierungsmethodik in [1] basiert derzeit nur auf den Amplituden der Oberschwingungen. Aus diesem Grund können Informationen bzgl. der Oberschwingungs-Phasenwinkel aus dem aktuellen Modellvalidierungsprozess nicht abgeleitet werden. Beispielsweise kann im Fall von Norton- oder Thévenin-Ersatzschaltbildern die Gültigkeit der Phasenwinkel der Oberschwingungsquellen und Innenimpedanz nicht nachgewiesen werden. Es ist geplant, die Phasenwinkel der Oberschwingungen in zukünftigen Untersuchungen einzubeziehen.

- [1] Kaveh Malekian et al., "Harmonic model validation of power generation units," in IET Renewable Power Generation, vol. 14, no. 13, pp. 2456-2467, 5 10 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.6268.





## Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle am Netzanschlusspunkt

M. Sc. Farhad Safargholi

---

In den letzten Jahren wurde ein erheblicher Teil der Forschungsarbeit im Bereich von Oberschwingungen zur Entwicklung der Ansätze für die Beurteilung der Oberschwingungen geleistet. Sie können in nicht-invasiven und invasiven Ansätze [1] kategorisiert werden. Nicht-invasive Ansätze geben eine Aussage über die Verantwortung für Oberschwingungsverzerrungen, ohne eine externe Störung im Elektroenergienetz zu verursachen. Die entscheidende Frage für die Durchführung dieser Ansätze ist die Messung der Oberschwingungsimpedanzen. Die nicht-invasiven Ansätze lassen sich in qualitative und quantitative Ansätze einteilen.

Der Hauptfokus der qualitativen Ansätze liegt auf der Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle und nicht auf der Ermittlung der Beiträge der Netz- und Anschlussnehmerseite zu Oberschwingungen. In [2, 3] wurden die gängigen qualitativen Ansätze zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen vorgelagertem Netz und dem Anschlussnehmer sowie Identifizierung der dominanten Oberschwingungsquelle am Netzanschlusspunkt in zwei Ansätze wie folgt eingeteilt:

- Ansatz basiert auf der Flussrichtung der Wirkleistung;
- Ansatz basiert auf der Blindleistung.

Im Gegensatz zu qualitativen Ansätzen können quantitative Ansätze den Oberschwingungsbeitrag der Netz- und Anschlussnehmerseite ermitteln. In diesem Zusammenhang wurde der folgende Ansatz entwickelt [4]:

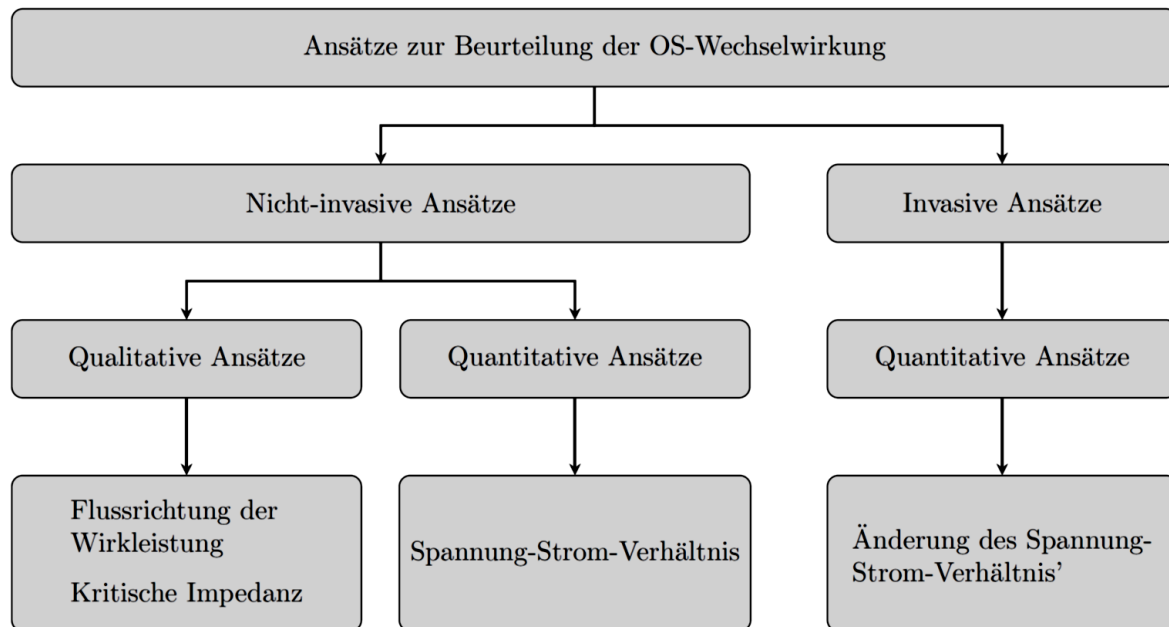
- Ansatz basiert auf dem Spannung-Strom-Verhältnis.

Anwendung nicht-invasiver Ansätze zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen vorgelagertem Netz und dem Anschlussnehmer ist aufgrund der praktischen Einschränkungen und Schwierigkeiten bei der Messung der Oberschwingungs-Äquivalentsimpedanzen begrenzt. Um dieses Problem zu überwinden, wurde in [1] ein neuer invasiver Ansatz vorgeschlagen, bei dem die Änderung der Spannungs-Strom-Verhältnisse am Netzanschlusspunkt als Indikator zur Identifizierung der dominanten Oberschwingungs-Äquivalentsspannung verwendet werden. Hier wird dieser Ansatz wie folgt genannt:

- Ansatz basiert auf Änderung des Spannung-Strom-Verhältnis.

Der wichtigste Vorteil dieses Ansatzes im Vergleich zu den nicht-invasiven Ansätzen ist seine Unabhängigkeit vom genauen Wert der Äquivalentsimpedanzen.

Abbildung 1 fasst die Ansätze zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen vorgelagertem Netz und dem Anschlussnehmer zusammen und gibt einen kurzen Überblick über ihre Klassifizierung.



