

# Schlussbericht

## Anforderungen an *Erneuerbare Energien gespeiste* sichere Netze aus leistungselektronischer Sicht (SMENOS-LE)



für das Vorhaben  
*SmartEnergy Ostdeutschland*  
im Rahmen der Förderung  
Zwanzig20 Foren des BMBF

Institut für Energie-, Antriebs- und Umweltsystemtechnik (IEAU)

TU Ilmenau

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Förderkennzeichen: 03ZZF95

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung.....</b>	<b>3</b>
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde.....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	4
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung .....</b>	<b>5</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses .....	5
2.1.1	Netzbetriebssicht .....	5
2.1.2	Anforderungen seitens der Industrienetze.....	7
2.1.3	Anforderungen seitens der Systemregelungstechnik .....	8
2.1.4	Anforderungen seitens der leistungselektronischen Betriebsmittel.....	9
2.1.5	Fazit.....	11
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	11
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	11
2.4	Verwertbarkeit .....	11
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt	12
2.6	Veröffentlichungen .....	12

# 1 Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Innerhalb dieser Studie soll gezeigt werden, welche Herausforderungen aus leistungselektronischer Sicht zum sicheren Betrieb der zukünftigen Stromnetze bestehen, wenn sie zunehmend aus Erneuerbaren Energien gespeist werden. Die bisherige Kraftwerksstruktur aus vielen Großkraftwerken wird sich in Richtung vieler kleinerer und mittelgroßer Anlagen verschieben, die örtlich und tages- bis jahreszeitlich fluktuierend in das Verbundnetz einspeisen. Ein Großteil der neuen Einspeiser (wie PV-Anlagen und Windparks) wird über leistungselektronische Anlagen mit dem Netz verbunden. Ebenso steigt die Zahl sowohl der Verbraucher in Industrie, Handwerk und Privathaushalten – die mit einem Stromrichter am Netz angeschlossen sind –, der Prosumer – die sowohl als Erzeuger wie auch als Verbraucher auftreten, wie z.B. zukünftige Elektroautos und stationäre Batteriespeicher –, als auch der leistungselektronischen Betriebsmittel des Elektroenergienetzes (z.B. HVDC-Anschlüsse von Offshorewindparks oder HGÜ's). Dies hat oder kann enorme Auswirkungen auf viele elektrische Parameter des Netzes wie Leistungsflüsse, Leistungsflussumkehrungen, Kurzschlussleistungen, Frequenzstabilität, dynamische Stabilität usw. und darüber hinaus auf deren gesamte Betriebsweise und Auslegung haben. Das Verhalten der Leistungselektronik incl. ihrer Dynamik wird zu einer relevanten Größe beim Betrieb zukünftiger Netze.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Institut für Energie-, Antriebs- und Umweltsystemtechnik (IEAU) haben sich fakultätsübergreifend Fachgebiete der TU Ilmenau mit passender Orientierung zusammengeschlossen. Die an der Studie beteiligten Fachgebiete Leistungselektronik und Steuerungen in der Elektroenergie-technik, Elektrische Energieversorgung und Industrienetze decken dabei die Thematik der in der Studie zu behandelnden relevanten Fragestellungen aufgrund ihrer Ausrichtung optimal ab.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Ausgehend vom Istzustand der Netze und leistungselektronischen Betriebsmittel mit ihren Regelstrukturen werden mittels Recherche und weitergehenden Überlegungen die Herausforderungen und Chancen der zukünftigen Entwicklungen im Elektronenergienetz abgeschätzt. Daraus wird ein Bedarf an notwendigen Forschungsschwerpunkten abgeleitet, die einen sicheren Betrieb der zukünftigen Netze ermöglichen. Entsprechend den beteiligten Forschern ist die Thematik in 4 Bereiche unterteilt:

- Schaltungstechnik / Stromrichtertopologien (Hardware)
- Systemregelungstechnik (Regelstrukturen, Wechselwirkungen)  
jeweils: Fachgebiet (FG) Leistungselektronik und Steuerungen in der Elektroenergie-technik
- Betrieb der Netze (FG Elektrische Energieversorgung)
- Anforderungen seitens der Industrienetze (FG Industrieelektronik)

## **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Es wurde der allgemeine Wissenstand der elektrischen Energieversorgung, insbesondere der des Netzbetriebes und der der Stromrichtertechnik incl. ihrer Regelungsmechanismen für diese Studie zugrunde gelegt.

Der klassische Betrieb der Netze ist eine seit langem bekannte Verfahrensweise. Durch die in den letzten Jahren zugenommenen Einspeisungen dezentraler Erzeugungsanlagen wurden schon verschiedene Veränderungen, die Betriebsweise und einige Betriebsmittel (z.B. der intelligente Ortsnetztransformator) betreffend, integriert.

Die gegenwärtigen Stromrichter, die als dezentrale Erzeugungsanlage, als Verbraucher oder aber seit einiger Zeit in Deutschland bspw. innerhalb der Hochspannungsgleichstromübertragung am Netz betrieben werden, und ihre Regelmechanismen sind ebenfalls prinzipiell bekannt.

