Initiative zur Einrichtung eines Schwerpunktprogramms

Hybride und multimodale Energiesysteme:

Systemtheoretische Methoden für die Transformation und den Betrieb komplexer Netze

Programmausschuss

Koordinator

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz (Univ.-Prof.)
Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie^3)
Technische Universität Dortmund
Tel.: +49 231 755-2396
christian.rehtanz@tu-dortmund.de

DFG-Fachgebiet: 408-03 Elektrische Energieerzeugung, -übertragung, -verteilung und –anwendung

Weitere Mitglieder

Prof. Dr.-Ing. habil. István Erlich (Univ.-Prof.)
Fachgebiet für Elektrische Anlagen und Netze
Universität Duisburg-Essen
Tel.: +49 203 379 1032
istvan.erlich@uni-due.de

DFG-Fachgebiet: 408-03 Elektrische Energieerzeugung, -übertragung, -verteilung und –anwendung

Prof. Dr.-Ing. J. Lunze (Univ.-Prof.)
Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik
Ruhr Universität Bochum
Tel.: +49 234 32-24071
lunze@atp.rub.de

DFG-Fachgebiet: 407-01 Automatisierungstechnik, Regelungssysteme, Robotik, Mechatronik

Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff (Univ.-Prof.)
Abteilung Energieinformatik (OFFIS)
Universität Oldenburg
Tel.: +49 441 9722 240
sebastian.lehnhoff@uni-oldenburg.de

DFG-Fachgebiet: 409-03 Betriebs-, Kommunikations- und Informationssysteme

1 Zusammenfassung

Das System der Energieversorgung besteht aus vernetzten, geografisch verteilten Strukturen, die hohen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsstandards genügen müssen. Strom- und Gasnetze versorgen ganze Kontinente. Wärmenetze in Metropolen treten mit den Strom- oder Gasnetzen in Wechselwirkung. Informations- und Kommunikationssysteme zur Einsatzplanung und Netzsteuerung folgen diesen ausgedehnten Strukturen und gehen sogar über sie hinaus.

Die Umstellung auf ein nachhaltiges und durch erneuerbare Energien geprägtes System verändert dessen Struktur und Verhalten. Zum Ausgleich der Volatilität erneuerbarer Energiequellen ist eine Vernetzung des Stromnetzes mit Pufferkapazitäten sowie mit den anderen Energieträgernetzen notwendig. Hierdurch entstehen *multimodale Netze*. Die elektrischen Netze werden ihre Struktur von reinen Drehstromsystemen hin zu gekoppelten Drehstrom-/Gleichstromnetzen ändern, so dass *hybride Netze* entstehen. Aus diesem doppelten Transformationsprozess ergeben sich völlig neue Anforderungen an die Regelung und Prozessführung des Gesamtsystems, weil sich dabei die Dynamik sowohl der vermehrt dezentralen und informationstechnisch koordinierten Energieerzeuger als auch der Verbraucher verändert und folglich das System als Ganzes neue Eigenschaf-

ten erhält. Gleichzeitig wird die Komplexität des Systembetriebs signifikant erhöht, weil zukünftig nicht nur eine Anpassung der Energieerzeugung an den aktuellen Verbrauch, sondern auch eine Steuerung der Verbraucher entsprechend dem aktuellen Energiedargebot notwendig ist.

Ziel dieses interdisziplinären Schwerpunktprogramms ist es, neue systemtheoretisch begründete Konzepte für die Transformation des gegenwärtigen elektrischen Energiesystems hin zu informationstechnisch durchdrungenen, hybriden und multimodalen Netzen zu schaffen und damit einen Beitrag zur sicheren und resilienten Energieversorgung bei sich wandelnden Energiequellen und Versorgungsprinzipien zu leisten.

Diese wissenschaftlichen Untersuchungen bedürfen eines Schwerpunktprogramms, weil Netz- und Anlagenbetreiber sowie Hersteller jeder für sich weder die Kapazität noch die Systemkompetenz für die Erarbeitung netz- und domänenübergreifender Konzepte haben. Andererseits besteht ein großes volkswirtschaftliches und politisches Interesse, den Wandel der Energieversorgung voranzutreiben.

Im Mittelpunkt steht die übergeordnete Frage, wie die Gesamtstruktur aus Netzarten, Netz- und Betriebstechnologien über alle Ebenen hinweg modelliert, berechnet und optimiert werden kann. Neue methodische Ansätze wie z. B. die Theorie komplexer Netze, die Nutzung autonomer, agentenbasierter und sich selbst organisierender Systeme sowie verteilte Regelungs- und Optimierungsstrategien für prognoseunsichere Systeme sowie unter maßgeblichem Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik müssen für die Transformation und den stabilen Betrieb komplexer Energienetze erschlossen werden. Da großräumige hybride und multimodale Netze wesentlich mehr planerische und betriebliche Freiheitsgrade als die heutigen Energieträgernetze bieten, sind neue Methoden erforderlich, die probabilistische Risiko- und Unsicherheitsbetrachtungen mit neuen Fehlertoleranz und -korrekturmaßnahmen kombinieren. Die Erforschung der grundlegenden Eigenschaften und Systemdienstleistungen im Zeitbereich von Millisekunden bis zu Stunden sind ebenfalls Teil der Forschung.

2 Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

2.1 Energiesysteme im Wandel

Die Energieversorgungssysteme stehen vor einem tiefgreifenden Wandel, der den Aufbau neuer Strukturen und die Entwicklung und Anwendung neuer Planungs- und Prozessführungsstrategien notwendig macht. Die folgenden Aspekte zeigen, dass die gegenwärtige verstärke Nutzung neuer Energiequellen nicht nur neue technische Komponenten in die bestehenden Netze einführt, sondern eine Transformation der Netze als Ganzes zu hybriden und multimodalen Netzen auslöst und damit neue Herausforderungen an die Prozessführung dieser Systeme stellt:

- Der drastische **Anstieg erneuerbarer Energiequellen** verändert die Dynamik der Erzeuger und damit das Verhalten des gesamten Netzes. Während bisherige Kraftwerke aller Art elektrische Energie durch Synchronmaschinen erzeugt und dabei durch die mechanische Trägheit der rotierenden Massen wesentlich zur Netzstabilität beigetragen haben, reduziert sich mit steigendem Anteil von Windkraft- und Photovoltaikanlagen und deren Einspeisung über Gleichspannungsnetze der Rückkopplungseffekt der Erzeuger auf eine Veränderung des Energieverbrauchs. Die Netzstabilität muss deshalb durch neuartige Steuerungsmethoden gesichert werden.
- Die bisherigen Netze sind für den Energiefluss von den Kraftwerken zu den Verbrauchern einerseits und die Steuerung des Netzes durch die Anpassung der Erzeugung an den Verbrauch andererseits ausgelegt. Im Unterschied dazu werden hybride Energiesysteme durch eine Verteilung der Energieeinspeisung über das gesamte Netz gekennzeichnet sein, so dass sich gegenüber dem bisherigen Netzaufbau der Energiefluss teilweise umkehren wird. Da die Energieerzeugung erneuerbarer Quellen sehr starken und sehr schnellen Schwankungen unterliegt, muss die Prozessführung vollkommen neue Wege gehen und beispielsweise auf die Verbraucher eingreifen, so dass das Prinzip der bedarfsgerechten Erzeugung durch das neue Prinzip des **angebotsorientierten Verbrauchs** ersetzt wird. Welche Konsequenzen dieser Übergang für die Netzstrukturierung und für die Netzsteuerung hat, ist bisher vollkommen offen.
- Energienetze sind bisher streng hierarchisch strukturiert, wobei von einer Lastvorhersage ausgehend eine Anpassung der Erzeugung an den aktuellen Verbrauch in gestaffelten, immer kleiner werdenden Zeitfenstern vorgenommen wird. Zukünftig wird das Netz in kleinere Einheiten

gegliedert sein, in denen ein teilweiser Ausgleich an Erzeugung und Verbrauch - auch über unterschiedliche Energieträger hinweg - erreicht wird. Unter den Begriffen **Microgrids**, zellulare Versorgung, energieautarke Gebäude und *Smart Grids* wird gegenwärtig an Konzepten gearbeitet, die nicht nur diese Art der Energieversorgung vor Ort, sondern das Energiesystem als Ganzes nachhaltig beeinflussen werden. Es muss untersucht werden, welche Gesamtsystemstrukturen dabei anzustreben sind und zu welchem Verhalten multimodale Netze als Ganzes führen werden.

- Der breite Einsatz erneuerbarer Energiequellen führt auf schnelle und große Schwankungen der verfügbaren Leistung im elektrischen Netz, die nur durch eine Kopplung mit anderen Energienetzen ausgeglichen werden können. So ist beispielsweise eine direkte Kopplung mit Gasnetzen durch die Nutzung von Gas zur Erzeugung elektrischer Energie einerseits und die Erzeugung von Wasserstoff zur Speicherung gegenwärtig nicht benötigter elektrischer Energie andererseits möglich. Damit entstehen **multimodale Energiesysteme**, für deren Strukturierung und Steuerung die Spezifika der beteiligten Energiearten beachtet werden müssen, wobei zum Beispiel Heizenergie nicht über große Entfernung transportiert und elektrische Energie nicht gespeichert werden kann.
- Derzeit werden erste einzelne **Hochspannungsgleichstromleitungen** in das europäische Netz integriert, um Engpässe, die durch Marktaktivitäten und erneuerbare Energien entstehen, zu beheben. Deutschland nimmt eine Vorreiterrolle ein und plant drei große Gleichstromtrassen von Nord nach Süd [8]. Hierfür sind die Verfahren für eine optimierte Systemplanung und einen optimierten Netzbetrieb bislang weitestgehend ungeklärt.
- Eine stabile und zuverlässige Energieversorgung auf Basis dezentraler und dargebotsabhängiger Energieumwandlungsanlagen ist effizient nur durch einen durchgängigen Einsatz von **Informations- und Kommunikationssystemen** unterschiedlicher (und anwendungsfallspezifischer) Ausprägung zur Überwachung, Steuerung und Regelung von Netzbetriebsmitteln, Energieerzeugern und Verbrauchern möglich. Dies erlaubt den Betrieb existierender Netzinfrastrukturen außerhalb der ursprünglichen auf zentralen und hierarchischen Versorgungsgrundsätzen beruhenden Planungsgrundlage sowie eine koordinierte/prognosebasierte Koordination und Einsatzplanung für eine effiziente Bewirtschaftung von Speichersystemen sowie die Einsatzplanung von Wandlungs- und Kopplungsprozessen multimodaler Energiesysteme. Die Fehlertoleranz- und Sicherheitsmechanismen der multimodalen Einzelsysteme sowie des integrierten Informationssystems werden dabei bislang unabhängig voneinander ausgelegt. Diese sind in einem derart integrierten System jedoch hochgradig untereinander abhängig.

Der beschriebene Wandel erfordert die Anwendung vollkommen neuer Konzepte für die Netzstrukturierung, Systemplanung und Prozessführung, für die es in dem zuvor diskutierten Umfang und der praktisch relevanten Problemkomplexität eines hochintegrierten hybriden und multimodalen Energieversorgungssystems bisher keinen wissenschaftlichen Vorlauf gibt. So hat die drastische Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energiequellen bereits in den vergangenen Jahren zu kritischen Netzsituationen geführt, weil in Spitzenzeiten die erzeugte Energie den Verbrauch bei Weitem übertroffen hat und die Netzstabilität nur durch eine kostspielige Übertragung der überflüssigen Energie in Nachbarnetze gewährleistet werden konnte. Diese Entwicklung zeigt die dringende Notwendigkeit für wissenschaftliche Analysen, die das Gesamtsystem betreffen. Da Kraftwerksbetreiber, Netzbetreiber, Hersteller und Lieferanten von Systemkomponenten wie den Anlagen zur Umwandlung erneuerbarer Energiequellen jeder für sich weder die Kapazität und Kompetenz für die Erarbeitung netz- und domänenübergreifender Konzepte haben, soll das hier vorgeschlagene Schwerpunktprogramm der DFG den wissenschaftlichen Vorlauf für die Wandlung von Energiesystemen zu hybriden und multimodalen Systemen schaffen und dafür neue Netzkonzepte und Steuerungsstrategien erarbeiten.

2.2 Steuerung klassischer Energiesysteme

Elektroenergiesysteme werden seit Jahrzehnten nach dem *Prinzip des lastfolgenden Netzbetriebs* gesteuert, bei dem die elektrischen Energieerzeuger an die von den Verbrauchern angeforderte Energiemenge angepasst werden. Dieses Prinzip wird auf mehreren Ebenen umgesetzt, die sich durch die für die Anpassung notwendigen Zeithorizonte unterscheiden. Beginnend mit der Ausbauplanung für die langfristige Anpassung der Erzeugung an den prognostizierten Verbrauch über die Lastvorhersage für ein oder mehrere Tage bis zur aktuellen Steuerung der Regelkraftwerke zur Anpassung der erzeugten Leistung an den aktuellen Verbrauch im Sekundentakt dienen alle Maß-

nahmen der Stabilisierung des Netzes gegenüber Störungen und unvorhersehbaren äußeren Einflüssen und damit der Versorgungszuverlässigkeit [1].