**Abbildung 6: Klassifizierung der Ansätze zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen vorge-lagertem Netz und dem Anschlussnehmer.**

- [1] F. Safargholi, K. Malekian, W. Schufft, "Voltage-Current Ratio Difference" Concept for identifying the dominant harmonic source, *In International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. - Elsevier B.V. – vol. 121, 106147, 2020.
- [2] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, "On the Dominant Harmonic Source Identification—Part I: Review of Methods," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 3, pp. 1268-1277, June 2018.
- [3] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, "On the Dominant Harmonic Source Identification—Part II: Application and Interpretation of Methods," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 3, pp. 1278-1287, June 2018.
- [4] K. Malekian, "A novel approach to analyze the harmonic behavior of customers at the point of common coupling," *Compatibility and Power Electronics (CPE), 9th International Conference on*, pp. 31–36, June 2015.



## **Dynamische Berechnungen in elektrischen Netzen auf Basis symmetrischer Raumzeiger**

M. Sc. Michael Würfel

---

Netzberechnungen erfahren seit der flächendeckenden Nutzung der elektrischen Energie im 19. Jahrhundert eine stetig wachsende Bedeutung. Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien und dem damit einhergehenden Netzausbau steigen die Anforderungen an die Software-Produkte zur Netzberechnung. Infolge der zunehmenden Durchdringung der elektrischen Netze mit volatilen Photovoltaikanlagen, Ladesäulen für Elektrofahrzeuge und einer steigenden Anzahl geregelter Anlagen reicht häufig eine Momentaufnahme zur Auslegung desselben nicht mehr aus. Es ist zunehmend notwendig, Berechnungen über größere Zeitbereiche in der Größenordnung einiger Stunden bis zu mehreren Tagen zu betrachten. Mit den bekannten Ansätzen der Netzberechnung können Berechnungen entweder mit einer hohen Genauigkeit über kurze Zeitbereiche (EMT-Simulationen) oder durch Vereinfachungen auch über größere Zeitbereiche (RMS-Simulationen) durchgeführt werden. Weiterhin können auch Ansätze genutzt werden, mit denen Berechnungen über größere Zeitbereiche mit einer hohen Genauigkeit ermöglicht werden. Bei derartigen Ansätzen werden häufig die Vorteile rotierender Koordinatensysteme aus der Theorie der elektrischen Maschinen genutzt. Durch die Anwendung einer Transformationsvorschrift lassen sich die Augenblickswerte der Spannungen und Ströme in einem räumlichen Zweiachsenkoordinatensystem darstellen.

Werden die Gleichungen der Komponentenmodelle (z.B.: Kabel, Trafo, Lastmodell, usw.) in einem Netzberechnungsprogramm in ein solches rotierendes Koordinatensystem (dq-System) transformiert, so ergeben sich bei einem stationären Systemzustand für die elektrischen Größen Raumzeiger konstanter Amplitude und Winkellage. Es ist dadurch möglich, die elektrischen Größen mit wenigen Rechenschritten und somit auch sehr schnell über große Zeitbereiche berechnen zu können. Dieser Ansatz kann jedoch nur für symmetrisch belastete Systeme vorteilhaft eingesetzt werden, da sich in unsymmetrisch belasteten Netzen nach der Transformation keine Raumzeiger konstanter Amplitude und Winkellage einstellen. Die d- und q-Komponenten schwingen stattdessen mit einer Sinusschwingung doppelter Frequenz gegenüber der Netzfrequenz. Zusätzlich kann sich noch eine Nullkomponente ausbilden.

Um auch unsymmetrisch belastete Netze mit einer geringen Anzahl von Rechenschritten berechnen zu können, wird hierfür die Theorie der rotierenden Koordinatensysteme mit der Theorie der symmetrischen Komponenten kombiniert. Es entstehen dabei drei Systeme (Mit-, Gegen- und Nullsystem), die jeweils in ein separates rotierendes Koordinatensystem transformiert werden. In einem stationären Zustand ergeben sich die d- und q-Komponenten der drei Systeme zu Gleichgrößen. Eine Nullkomponente kann sich nicht ausbilden, da alle drei Systeme durch Anwendung mathematischer Hilfsgrößen in sich symmetrisch sind. In Anlehnung an die zugrundeliegenden Theorien wird diese Methodik als „symmetrische Raumzeiger“ bzw. 3dq-System bezeichnet.

Die Komponentenmodelle (Netzeinspeisung, Kabel, Trafo, Last, ...) wurden mit der neuen Methodik in das Netzberechnungsprogramm CERBERUS der Firma Adapted Solutions GmbH implementiert und anhand von Vergleichsrechnungen mit einer anderen Netzberechnungssoftware („Simscape“ von MathWorks) validiert. Bei einem einfachen Beispiel betrug die Anzahl der Rechenschritte in CERBERUS weniger als 1 % gegenüber der Vergleichssoftware. Die Ergebnisse der beiden Simulationsprogramme sind hierbei identisch. Anhand weiterer Vergleichsrechnungen konnte der Rechenvorteil mit symmetrischen Raumzeigern nachgewiesen werden.

Der Ansatz der symmetrischen Raumzeiger bildet neben den bereits etablierten Netzberechnungsmethoden eine weitere Möglichkeit, Berechnungen schnell und zugleich mit einer hohen Genauigkeit durchführen zu können. Neben den klassischen Netzelementen, wie zum Beispiel Kabel, Transformatoren oder Lasten lassen sich auch Reglerstrukturen in unsymmetrisch belasteten Netzen simulieren.

## 6 Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten

Auch im Jahr 2020 konnten an unserer Professur viele Studierende bei deren Studienabschluss positiv unterstützt und begleitet werden. Nachfolgend sind die Themen dieser Abschlussarbeiten aufgeführt. Detailliertere Informationen und Hinweise zu allen wissenschaftlichen Arbeiten können auf unserer Homepage eingesehen werden: <http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/lehre/studentischearbeiten.php>

Wir wünschen allen Absolventen für Ihre Zukunft viel Zufriedenheit und großen Erfolg!