Aus der Forschung und Entwicklung sind viele Ansätze bekannt, in welche Richtungen sich die Stromrichtertechnik weiterentwickeln kann, welche Herausforderungen sich dem Netzbetrieb stellen und wo mögliche Lösungen liegen können.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Studie wurde innerhalb des Instituts für Energie-, Antriebs- und Umweltsystemtechnik erstellt, jedoch sind die Erfahrungen von Partnern aus anderen Projekten mit eingeflossen. Innerhalb des Konsortiums „Smart Energy Ostdeutschland“ wurde sich zu den Projekten ausgetauscht.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Innerhalb dieser Studie wird gezeigt, welche Herausforderungen aus leistungselektronischer Sicht zum sicheren Betrieb der zukünftigen Stromnetze bestehen, wenn sie zunehmend aus Erneuerbaren Energien gespeist werden. Ein Großteil der neuen Einspeiser (wie PV-Anlagen und Windparks) wird über leistungselektronische Anlagen mit dem Netz verbunden. Ebenso steigt die Zahl der Verbraucher in Industrie, Handwerk und Privathaushalten, die mit einem Stromrichter am Netz angeschlossen sind. Die vorhandenen Netze sind historisch gewachsen und vornehmlich für den Betrieb bei Erzeugung aus dezentral verteilten Großkraftwerken ausgelegt. Zukünftig wird diese Art der Einspeisung mit ihren mechanisch rotierenden Massen immer weiter ersetzt, so dass immer mehr die Eigenschaften der leistungselektronischen Betriebsmittel, insbesondere deren innere Regelkreisstrukturen, sowohl in den Erzeugungs- und den Verbrauchsanlagen als auch vermehrt an verschiedenen Stellen des Verteil- und Übertragungsnetzes, dann letztlich die Eigenschaften des Netzes bestimmen.

Unterteilt in die vier Schwerpunkte 'Netzbetrieb des öffentlichen Netzes', 'Industriennetzbetrieb', 'leistungselektronische Betriebsmittele' (Hardware) und 'Systemregelungstechnik' (Regelstrukturen, Wechselwirkungen) für die Stromrichter werden aus den jeweiligen Blickwinkeln mittels Recherche und eigenen abgeleiteten Schlussfolgerungen – ausgehend vom Istzustand – zukünftige Entwicklungen abgeleitet und deren Herausforderungen für den Betrieb von sicheren Netzen abgeleitet sowie notwendige Forschungsschwerpunkte identifiziert.

#### 2.1.1 Netzbetriebssicht

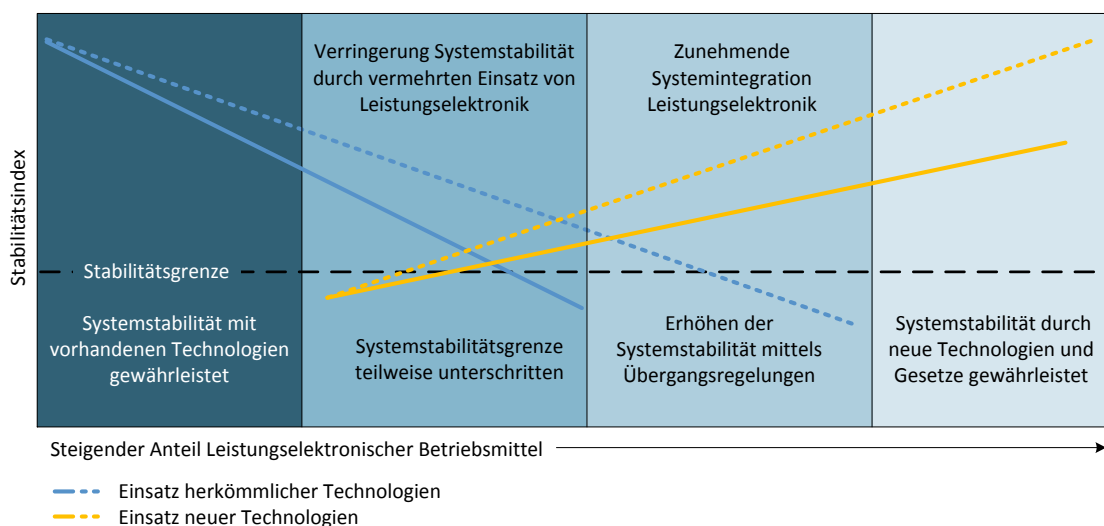
Aus Sicht des Netzbetriebes ist mit veränderten Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den verschiedenen Netzebenen zu rechnen. So müssen die Netzteilnehmer zunehmend (insb. derzeit die dezentralen Einspeiseanlagen) Systemdienstleistungen wie netzzustandsabhängige Einspeisung von Wirk- und kapazitiver oder induktiver Blindleistung erbringen. Die notwendigerweise immer mehr werdenden dezentralen Speicher im Netz haben ebenfalls ihren Beitrag zu liefern, neben der Verbraucher- auch auf der Erzeugerseite (Energiemanagement). Die Netze weisen zukünftig eine verringerte bis keine Kurzschlussleistung auf, was zu veränderten Betrachtungsweisen in der Schutztechnik führen muss. Weiterhin besteht die Frage nach dem Kommunikationsbedarf im Netz seitens der Betriebsmittel, z.B. zur Vorhersage des Wartungsbedarfs. U. a. durch die Veränderung der Einspeisecharakteristik ist mit veränderten Leistungs- und Energieflüssen zu rechnen, so dass zur besseren Nutzbarkeit der vorhandenen Leitungen auch der Bedarf steigt, die Leistungsflüsse aktiv zu steuern, z.B. über Back-to-Back-Kopplung. Weiterhin gibt es Überlegungen, neben den geplanten HVDC-Trassen zum Energieaustausch von Nord- nach Süddeutschland diese zu einem Overlay-DC-Netz europaweit auszubauen (Supergrid). Ebenso sind DC-Netze auch in den unteren Spannungsebenen denkbar, was zu Hybridnetzen führt (AC- und DC-Leitungen auf einer gemeinsamen Trasse).