Dieses Wirkungsprinzip ist bei überwiegendem Anteil an erneuerbaren Energien nicht mehr realisierbar und muss durch vollkommen andere Verfahren ersetzt werden. Nur ein *erzeugungsorientiertes Betriebsregime* kann den Anteil der gewonnenen erneuerbaren Energien maximieren. Der Übergang vom Steuerungsprinzip der bedarfsgerechten Erzeugung zum neuen Steuerungsprinzip des angebotsorientierten Verbrauchs erfordert nicht nur neue technische Eingriffsmöglichkeiten, mit denen Verbraucher durch dezentrale Steuerungsalgorithmen beeinflusst werden können. In Ermangelung geeigneter Speicherkapazitäten und -technologien muss das Elektroenergiesystem einerseits in kürzeren Betriebsführungsintervallen „reaktiver“ auf Prognoseabweichungen reagieren und letztlich mit weiteren Energieträgersystemen kombiniert werden, um die erforderlichen energetischen und Kapazitätsfreiheitsgrade für die Steuerung zu gewinnen. Mit dem Wandel des Energienetzes zu hybriden und multimodalen Netzen müssen die bisherigen Steuerungsmechanismen also durch neue Methoden ersetzt werden, was für das Schwerpunktprogramm grundlegend neue Fragestellungen aufwirft, die bearbeitet werden sollen.

2.3 Stand der Forschung zu Smart Grids

Smart Grids (intelligente Energiesysteme) werden als Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen seit einigen Jahren systematisch betrachtet, wobei im Unterschied zu klassischen Systemen die Verfügbarkeit einer großen Anzahl von Messgrößen und der Zugriff auf Verbraucher bis in den Bereich der Haushalte angenommen wird. Eine wichtige Frage ist beispielsweise, ob in diesen Netzen mit dezentraler Energieerzeugung durch Photovoltaikanlagen in den Wohngebieten und mit Zugriff auf Verbraucher wie Elektrofahrzeuge, Kühlaggregate oder Klimaanlagen, deren Einsatz zeitlich in bestimmten Grenzen verschoben werden kann, eine Anpassung des Verbrauchs an die aktuelle Erzeugung in ausreichendem Maße möglich ist [2], [3], [4].

Damit wird unter dem Stichwort der *Smart Grids* auf systemtheoretischer Ebene und folglich noch ohne den Bezug zur konkreten technischen Realisierung steuerbaren Verbraucher der Übergang von einer lastgeführten Erzeugung zum angebotsorientierten Verbrauch vollzogen. Die Arbeiten zeigen, dass die Regelung durch verteilte Komponenten realisiert werden muss, weil ein zentraler Ansatz, bei dem alle verfügbaren Messgrößen zu einem zentralen Regler übermittelt, dort verarbeitet und dann an die einzelnen Aktoren übertragen werden, aufgrund der Vielzahl von Mess- und Stelleingriffen nicht möglich ist [5].

Bisherige Smart-Grid-Ansätze betrachten allerdings zumeist quasistationär die energetischen Freiheitsgrade dezentraler Anlagen zum Erzeuger-Last-Ausgleich auf Verteilnetzebene. Des Weiteren werden neue steuernde Komponenten im Verteilnetz untersucht. Da im Rahmen dieses Schwerpunktprogramms systemtheoretische Betrachtungen der Gesamtsystemstruktur über alle Netzebenen hinweg durchgeführt werden sollen, kann man den hier zu betrachteten Forschungsgegenstand als weitergehenden Smart-Grid-Ansatz bezeichnen.

2.4 Stand der Forschung zu multimodalen Netzen

Der Fokus der derzeitigen Forschung zu multimodalen Netzen[1] liegt primär auf der Untersuchung der Schnittstellentechnologien zwischen den verschiedenen Netzarten. Untersuchungen zu Netzauslegung und -betrieb werden sekundär als Ausblick aufgenommen. Oft werden die Forschungsvorhaben von Interessens- oder Fachverbänden initiiert und eine interdisziplinäre Diskussion der Inhalte wird nur am Rande geführt.

Die Motivation zur Kopplung der Netzarten in Deutschland, hauptsächlich die Bereitstellung von Flexibilität zur Integration von erneuerbaren Energien, ist vieldiskutiert und Forschungsfragen hierzu sind formuliert [6], [7]. Die Netzentwicklung im Gas- und Stromsektor wird von den Netzbetreibern und Forschungseinrichtungen auf nationaler und internationaler Ebene in z.B. [8], [9] basierend auf zukünftigen Szenarien geplant, jedoch ohne die Kopplung zwischen den Systemen zu modellieren. Im Gassektor sind die Nutzung der Gasinfrastruktur als Energiespeicher und die Marktintegration neuer Technologien wie Gaswärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und

[1] In der Literatur wird teilweise der Begriff Hybridnetz für den Systemverbund der verschiedenen Netzarten verwendet. Diesbezüglich ist zu beachten, dass im Rahmen dieses Antrags unter Hybridnetz ein gekoppeltes Drehstrom-/Gleichstromnetz verstanden und das domänen-/netzartenübergreifende Netz als multimodales Netz bezeichnet wird.

Power-to-Gas-Anlagen Kernpunkte der Forschung [10]. Standorte von Power-to-Gas-Anlagen als Schnittstellentechnologie wurden in [11] untersucht. Auch der Wärmesektor bietet Flexibilitätspotentiale für den Stromsektor [12]. Im Fokus stehen dabei die hybriden Energieumwandlungsanlagen wie bspw. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Verbindung mit Wärmenetzen oder Warmwasserspeichern in Verbindung mit elektrischen Heizstäben [13].

Ein weiterer Forschungsansatz ist die sektorübergreifende Optimierung des Energiesystems, bspw. in [14] und [15]. Netzaspekte werden dabei berücksichtigt, das Vorgehen jedoch nicht nachvollziehbar dokumentiert. Detaillierte Untersuchungen der Netzaspekte bspw. in Form von Lastflussrechnungen sind nicht Teil der Optimierung. Ein solcher Ansatz wird wissenschaftlich fundiert in [16] gewählt, wobei eine Optimierung der gekoppelten Lastflüsse der Elektrizitäts-, Gas- und Wärmeinfrastruktur anhand von sogenannten Energy Hubs durchgeführt wird. In [17] wird ein Grüner-Wiese-Ansatz zum Design eines multimodalen Energiesystems und der Herleitung von Entwicklungspfaden angewandt. Generell ist die internationale Forschung hinsichtlich der Entwicklung und des Betriebs multimodaler Netze nicht weit vorangeschritten und es besteht grundlegender Forschungsbedarf [18].

2.5 Stand der Forschung zu hybriden Hochspannungsgleichstrom- und Drehstromnetzen

Der Verbundbetrieb hybrider elektrischer Transportnetze ist aktuell noch wenig erforscht. Während für die Kopplung einzelner, unabhängig betriebener Netzbereiche mittels Hochspannungsgleichstromübertragungen (HGÜ) bereits tiefe Kenntnisse und langjährige Betriebserfahrungen vorliegen, konzentrierte sich die Forschung seit einigen Jahren zunächst auf die Einbettung einzelner Punkt-zu-Punkt-Verbindungen in HGÜ-Technologie in einzelne, synchron betriebene Transportnetze. Optimale Positionen für neue HGÜ-Konverterstationen wurden in [19] und der Mehrwert der kurzfristigen Steuerbarkeit von HGÜs für den Netzbetrieb in [20] untersucht. Verfahren für die Kopplung von Drehstrom- und Gleichstromnetzen unter Berücksichtigung von Unterstützung der Frequenz-Leistungsregelung sind z. B. in [21] publiziert. Die Erweiterung bestehender Netze durch mehrere HGÜ-Systeme oder ein überlagertes, vermaschtes HGÜ-Netz wurde bislang nur vereinzelt betrachtet, obwohl die aktuellen Entwicklungen in der Energiepolitik zeigen, dass eine solche Forschungsfokussierung notwendig ist, wenn die klimapolitischen Ziele technisch umgesetzt werden sollen.

Eingebettete Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Systeme werden erstmalig in Deutschland ab voraussichtlich 2017 zum Einsatz kommen, um die in Norddeutschland und auf See erzeugte Windenergie zu den Lastzentren in West- und Süddeutschland zu transportieren [8], [9]. Zudem ist eine Umstellung vorhandener Drehstromverbindungen auf Gleichstrom denkbar [22]. Zwar ist bekannt, wie diese HGÜ-Leitungen stationär in das vorhandene System integriert werden können [23], jedoch muss für die Stabilität des zukünftigen hybriden Gesamtsystems auch die dynamische Regelung bis in den Kurzzeitbereich betrachtet werden [24]. Eine optimierte Reglerauslegung für HGÜ wurde in [25] untersucht. Nur durch eine aus Systemsicht optimale Regelung kann das Potential der HGÜ ausgeschöpft werden [26]. Zudem wurden bisher keine Entwicklungspfade erforscht, wie diese einzelnen Punkt-zu-Punkt-Leitungen in ein vermaschtes HGÜ-Netz überführt werden können.

Hybride Hochspannungsgleichstrom- und Drehstromnetze wurden bisher nur als hypothetische Strukturen vorgeschlagen, die zumeist anhand stationärer Gesichtspunkte abgeleitet wurden [27]. Darüber hinaus wurden Einzeltechnologien im elektrischen Netz wie Hochspannungsgleichstromübertragungen oder leistungselektronische Netzregler (FACTS-Geräte) bezüglich deren Regelbarkeit untersucht. Große Projekte in diesem Bereich sind die Projekte Realisegrid (http://realisegrid.rse-web.it/) und ICOEUR (www.icoer.eu), die vom 7. Rahmenprogramm der EU gefördert wurden und an denen der Koordinator des SPP beteiligt war. Darüber hinaus wurde das Projekt PEGASE (www.fp7-pegase.de) von der EU gefördert und zwischenzeitlich beendet. Alle drei Projekte befassten sich mit der technischen und wirtschaftlichen Planung und Bewertung sowie dem Betrieb neuer Technologien zur Beseitigung von Transportnetzengpässen in Europa und bei der Erweiterung von Verbundsystemen [P1]. Hierbei wurden jedoch nur Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen betrachtet.

Der Betrieb hybrider Netze – insbesondere bei Störungen – ist bisher nur vereinzelt und unter Hinzuziehung starker Vereinfachungen erforscht worden [28]. Mangels kommerziell verfügbarer Leistungsschalter zum Schalten von Gleichströmen stellt die selektive Fehlerklärung bei Störungen im Gleichstromnetz aktuell eine der dringendsten Forschungsfragen dar, da die Form der Fehlerklä-

rung wesentlichen Einfluss auf den Betrieb des Gesamtsystems hat [29]. Auch die Frage, wie die zu übertragende Leistung in Abwägung ökonomischer und die Systemstabilität betreffender Sachverhalte zwischen dem Drehstrom- und dem Gleichstromnetz aufzuteilen ist, ist erkannt, aber noch nicht hinreichend geklärt worden [30].

Der zusätzliche Nutzen, der sich bei der multimodalen Kopplung eines hybriden elektrischen Energiesystems mit anderen Netzarten ergeben könnte, so dass zusätzlich zum hochgespannten Wechselstrom auch hochgespannter Gleichstrom als Prozessenergie zur Gassynthese/ Wärmeerzeugung bereitgestellt werden kann, ist noch nicht erforscht worden. Allerdings belegen zahlreiche Quellen den Mehrwert bei der Kopplung der Energienetze [31].

Erste Untersuchungen zeigen den Mehrwert einer Reservestellung durch erneuerbaren Energien bei der Simulation des Marktes. Der zukünftige Bedarf von Systemdienstleistungen[2] in Deutschland und Europa wurde detailliert in [32] seitens des Koordinators untersucht und dient unter anderem als Anforderungskatalog für das hier beantragte Schwerpunktprogramm. Erste Ansätze zur Betrachtungen der Frequenzstabilität bei einem hohen Anteil leistungselektronischer Erzeuger im Drehstromnetz befinden sich in [33]. Forschungsfragen für Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) multimodaler Netze wurden von *acatech* aufgezeigt [1]. Die konkreten Lösungen dazu stehen jedoch aus.

2.6 Zusammenfassende Bewertung

Die Zusammenstellung des Standes der Forschung zeigt, dass der gegenwärtige Wandlungsprozess der Energiesysteme als Forschungsgegenstand vor einigen Jahren erkannt worden ist und dass erste Lösungsansätze für wichtige methodische und technologische Probleme erarbeitet worden sind. Diese Entwicklung hat jedoch zwei Mängel. Erstens hält der beschriebene wissenschaftliche Vorlauf mit der rasanten gegenwärtigen Entwicklung nicht Schritt, weil die Veränderungen der Netze durch unterschiedliche politische Maßnahmen beschleunigt wurden. Es ist abzusehen, dass der Weiterbetrieb der Netze mit den konventionellen Methoden zu großen technischen Schwierigkeiten führen wird, die sich auf die Netzstabilität und damit auf die Versorgungssicherheit auswirken werden. Beispiele für kritische Situationen haben sich in den letzten Jahren gehäuft.

Der zweite Mangel besteht darin, dass die o. g. Forschungsergebnisse aus singulären Arbeiten entstanden sind, die den Fokus auf einzelne Probleme der (sektor- oder domänenspezifischen) Energiesystemtechnik, der Regelungstechnik oder der Informationstechnik richten. Sie bieten damit Lösungen für technologische bzw. systemtheoretische Teilprobleme, die sich jedoch nicht aus einem interdisziplinären Blickwinkel adäquat zusammenführen lassen.