### 6.1 Masterarbeiten

Martin Schumann	Beitrag zur Simulation der aktiven Beeinflussung der Spannungsqualität im Mittelspannungsnetz
Robert Szilágyi	Implementierung eines intelligenten Energiemanagements in einem städtischen Verteilnetz zur Nachbildung eines spannungsebenenübergreifenden Demand Side Managements
Daniel Rochlitzer	Modellunterstützter Planungsleitfaden für die vereinfachte lebenszyklusbasierte ökologische Bewertung einer nachhaltigen Gebäudeausrüstung
Kerstin Schuchardt	Konzept für einen wettbewerblich organisierten Markt für Spannungsqualität auf Basis des Blindleistungsmarktes
Christof Riedel	Entwicklung einer Berechnungsmöglichkeit für komplexe Anordnungen von Kabeln – auch unterschiedlicher Spannungsebenen – mit Hilfe der Software ATP/EMTP
Ulrike Tofelde	Der Regulierungsmarkt als Möglichkeit zur Konzeptionierung eines regulierten Marktes für Spannungsqualität
Santiago Camejo	Vergleich und Bewertung verschiedener Lastmodellierungsansätze für Niederspannungsnetze

Johannes Lochner	Elektrisches Design einer MSCDN-Anlage unter Berücksichtigung der Oberschwingungscharakteristik im Übertragungsnetz
Tom Winkler	Auslegung und Modellierung des Hochvoltantriebsstranges eines zweirädrigen Brennstoffzellenprototypenfahrzeuges

## 6.2 Bachelorarbeiten

Hisham Sherief	Untersuchung der Reproduzierbarkeit sowie Temperaturabhängigkeit von zeitabhängigen Merkmalen von Teilentladungen von Modellversuchen
Dominik Landmann	Zeitreihenbasierte Simulation eines Verteilernetzes mit einer Vielzahl hybrider dezentraler Prosumer
Ha My Bui	Analyse und Bewertung der Recyclingverfahren für Elektrofahzeugmotoren
Maja Scheunemann	Modellhafte Nachbildung eines dezentralen Energieversorgungssystems in der Simulationsumgebung Matlab-Simscape
Gengqi Li	Technische Netzanschluss-Bedingungen bzw.-Anforderungen für die Speicher in der Niederspannung und Mittelspannung
Alexander Blechschmidt	Vergleich der geplanten und der realen Entwicklung der Elektromobilität der vergangenen 15 Jahre
Anna Odenwald	Recherche und Vergleich verschiedener Planungsrichtlinien für Niederspannungsnetze

Murad Yasin	Lastmanagement mittels neuer Tarifmodelle und Vergleich mit aktuellen Stromtarifen in Deutschland
Jannik Hohmeier	Die Realisierbarkeit eines energieautarken Containergebäudes mittels erneuerbarer Energien und Energiemanagement
Yungu An	Der Einfluss der Spannungsqualität auf Netzverluste

## 7 Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge

Die im Jahr 2020 getätigten Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge sind nachfolgend sowie auf unserer Homepage aufgeführt.

**Adloff, S.; Dreyer, T.; Malekian, K.; Safargholi, F.:** *Determining model parameter values describing harmonic behavior of wind turbine generators*, Patent, Veröffentlichungsnummer EP3736936A1, weitere Nachanmeldungen WO2020229048A1, 2020.

**Gürlek, A.;** *Breakdown Process on Rod-Rod Air Gap under Oscillating Lightning Impulse Voltage*, in High Voltage, vol. 5, no. 3, pp. 319-326, 2020.

**Günther, M., Jacobsen, B., Rehme, M. et al.:** *Understanding user attitudes and economic aspects in a corporate multimodal mobility system: results from a field study in Germany*. Eur. Transp. Res. Rev. 12, 64 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00456-0>, 2020.

**Jacobsen, B; Stange, M.:** *Vorgehensmodell zur Simulation von gebündeltem Energiebedarf*, ARGESIM Report 59, Fraunhofer IAIS, Sankt Augustin, 2020.

**Malekian, K. ; Safargholi, F.; Schufft, W.; Dreyer, T.; Cassoli, J.; Adloff, S.; Ackermann, F.; Moghadam, H.; Rogalla, S.; Kaatz, G.; Meyer, M. F.; Mueller, S.; Athamna, I.; Daniel, S.; Klosse, R.; Santjer, F.; Weise, B.:** *Harmonic model validation of power generation units*, in IET Renewable Power Generation, vol. 14, no. 13, pp. 2456-2467, 2020.

**Safargholi, F.; Malekian, K.; Schufft, W.:** *"Voltage-Current Ratio Difference" Concept for identifying the dominant harmonic source*, In International Journal of Electrical Power & Energy Systems. - Elsevier B.V. – vol. 121, 106147, 2020.

**Safargholi, F.; Malekian, K.:** *Relevant Factors for Evaluation of the Harmonic Responsibility of Utility and Customer*, In IEEE Transactions on Power Delivery. - IEEE, 2020.



# 8 Höhepunkte

## 8.1 Promotionsverteidigung Suleiman Hadid

„Untersuchung der Einflussfaktoren auf den frequenzabhängigen Verlustfaktor an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln ‘

Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Schufft  
Prof. Dr. Stefan Kornhuber  
Prof. Dr. Uwe Schmidt  
Beisitzer: Dr. Martin Anglhuber

In seiner Dissertation hat Herr Dr. Hadid die Verlustfaktormessung an Mittelspannungskabeln untersucht. Dabei handelt es sich um ein Verfahren zur Bestimmung des integralen Zustandes von Kabelanlagen. Eine Veränderung des Verlustfaktors  $\tan \delta$  wird hauptsächlich durch die globale Alterung des Kabels verursacht. Um aussagekräftige Informationen durch die Verlustfaktormessung zu erhalten, sollten die Messergebnisse erstens reproduzierbar sein und zweitens eine zeitliche Tendenz, mit der betrieblichen Alterung des Kabels, zeigen.