Als besondere Anforderungen sind aufzuzählen:

- veränderte Schutzkonzepte (z.B. durch spannungsfreies Schalten),
- neue Betriebskonzepte für lokale (Insel-)Netze (Kombination der PV-/Winderzeuger mit lokalen Speichern),

- das Monitoring der Energieflüsse, um diese dann auch intelligent beeinflussen zu können (Smart Grids: Kombination flexibler Erzeuger, Verbraucher, Speicher und Betriebsmittel zur Lastflusssteuerung),
- (damit verbunden) Planungen zum notwendigen/vermeidbaren Netzausbau aufgrund von Betrachtungen des ungestörten als auch des gestörten Netzbetriebes,
- zentrale versus dezentrale Kommunikation in der Betriebsführung (Stichworte: Sicherheit, autonom agierende Marktteilnehmer, Verantwortlichkeiten in der Netzführung).

Ein spezieller Forschungsbedarf liegt in den Betrachtungen zur Systemstabilität, die bisher vornehmlich durch die vorhandenen Technologien („trotz“ vermehrten Einsatzes von Leistungselektronik) gewährleistet wird, zunehmend mittels Übergangsregelungen durch die Systemintegration der Leistungselektronik verbessert wird und zukünftig aber durch neue (leistungselektronisch basierte) Technologien und Gesetze gewährleistet werden muss.



**Abb. 1:** Darstellung der Gesamtentwicklung bei zunehmendem Einsatz von Leistungselektronik im Verteilnetz

Folgende Kernforschungsfelder lassen sich benennen:

- Neu-/Weiterentwicklung der Betriebsmittel und Technologien
  - Bereitstellung von Systemdienstleistungen über VNB
  - Entwicklung und Einsatz von Energiespeichern in Verbindung mit EE-Anlagen
  - Intelligente Messsysteme
  - intelligente Netzbetriebsführung
  - Regelkonzepte
  - sichere Informations- und Kommunikationstechnologien
- Netztechnologien
  - Konzipierung stabiler dezentraler Betriebsführung
  - HGÜ
  - Einsatz und Nutzung von Mischstrom / Hybride Netze

Laufende Forschungsprojekte decken dabei nur einen Teilbereich der nötigen Kernforschungsfelder ab.

## 2.1.2 Anforderungen seitens der Industrienetze

Industrienetze werden nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifiziert. Im Vergleich zum öffentlichen Netz können ähnliche Anforderungen an die Spannungsqualität gestellt werden als auch geringere (hoher Anteil an Netzzrückwirkungsverursachern) oder höhere (geschützte Versorgungsungen).

Die Typen der Industrienetze können weiterhin bezüglich ihrer eigenen Spannungsebene (/ -en), der Anzahl der Einspeisungen aus dem öffentlichen Netz (gleicher oder unterschiedlicher Spannungsebenen) und gegebenenfalls durch Eigenerzeugungs- oder Ersatzgenerierungsanlagen unterschieden werden.