Beide Mängel sollen mit dem hier beantragten Schwerpunktprogramm behoben werden. Die Forschungsarbeiten sollen einerseits durch eine Konzentration auf wichtige Aspekte des genannten Wandlungsprozesses der Energiesysteme und andererseits durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Energiesystemtechnikern, Regelungstechnikern und Informatikern quantitativ und qualitativ verbessert und erweitert werden.

2.7 Vorarbeiten der Mitglieder des Programmausschusses

Die Mitglieder des Programmausschusses haben sich seit vielen Jahren mit unterschiedlichen Problemen und Ansätzen der Strukturierung und Steuerung von Elektroenergiesystemen beschäftigt. Seitens des Koordinators wurden seit vielen Jahren weitgehende Forschungen zur stabilisierenden und koordinierenden Netzregelung mit leistungselektronischen Netzreglern vorangetrieben [P1]. EU-Projekte zur zukünftigen Entwicklung und zum Einsatz von neuen Transporttechnologien wurden durchgeführt und die Ergebnisse z. B. in [P2] veröffentlicht.

In [P3] wurde eine koordinierte Lastflusssteuerung vorgestellt, die die Transportnetzauslastung und -stabilität erhöht. Weitbereichsregelungen und korrektive Handlungen zur Netzstabilisierung und deren Berücksichtigung in der Planung hybrider Netze wurden gezeigt. Spezielle Verfahren zur Analyse niederfrequenter Schwingungen in ausgedehnten Netzen, die detaillierte Netzdynamiken betrachten, wurden in [P4] vorgestellt. Ein gekoppeltes europäisches Netz- und Marktmodell als Basis für die Untersuchung realistischer Szenarien ist vorhanden und wurde letztlich in [P5]

[2] Als Systemdienstleistungen werden gemäß der üblichen Terminologie die Maßnahmen zur stabilen Frequenz- und Spannungsregelung, zur Betriebsführung und zum Netzwiederaufbau nach Ausfällen verstanden.

veröffentlicht. Eine Co-Simulation zwischen elektrischen Energie- und IKT-Netzen wurde erarbeitet und zum Patent angemeldet [Rehtanz, Wietfeld, e.a.: deutsche Patentanmeldung 2013] und steht für Untersuchungen im Rahmen des Schwerpunktprogramms zur Verfügung.

Um über Strom- und IKT-Systeme hinaus weitere Energiesysteme sowie Nutzer- und Umweltmodelle in praxisrelevanter Größenordnung simulativ zu koppeln, wurde mit *mosaik* [P6] ein Werkzeug geschaffen, mit dem sich heterogene und unabhängig voneinander entwickelnde Simulationsmodelle aber auch Echtzeit-Hardware-Komponenten zu einer Multiskalen-Co-Simulation orchestrieren lassen. Bei einer derartigen modellbasierten Erzeugung großskaliger Energiesystemsimulationen sind die Unsicherheitsanalyse und -quantifizierung von besonderer Bedeutung [P7].

Die Auslegung und Planung von IKT-Systemen für den Betrieb integrierter multimodaler Energiesysteme wurde untersucht und es konnten Voraussetzungen geschaffen werden, die Einsatzfähigkeit IKT-basierter verteilter Betriebsführungsstrategien hinsichtlich Risiko und Zuverlässigkeit zu bewerten [P8] sowie Mechanismen vorgestellt werden, garantierte Systemantworten in Echtzeit [P9] und unter Erfüllung bestimmter Güteanforderungen [P10] trotz probabilistischer kommunikationsbasierter Entscheidungsprozesse zu gewährleisten.

Vorarbeiten zur Netzstrukturierung auf der Grundlage der Struktur und Eigenschaften sich selbst organisierender Netze sind in [P11] und [P12] beschrieben und für die Knotenspannungsregelung von Elektroenergienetzen exemplarisch demonstriert. Diese Analyse basieren auf der Erfahrung des Antragstellers mit der Netzregelung, wobei unterschiedliche Strukturen der Frequenz-Übergabeleistungsregelung und der Spannungs-Blindleistungsregelung untersucht und an realen Netzen eingesetzt wurden. In [P13] ist als Ergebnis eines DFG-Schwerpunktprogramms der aktuelle Stand der Theorie vernetzter Regelungssysteme zusammengestellt. Dass man Synchronisationsphänomene, wie sie in elektrischen Energienetzen auftreten, in einem allgemeineren Rahmen systemtheoretisch untersuchen kann, wurde in [P14] und [P15] gezeigt.

Umfangreiche Arbeiten zur Modellierung und Wechselwirkung von Windturbinen und Photovoltaik-Anlagen mit dem Netz liegen bei den Initiatoren vor [P16]. Auf dieser Basis können realitätsnahe Simulationsuntersuchungen in großen Netzen durchgeführt werden. Die Vorhersage eines drohenden Stabilitätsverlusts erfordert eine umfassende Analyse von Daten und Verfahren welche die Ableitung von Schlussfolgerungen (Dynamic Security Assessment) gestatten [P17]. Ein möglicher marktorientierter Ansatz zur Vermeidung von Instabilität wurde in [P18] diskutiert. In der Zukunft werden sowohl in der Planung als auch in der Betriebsführung heuristische Optimierungsverfahren eine zunehmende Rolle spielen. Ansätze hierfür, z. T. unter Einbeziehung der Optimierungsalgorithmen in die existierenden Regelkreise und Nutzung von Prognosedaten für die eingespeiste Leistung, wurden in [P19] gezeigt. Die neuen HGÜ-Verbindungen oder Netze erfordern einen qualitativen Wechsel in der Modellierung und Simulation von elektrischen Netzen [P20]. Die neue Technologie erlaubt aber auch völlig neue Ansätze für die Stabilisierung des Netzes bzw. für das Durchfahren von Fehlern.

Die genannten Veröffentlichungen bilden eine fundierte Ausgangsbasis für die Erforschung hybrider und multimodaler Netze und die dazu notwendigen systemtheoretischen Methoden im Rahmen des beantragten Schwerpunktprogramms.

3 Themenbezogene Publikationen der Mitglieder des Programmausschusses

3.1 Veröffentlichte Arbeiten aus Publikationsorganen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung und Bücher

[P1] Zhang, X.-P., Rehtanz, C., Pal, B.: *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*, überarbeitete und erweiterte Edition, Springer-Verlag, 2. Edition, Feb. 2012

[P2] Häger, U.; Rehtanz, C.; Voropai, N.: *Monitoring, Control and Protection of Interconnected Power Systems*, Springer-Verlag, 2014

[P3] Müller, S.C.; Häger, U.; Rehtanz, C.: *A Multi-Agent System for Adaptive Power Flow Control in Electrical Transmission Systems*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 4, pp. 2290-2299, Nov. 2014

[P4] Yang, D; Rehtanz, C.; Li, Y.: *A hybrid method and its applications to analyse the low frequency oscillations in the interconnected power system*, IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 7, Iss. 8, 2013

[P5] Spieker, C.; Teuwsen, J.; Liebenau, V.; Müller, S. C.; Rehtanz, C.: *European Electricity Market Simulation for Future Scenarios with High Renewable Energy Production*, IEEE PowerTech, Eindhoven, Netherlands, 29. June - 2. July 2015

[P6] Rohjans, S.; Widl, E.; Müller, W.; Schütte, S.; Lehnhoff, S.: *Gekoppelte Simulation komplexer Energiesysteme mittels MOSAIK und FMI*, at – Automatisierungstechnik 2014. 62(5), DOI: 10.1515/auto-2014-1087, De Gruyter Oldenburg

[P7] Steinbrink, C.; Lehnhoff, S.: *Challenges and Necessity of Systematic Uncertainty Quantification in Smart Grid Co-Simulation*, IEEE Eurocon, Salamanca, Spain, 8.-11. September 2015.

[P8] Blank M.; Lehnhoff, S.: *Correlations in Reliability Assessment of Agent-based Ancillary Service Coalitions*, 18th international Power Systems Computation Conference (PSCC’14), Wroclaw, Poland, 18.-22. August 2014

[P9] Blank, M.; Calabria, M.; Dietz, R.; Fuchs, F.; Klingenberg, T.; Lehnhoff, S.; Mertens, A.; Schumacher, W.: *Agentenbasierte Vorhaltung und Erbringung von Primärregelleistung*, at – Automatisierungstechnik 2014. 62(5): 347-363, DOI: 10.1515/auto-2014-1088, De Gruyter Oldenburg

[P10] Ruthe, S.; Rehtanz, C.; Lehnhoff, S.: *On the Problem of Controlling Shiftable Prosumer Devices with Price Signals,* International Journal of Electric Power & Energy Systems – IJEPES, Volume 72 (2015), pp. 83–90, ISSN: 0142-0615, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.02.014, Elsevier, 2015

[P11] Lunze, J.: *Synchronisation of systems with individual dynamics by static networked controllers*, Asian J. of Control 16 (2014) No. 2, pp. 1-12

[P12] Lunze, J.: *Vernetzte Regelungen aus der Sicht der Theorie komplexer Netzwerke*, Automatisierungstechnik 61 (2013) H.10, 700-710

[P13] Lunze, J. (Ed.): *Control Theory of Digitally Networked Dynamic Systems*, Springer-Verlag, Heidelberg, 2014

[P14] Demir, O.; Lunze, J.: *Optimal and event-based networked control of physically interconnected systems and multi-agent systems*, Intern. J. Control 87 (2014) No. 1, pp. 169-185.

[P15] Lunze, J.: *Self-organising disturbance attenuation for synchronised agents with individual dynamics*, Intern. J. of Control 88 (2015) No. 3

[P16] Shewarega, F.; Feltes, Ch.; Erlich, I.: *Enhanced Voltage Drop Control by VSC-HVDC Systems for Improving Wind Farm Fault Ride-through Capability*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 1 pp. 378 – 385, Feb. 2014

[P17] Cepeda, J.C.; Rueda, J.L.; Golomé, D.G.; Erlich, I.: *Data-mining-based approach for predicting the power system post-contingency dynamic vulnerability status*, IEEE Transaction on Electrical Energy Systems, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/etep.1981, 2014

[P18] Hoballah, A.; Erlich, I.; *Online market-based rescheduling strategy to enhance power system stability*, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 6, pp. 30 - 38, 2012

[P19] Pham, H.V.; Rueda, J.L.; Erlich, I.: *Online Optimal Control of Reactive Sources in Wind Power Plants*, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 2, pp. 608 – 616, 2014

[P20] Trinh,. N.-T., Zeller, M.; Wuerflinger, K.; Erlich, I.: *Generic Model of MMC-VSC-HVDC for Interaction Study With AC Power System*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PP, Issue: 99, 3. Feb. 2015

4 Literaturverzeichnis

[1] A. J. Woods, B. F. Wollenberg: Power Generation, Operation and Control, Wiley, 1996

[2] J. M. A. Scherpen: Distributed supply-demand balancing and the physics of smart energy systems, European J. of Control 24 (2015), 63-71

[3] G. K. H. Larsen, N. D. van Foreest, J. M. A. Scherpen: Distributed MPC applied to a network of households with micro-CHP and heatstorage, IEEE Trans. Smart Grid 5 (2014) pp. 2106–2114

[4] A. Molderink, V. Bakker, M. Bosman, J. Hurink, G. Smit: Management and control of domestic smartgrid technology, IEEE Trans. Smart Grid 1 (2010) pp. 109–119

[5] S. Lehnhoff, M. Blank, R. Bleiker, T. Klingenberg, K. Piech, M. Uslar, W. Schumacher, M. Calabria, A. Mertens, R. Dietz, F. Fuchs, “Sub-Project Two: Grid Stabilizing Ancillary Services” in L.Hofmann and M. Sonnenschein, “Smart Nord - Final Report”, pp. 95-137, Hanover, April 2015, ISBN: 978-3-00-048757-6

[6] Appelrath, H.-J.; Lehnhoff, S.; Rohjans, S.; König, A.; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Hybridnetze für die Energiewende - Forschungsfragen aus Sicht der IKT*. Berlin, 2012