Zur Verlustfaktormessung wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Messgeräte mit unterschiedlichen Messprinzipien entwickelt. Zur Untersuchung des Einflusses der Frequenz, kann die Frequenzbereichsspektroskopie verwendet werden. Mit dieser Messmethode sind Alterungsursachen und Störeinflüsse schwer zu erkennen. Da nachweislich keine Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors  $\tan \delta$  festzustellen ist, ist es notwendig, andere Kriterien zu untersuchen, welche mehr Informationen aus der Messung generieren, was das Hauptthema von Herrn Dr. Hadid war.



Wir gratulieren Herrn Dr. Hadid herzlich und wünschen ihm auch zukünftig alles Gute!

## 8.2 Promotionsverteidigung Dr. Akif Gürlek am 30.11.2020

„Zum Entladungsprozess der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung bei standardisierter und oszillierender Blitzspannung“

Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Schufft  
Prof. Dr. Volker Hinrichsen  
Beisitzer: Dr. Maria Kosse  
Dr. Carsten Leu

Herr Dr. Gürlek beschäftigte sich in seiner Dissertation mit der Erfassung, Identifikation und Beschreibung von Entladungsprozessen, die an Überschlägen bei Blitzspannung auftreten. Es wurde ein Messsystem entwickelt, welches die elektrischen und optischen Parameter der Entladungsprozesse an der Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung bei standardisierter und oszillierender Blitzspannung mit hoher Empfindlichkeit und Synchronisationsgenauigkeit aufzeichnet. Mithilfe der Strommessungen und der fotografischen Aufzeichnungen von Entladungen konnten drei Phasen des Durchschlagprozesses identifiziert werden. In der Reihenfolge ihres Auftretens handelt es sich um die Streamerphase, die Kanalübergangsphase und die Kanalbildungsphase. Diese Phasen werden für die standardisierte und oszillierende Blitzspannung aufgezeigt, wobei Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgestellt werden. Anhand von statistischen Beschreibungen des Durchschlagverhaltens und des Entladungsverhaltens werden daraufhin Abhängigkeiten in den Entladungsprozessen abgeleitet.



Wir gratulieren Herrn Dr. Hadid herzlich und wünschen ihm auch zukünftig alles Gute!!

### 8.3 Acht Millionen Euro Förderung für Wasserstoff-Forschung in Chemnitz

**Sächsisches Wissenschaftsministerium unterstützt TU Chemnitz und Fraunhofer IWU Chemnitz bei Forschung zur Nutzung von Wasserstoff für Mobilität, Industrie und Wärme sowie als Energiespeicher**



**Abbildung 7: Konzeptbild mit vier Bausteinen des geplanten HIC Hydrogen and Mobility Innovation Center. (Bildquelle: HZwo e.V.; URL: <http://hzwo.eu/projekte/hic/>)**

Wasserstoff kann und soll der Energieträger der Zukunft in Sachsen werden. Das Sächsische Staatsministerium für Wissenschaft, Kultur und Tourismus (SMWK) unterstützt deshalb die Forschung, die dazu nötig ist.

Die Technische Universität Chemnitz und das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Chemnitz erhalten insgesamt acht Millionen Euro, um zur Nutzung von Wasserstoff für Mobilität, Industrie und Wärme sowie als Energiespeicher zu forschen. Die Fördermittel stammen aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE). Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

#### **Wissenschaftsminister Sebastian Gemkow:**

„Mithilfe neuer Geräte wird die Leistungsfähigkeit der TU Chemnitz und des Fraunhofer IWU weiter erhöht und auch die hier vorhandene Exzellenz in der Wasserstoffforschung gestärkt. Hier hat sich mittlerweile ein wettbewerbsfähiges Technologiezentrum etabliert, das in enger Kooperation mit regionalen Unternehmen und dem sächsischen Innovationscluster HZwo zukunftsfähige Wasserstoff-Lösungen erarbeitet. Die Art der industriellen Produktion wird sich stark verändern - hin zu mehr Umweltfreundlichkeit und hin zu ganz neuen Produkten. Die Forschung schafft die Voraussetzung dafür.“

Sechs Millionen Euro der Gesamtfördersumme gehen an die TU Chemnitz. Hier arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an den Brennstoffzellenkomponenten und -systemen der Zukunft, die Wasserstoff als Antrieb für verschiedenste Anwendungen nutzbar machen

sollen. Die Forschung beschäftigt sich auch mit der Wasserstoff-Wertschöpfungskette, von der Produktion, über den Transport bis hin zur Anwendung. Außerdem wird untersucht, wie sich Erzeugung, Speicherung und Verbrauch von Energie in innovativen, sektorengekoppelten Systemen zueinander verhalten und intelligent gesteuert werden können.

**Prof. Dr. Gerd Strohmeier, Rektor der TU Chemnitz:**

„Chemnitz hat sich in den letzten Jahren in atemberaubender Geschwindigkeit zu einem Zentrum der Forschung im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen entwickelt. Als wesentlicher Inkubator fungiert dabei der Innovationscluster "HZwo – Antrieb für Sachsen". Die Förderung, für die wir dem Freistaat Sachsen und der Europäischen Union herzlich danken, wird maßgeblich dazu beitragen, dass die Chemnitzer Forschung zu diesem äußerst bedeutsamen Zukunftsthema weiter vorangetrieben wird.“

**Prof. Dr. Welf-Guntram Drossel, Institutsleiter des Fraunhofer IWU:**

„Dafür müssen Konzepte des Energiemanagements neu gedacht werden. Wir haben viele Jahre Erfahrung in diesem Forschungsbereich und suchen die optimale Verbindung von Windrädern, Anlagen zur Herstellung von Wasserstoff, und Steuerungssystemen für eine innovative Energieversorgung von Produktionsanlagen“. Darüber hinaus sind mobile Nutzungskonzepte und die produktionstechnische Weiterentwicklung von Komponenten für Brennstoffzellen für die Großserienreife Gegenstand der Forschung am Fraunhofer IWU.