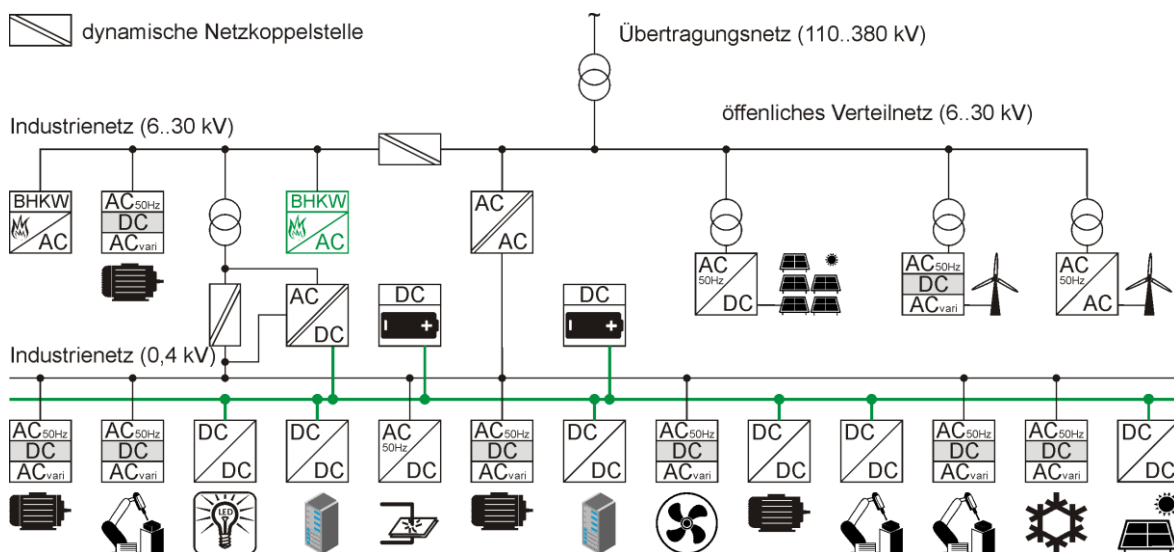
Ähnlich wie im öffentlichen Netz ist sowohl mit Wechselwirkungen innerhalb der Industrienetze als auch (für diese Studie mit besonderer Relevanz) mit dem öffentlichen Netz zu rechnen, wobei letztere unterteilt werden können in Schutz des Industrienetzes vor Störungen von Seiten des öffentlichen Netzes als auch in eine Begrenzung des Einflusses auf das öffentliche Netz.

Veränderungen ergeben sich im zunehmenden Einsatz von DC-Netzen (z.B. von 24Vdc für Beleuchtung, 380Vdc bis unter 1kVdc zum effizienten Energieaustausch von Prozessenergie). Viele Stromrichter (bei Verbrauchern, Erzeugern, Speichern oder auch Spannungswandlern) sind ohnehin mit Gleichspannungszwischenkreisen ausgestattet und so lassen sich manche Spannungswandlereinheiten (AC/DC) einsparen.

In Industrienetzen ist der Einzug von DC-Netzen ungleich leichter zu bewerkstelligen als im öffentlichen Netz. Andererseits sind die zu lösenden Problematiken beim Betrieb von DC-Industrienetzen tlw. ähnlich zu denen in öffentlichen Netzen.

Es sind veränderte Schnittstellendefinitionen am PCC (Point of Common Coupling) mit differenzierten Netzanschlussbedingungen zu erwarten (z.B. noch breiter aufgestellter Spannungsqualitätsanspruch: Industrienetze mit ausschließlich Stromrichtern benötigen keine 50 Hz; veränderte Systementgelte über das Verhältnis Spitzen- zu mittlerer Dauerleistung, Beitrag der Industrienetze zu verschiedensten Systemdienstleistungen im öffentlichen Netz in unterschiedlichen Zeitskalen).

Weiterhin ist in den Netzen ein zunehmender Einsatz von Eigenerzeugungsanlagen, Speicheranbindungen in Kopplung mit dem Wärme- und/oder Gasnetz zu erwarten (Multimodale Energiesysteme), die die Flexibilität der Gestaltung der Energieversorgung erhöhen.



**Abb. 2:** Mögliche zukünftige Netzstruktur im Industrienetz

Folgende Forschungsschwerpunkte sind hier zu setzen:

- Entwicklung der DC-Energieverteilnetze (Normal- und Fehlerbetrieb, Schutz, DC-Schalter, flexibles Energiemanagement für Speicher, Verbraucher, Eigenerzeuger und Netzbezug)
- Systemverhalten der DC Betriebsmittel definieren (incl. Normen)
- Koppelkomponenten von AC/AC-Netzen und AC/DC bei voller Steuerbarkeit (dynamische Netzkoppelstelle zur Trennung vom bzw. Synchronisation zum öffentlichen Netz und Betrieb des Industrienetzes als Inselnetz)

### 2.1.3 Anforderungen seitens der Systemregelungstechnik

Die Hauptanforderungen an durch Erneuerbare Energien gespeiste sichere Netze aus Sicht der Regelungstechnik ergeben sich durch die zunehmende Integration der erneuerbaren Energien in das Elektroenergienetz bei gleichzeitigem Rückbau konventioneller Kraftwerke. Waren früher nur konventionelle Kraftwerke mit großen rotierenden Massen für die Frequenz- und Amplitudenstabilität sowie die Bereitstellung der Kurzschlussleistung verantwortlich, so steigt der Einfluss der einzelnen netzgekoppelten Wechselrichter zur Einspeisung der Erneuerbaren Energie durch die Verschiebung der installierten Bauleistung von konventioneller zu neuer Technik. Durch diese Verschiebung ergibt sich ebenfalls eine Reduktion der Kurzschlussleistung.

Weiterhin verändern sich die Anschlusspunkte der Kraftwerke und damit auch die Leistungsflüsse im gesamten Netz. Während die konventionellen Kraftwerke hauptsächlich in der Höchstspannung angebunden sind, werden die Erneuerbaren Energien, je nach Baugröße der Anlage, in der Mittel- und Niederspannung angeschlossen. Aus dieser Verschiebung der Kraftwerksankopplung können, je nach Last und Einspeiseverhältnissen in einem betrachteten räumlichen Umfeld, umgekehrte Leistungsflüsse resultieren, d.h. die elektrische Energie fließt von einer niedrigen in eine höhere Netzspannungsebene.