[7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *IKT-basiertes Energie-Hybridnetz der Zukunft*. Fachgespräch im Rahmen des Leuchtturmprojekts „E-Energy: IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft“, Berlin, 29.11.2011
[8] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH (Hrsg.): *Netzentwicklungsplan Strom 2014; zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber*. 04.11.2014
[9] ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity (Hrsg.): *10-Year Network Development Plan 2014*. Brüssel
[10] Fischedick, M.; Merten, F.; Krüger, C.; Nebel, A.; DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (Hrsg.): *Synergieeffekte Gas- und Stromnetze - Nutzung von Gasnetzen und -speichern für die Integration von Strom aus Erneuerbaren Energien und zur Entlastung der Stromnetze*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Bonn, Dezember 2013
[11] Breuer, C.; Drees, T.; Echternacht, D.; Linnemann, C.; Moser, A.: Identification of Potentials and Locations for Power-to-Gas in Germany, 6th International Renewable Energy Storage Conference, Berlin, Deutschland, 28.11.-30.11.2013
[12] Bundeskartellamt: *Sektoruntersuchung Fernwärme*, Abschlussbericht, August 2012
[13] Schulz, W.; Brandstätt, C.: *Flexibilitätsreserven aus dem Wärmemarkt*. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE), AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Bochum, Dezember 2013
[14] Hake, J.-F.; Hansen, P.; Heckler, R.; Linssen, J.; Markewitz, P.; Martinsen, D.; Weber, K.: *Projektionsrechnungen bis 2050 für das Energiesystem von Deutschland*. VDI Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), 13.10.2009
[15] Henning, H.-M.; Palzer, A.: *Energiesystem Deutschland 2050; Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO2-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien*. FhG ISE (Hrsg.), Freiburg, November 2013
[16] Moeini-Aghtaie, M.; Abbaspour, A.; Hajipour, E.: *A Decomposed Solution to Multiple-Energy Carriers Optimal Power Flow*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 2, 2014
[17] Kienzle, F.; Andersson, G.: *A Greenfield Approach to the Future Supply of Multiple Energy Carriers*. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009.
[18] Andersen, B.: *The Path towards HVDC Grids*, SC B4 Electra N 275, August 2014
[19] Echternacht, D.; Heuberger, D.; Breuer, C.; Linnemann, C.; Moser, A.: *Advantageous Positions for HVDC Terminals in Europe*, IEEE EnergyTech 2013, Cleveland, USA, 21.05.-23.05.2013
[20] Eickmann, J.; Fiebig, Y.; Linnemann, C.; Moser, A.: Mehrwert der kurzfristigen Steuerbarkeit von HGÜs im Netzbetrieb von Übertragungsnetzen, Internationaler ETG-Kongress 2013, Berlin, Deutschland, 05.11.-06.11.2013
[21] Marten A.-K. and Westermann D., Schedule for Converters of a Meshed HVDC Grid and a Contingency Schedule for Adaption to Unscheduled Power Flow Changes in Proc. of the IEEE PES General Meeting, Paper 535, Vancouver, Canada, July 2013
[22] J. Lundquist, Convener, L.O. Barthold; A. Beutel, A.C: Britten, et al.: *Guide for the conversion of existing AC lines to DC operation*, 583 WG B2.41 Cigre,N 275, August 2014
[23] Linnemann, C.: *Wirtschaftliche Bewertung von HGÜ-Netzausbaumaßnahmen beim Engpassmanagement im Europäischen Übertragungsnetz*, Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Band 146, print production Verlag, Aachen, 2013
[24] Asplund, G.; Jacobson B.; Berggren B.; Lindén, K.: *Continental Overlay HVDC-Grid*, B4-109 CIGRE, 2010
[25] J. Dragon, L. Werner, J. Hanson, *Effects of DC Voltage Droop Characteristics on Contingency Behaviour of AC/DC Systems*, 49th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Cluj-Napoca (Romania), September 2-5, 2014
[26] Beerten, J.; Gomis-Bellmunt O.; Guillaud X.; Rimez J.; van der Meer A.; Van Hertem D.; *Modeling and control of HVDC grids: a key challenge for the future power system, Power Systems Computation Conference*. Wroclaw, Poland, 18-24 August 2014 , pp. 1-21
[27] Bucher, M. K.; Wiget, R.; Andersson, G. et al.: *Multiterminal HVDC Networks – What is the Preferred Topology?*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 1, pp. 406-413, 2014.
[28] Bizumic, L.; Cherkaoui, R.; Villella, F. et al.: *Advanced Control of Hybrid HVAC/HVDC Interconnection Interface for the Interconnected ENTSOE-E-IPS/UPS Systems*, Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), Manchester (UK), 2011.
[29] Häfner, J; Jacobson, B.: *Proactive Hybrid HVDC Breakers - A key innovation for reliable HVDC grids*, CIGRE paper 264, Bologna September 2011
[30] Feng, W.; Tuan, L. A.; Bertling Tjernberg, L. et al.: *A New Approach for Benefit Evaluation of Multiterminal VSC-HVDC Using A Proposed Mixed AC/DC Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 1, pp. 432-443, 2014
[31] Agora Energiewende: *Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien*, www.agora-energiewende.de, Juni 2014
[32] Rehtanz, C.; e.a.: *dena-Studie - Systemdienstleistungen 2030: Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien*, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, Feb. 2014
[33] H. Zimmer, G. Papaioannou, J. Hanson, *Influence of the Mix of Conventional Power Plants and Different Shares of Renewable Power Supply on Frequency Dynamics*, 11th International Conference on Modelling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (ElectrIMACS), Valencia (Spain), May 19-22, 2014
[34] European Commission: *Horizon 2020 Work Programme 2014-2015 in the area of Secure, Clean and Efficient Energy*, 2013
[35] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: *Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung*, Juli 2011
[36] A. Jokic, Price-based optimal control of electrical power systems, Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, 2007
[37] A. Rantzer: Dynamic dual decomposition for distributed control, American Control Conference, St.Louis 2009, pp. 884–888

[38] S. Fiaz, D. Zonetti, R. Ortega, J. M. A. Scherpen, A. J. van der Schaft: A port-Hamiltonian approach to power network modeling and analysis, European J. Control 19 (2013) pp. 477–485

5 Inhaltliche Begründung unter Berücksichtigung der Programmziele

5.1 Originalität der wissenschaftlichen Fragestellungen unter thematischen und/oder methodischen Aspekten

Das wissenschaftliche Ziel dieses Schwerpunktprogramms besteht in der Erarbeitung systemtheoretisch begründeter Methoden für die Analyse, die Strukturierung und die Steuerung IKT-durchdrungener, hybrider und multimodaler Energiesysteme. Die systemtheoretischen Ansätze liefern in einem reduzierten Systemmodell Hinweise auf stabile Parameterbereiche, Stabilitäts- und Phasengrenzen. Weitergehende Untersuchungen in realistischer Ausprägung und Modelltiefe sollen als statistische Versuchsplanung und Simulation durchgeführt werden. Da die technische Ausgestaltung der in diesen Systemen vorkommenden Energiewandler (Erzeuger und Verbraucher bestimmter Energieformen), Übertragungstechnologien sowie Informations- und Automatisierungssysteme nicht abgeschlossen ist, sollen die Forschungsergebnisse in dem Sinne technologieinvariant und übertragbar sein, dass sie nicht auf spezifische Eigenschaften oder Parameter der genannten Komponenten zugeschnitten sind, sondern Methoden und Verfahren liefern, die für die zukünftig eingesetzten Komponenten allgemein anwendbar sind.

Das sich wandelnde Energiesystem als Untersuchungsgegenstand des Schwerpunktprogramms ist in Bild 1 veranschaulicht. Der linke Teil des Bildes stellt die Struktur des heute verwendeten, bereits mit erneuerbaren Energiequellen angereicherten elektrischen Netzes dar. Die Energieerzeuger speisen elektrische Energie auf mehreren Spannungsebenen der Höchst- (HöS), Hoch- (HS), Mittel- (MS) und Niederspannung (NS) ein, wobei der Energiefluss von den Erzeugern zu den Verbrauchern gerichtet und das Verteilungsnetz dementsprechend dimensioniert ist. Die heute noch gültigen Planungs- und Betriebskriterien sowie Stabilitätsbetrachtungen für die bestehenden Transportnetze wurden in den 1970er bis 1990er Jahren entworfen und seitdem nur graduell angepasst.

Für den Systemwechsel hin zu einer großen Anzahl der im rechten Teil des Bildes gezeigten Einspeisungen aus volatilen erneuerbaren Energiequellen, einer geringeren Anzahl von Großkraftwerken und der Kopplung mit anderen Energieträgernetzen müssen die Planung und der Betrieb einschließlich der Stabilitätsbewertung mit neuesten systemtheoretischen Methoden analysiert, simulativ statistisch untersucht und robuste Verfahren für einen zuverlässigen und effizienten Betrieb erschlossen werden. Dafür müssen system- und regelungstechnische Ansätze mit neuen Informations- und Kommunikationstechnologien sowie neuesten energietechnischen Verfahren zusammengeführt werden, um die zukünftigen Netzstrukturen und deren Steuerungsstrategien ableiten zu können. Das Ergebnis der Untersuchungen soll nicht in der Vorgabe einer als optimal erkannten Struktur oder eines für ein spezifisches Netz erarbeiteten Prozessführungsstrategie bestehen, sondern in Methoden, mit denen für unterschiedliche Netzkomponenten und Netz-/IKT-strukturen Aussagen über das Gesamtsystemverhalten und die Versorgungssicherheit in Extremsituationen getroffen werden können.

Die neu zu entwickelnden Modellbildungs-, Analyse- und Entwurfsmethoden müssen auf den heterogenen Charakter sowie die zu erwartende Komplexität und Größenordnung multimodaler Netze zugeschnitten sein, indem sie die typischen dynamischen Eigenschaften und Einsatzcharakteristika von Energieerzeugern und -verbrauchern unterschiedlicher technologischer Basis berücksichtigen und die Variantenvielfalt der Verkopplung dieser Komponenten zulassen. Insbesondere die IKT-basierte informationelle Kopplung verteilter Überwachungs- und Steuergeräte, die Teile des Energiesystems beobachten, prognostizieren und ihr Verhalten hierauf dynamisch, optimierend abstimmen führt zu einer Vielzahl ineinandergreifender geschlossener Regelkreise, die adäquat modelliert werden müssen.

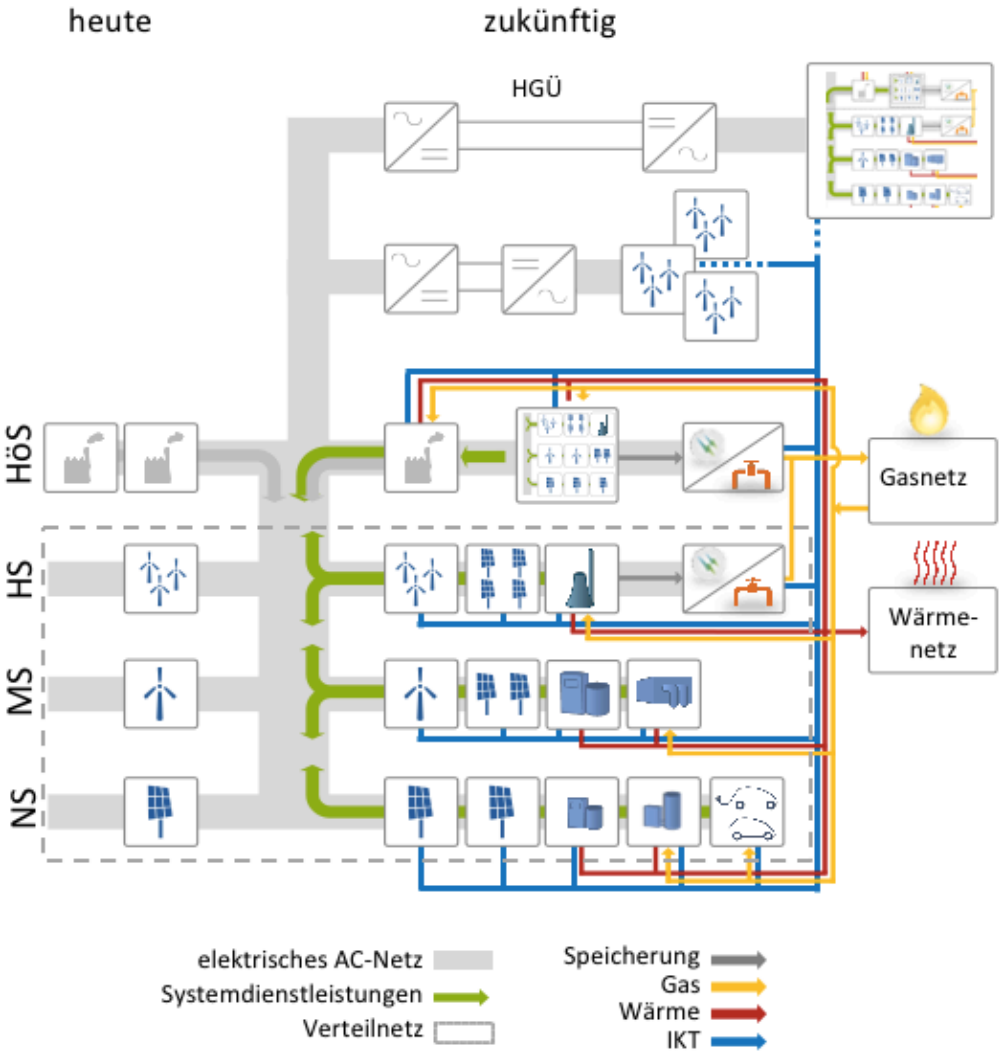

Bild 1: Hybrides und multimodales Netz als Forschungsgegenstand des Schwerpunktprogramms

Damit konzentriert sich das Schwerpunktprogramm auf die folgenden grundlegenden Probleme:

- Erarbeitung systemtheoretischer Methoden für netzebenen- und netzspartenübergreifende System- bzw. Ausbauplanung, -auslegung und -betrieb für hybride und multimodale Netze und deren Anwendung in der Energiesystemtechnik,
- Entwicklung neuer Verfahren zur Bewertung und Einschätzung der Systemstabilität (Dynamic Security Assessment) hybrider und multimodaler Netze in verschiedenen Zeitskalen und Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Vermeidung von Systemkollaps,
- Erarbeitung von planerischen und betrieblichen Maßnahmen zur Sicherstellung der Systemstabilität hybrider und multimodaler Netze mittels neuer systemtheoretischer Methoden,
- Regelungsansätze zur Erbringung von stabilisierenden Online-Maßnahmen aus vielfältigen Subsystemen großer Anzahl wie unterlagerten oder benachbarten Netzebenen, spezifischen Netzkomponenten wie Gleichstromübertragungsleitungen oder anderer leistungselektronischer Betriebsmittel,
- Erforschung von stabilisierenden neuen Funktionen sowie des systemkonformen Verhaltens leistungselektronischer Komponenten wie HGÜ und kleinerer Umrichter von Windenergie- und PV-Anlagen.