Das Fraunhofer IWU forscht daran, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Industrieanlagen zu verringern. Wasserstoff ist dabei als sauberer Energielieferant und -speicher eine Zukunftstechnologie. Ziel ist die klimaneutrale Fabrik.

Auf der Grundlage der geförderten Investitionen beteiligen sich die TU Chemnitz und Fraunhofer IWU auch am Vorhaben „Clean Energy City“ in Chemnitz. Dieses verfolgt das Ziel, auf der Basis von Wasserstoff ein lokales Energiesystem aufzubauen. Damit können die Energieerzeugung und der Energieverbrauch von Mobilität, Industrie, Wärme und Wohnen langfristig unabhängig von fossilen Energieträgern gemacht und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß deutlich zu reduziert werden.

**Prof. Dr. Thomas von Unwerth, Inhaber der Professur Alternative Fahrzeugantriebe an der TU Chemnitz und Leiter des Innovationsclusters HZwo e. V.:**

„Wir freuen uns sehr über diese Fördermittelbewilligung, sie unterstützt in erheblichem Maße unsere Arbeit im Themenfeld Wasserstoff und Brennstoffzellen. Mit dieser Hilfe werden ergänzende Geräteausstattungen möglich, die eine umfassendere Erforschung der notwendigen sektorübergreifenden Prozesse und Systeme zum Umbau der Wertschöpfungskette im Rahmen der Wasserstoffstrategie ermöglichen.“

**Prof. Dr. Markus Richter, Inhaber der Professur Technische Thermodynamik der TU Chemnitz:**

„Diese Förderung legt einen wichtigen Grundstein für kooperative Forschungsprojekte an der TU Chemnitz im Bereich der Wasserstofftechnologien und Sektorenkopplung. Sie ergänzt unsere Forschungsinfrastruktur in dem Maße, dass verschiedenste Studien überhaupt erst möglich werden.“

**Dr. Jens Teuscher, Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Energie- und Hochspannungstechnik (Prof. Dr. Wolfgang Schufft) der TU Chemnitz:**

„Die Kopplung von Wasserstofftechnologien mit dem Elektroenergiesystem wird ein wesentlicher Baustein für eine zukünftige regenerative Elektroenergieerzeugung darstellen. Mit der bewilligten Forschungsinfrastruktur kann genau diese komplexe Schnittstelle umfassend untersucht werden.“

Der Text wurde übernommen aus: „Uni aktuell“-Meldung 10747 der Technischen Universität Chemnitz (URL: <https://www.tu-chemnitz.de/tu/pressestelle/aktuell/10474>)

## 9 Ausstattung für Praktika und Prüfungen in der Hochspannungstechnik

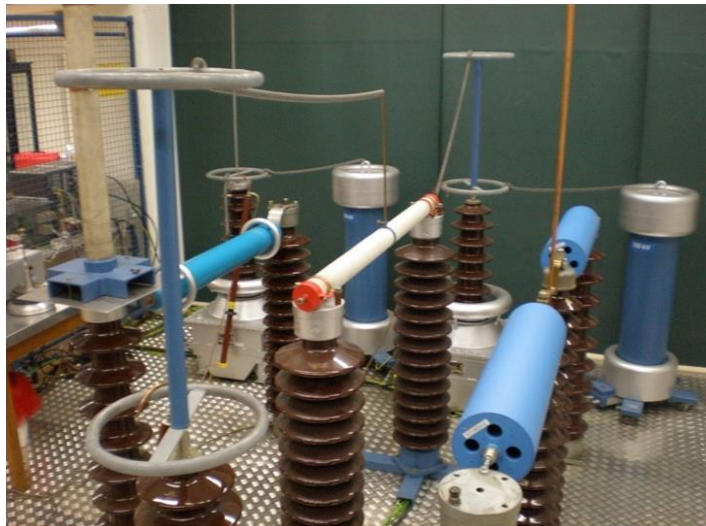
Prüfsystem zur Erzeugung von Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen bis 100 kV



Praktikumsversuche:

- *Funkenstrecken*
- *Erzeugung und Messung hoher Gleich- und Wechselspannungen*

Prüfsystem zur Erzeugung von Wechselspannungen bis 200 kV



Praktikumsversuch:

- *Isolatoren*

Geschirmte Messkabine zur Teilentladungs- und Verlustfaktormessung





Praktikumsversuch:

- *Verlustfaktormessung ( $\tan \delta$ )*

**Stoßspannungsgenerator zur Erzeugung von Blitzstoß- und Schaltstoßspannungen bis 600 kV**



Praktikumsversuch:

- *Erzeugen von Stoßspannungen / Einfluss der Elemente des Stoßspannungsgenerators*

**Wechselspannungs-Prüfsystem zur Erzeugung von Wechselspannungen bis 200 kV**



**Mobiles Resonanzprüfsystem zur Teilentladungs- und Verlustfaktormessung und Spannungsprüfung**





# 10 Laborausstattung

## Verfügbare Hardware

### Hochspannungsprüfung

Wechselspannung	$U_{\max} = 200 \text{ kV}$
Gleichspannung	$U_{\max} = 140 \text{ kV}$
Stoßspannung	$U_{\max} = 600 \text{ kV}$

### Trennverstärker

Lichtwellenleiter-Isolier-Messsystem HERO® LINK LWL-DC-15 MHz für Messungen auf Mittelspannungspotential

### Vor-Ort-Resonanzprüfsystem

Prüfspannung bis 36 kV, Prüfstrom bis 10 A  
Frequenzbereich 25 - 300 Hz

### Transienten-Mess-System für Impulsspannungsmessung

TR-AS 100/12, 100 Megasample pro s, 12 bit  
TR-AS 100/8 100 Megasample pro s, 8 bit  
umfangreiche Auswerte- und Protokollsoftware