Aus den sich ändernden Netzbedingungen ergeben sich für die Regelung der Wechselrichter neue Herausforderungen. Als wichtigste Konsequenz aus den vorgenannten Änderungen, Reduktion der konventionellen Kraftwerke bei gleichzeitig steigender Anzahl der Erneuerbaren Energie auch und vor allem in den niedrigeren Netzspannungsebenen, ist die Reduktion der Kurzschlussleistung und daraus folgend die Immunität der Netzspannung auf Belastungswechsel zu nennen. In Netzabschnitten mit einer großen Netzimpedanz und daran angeschlossenen Wechselrichtern führen schnelle Änderungen des Leistungsflusses / des Netzstromes zu schnellen Änderungen der Netzspannung und des Netzspannungswinkels. Diese schnellen Änderungen können sich durch schnelle Änderung der Einspeisung, aber auch durch das Schalten von Leistungsstarken Verbrauchern ergeben. Als Folge dieser Spannungsänderung springt das Bezugssystem der Regelung des Wechselrichters (der Spannungswinkel am Anschlusspunkt). Dies kann im günstigsten Fall zu einem transient falsch eingespeisten Strom und im ungünstigsten Fall zu einem Fehler des Wechselrichters mit anschließender Schutzabschaltung desselben führen. Unabhängig vom eintretenden Fall darf dieses Ereignis keine weiteren Wechselrichter beeinflussen und so eine Kettenreaktion auslösen. Um dies zu verhindern, sind innerhalb der Regelung robuste Strukturen zur Ermittlung des Netzspannungswinkels und schnelle Stromregelkreise erforderlich.

Neben der Immunität der einzelnen Wechselrichterregelung auf Spannungsereignisse und damit der Stabilität des einzelnen Wechselrichters ist es ebenso notwendig, dass Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Wechselrichtern verhindert werden. Diese Wechselwirkungen können sich z.B. durch in Normen und Richtlinien geforderte Statiken ergeben.



Ein weiteres Aufgabenfeld ergibt sich aus dem Umstand, dass sich durch die Einspeisung der Erneuerbaren Energie der Leistungsfluss umkehren kann. Dies kann dazu führen, dass einzelne Netzabschnitte weiter versorgt werden, obwohl sie vom Verbundnetz getrennt sind. Dies führt zu einer asynchron zum Verbundnetz laufenden Insel, bei der sowohl Netzfrequenz als auch Amplitude unterschiedlich sein können. Nach derzeitigem Stand müssen Wechselrichter diese Betriebsart erkennen und dürfen nicht weiter einspeisen. Der Weiterbetrieb in diesem Zustand kann aber auch gewünscht sein.

Folgende Forschungsschwerpunkte sind zu setzen:

- Entwicklung von robusten Phasen- und Frequenzregelkreisen zur Bestimmung des Netzspannungswinkels als Bezugsgröße für die Regelung des Wechselrichters
- Untersuchung des Stabilitätsverhaltens der Regelung bei transienten Netzspannungsereignissen
- Analyse der Wechselwirkungen verschiedener Wechselrichter an einem weichen Netz zur:
  - Vermeidung von Instabilitäten jedes einzelnen Wechselrichters
  - Vermeidung von Leistungspendelungen zwischen den Wechselrichtern als Folge eines transienten Netzereignisses
- Entwicklung von Strategien zur Erkennung und Behandlung von Inselbildungen
- Entwicklung von robusten Regelungskonzepten für durch mehrere Wechselrichter gespeiste Inselnetze, hier insbesondere Behandlung der Überlast und Fehlerfälle (Wechselrichter in Strombegrenzung)

#### **2.1.4 Anforderungen seitens der leistungselektronischen Betriebsmittel**

Stromrichter können nach ihrem Energie- bzw. Leistungsaustausch eingeteilt werden. Derzeit massenhaft im Netzbetrieb sind sie als unidirektionaler Verbraucherstromrichter, jedoch überwiegend im unteren Leistungsbereich. Im mittleren Leistungsbereich (einige kW für private PV-Anlagen bis in mehrere MW für Windkraftanlagen) sind zunehmend gepulste Spannungsstromrichter mit dem Netz verbunden, die zwar prinzipiell bidirektional arbeiten könnten, der Prozess lässt dies aber zumeist nicht zu (bei Einspeisestromrichtern wie PV-Anlagen ohne Speicheranbindung). Antriebsumrichter größerer Leistung als Verbraucher sind uni- oder bidirektional (rückspeisefähig) angelegt. Bidirektionale Stromrichter sind in Anwendungen mit Speichern vorhanden (in zunehmender Zahl in Batteriespeichern) und in Pumpspeicherkraftwerken.