Den Kern des Schwerpunktprogramms bilden systemtheoretische Methoden für die Energiesystemtechnik, mit der die Transformation und der Betrieb komplexer Netze entworfen und analysiert werden kann. Flankiert wird dieser Kern von Kompetenzen und Forschungsrichtungen der nichtelektrischen Elektroenergiesystemtechnik wie dem Gas- und Wärmebereich, der Informatik und Informationstechnik sowie der Leistungselektronik, die Beiträge zur Gestaltung und Analyse hybrider und multimodaler Energiesysteme aus der Sicht der alternativen Energieträger leisten können.

Das Zusammenwirken und die Stabilitätsbetrachtung hybrider und multimodaler Netze mit einer praxisrelevanten Anzahl leistungselektronischer Komponenten im Netz und den angeschlossenen

Einspeisern bis hin zu hybriden Drehstrom-/Gleichstromnetzen wurden bislang in keinem bekannten größeren Projekt betrachtet. Ebenso fehlen die systemtheoretischen Modelle und Analyseverfahren der integrierten Netz- und Systemstrukturen für deren Auslegung und den Betrieb. Gerade hier sind durch grundlegende Forschungen zu neuen Methoden dringend benötigte neue Lösungswege zu erwarten.

5.2 Eingrenzung der wissenschaftlichen Fragestellungen unter Berücksichtigung der Laufzeit des Schwerpunktprogramms

Die Abgrenzung des Forschungsgegenstandes der ausgedehnten hybriden und multimodalen Netze in diesem Schwerpunktprogramm findet über die Betrachtung des elektrischen Transportnetzes im Kern und den Schnittstellen zu den anderen Netzebenen und Energieträgernetzen horizontal wie vertikal (Verteilnetze) statt. Einzeluntersuchungen in Gas- und Wärmenetzen oder elektrischen Verteilnetzen dienen zur detaillierten Ausgestaltung der Schnittstellen hin zum hybriden elektrischen Transportnetz. Die Forschung soll hierbei grundlegende systemtheoretische Methoden für die Transformation und den stabilen Betrieb der komplexen Netze erschließen. Somit stehen grundsätzliche systemtechnische und systemtheoretische Analysen der Strukturen, deren Beobachtbarkeit, Steuerbarkeit und robusten Regelbarkeit im Vordergrund. Die große Anzahl von unterschiedlichen Stellgliedern aller Art und auf allen Ebenen erfordern völlig neue Ansätze für die Auslegung und den Betrieb. Hierbei ist jeweils die Notwendigkeit zur Ausgestaltung der IKT bzw. die Anforderungen daran ein wesentlicher Betrachtungsaspekt. Der Betrachtungsfokus liegt somit auf der Resilienz des hochkomplexen ausgedehnten elektrischen Systems mit den jeweiligen Schnittstellen zu den anderen Energieträgernetzen.

Als Grundlage der Stabilitätsbetrachtungen sind Szenarien für die zukünftigen Versorgungsaufgaben zu definieren, für die bereits vielfältige Ergebnisse aus Studien des europäischen Energiesystems, z. B. [P4], vorliegen. Die Nachfrage nach Energie bzw. Leistung muss durch ein Angebot aus erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Der Betrachtungsrahmen umfasst große Energieversorgungsstrukturen und -netze und das Wechselspiel zwischen diesen. Zur Stabilitätsbetrachtung sind jedoch unterlagerte Netzebenen soweit möglich als Subsysteme zu betrachten, da aus diesen und von den dort befindlichen dezentralen Einspeisungen aus erneuerbaren Energien Systemdienstleistungen erbracht werden müssen, um die Stabilität des Gesamtsystems zu gewährleisten. Als Systemdienstleistungen bezeichnet man in diesem Zusammenhang alle betrieblichen Eingriffe durch Maßnahmen an der Erzeugung oder Maßnahmen im Netz, die für einen stabilen und sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems erforderlich sind.

Die folgenden Aspekte sollen explizit nicht betrachtet werden:

- Optimierungen der Gesamtszenarien, wie z.B. die Ermittlung des generellen Speicher- und Flexibilitätsbedarfs, stehen nicht im Kern der Betrachtungen, sondern dienen nur der Szenariengenerierung und werden weitestgehend vorausgesetzt.
- Entwicklungen und Ausgestaltungen zukünftiger Märkte sowie Marktbetrachtungen bleiben außen vor, soweit sie nicht als Teil zur Definition der Versorgungsaufgabe dienen.
- Im Bereich der Subsysteme sind komplexe Anlagen bezüglich ihrer Eigenschaften, wie z.B. Hochspannungsgleichstromübertragungen, ein relevanter Aspekt des Schwerpunktprogramms. Hierin befindliche Einzelkomponenten wie Halbleiter, Leistungsschalter als Bestandteile komplexer Subsysteme etc. sind jedoch nicht Teil der Betrachtungen.
- Ebenfalls nicht zu betrachten sind neue Gerätetypen oder -klassen für die Energienetze, Technologien von Energiewandlungseinrichtungen und neue Kommunikationstechnologien, wenn es um diese als solche und nicht um deren systemtechnische Integration in das Gesamtsystem geht.

Zur Erreichung der oben definierten wissenschaftlichen Ziele im abgegrenzten kohärenten Betrachtungsrahmen umfasst das Schwerpunktprogramm die folgenden Bereiche wissenschaftlicher Fragestellungen. Die Bereiche 5.2.1, 5.2.2 und 5.2.3 sind schwerpunktmäßig für die ersten drei Jahre vorgesehen. Die dort erarbeitete Basis kann in den weiteren drei Jahren weitergeführt werden und durch die Bereiche 5.2.4 und 5.2.5 ergänzt werden.

5.2.1 Systemtheoretische Modellbildung und Simulation informationstechnisch durchdrungener hybrider und multimodaler Energiesysteme

Die Einführung neuer Netzstrukturen, neuer Energieerzeuger und neuer Steuerungskonzepte erfordert die Überarbeitung und Erweiterung der bisher für die Systemanalyse und den Steuerungsentwurf verwendeten Modelle. Dabei müssen nicht nur die neu hinzukommenden Komponenten in die systemtheoretische Betrachtungsebene abgebildet werden, sondern die bisherigen Modelle sind – beginnend mit den traditionellen Modellannahmen – grundlegend zu hinterfragen und zu überarbeiten. Die Notwendigkeit dafür ergibt sich aus der Tatsache, dass eine andere örtliche Verteilung der Erzeuger und Verbraucher, die zum Zwecke einer koordinierten Einsatzplanung untereinander automatisiert Informationen austauschen, transiente Vorgänge hervorruft, die in den traditionell strukturieren Energiesystemen keine wesentliche Rolle gespielt haben und deshalb durch geeignete Modellannahmen ausgeblendet wurden. Deshalb stellen die bisher verwendeten Modelle im Wesentlichen die Schwingungsgleichungen der Synchronmaschinen dar und betrachten die Verbraucher als frequenzabhängige Last.

Das Systemverhalten ändert sich insbesondere durch die Zunahme schnell regelbarer leistungselektronischer Komponenten auf allen Ebenen im Netz und bei der Kopplung von Netzen. Es ist heute weitestgehend unbekannt, wie eine sehr große Anzahl leistungselektronischer Anlagen derartig abgebildet werden kann, so dass die Genauigkeit des Anlagenverhaltens für die zu untersuchenden Effekte im Gesamtsystem im Normalbetrieb und bei Störungen immer noch ausreichend ist. Bei der Kopplung von Drehstrom- und Gleichstromnetzen, den Anlagen zur multimodalen Kopplung und bei großen Anzahlen von EE-Anlagen müssen die Umrichter als Schnittstellen effizient, aber im Sinne der Anwendung detailliert genug modelliert sein, um die jeweiligen Rückwirkungen abschätzen zu können und die oben genannten systemtheoretischen Untersuchungen für den Betrieb durchführen zu können. Der vermehrte Einsatz verteilter und vernetzter, prognosebasierter Regel- und Steuerungsmechanismen (modellprädiktive Regelung multivariabler Prozesse) führt zu bislang unberücksichtigten, jedoch in praxisrelevantem Einsatz und Größenordnung nicht vernachlässigbaren, Regelschleifen und Wechselwirkungen, die adäquat in einer Energiesystemmodellierung berücksichtigt werden müssen.

Ansätze für die Modellbildung zukünftiger Energiesysteme gibt es in der Literatur [38], aber die Modellierung steht hier erst am Anfang und beschränkt sich bis auf wenige Ausnahmen auf die getrennte Beschreibung des elektrischen Energiesystems oder des Gasverbundsystems. Da es sich bei Energiesystemen um großskalige Probleme handelt, muss sich an die Modellierung der Komponenten und der Kopplungsstrukturen eine Modellvereinfachung anschließen, die insbesondere für jede der bereits genannten Zeitskala der Steuerung einfachere Modelle liefert.

In diesem Arbeitsbereich soll deshalb die systemtheoretische Modellierung des Energiesystems als Ganzes vorangetrieben werden, mit dem Ziel, Modelle ausgewählter Beispielssysteme für die Systemanalyse und die Erprobung der in den anderen Arbeitsbereichen entwickelten Methoden zur Verfügung zu haben.

5.2.2 Systemtheoretische Methoden für die Strukturierung großer Energiesysteme

Die in den Vorarbeiten genannten Untersuchungen auf der Grundlage der Theorie komplexer Netzwerke (*Network Science*) zeigen, dass man unabhängig von der technologischen Realisierung von Energieerzeugern und Verbrauchern allgemeingültige Aussagen und Entwurfskriterien für Netze mit sehr vielen (tausenden) von Knoten und Verbindungen ableiten kann [P11]. Diese Aussagen zeigen Grenzen für die Strukturierung von komplexen vernetzten Systemen auf, aber sie sind zu unspezifisch für die in diesem Schwerpunktprogramm betrachteten Energiesysteme. Deshalb besteht die Aufgabe dieses Arbeitsbereichs darin, allgemeingültige Aussagen über Energiesysteme unter der Berücksichtigung der grundlegenden Eigenschaften von hybriden und multimodalen Netzen zu erarbeiten. Die hier zu berücksichtigenden grundlegenden Eigenschaften beziehen sich auf die qualitative Dynamik der in diesen Netzen auftretenden Erzeuger und Verbraucher, die Strukturierung der Netze entsprechend der Energieträger (Strom, Gas, Wärme usw.), sowie die typischen Kopplungsbedingungen. Anzustreben sind Aussagen, die nicht durch Simulationsuntersuchungen mit Beispielsnetzen, sondern zunächst durch eine systemtheoretische Analyse von Netzen mit sehr vielen Knoten, gegebenenfalls unter vereinfachten Annahmen bezüglich der Knotendynamiken, erhalten werden und somit für eine Klasse von Netzen zutreffend sind. Diese können in einem zweiten Schritt statistisch simulativ hoch skaliert und unter stochastischen Bedingun-

gen in den aus der systemtheoretischen Voranalyse identifizierten interessanten Parameterbereichen untersucht werden.

Eine typische Eigenschaft von Energiesystemen, die in den traditionellen Netzen wesentlich zur Strukturierung und zur Vereinfachung der Steuerung beigetragen hat und die in die neuen Energiesysteme übernommen werden muss, besteht in der *teilweisen Autonomie* von Teilnetzen. Darunter versteht man den Ausgleich der erzeugten und der verbrauchten Leistung innerhalb kleinerer Einheiten, deren Verkopplung mit anderen Teilnetzen nur zum Ausgleich von Erzeugungs- und Verbrauchsschwankungen dient. Diese Autonomie wird in den zukünftigen Netzen, in denen die Energieerzeugung teilweise örtlich mit den Verbrauchern kombiniert ist, in wesentlichen kleineren Teilnetzen auftreten (*Microgrid*). Damit ergibt sich die Frage, welche Rolle zukünftig die großräumigen Netzverbünde für die Versorgungszuverlässigkeit haben.

Mit diesem Arbeitsbereich sollen Grenzen, Richtlinien, Empfehlungen für die Strukturierung zukünftiger Netze erarbeitet werden, die in die nachfolgend beschriebenen Arbeitsbereichen eingehen sollen, denen Aussagen typischerweise konkreter auf Beispielssysteme zugeschnitten sind.