### Digitales Kapazitäts- und Verlustfaktormesssystem MI 600 (Omicron)

Auflösung  $\tan \delta$  bis  $10^{-8}$   
Messbereich Kapazität 0,1 pF - 5  $\mu\text{F}$   
Frequenzbereich 5 Hz - 50 kHz

### Verlustfaktormessung DIRANA – Dielectric Response Analyser (Omicron)

Frequenzbereichsspektroskopie (FDS)  
Messung von Polarisations-/Depolarisationsströmen (PDC)

### Digitales Teilentladungsmess- und Diagnosesystem MPD 600 (Omicron)

TE-Messbereich 1 -  $10^5 \text{ pC}$   
obere Grenzfrequenz 30 MHz

### TE-Fehlstellenortung mit MPD 600 (Omicron)

Abtastrate bis 250 Megasample pro s  
Ortungsgenauigkeit bis 0,2 % der Kabellänge

### Kabeldiagnosesystem CDS

dreiphasige IRC-Analyse an PE- und VPE-Kabeln  
dreiphasige RVM-Analyse an Papier-Masse-Kabeln

### Transportables Hochspannungsnetzgerät 6,5 kV/ 0,02 A

### Blitzspannungsprüfeinrichtung SIP 010, transportabel

Wechselspannung bis 5 kV  
Stoßspannung 1,2/50  $\mu\text{s}$  bis 10 kV

#### Spannungsmessteiler

Ohm'sche Teiler bis 200 kV

Kapazitive Teiler bis 300 kV

Stoßspannungsteiler bis 600 kV (1,2/50 µs)

#### Mikrotom - Schneidgerät für Untersuchung von Wasserbäumchen (water trees) an PE-Kabeln

#### Transienten Recorder DEWE-3020

8-Kanal Recorder und 8 Kanäle Erweiterung

Abtastrate 200 KSa/s

Auflösung 24 bit

#### Transienten Recorder YOKOGAWA DL 708

8-Kanal Scope Recorder

Abtastrate bis 10 MSa/s

Auflösung 10 bit

#### Digitalspeicher Oszilloskope YOKOGAWA DL9040L und Rohde & Schwarz RTM2054

4 Kanäle

Abtastrate bis 5 GSa/s

Bandbreite 500 MHz

Auflösung 8 bit / 16 bit im High-Resolution Mode

#### Datenlogger DA 100 (YOKOGAWA) mit 10 Kanälen

kürzestes Messintervall: 2 s

Speichertiefe: nur begrenzt durch Festplatte des Logger-PC

#### Lichtmikroskop mit Rechneranschluss und Videoeinrichtung

#### Magnetfeldmesseinrichtung mit Rechneranschluss bis 10 kHz

#### Dosisleistungsmessgerät FH 40 G (Eberline Instruments)

Messgröße: Photonendosisleistung

Messbereich: 0,1 µSv/h - 0,99 Sv/h

Dosismessbereich: 100 nSv - 10 Sv

#### EM-Feldanalysator EFA-2 (Wandel & Goltermann)

Frequenzbereich 1: 5 Hz ... 2 kHz

Frequenzbereich 2: 5 Hz ... 30 kHz

Messbereich: 100 nT, 1 µT, 10 µT, 100 µT, 1 mT, 10 mT  
(automatische Messbereichswahl)

#### Strahlungsmessgerät EMR-20 (Wandel & Goltermann) für isotrope Messung elektrischer Felder

Frequenzbereich: 100 kHz ... 3 GHz

Messprinzip: digitale dreiachsige Messung

Spezifizierter Messbereich: 1 ... 800 V/m

Anzeigeauflösung: 0,01 V/m

Hochstromaggregat ODEN

1000A/ 2,5V TAP 2,5 (Wandlerprüfung)

Gleichspannungsnetzgerät Toellner 8872

40V/ 100A

## **Verfügbare Software**

### MATLAB

Programmpaket zur Analyse von Daten, Durchführung von Simulationen und Programmierung.

### ATP/EMTP

Simulation dynamischer und transienter Netzvorgänge der Energieversorgung.

### EMTDC/PSCAD

Simulation dynamischer und transienter Netzvorgänge mit leistungselektronischen Betriebsmitteln in Elektroenergiesystemen.

### DIgSILENT „POWERFACTORY 2019“ und Elektra 3.98

Stationäre Berechnung und Simulation von Lastflüssen und Kurzschlüssen in elektrischen Netzen.

### FlexPro 10

Konvertierung, Bearbeitung und Analyse von Messwertdatensätzen.

### VIG 2011

Virtueller Impulsgenerator zur Simulation von Stoßspannungsimpulsen im Internet unter:  
<http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/service/vig/vig2011/index.php?c=vig2011>

# 11 Dienstleistungsangebote

## 11.1 Dielektrische Prüfungen

- Wechselspannungsprüfungen bis 200 kV
- Stoßspannungsprüfungen bis 600 kV
- Gleichspannungsprüfungen bis 140 kV
- FGH-Stufentest an Mittelspannungskabeln bis 150 kV
- Vor-Ort-Spannungsprüfungen an Mittelspannungskabeln und anderen kapazitiven Prüfobjekten mit einem mobilen Resonanzprüfsystem

## 11.2 Diagnosemöglichkeiten

- Verlustfaktormessungen mit unterschiedlichen Messprinzipien im Labor
- Verlustfaktormessungen Vor-Ort mit einem mobilen Resonanzprüfsystem
- Teilentladungsmessungen mit unterschiedlichen Messprinzipien im Labor
- Verlustfaktormessung Vor-Ort mit einem mobilen Resonanzprüfsystem
- Isotherme Relaxationsstrom-Analyse (IRC) an Energiekabeln
- Messungen von Isolations- und Ableitwiderständen

## 11.3 Prüfung der Stromtragfähigkeit

Widerstandsmessungen von Hauptstrombahnen

Hochstromprüfungen, Erwärmungsprüfungen bis 2.000 A (größere Ströme auf Anfrage) für:

- Leiteranordnungen
- Geräte
- Schaltfelder

## 11.4 Spezielle Messaufgaben

- Messung magn. Felder (5 Hz bis 30 kHz [3 dB]; MB: 100 nT, 1  $\mu$ T, 10  $\mu$ T, 100  $\mu$ T, 1 mT, 10 mT)

- Messung elektrischer Felder (100 kHz bis 3 GHz; MB: 1 bis 800 V/m – 0,0027 bis 1700 W/m<sup>2</sup>)
- Messung elektromagnetischer Felder
- Messungen mit Isoliermessverstärkern
- Mikroschnitte von PE-Kabeln zum Nachweis von Wasserbäumchen (water trees)

### **11.5 Virtueller Stoßspannungsgenerator**

Zur Simulation des Einflusses der Elemente des Stoßkreises auf den Spannungsverlauf.