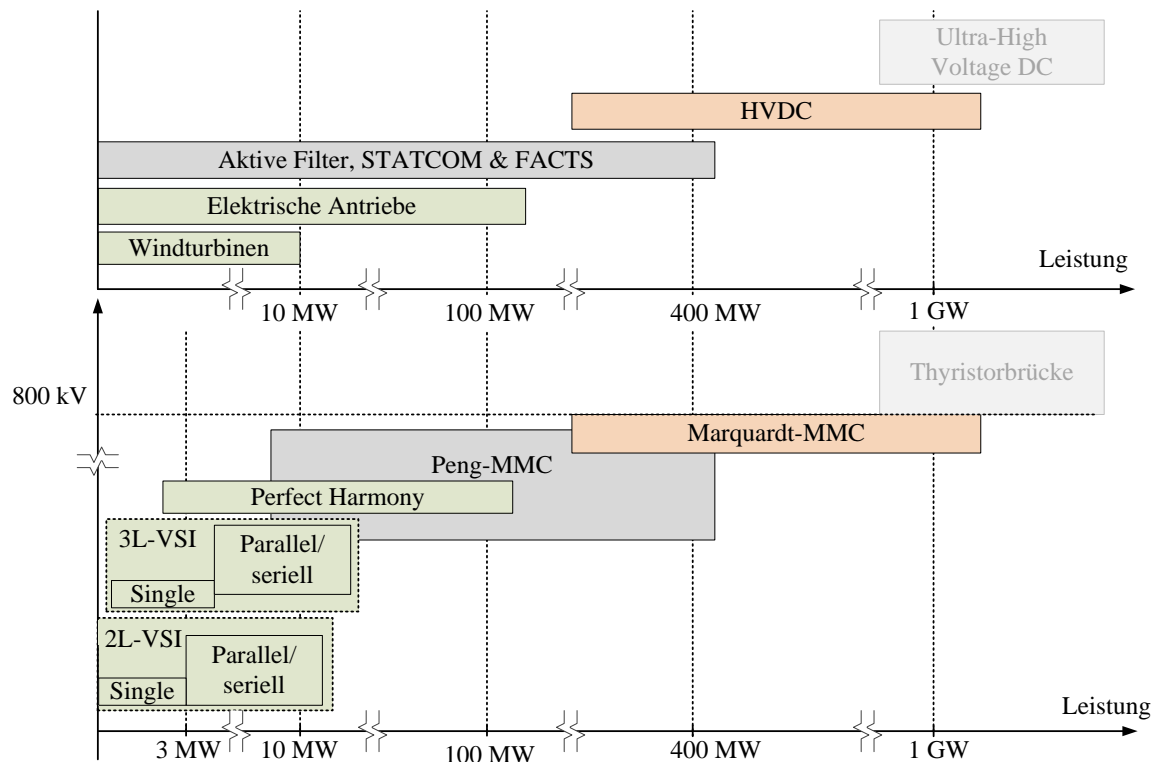
Daneben können die Stromrichter bezüglich ihrer unterschiedlichen Funktionen für den Betrieb des Netzes unterschieden werden. Prinzipiell sind die gepulsten Spannungswechselrichter alle in der Lage, Systemdienstleistungen für das Netz zur Verfügung zu stellen, so sie denn von ihren inneren Regelungsstrukturen etc. dafür ausgelegt sind. Insbesondere für Industrienetze mit vielen nichtlinearen Verbrauchern oder stark un stetigen Leistungsbezügen sind aktive Filter (Grund- und Oberschwingungsblindleistungskompensation) im Einsatz.

Für den Netzbetrieb sind prinzipiell verschiedene Stromrichter zu nennen, die in den Bereich der FACTS (Flexible-AC-Transmission-System) zu zählen sind:

- STATCOM (Static Synchronous Compensator – 50/60Hz-Blindleistungskompensation) (parallele Stromeinkopplung)

- UPFC (Unified-Power-Flow-Controller – Leistungsflussregler, parallele Strom- und serielle Spannungseinkopplung)
- HGÜ-Stromrichter (HVDC)
- Back-to-Back-Stromrichter als Netzkopplung

Diese FACTS-Stromrichter sind prinzipiell sehr gut geeignet, um den Lastfluss in den Netzen zu beeinflussen bzw. zu steuern und stabilisierend zu wirken, und schon länger im Einsatz, jedoch nur in sehr geringem Umfang, was nicht zuletzt an ihren Kosten bzw. der nicht vorhandenen zwingenden Notwendigkeit liegen mag.



**Abb. 3:** Stromrichter großer Leistung, eingeteilt nach Topologie, Anwendung, Leistungs- und Spannungsbereich

Stromrichter für größere Leistungen werden meist mit mehreren Leveln (3- / 5- / n, klassisch sind 2-Level) und/oder durch Zusammenschaltung von Grundschaltungen als kaskadierte Stromrichter betrieben, wobei zwischen Strom- (parallel) und Spannungskaskadierung (seriell, Stichwort: MMC – Modular Multilevel Converter) zu unterscheiden ist, jeweils mit und ohne Transformator zur Potentialtrennung und Spannungsanpassung.