5.2.3 Systemführungsmethoden für hybride und multimodale Energiesysteme

Der Betrieb von elektrischen Energieversorgungssystemen als hochkomplexe Systeme ist bei einer Umstellung auf Einspeisungen überwiegend aus erneuerbaren Energiequellen durch eine steigende Volatilität der elektrischen Systemgrößen gekennzeichnet. Die Aufrechterhaltung eines sicheren und stabilen Betriebs wird dadurch schwieriger und erfordert heute zum Teil noch völlig unbekannte Methoden der Systemführung und -planung. Auch die Hinzunahme anderer Energieträgersysteme wie Gas- und Wärmenetze ist aus Effizienzgründen geboten, da mit Einspeisungen aus erneuerbaren Energiequellen kein lastfolgender Netzbetrieb mehr möglich ist. Dadurch muss die Prozessführung durch verteilte Eingriffe realisiert werden, die aus den lokal verfügbaren Messinformationen berechnet werden.

Steuerungsaufgabe als Optimierungsproblem

Eine in der neuesten Literatur betrachtete Methode zum Entwurf derartiger verteilter Steuerungen basiert auf dem Formulierung der Steuerungsaufgabe als Optimierungsproblem, der Lösung dieses Problems in einem Zwei-Ebenen-Algorithmus und der Interpretation der dabei verwendeten Koordinationsvariablen als „Preise“ für die Kompensation der Verkopplungen [36], [37]. Das wichtigste methodische Problem entsteht bei diesem Vorgehen aus der Tatsache, dass das entstehende Optimierungsproblem strukturelle Beschränkungen bezüglich der Steuerungsstruktur zu berücksichtigen hat und folglich nicht konvex ist. Dennoch erscheint dieser Ansatz als erfolgversprechend und soll als ein Weg für die Erarbeitung von Prozessführungsmethoden für die hier untersuchten Energiesysteme weiterverfolgt werden.

Das Steuerungsproblem wird methodisch noch schwieriger, wenn die Einsatzplanung von Energieerzeugern und die Möglichkeit berücksichtigt wird, den Verbrauch (z. B. von Kühl- und Heizgeräten) zeitlich zu verschieben, weil dann auch binäre Größen als Optimierungsvariablen auftreten und das Gesamtproblem als gemischt-ganzzahliges Programmierungsproblem zu lösen ist. Die Komplexität derartiger Probleme kann nur unter Ausnutzung struktureller Eigenschaften des betrachteten Problems, also unter Berücksichtigung der Netzstruktur und spezifischer Eigenschaften von deren Komponenten, vereinfacht werden.

Zentrale und dezentrale Ansätze zur Systemführung

Die Prozessführung zukünftiger hybrider und multimodaler Netze mittels kommunikationsbasierter leittechnischer Systeme muss die Komplexität des Systems berücksichtigen und eine dementsprechende Robustheit aufweisen. Die unterschiedlichen Netzarten mit ihren jeweiligen Steuerungs- und Regelungsmechanismen und Leitstellen müssen geeignet koordiniert werden. Für die Ansätze der Steuerung, Regelung, Führung und zum Schutz der komplexen Netzstrukturen muss jeweils der IKT-Bedarf und dessen Leistungsfähigkeit und Struktur ermittelt werden. Darüber hinaus muss erforscht werden, welche Funktionsaufteilung der Prozess- bzw. Netzbetriebsführung zentral und welche dezentral verteilt angeordnet werden sollten, da im Vergleich zu heutigen Systemen auf Grund der kleineren Zeitkonstanten höhere zeitliche Anforderungen zu erfüllen sind. Zwischen den Netzebenen und Netzarten müssen geeignete leittechnische Koordinationsmechanismen entworfen werden, um die Systemkomplexität zu beherrschen.

Auch die Schutzsysteme bieten eine grundlegende Funktion zur Absicherung gegenüber Störungen und sind somit essentiell wichtig für die Sicherheit des Gesamtsystems. Die Eigenschaften von Schutzsystemen bei hybriden Netzen müssen nahtlos ineinandergreifen. Aufgrund der großen räumlichen Strukturen der hybriden und multimodalen Netze müssen auch Systemschutzmechanismen untersucht werden, die großräumige Störungen durch Ausfälle in Netzbereichen frühzeitig erkennen und geeignet absichern.

Die komplexen Netzstrukturen stellen erhöhte Anforderungen an Netzwiederaufbaukonzepte. Die oben beschriebenen Forschungsaufgaben dienen alle dem Ziel, das komplexer werdende System zu stabilisieren und Systemzusammenbrüche zu vermeiden. Dennoch bleibt bei jedem technischen System das Restrisiko eines Systemzusammenbruchs, so dass sich vielfältige Fragen zur Vorgehensweise im Falle des Wiederaufbaus von zusammengebrochenen hybriden und multimodalen Netzen ergeben. Die Bildung stabiler Netzinseln nach Ausfällen ist eine Betrachtungsansatz, der grundlegend neue Mechanismen erfordert. Zukünftige Netzaufbaukonzepte können sich nicht mehr an großen Kraftwerksblöcken orientieren; vielmehr muss den benachbarten Netzebenen und den Schnittstellen zu den anderen Energiesystemen eine zunehmende Bedeutung zukommen. Auch die Rolle von überlagerten Gleichstromnetzen sowie der Vielzahl von kleinen Erzeugungsanlagen in den Verteilnetzen bei Fragen des Netzwiederaufbaus ist heute noch nicht erforscht.

5.2.4 Bewertung und Sicherstellung der Systemstabilität hybrider bzw. multimodaler Netze

Die klassischen Stabilitätsarten elektrischer Netze wie Frequenzstabilität, Winkelstabilität und Spannungsstabilität ändern sich durch die Integration leistungselektronisch gekoppelter erneuerbarer Energien sowie HGÜ-Systeme oder -Overlaynetze grundlegend. Durch hochverfügbare Informations- und Kommunikationssysteme können weiträumige Informationen zur Stabilitätsbewertung ermittelt werden.

Analyse des Systemverhaltens und der Systemstabilität

In diesem Bereich sind für die einzelnen Stabilitätsarten neue Verfahren zur Stabilitätsermittlung und -bewertung unter Berücksichtigung des strukturell veränderten Gesamtsystems zu erforschen. Beispielsweise sind Fragestellungen zur Frequenz- und Winkelstabilität bei stark reduziertem Anteil rotierender Massen von hoher Relevanz und bislang ungeklärt. Genauso sind die Leistungsfluss- und Frequenz-Leistungsregelungen durch HGÜ-Systeme stark beeinflussbar und müssen mit dem Gesamtsystem für einen stabilen Betrieb koordiniert werden. Ebenso müssen Verfahren zur Sicherung der Spannungsstabilität bei großräumiger Leistungsfluss- und Blindleistungsregelung von Umrichtern in hybriden Netzen überdacht und neu entwickelt werden. Heutige Indikatoren zur Ermittlung der Spannungsstabilität sind auf ihre Verwendbarkeit hin zu überprüfen und geeignet weiterzuentwickeln. Die hier anzustellenden Betrachtungen basieren auf den oben genannten systemtheoretischen Untersuchungen und Modellierungen, die die Struktur des Gesamtsystems abbilden und theoretisch analysierbar machen.

Erste Erfahrungen zeigen, dass in der Zukunft die Harmonische Instabilität die durch Wechselwirkung von schnellen leistungselektronischen Kompetenten untereinander und mit dem Netz entstehen kann, eine große Rolle spielen wird. Im Forschungsvorhaben sollen Methoden zur Analyse, Koordinierung von Akteuren und Sicherung der Harmonischen Stabilität erforscht und entwickelt werden.

Bei der Kopplung des elektrischen Netzes mit einem Gas- und/oder Wärmenetz sind die Stabilitätsklassen an sich neu zu bewerten bzw. zu erarbeiten. Über alle miteinander verbundenen Versorgungsnetze hinweg müssen neue Stabilitätskriterien bzw. -indikatoren erforscht werden. Diese Kriterien und Indikatoren stellen dann die Grundlage für Design und Analyse für einen stabilen Betrieb dar.

Maßnahmen zur Sicherstellung der Systemstabilität

Weiter zu betrachtenden Einzelaspekte sind die Regelleistung und Spannungsregelung. Regelleistung wird heute mittels eines wahrscheinlichkeitsbasierten Verfahrens dimensioniert, welches Prognosefehler sowie Kraftwerksausfälle berücksichtigt. In hybriden Netzstrukturen und bei der zukünftigen stark veränderten Einspeisestruktur ist dieses Verfahren grundlegend zu analysieren und neu zu entwerfen. Die Regelleistungsarten sind heute basierend auf den Fähigkeiten von Dampfkraftwerken definiert. Zukünftige Regelleistungskonzepte- und verfahren müssen die Erbrin-

gungspotentiale durch erneuerbare Energien sowie Schnittstellen zu anderen Energieträgernetzen konsistent berücksichtigen.

Auch für die Spannungsregelung sind die zukünftigen Erbringungspotentiale auf den einzelnen Netzebenen bei einem hybriden Netzbetrieb derart zu koordinieren, dass ein stabiles Gesamtsystem im Sinne der Spannungsstabilität oder auch neuer Stabilitätskriterien gewährleistet werden kann. Die Potentiale einer großen Anzahl leistungselektronischer Umrichter, die Blindleistung erbringen und die Spannung regeln, sind durch koordinierte Regelungsverfahren zu erschließen. Dieses muss sowohl durch Umrichter in den hybriden Transportnetzen als auch durch Koordination mit unterlagerten oder benachbarten Netzebenen erfolgen. Hierbei ist insbesondere das stabile Verhalten einer großen Anzahl von sehr schnellen Reglern zu gewährleisten. Des Weiteren sind die Wirkungen und Regelungen der Stufensteller der Transformatoren sowie von Kompensationsanlangen zu überdenken und deren möglicherweise veränderte Einfluss auf die Systemregelung zu berücksichtigen.

Neben den genannten Stabilitätsfragen sind im Hinblick auf den steigenden Anteil der Umrichter auch Fragen zur Anregung von Netzresonanzen durch Oberschwingungen und die Wechselwirkungen mit den Umrichtern zu untersuchen. Die damit entstehenden Überspannungen können ebenfalls einen stabilen Betrieb stören bzw. verhindern.

Erbringung von Systemdienstleistungen zwischen unterschiedlichen Energieträgersystemen und Netzebenen

Neue Subsysteme sowie das Zusammenspiel von Netzebenen können auf vielfältige Weise dazu genutzt werden, um Systemdienstleistungen über den heutigen Stand der Forschung hinaus zu erbringen. Unterlagerte Netzebenen, die als Subsysteme betrachtet werden, können durch geeignete Koordination mittels IKT Systemdienstleistungen zur Frequenz- und Spannungsregelung im elektrischen Netz leisten. Die Nutzbarmachung dieser Freiheitsgrade erfordert robuste Regelungs- und Erbringungsmechanismen die grundlegender Forschung bedürfen. Ein Systemkonzept zum Zusammenspiel von elektrischen Netzebenen, wie der Erbringung von Regelleistung oder Blindleistung aus unterlagerten Netzebenen, ist zu erforschen. Die Robustheit und Ausgestaltung der IKT-Systeme ist in diesem Zusammenhang ebenfalls zu untersuchen. Die Betrachtungen sollen dabei auch leistungselektronische Komponenten als Regler im Netz, z.B. Kompensationseinrichtungen oder Spannungsregler umfassen.

Ein ähnliches Zusammenspiel ist für das Wechselspiel zwischen den verschiedenen Energieträgersystemen erforderlich. Welche Reserveerbringung für die Leistungspufferung in welchen Zeitbereichen und auf welche Weise zwischen den Netzarten erbracht werden kann, ist eine grundlegend neue und notwendige Betrachtung. Je nach Ausgestaltung der Schnittstellen zwischen den Netzen können unterschiedliche Reaktionszeiten und somit Möglichkeiten zur Stabilisierung erreicht werden. Ebenso sind bei einer zukünftigen Beteiligung von EE-Anlagen an der Erbringung von Systemdienstleistungen Unsicherheiten aufgrund des stochastischen Einspeiseverhalten von EE-Anlagen zum einen in der Prognose als auch in der Regelleistungsbereitstellung geeignet zu berücksichtigen und gegebenenfalls Kompensationsmaßnahmen zu entwickeln.

Regelung hybrider und multimodaler Netze

Die Regelung der hybriden Drehstrom-/Gleichspannungsnetze umfasst unterschiedliche Aspekte (z.B. Leistungsbilanz, Lastfluss, Spannungsband, Stabilität). Für die Ausregelung der Leistungsbilanz in einem hybriden Netz müssen neue Verfahren erarbeitet werden, da Gleichstromnetze in sich immer eine ausgeglichene Leistungsbilanz aufweisen müssen, so dass sich räumliche Leistungsverschiebungen (Entnahme und Einspeisung von Leistung an weit entfernten Stellen) im Drehstromnetz ergeben. Hierzu sind sinnvolle Betriebsverfahren zu erarbeiten, z.B. ob die Regelung der Leistungsbilanz nur auf lokalen Informationen basieren kann oder ob ein überlagertes, schnelles Informationsnetz zur Verfügung stehen muss, um die gegenseitige Beeinflussung zu ermitteln und die Stabilität sicherzustellen. Die Regelung der Leistungsbilanz ist mit der stromrichternahen Regelung zu koordinieren. Darüber hinaus ist eine ausreichende Spannungsstützung und Regelreserve zu gewährleisten.