<http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho/service/vig/vig2011/index.php?c=vig2011>

### **11.6 Netzanalysen**

- Lastfluss-, Lastgang- und Leitungsfehlerberechnung in Energieübertragungs- und Verteilnetzen
- Netzverlustanalysen
- Versorgungszuverlässigkeit
- Netzoptimierung
- Oberschwingungsanalysen an Netzanschlusspunkten des Übertragungsnetzes
- Berechnungen von transienten Vorgängen

## 12 Referenzen

Labor- und Vor-Ort-Kabeldiagnose (TE-Messung, TE-Ortung, Spannungsprüfung, Verlustfaktormessung)

- inetz GmbH, Chemnitz
- Stadtwerke Leipzig GmbH
- ENSO Netz, Dresden
- MITNETZ Strom GmbH, Halle/Saale
- Städtische Werke Magdeburg GmbH & Co. KG
- Stadtwerke Schwabach GmbH
- Basler Sachversicherungs- AG, Basel

Netzanalyse, Versorgungszuverlässigkeit

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG
- TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH. Leuna

Betriebsmitteldatenbank

- TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH, Leuna

Netzverluste

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz
- Stadtwerke Annaberg-Buchholz Energie AG

Prognosen zum Elektroenergiebedarf und Spitzenleistungen einzelner Umspannwerke

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Erstellung von Lastprofilen Strom/ Gas

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Bewertung von Investitionsstrategien in der Elektroenergieversorgung

- ENSO Netz, Dresden

Isolationsprüfung, Stufentest

- Kabelwerk Meißen

FGH-Stufentest an Mittelspannungskabeln

- Stadtwerke Rostock

Temperaturbeständigkeit von Isolieranordnungen

- Kabelwerk Meißen

Berechnung maximaler Leitungsbelastung

- SPIE SAG Montagegesellschaft mbH, Chemnitz

Kurzschlussstromprüfung Schutzwiderstand

- Türk und Hillinger. Limbach-Oberfrohna

TE-Messung im Labor

- VEM motors Thurm GmbH
- eviro Elektromaschinenbau & Metall GmbH, Eibenstock

Dimensionierung Überspannungsschutz

- AREVA, Dresden

Bewertung transienter Ausgleichsvorgänge in Elektroenergiesystemen

- KEMA-IEV, Dresden
- AREVA, Dresden

Spannungsprüfung

- Elektrotechnische Geräte Böhlitz-Ehrenberg GmbH, Leipzig

Erstellung von Energiekonzepten zur Visualisierung der Auswirkungen von Potentialrealisierungen Erneuerbarer Energien in einem abgegrenzten Bilanzraum

- Landkreis Vogtland, Plauen

Untersuchungen der Auswirkungen der Verarmung von Masse bei Öl-Papier-Kabel

- inetz GmbH, Chemnitz

Entwicklung von Speicherkonzepten im Bereich von 1 bis 10 MW

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Analyse von Nutzungskonzepten für energienahe Dienstleistungen

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Definition der anteiligen Planungspegel für Oberschwingungen in Offshore-Netzen

- TenneT Offshore GmbH, Bayreuth

Untersuchung der Resonanzstellen und Störungsanalyse für das Netzanschlussystem Bor-Win1 inklusive des Offshore-Netzes (OWP BARD und Global Tech I)

- TenneT Offshore GmbH, Bayreuth

Erweiterung des D- und D0-Schmelzsicherungssystems

- NH/HH Recycling e.V., Stamsried

Erstellung von Zielkonzepten für eine Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge

- eins energie in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Analyse des Potenzials von Kühllhäusern für Demand Side Management

- Hörburger AG, Neukirchen

Analyse des Potenzials der Solarenergie zur Versorgung einer Schwimmhalle

- Stadtwerke Annaberg-Buchholz Energie AG

Untersuchung von elektrischen Gleichstromlichtbögen

- Mahle GmbH, Stuttgart

Untersuchungen an Flachsteckkontakten

- Mahle GmbH, Stuttgart
- Dometic GmbH, Siegen

Analyse des Schaltverhaltens von LED-Straßenbeleuchtung und der resultierenden Netzrückwirkungen

- inetz GmbH, Chemnitz



#### Labormessungen an MS-Kabelmuffen

- MITNETZ Strom GmbH, Halle/Saale
- inetz GmbH, Chemnitz



Teilgebiete		Elektrische Energietechnik			Hochspannungstechnik			
Inhalt		Regenerative Energiequellen	Energie-management	Elektroenergiesysteme	Beanspruchung von Betriebsmitteln	Überspannungen u. Isolationskoordination	Geräte- und Isoliertechnik	
Semester		Bachelor-Studiengang Elektrotechnik						
Modularisierte Bachelor-Master-Studiengänge	3.	Elektrische Energietechnik/Nachhaltige Elektroenergieerzeugung 2 1 0						
	4.							
	5.						Hochspannungstechnik 3 1 2	
	6.			Elektroenergieübertragung und -verteilung 3 1 2				
					Netze und Betriebsmittel 2 1 0			
Vertiefungs-modul (Pflicht, Wahlpflicht, Wahl)		Bachelorarbeit						
		Master-Studiengang Energie- und Automatisierungssysteme						
Ergänzungs-modul (Pflicht, Wahlpflicht, Wahl)	7.				Beanspruchung von Betriebsmitteln 3 1 1			
			Elektroenergiewirtschaft 1 0 0					
8.						Statistik und Isolationskoordination 2 1 0		
				Netzberechnung und Schutztechnik 1 1 0			Diagnose- und Messtechnik 2 0 0	
9.		Praktikum						
10.		Masterarbeit						
Forschungsschwerpunkte								
Analyse von Netzen und Betriebsmitteln			Zustandsbewertung und Asset-Management					
			Überschwingungsverhalten regenerativer Erzeugungsanlagen / Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem					
			Netzanbindung leistungsstarker Windparks					
			Netzintegration der Elektromobilität					
			Isolationskoordination					
Dezentrale Energiesysteme								
Netzbaustrategien			Speichersysteme für eine nachhaltige Energieversorgung					
			Probabilistische Netzplanung					
Anspruch:		Kompetenzzentrum für aktuelle Fragestellungen der Elektroenergieversorgung						