Veränderungen vollziehen sich dabei derzeit insbesondere in den folgenden Bereichen:

- weitere Kaskadierung für höhere Leistungen, insbesondere in höheren Spannungsebenen, (MMC)
- Einsatz weiterentwickelter (schnellerer) Halbleiter (SiC) mit verbessertem Wirkungsgrad, (tlw. auch mit höheren Sperrspannungen)
- Potentialtrennungen im Bereich der Mittelspannung, auch als DC/DC-Stromrichter mit Übertrager (tlw. mit resonanten Schaltungen zur Verbesserung der Effizienz)

Folgende Forschungsschwerpunkte sind zu setzen:

- Modularisierbarkeit (größere Stückzahlen, größere Flexibilität) durch Verwendung von Standardbaugruppen, mit dem Ziel von preiswerteren Lösungen z.B. für FACT-Elemente
- MMC-Stromrichter mit Potentialtrennung (ohne 50Hz-Transformator) für den Mittelspannungsbereich (z.B. 20kV), mit zentraler oder dezentraler Lösung für den/die induktiven Übertrager ( $f = 1 \text{ kHz} \dots 20 \text{ kHz} \dots$ ), incl. insbesondere der Isolationsproblematik (Stichwort Solid-State-Transformer)
- Weiterentwicklung von Back to Back Stromrichtern als Koppelstellen verschiedener (auch öffentlicher) Netze (AC/AC, AC/DC) mit integrierten Speichern (siehe auch Industrienetzanforderungen)

### 2.1.5 Fazit

Weiterentwicklungen des Betriebsmittels Stromrichter, die zu preiswerteren Lösungen auch für einen erweiterten Leistungs- und Spannungsbereich führen, mit neuen/angepassten Regelstrukturen für dynamische (AC, DC, Insel-) Netze und eine für die sich veränderte Struktur angepasste Netzbetriebsweise sind Voraussetzungen für einen sicheren Betrieb aus leistungselektronischer Sicht. Den Industrienetzen kann dabei aufgrund ihrer Abgeschlossenheit eine Vorreiterrolle zukommen.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Zeitplan wurde eingehalten. Durch den verstärkten Einsatz wissenschaftlicher Mitarbeiter zum Ende der Projektbearbeitung wurden weitere Kompetenzen aus dem wissenschaftlichen Bereich der Energie-Kompetenzen der TU Ilmenau einbezogen. Durch die Nichtausschöpfung der Mittel für studentische Hilfstätigkeiten sollten die Mehrausgaben der Ausgabeart 0812 kompensiert werden. Die Gegenüberstellung der geplanten Mittel mit dem Ist-Verbrauch zeigt eine Überziehung des PK-Ansatzes (Pos. 0812 + 0822) um 2.264,74 €.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Vorhaben konnte nicht im Rahmen der Grundfinanzierung der TU Ilmenau erfolgen. Um für die sich auftuenden Fragestellungen, die durch die Energiewende und der damit einhergehenden Umstellung des Elektroenergieversorgungssystems aufgeworfen werden, gewappnet zu sein, sind immer wieder von der Wissenschaft begleitet einhergehende Untersuchungen nötig. Nur so können auftretende Probleme rechtzeitig fokussiert und notwendige Schlussfolgerungen abgeleitet werden.

## 2.4 Verwertbarkeit

Die in dem Projekt aus Sicht der Leistungselektronik identifizierten Forschungsschwerpunkte haben die Wissensbasis erweitert. Daraus ergeben sich die Möglichkeiten zur Formulierung von Skizzen und Vollarträgen für relevante Forschungsvorhaben bis hin zur Überführung in erfolgreiche Forschungsprojekte. Infolgedessen wurden die wissenschaftlichen Grundlagen für vorhandene und sich entwickelnde Technologien, die für einen sicheren Netzbetrieb notwendig sind, vertieft. Eine Technologie-Roadmap kann im Nachgang abgeleitet werden.

## **2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt**

In der Zeit des Vorhabens sind keine signifikanten Entwicklungsschritte bekannter gemacht worden, die diese Studie betreffen.

## **2.6 Veröffentlichungen**

Auf dem Abschluss-Workshop des Forum SmartEnergy Ostdeutschland wurden die Ergebnisse dieser Studie vorgestellt.

Weiterhin wird der Schlussbericht sowie die Kurzfassung der Technischen Informationsbibliothek (TIB) zugeleitet werden.

## Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b>	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht
<b>3. Titel</b> Zwanzig20 - Foren - Smart Energy; Vorhaben: Anforderungen an erneuerbare Energien, gespeiste sichere Netze aus leistungselektronischer Sicht	
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Prof. Dr. Jürgen Petzoldt (Projektleiter)	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 31.12.2016
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b>
	<b>7. Form der Publikation</b> Schlussbericht
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> Technische Universität Ilmenau - Institut für Elektrische Energie- und Steuerungstechnik - FG Leistungselektronik und Steuerungen in der Elektroenergie-technik	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b>
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 03ZZF95
	<b>11. Seitenzahl</b> 12
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	<b>13. Literaturangaben</b>
	<b>14. Tabellen</b>
	<b>15. Abbildungen</b> 3
<b>16. Zusätzliche Angaben</b>	
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b> Projekträger Jülich Dr. Boris Repen / Petra Hochsieder Postfach 61 02 47 10923 Berlin 30.06.2017	
<b>18. Kurzfassung</b> In dieser Studie wird gezeigt, welche Herausforderungen aus leistungselektronischer Sicht zum sicheren Betrieb der zukünftigen Stromnetze bestehen, wenn sie zunehmend aus Erneuerbaren Energien gespeist werden. Ein Großteil der neuen Einspeiser (PV-Anlagen, Windparks) wird über leistungselektronische Anlagen mit dem Netz verbunden. Ebenso steigt die Zahl der Verbraucher in Industrie, Handwerk und Privathaushalten, die mit einem Stromrichter am Netz angeschlossen sind. Die vorhandenen Netze sind historisch gewachsen, vornehmlich für den Betrieb bei Erzeugung aus dezentral verteilten Großkraftwerken ausgelegt. Zukünftig wird diese Art der Einspeisung mit ihren mechanisch rotierenden Massen immer mehr ersetzt, so dass zunehmend die Eigenschaften der leistungselektronischen Betriebsmittel, insbesondere deren innere Regelkreisstrukturen, sowohl in Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen, als auch vermehrt an verschiedenen Stellen des Verteil- und Übertragungsnetzes, dann letztlich die Eigenschaften des Netzes bestimmen. Unterteilt in die vier Schwerpunkte Netzbetrieb des öffentlichen Netzes, Industrienetzbetrieb, leistungselektronische Betriebsmittel (Hardware) und Systemregelungstechnik (Regelstrukturen, Wechselwirkungen) für die Stromrichter werden aus den jeweiligen Blickwinkeln mittels Recherche und eigenen abgeleiteten Schlussfolgerungen – ausgehend vom Istzustand – zukünftige Entwicklungen abgeleitet und deren Herausforderungen für den Betrieb von sicheren Netzen abgeleitet sowie notwendige Forschungsschwerpunkte identifiziert. Weiterentwicklungen der Betriebsmittel Stromrichter, die zu preiswerteren Lösungen auch für einen erweiterten Leistungs- und Spannungsbereich führen, mit neuen/angepassten Regelstrukturen für dynamische (AC, DC, Insel-) Netze und eine für die sich veränderte Struktur angepasste Netzbetriebsweise sind Voraussetzungen für einen sicheren Betrieb aus leistungselektronischer Sicht. Den Industrienetzen kann dabei eine Vorreiterrolle zukommen.	
<b>19. Schlagwörter</b> Netzintegration, Netzbetrieb, leistungselektronische Betriebsmittel, Stromrichtertopologien, Regelstrukturen, Stabilität, Industrienetze	
<b>20. Verlag</b> TIB, Welfengarten 1B, 30167 Hannover	<b>21. Preis</b>

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 510235-12

## Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b>	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)	
<b>3. title</b> Twenty20 - Forums - Smart Energy; Project: Requirements for renewable energy-fed safe grids from power electronics view		
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Prof. Dr. Jürgen Petzoldt (Projektleiter - project manager)	<b>5. end of project</b> 31.12.2016	
	<b>6. publication date</b>	
	<b>7. form of publication</b> Document Control Sheet	
<b>8. performing organization(s) name, address</b> Technische Universität Ilmenau - Institute for Electric Power and Control Engineering - Power Electronics and Control Group	<b>9. originators report no.</b>	
	<b>10. reference no.</b> 03ZZF95	
	<b>11. no. of pages</b> 12	
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> Federal Ministry of Education and Research 53170 Bonn	<b>13. no. of references</b>	
	<b>14. no. of tables</b>	
	<b>15. no. of figures</b> 3	
<b>16. supplementary notes</b>		
<b>17. presented at (title, place, date)</b> Projekträger Jülich Dr. Boris Repen / Petra Hochsieder Postfach 61 02 47 10923 Berlin		
<b>18. abstract</b> In this study, it is shown which challenges to the safe operation of the future national grids exist when they are increasingly supplied with renewable energies. Much of the new feeders (PV systems, wind parks) are connected to the grid via power electronics systems. Likewise, the number of consumers in industry, crafts and private households, which are connected to the grid by a converter, is increasing. The existing grids are grown historically, mainly designed for operation in the generation of decentralized distributed large-scale power plants. As a result, the characteristics of the power electronic equipment will significantly determine the characteristics of the future national grid, in particular the internal control circuit structures of the power electronic, both in production and consumption systems, as well as increasingly at different points in the distribution and transmission grid. Subdivided into four main areas (mains operation of the national grid, operation of industrial grids, power electronic equipment (hardware) and system control technology (control structures, interactions) of the converters) future developments and their challenges for the operation of safe grids are derived from the respective viewing angles by means of research and their own derived conclusions from the actual state, as well as the necessary research areas are identified. Further developments of the equipment converters, which lead to cheaper solutions also for an extended power and voltage range, with new / adapted control structures for dynamic (AC-, DC-, island-) grids and a grid operation mode adapted for the changed structure are prerequisites for safe operation from a power electronics perspective. Industrial grids in particular can play a pioneering role in this.		
<b>19. keywords</b> Grid integration, grid operation, power electronic equipment, converter topologies, control structures, stability, industrial grids		
<b>20. publisher</b> TIB, Welfengarten 1B, 30167 Hannover	<b>21. price</b>	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 524671-16