HGÜ-Punkt-zu-Punkt-Verbindungen bis hin zu vermaschten HGÜ-Netzen besitzen ein grundsätzlich anderes Verhalten bezüglich der Stabilitätsarten elektrischer Netze. Insbesondere in vermaschten HGÜ-Netzen ist eine koordinierte Leistungssteuerung zu entwerfen, die die Randbedingungen des unterlagerten Drehstromnetzes berücksichtigt. Diese muss auch im Fehlerfall im

Drehstrom- oder Gleichstromnetz zuverlässig funktionieren. Es sind Techniken zu erforschen, die im hybriden Netz und an den Verknüpfungspunkten zum Drehstromsystem, z.B. durch die Regelbarkeit der Leistungsaufnahme und -abgabe des Gleichstromnetzes, die Stabilität des parallel betriebenen Drehstromverbunds verbessern.

In dieser Art hybrider Netze spielt die Leistungsflusssteuerung eine wesentliche, betriebliche Rolle. Neben den diesbezüglichen Eigenschaften der HGÜ-Leitungen oder -Netze sind auch leistungsflussregelnde Betriebsmittel im Drehstromnetz zu betrachten. Die Leistungsflüsse stehen zudem in engem Wechselspiel mit dem Spannungsniveau in den Netzen, welches bezüglich der Stabilität ebenfalls berücksichtigt werden muss. In Summe sind gemeinsam die unterschiedlichen Stabilitätsarten und deren Wechselspiel für die Auslegung und den stabilen Betrieb hybrider Drehstrom-/Gleichstromnetze zu betrachten und die Koordination der stabilisierenden Eingriffsmöglichkeiten zu erforschen.

5.2.5 Systemtheoretische Analyse und Planung der Netz- und Systemstruktur

Strukturbasierte Systemplanung

In Abhängigkeit von der Versorgungsaufgabe und damit den Transportentfernungen bzw. der zu übertragenden Leistungen ist es notwendig, unterschiedliche Spannungsebenen für die Drehstrom- und Hochspannungsgleichstromnetze (HDÜ und HGÜ) sowie unterschiedliche Verknüpfungspunkte mit anderen Netzarten einzuführen. Diesbezüglich sind für die systemplanerische Perspektive grundlegende Methoden zu entwerfen, die Kriterien für die Wahl geeigneter Spannungsebenen, Strukturmerkmale (z.B. Topologie von Teilsystemen oder Vermaschungsgrad) und Verknüpfungspunkte zwischen den hybriden und/oder multimodalen Energieträgersystemen liefern. Dies umfasst auch den Einsatz unterschiedlicher Technologien für die Verknüpfung der Netzarten.

Die zukünftigen Strukturmerkmale stehen dabei gegebenenfalls in enger Wechselwirkung mit der zukünftigen Leistungs-Frequenzregelung in Drehstromsystemen. So kann das heute noch zwingende Erfordernis, ein europaweites frequenzsynchrones Drehstromtransportnetz zu betreiben, im Falle hybrider und multimodaler Netze zugunsten mehrerer untereinander asynchron betriebener, frequenzsynchroner Drehstromtransportnetzgruppen entfallen, wenn die weiträumigen Energietransporte zukünftig ausschließlich durch ein Gleichstrom-Overlaynetz oder gar über andere Energiesysteme, z.B. das Gastransportsystem, übernommen werden können.

Unsicherheits- und risikobasierte Systembetrachtung und -planung

Ein weiterer Betrachtungsaspekt sind Methoden zur Zuverlässigkeitsbewertung und Sicherheitsberechnung von hybriden und multimodalen Netzen. Hierbei stehen zum Beispiel die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Redundanz der entwickelten Schnittstellen zu den Gas- und Wärmenetzen im Fokus, da Einschränkungen an diesen Schnittstellen unmittelbare Auswirkungen auf das Gesamtsystemverhalten haben und somit durch geeignete Gegenmaßnahmen ausgeglichen werden müssen. Die Bearbeitung der vorgenannten Fragestellung stellt forscherisches Neuland dar, da solche Schnittstellen bisher nicht existieren. Diese Methoden sind die Grundlagen einer Optimierung der hybriden und multimodalen Netzstrukturen und deren Elemente. Des Weiteren ist dabei auch die Verfügbarkeit von IKT-Systemen zu berücksichtigen, da sie für die Systemfunktionalität und den Betrieb der zukünftigen hybriden und multimodalen Netze von Relevanz sind. In informationstechnisch durchdrungenen Energiesystemen ergeben sich komplexe Wechselwirkungen, durch die Abhängigkeit der Netzführung von hochverfügbaren Informationssystemen, die ihrerseits auf eine unterbrechungsfreie Stromversorgung angewiesen sind.

Mittels der modellierten Risiken und Unsicherheiten müssen dementsprechende probabilistische Planungsverfahren erforscht werden. Korrelationen von Ereignissen und Zuständen dienen der Bewertung notwendiger Sicherheitsniveaus und zur Dimensionierung von stabilisierenden Maßnahmen. Zum Beispiel basiert die heutige Dimensionierung von Regelleistung auf der Verfügbarkeit von Großkraftwerken. Zukünftig müssen die Schnittstellen zu den anderen Netzen sowie die Erbringung aus dezentralen Anlagen mit ihrem teilweise stochastischen Einspeiseverhalten als dominanter Faktor berücksichtigt werden.

Die grundlegenden Methoden müssen für die Planung multimodaler sich gegenseitig beeinflussender Netze sowie für deren Betrieb konkretisiert werden. Zwischen Planung und Betrieb unterscheiden der zeitliche Betrachtungsrahmen und der Abruf von vorab dimensionierten Maßnahmen

5.3 Kohärenz der geplanten Forschungsaktivitäten

Die Fragestellungen des Schwerpunktprogramms gliedern sich kohärent um den Untersuchungsgegenstand der informationstechnisch durchdrungenen hybriden und multimodalen Netze (siehe Bild 2). Das elektrische Drehstrom-/Gleichstromnetz zusammen mit wird ergänzt durch die Schnittstellen zu den weiteren Energieträgernetzen. Die systemtheoretischen Methoden bieten zunächst neue Analysemöglichkeiten für die Transformation des Gesamtsystem. Hierauf basierend werden die neuen Ansätze zum Entwurf sicherer Betriebsmethoden und Verfahren entworfen.

Nur durch die gemeinsame und kohärente Arbeit in den Bereichen Energiesystemtechnik, Systemtheorie und IKT können tragfähige und grundsätzlich neue Lösungen gefunden werden.

Aus den genannten Vorarbeiten (siehe auch Abschnitt 4) können gemeinsame Szenarien für die zukünftige Versorgung abgeleitet werden und als gemeinsame Referenz in den zukünftigen Teilprojekten verwendet werden. Darauf aufbauend sollen aus den Ergebnissen dieser zukünftigen Teilprojekte gemeinsame Systemmodelle für die Netz- und Versorgungsstrukturen definiert werden, die von den anderen Teilprojekten als gemeinsame Modellbasis herangezogen werden können.

Insgesamt greifen die Aspekte Analyse und Betrieb sowie Eigenschaften von Subsystemen ineinander, da nur durch eine kohärente Betrachtung die geforderte Resilienz des Gesamtsystems erreicht werden kann.

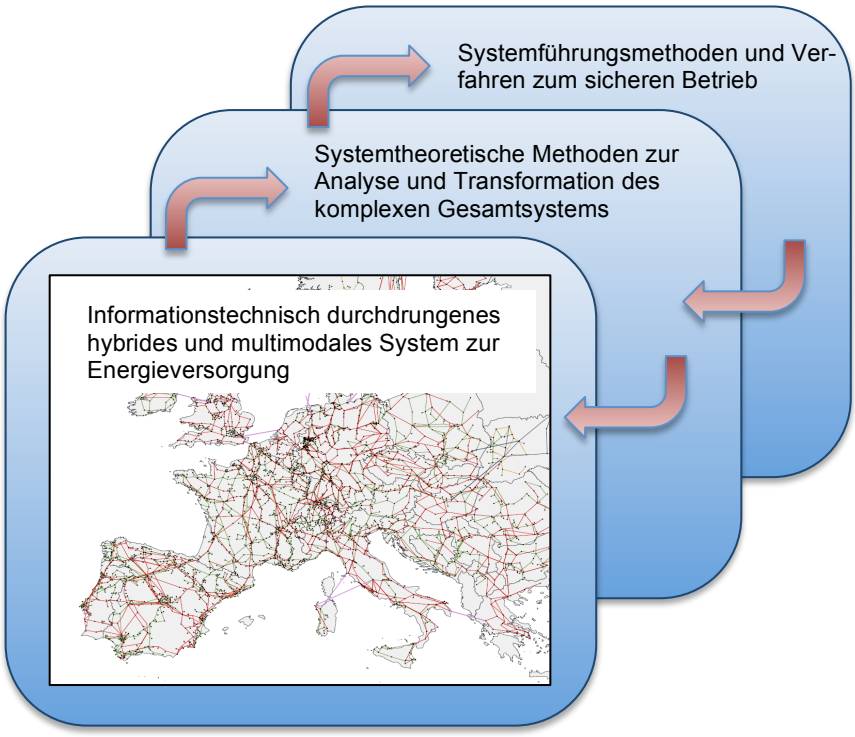

Bild 2: Kohärenz der Forschungsaktivitäten für hybride und multimodale Systemstrukturen

5.4 Konzepte zur Gestaltung der interdisziplinären und ortsübergreifenden Zusammenarbeit/Netzwerkbildung

Die Durchführung des vorgeschlagenen Arbeitsprogramms erfordert die Kompetenz verschiedener Fachdisziplinen innerhalb und außerhalb der elektrischen Energietechnik. Das Schwerpunktprogramm wendet sich deshalb sowohl an Energietechniker als auch an Systemtheoretiker, Regelungstechniker und Kommunikationstechniker, die sich mit Methoden für die Gestaltung und Steuerung vernetzter Systeme beschäftigen und im Rahmen dieses Programms den fachlichen Kern der hybriden und multimodalen Netze fundiert behandeln können. Das Schwerpunktprogramm baut dabei auf einer jahrzehntelangen Kooperation dieser Fachgebiete auf, die u. a. zu gemeinsamen Aktivitäten auf internationalen Tagungen im *Technical Committee 6.3 „Power and Energy Systems“* der IFAC (*International Federation of Automatic Control*) geführt hat.

Zur Koordinierung der Forschungsprojekte innerhalb des Schwerpunktprogramms sind die im Folgenden beschriebenen strukturellen und organisatorischen Elemente geplant.

5.4.1 Initial-/ Verknüpfungs-/ Schnittstellen-Workshops

Nach dem Start der einzelnen Projekte des SPP und der ersten Einarbeitungsphase von eingebundenen Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern ist geplant, sogenannte Initialworkshops zu bestimmten Themenschwerpunkten wie z. B. der Planung hybrider und multimodaler Netze, des Betriebs hybrider Netze, Anforderungen an Subsysteme, etc. durchzuführen. Hierbei sollen die einzelnen Forschungspläne aufeinander abgestimmt werden, so dass Dopplungen vermieden und Synergien frühzeitig erkannt werden können.

Im weiteren Verlauf des SPP werden Verknüpfungs- und Schnittstellen-Workshops ebenfalls wieder zu ausgewählten Themen organisiert, die dazu führen, dass die Ergebnisse ineinandergreifen und idealer Weise auch gemeinsam veröffentlicht werden. Je nach Anzahl und Inhalt der geförderten Projekte wird die fachübergreifende Steuerungsgruppe die Workshops ausgestalten und an ausgewählten Standorten organisieren. Es ist geplant, dass jedes Projekt im gesamten Verlauf an ca. 2-3 dieser Workshops, die zwischen den Jahrestreffen stattfinden, teilnimmt.

5.4.2 (Adhoc-)Forschungskleingruppen

Eine wichtige Form der Zusammenarbeit auf der Arbeitsebene ist die Bildung von Forschungskleingruppen in der Größe von bis zu ca. fünf Forschern, die sich aus mehreren Instituten zusammensetzen. Als Adhoc-Gruppen können sich diese kurzfristig für einen bestimmten Zeitraum bilden, um eine bestimmte Aufgabe zu erarbeiten. Die Anforderungen und Lösungsansätze sollen aus Sicht der unterschiedlichen Fachdisziplinen zusammengetragen bzw. bewertet werden. Diese Forschungskleingruppen ergeben sich je nach Bedarf aus den Initial-/ Verknüpfungs- und Schnittstellen-Workshops. Sie bieten sich immer dann an, wenn entweder die zu untersuchenden Themen eng ineinandergreifen, oder z.B. ein gemeinsamer Untersuchungsgegenstand definiert werden muss oder Ergebnisse vergleichend evaluiert werden sollen.

Offene und häufige Kleingruppentreffen mit möglicher Teilnahme von Vertretern anderer interessierter Fachdisziplinen sind ein ausgezeichneter Weg, um Ergebnisse zu erarbeiten, zu bewerten und zu diskutieren. Durch dieses Vorgehen wird es möglich, für das Gesamtsystem ineinandergreifende Lösungen zu finden.

5.4.3 Jahrestreffen

Bei den jährlichen Treffen aller beteiligten Forschergruppen werden die erhaltenen Ergebnisse und das weitere Vorgehen einer ausgewählten wissenschaftlichen Gemeinschaft und ausgewählten Industrievertretern zur Diskussion gestellt. Ziel ist es, die Ausrichtungen der einzelnen Forschungsprojekte besser aufeinander abzustimmen und Synergien bei der weiteren Bearbeitung der Forschungsprojekte zu nutzen.