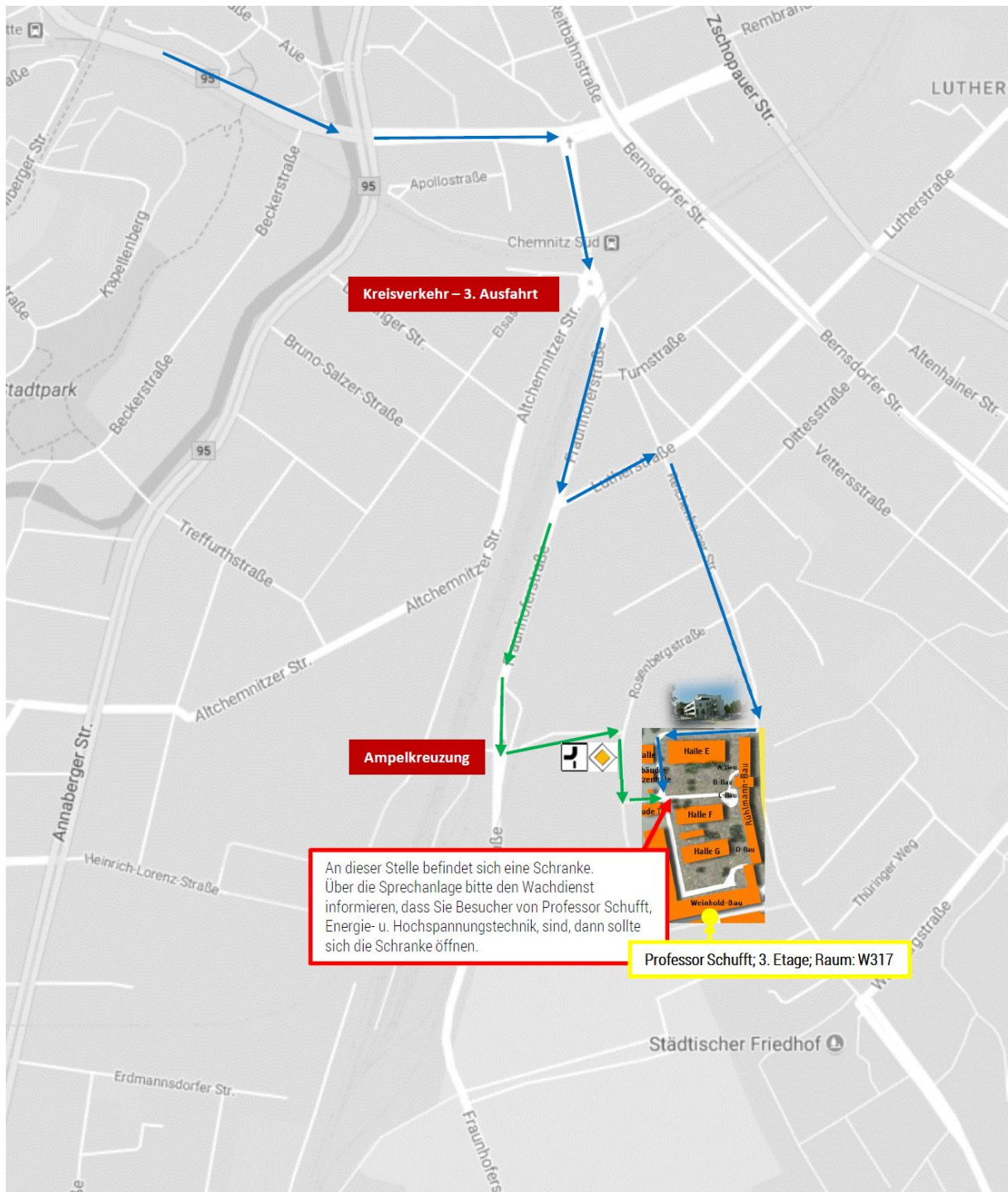
### Anfahrtsskizze:

Über Autobahnkreuz Chemnitz Süd – B173 – B169





## Über Autobahnkreuz Chemnitz-Mitte A4 – B95



Weiterhin ist die Professur mit der neuen Straßenbahnlinie 3 zu erreichen. Diese verbindet den Hauptbahnhof mit dem Universitätsstandort Straße der Nationen (Haltestelle Theaterstraße) sowie mit dem Universitätsstandort Reichenhainer Straße (Haltestelle TU Campus).



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Professur für Energie- und Hochspannungstechnik  
Adolf-Ferdinand-Weinholdbau  
Reichenhainer Str. 70  
09126 Chemnitz

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft  
Telefon: +49 (0) 371 531 33343  
Telefax: +49 (0) 371 531 24239  
E-Mail: [wolfgang.schufft@etit.tu-chemnitz.de](mailto:wolfgang.schufft@etit.tu-chemnitz.de)  
[www.tu-chemnitz.de/etit/eneho](http://www.tu-chemnitz.de/etit/eneho)

Technische Universität Chemnitz  
09107 Chemnitz  
[www.tu-chemnitz.de](http://www.tu-chemnitz.de)