5.4.4 Internetauftritt

Während des gesamten Projektes und darüber hinaus werden die Ergebnisse mit Hilfe einer Internetseite allen Interessenten zur Verfügung gestellt.

Zur Zusammenarbeit wird ein Share-Point zur Verfügung gestellt, in dem gemeinsame Informationen wie z.B. Standardpräsentationen, Szenariendaten und Daten für Testnetze als gemeinsamer Untersuchungsgegenstand sowie Zwischenergebnisse ausgetauscht werden können. Diese Plattform dient ebenfalls als Arbeitsbereich für die Kooperationsinstrumente wie die beschriebenen Workshops und Forschungskleingruppen.

5.4.5 Test- und Integrationsumgebung für hybride und multimodale Netze

Zur engen inhaltlichen Zusammenarbeit wird eine gemeinsame Test- und Integrationsumgebung für hybride und multimodale Netze aufgesetzt. Die Leistungsfähigkeit und Robustheit von stabilisierenden Verfahren für hybride und multimodale Netze sowie Methoden und Algorithmen für deren Planung und Betrieb soll an abgestimmten, simulationsbasierten Testnetzen bewertet und verglichen werden. Diese Testnetze sollen genutzt werden, um die erforschten Verfahren zu verifizieren und die Ergebnisse zu vergleichen sowie Schnittstellen abzustimmen Die Testnetze werden

nach Abstimmung zwischen den beteiligten Wissenschaftlern im Rahmen eines Teilprojekts implementiert und als Test- und Bewertungsplattform allen Teilnehmern des Schwerpunktprogramms zur Verfügung gestellt.

5.5 Maßnahmen zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, Förderung von Wissenschaftlerinnen, Angebote zur Familienfreundlichkeit

Das Schwerpunktprogramm soll die Heranbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf diesem wichtigen Gebiet unterstützen. Die Nutzung der hier entwickelten Ideen wird durch den im Ingenieurbereich typischen Wechsel der Doktoranden nach dem Abschluss der Forschungsprojekte in die Industrie maßgeblich gefördert.

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms sind zwei Doktorandenschulen geplant, bei denen in didaktisch aufbereiteter Form von den Projektleitern und von internationalen Gästen wichtige Methoden aus dem Bereich der elektrischen Energietechnik präsentiert werden. Diese Schulen dienen der Verbreiterung der Kenntnisse aller Teilnehmer, die sich bei ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit naturgemäß nur mit ausgewählten Aspekten hybrider und multimodaler Energiesysteme beschäftigen und hier eine breite Sicht auf das Thema des Schwerpunktprogramms als Ganzes erhalten sollen.

Durch die Einführung der Masterabschlüsse an den Universitäten wurde die Breite der Ausbildung in den Ingenieurwissenschaften erheblich reduziert. Daher sollen im Rahmen der Doktoranden-Sommerschule unter anderem die Zusammenarbeit und die Kenntnisse über die verwendeten Methoden und Verfahren der beteiligten Disziplinen aber auch darüber hinaus vertieft werden. Dies betrifft insbesondere die Energiesystemtechnik, Leistungselektronik, Automatisierungs- und Regelungstechnik, IKT sowie Methoden der Systemtheorie, Mathematik, Statistik und Informatik.

Die Chancengleichheit von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ist ein verankertes Ziel der Entwicklung aller beteiligten Universitäten. Zur Ausschöpfung des Kreativitätspotentials wird auf ein möglichst ausgewogenes Verhältnis zwischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern geachtet und aktiv hingearbeitet. Da die Absolventinnenanzahl in den Ingenieurwissenschaften vergleichsweise gering ist (derzeit bei 8%), werden Frauen bei gleicher Qualifikation als Nachwuchswissenschaftlerinnen bzw. studentische Hilfskräfte bevorzugt berücksichtigt.

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms soll sichergestellt sein, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Familie und Beruf miteinander in Einklang bringen können. Teilzeitbeschäftigungen, flexible Arbeitszeiten und Erziehungszeiten werden ermöglicht. Die dem entsprechenden Mittelverschiebungen und ggf. Projektverzögerungen werden innerhalb des Schwerpunktprogramms und in Absprache mit der DFG ausgeglichen.

5.6 Vernetzung der geplanten Forschungsaktivitäten im internationalen Wissenschaftssystem

Die Mitglieder des Programmausschusses und die potenziellen Teilnehmer des Schwerpunktprogramms unterhalten intensive wissenschaftliche Kontakte zu international renommierten Arbeitsgruppen, von denen die wichtigsten in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind. Es ist vorgesehen, sowohl zu den Berichtskolloquien als auch zu den Arbeitstreffen renommierte Gäste aus dem Ausland als Gastredner einzuladen. Zum Gastwissenschaftlerprogramm gehören auch zwei längerfristige Aufenthalte von Gästen aus dem Ausland an zwei am Schwerpunktprogramm beteiligten Instituten, die die Mitarbeit der Gäste bei den Doktorandenschulen einschließen.

Seitens des Koordinators besteht eine exzellente internationale Vernetzung. Er hat über die letzten vier Jahre das EU-russische Förderprojekt ICOEUR (www.icoeur.eu) mit insgesamt 20 Partnern zum Thema des Betriebs großer elektrischer Netze geleitet. In diesem Projekt wurden Ergebnisse zur Führung großer Netze einschließlich einzelner Hochspannungsgleichstromstrecken erarbeitet und als Buch veröffentlicht [P1]. Gleichzeitig wurden auch Anforderungen an weitergehende Forschungen abgeleitet. Die in diesem Schwerpunktprogramm zu betrachtenden hybriden und multimodalen Netze schließen sich an die bisherigen Forschungen an.

Die Ergebnisse des Projektes wie z.B. ein detailliertes europäisches dynamisches Netzmodell stehen dem Schwerpunktprogramm als Grundlage zur Verfügung.

Mit den bisherigen Projektpartnern, die in ihren jeweiligen Ländern weiter an den Themen forschen, kann über das Schwerpunktprogramm ein Wissensaustausch gepflegt und weitergeführt werden. Darüber hinaus werden weitergehende Kooperationen und Vernetzungen der Initiatoren und Antragsteller einbezogen.

Es ist vorgesehen, thematische Sitzungen über die Ergebnisse des Schwerpunktprogramms auf internationalen Tagungen zu organisieren. Dafür eigenen sich insbesondere die folgenden Veranstaltungen:

- Power Systems Computation Conference (PSCC), 2016 (Genua, Italien) und alle drei Jahre an wechselnden Orten in Europa
- IEEE Powertech, 2017 (Manchester, UK) und alle zwei Jahre an wechselnden Orten in Europa
- IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT), 2015 (Warschau, PL) und jährlich an wechselnden Orten in Europa
- IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015 (Denver CO, USA) und jährlich an wechselnden Orten in den USA
- IREP Symposium - Bulk Power Systems Dynamics and Control**,** 2016 und alle 3 Jahre an wechselnden Orten weltweit
- Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES) im Rahmen der ACM/IEEE CPSWeek jährlich an wechselnden Orten weltweit
- ACM International Conference on Future Energy Systems (ACM SIGCOMM e-Energy) jährlich an wechselnden Orten weltweit

Alle Konferenzen unterliegen einem strengen Peer Review und die Veröffentlichungen sind in *IEEE Xplore* gelistet.

Die Nutzung der hier entwickelten Ideen wird durch den im Ingenieurbereich typischen Wechsel der Doktoranden nach dem Abschluss der Forschungsprojekte in die Industrie maßgeblich gefördert.

6 Abgrenzung zu anderen laufenden Programmen mit direktem thematischen Bezug

Zur Einordnung in den Kontext anderer Förderaktivitäten mit direktem thematischem Bezug und zur Erläuterung des Verhältnisses zu anderen früheren, laufenden oder geplanten Förderaktivitäten sind insbesondere Projekte der EU, der Bundesministerien, der Landesministerien sowie der DFG zu betrachten.

6.1 EU 7. Rahmenprogramm und Horizon 2020

Im 7. Rahmenprogramm wurden die oben genannten und abgegrenzten Projekte ICOEUR, Realisegrid und PEGASE gefördert. Hybride oder multimodale Netze und speziell deren Stabilität standen nicht im Fokus.

Im Arbeitsprogramm 2014 bis 2015 von Horizon 2020 [34] ist das Thema 'Transmission Grid and Wholesale Market' genannt, welches als neue Technologie allein die satellitenbasierte zeitsynchronisierte Spannungs- und Strommessung für Stabilitätsüberwachung für Demonstrationsprojekte nennt. Darüberhinaus werden neue Strukturen für Großhandelsmärkte sowie Flexibilitäten aus Lasten und EE-Anlagen ebenfalls als Demonstrationsprojekte genannt.

Die Planung eines europäischen Netzes wird innerhalb des EU 7. Rahmenprogramms im Projekt e-Highway 2050 - Modular Development Plan of the Pan-European Transmission System 2050 behandelt (www.e-highway2050.eu). Das Projekt mit einer Laufzeit von 40 Monaten endet Ende 2015. Im Fokus steht hier der Entwurf eines bedarfsgerechten elektrischen Netzes bis 2050. Eine multimodale Betrachtung der Energienetze sowie die detaillierte Untersuchung neuer Methoden zur Steuerung und zum stabilen Betrieb sind nicht Kern des Forschungsprojektes. Im EU-Projekt OVANET werden unter anderem relevante Aspekte eines vermascht betriebenen HGÜ-Overlay-Netzes bspw. Fahrplanerstellung für den redundanten Betrieb, Leistungs-Frequenz-Regelungsunterstützung in einem hybriden Netz beschrieben. In beiden Projekten liegt der Fokus allerdings rein auf der obersten elektrischen Transportnetzebene. Ein weiterer Projektbereich sind

vermaschte Offshore-Netze, für die Basistechnologien und Systembetrachtungen spezifisch am Beispiel der Nordsee vorzuschlagen sind. Darüber hinausgehende hybride und multimodale Netze als weiterer Zukunftsschritt werden nicht betrachtet. Es ergibt sich jedoch eine kohärente Ergänzung, da die Methoden des Schwerpunktprogramms in die Betrachtungen der EU integriert werden können bzw. einen Innovationsvorsprung für Deutschland versprechen.

6.2 Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Durch das aktuelle 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung [35] werden vielfältige Themen der Energieforschung abgedeckt. Hieraus ist die Förderinitiative "Zukunftsfähige Stromnetze" hervorgegangen. Da der Fokus der Bundesförderung jedoch eher auf konkreter Technologieentwicklung liegt, sind die grundlegenden Betrachtungen zur Systemauslegung und Systemstabilität, die in dem Schwerpunktprogramm geplant sind, nicht zu erwarten.

Der Forschungscampus „Flexible Elektrische Netze (FEN)“ an der RWTH Aachen wird durch das BMBF gefördert und über einen Zeitraum von bis zu 15 Jahren unterstützt und befindet sich zurzeit in der ersten von drei Hauptphasen. Im Fokus stehen zukünftige Gleichstromnetze mit den Forschungsthemen Materialen und Komponenten, technische Umsetzung und Planung. Im Mittelpunkt steht jedoch der Aufbau eines Mittelspannungsgleichstromnetzes.

Das Verbundprojekt „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“, gefördert durch das BMU mit einer Projektlaufzeit bis Nov. 2014, hatte das Ziel einer Neubewertung der Schnittstellen zwischen den drei Energiesektoren und gibt Aufschlüsse über erste Handlungsempfehlungen. Ergebnisse können direkt in die Bearbeitung des Schwerpunktprogramms mit einfließen.

Das Projekt „KonStGas - Integration fluktuierender erneuerbarer Energien durch konvergente Nutzung von Strom und Gasnetzen“, gefördert durch das BMU, dem BMWi und das BMBF, befasst sich mit der Kopplung der Strom- und Gasnetze, um insbesondere die Potentiale des Gasnetzes als Energiespeicher zu nutzen. Im Mittelpunkt steht daher die Umwandlung von Strom aus erneuerbaren Energien in erneuerbare Gase mittels Power-to-Gas-Anlagen. Das Projekt endet Anfang 2016.

Bei der Auswahl der Einzelprojekte für das Schwerpunktprogramm wird zu dem entsprechend späteren Zeitpunkt darauf geachtet, dass keine Überschneidungen zu den Bundesprojekten bestehen und dass ggf. Synergien genutzt werden können.

6.3 Forschungsförderung der Länder

Es sind keine Projekte mit Förderungen der Bundesländer bekannt, die das Thema hybride oder multimodale Netze betreffen. Im Technologiebereich wird ein Konsortium rund um die Firma Siemens durch das BMWi und das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Medien, Energie und Technologie zum Thema kompakte HGÜ-Technologie gefördert, welches zukünftig ein Technologiebaustein hybrider Netze sein könnte. In NRW ist eine HGÜ-Prüfinfrastruktur an der TU Dortmund durch das BMWi gefördert worden. NRW- und Bundesprojekte zur Erweiterung dieser Infrastruktur sind 2015 bewilligt worden. Das dadurch entstehende NRW-Prüfzentrum für Hochspannungsgleichstromtechnologie bildet eine Grundlage für Forschungen im Bereich der Anlagentechnik als Subsystem hybrider Netze und steht nach Fertigstellung für die zweite Phase des Schwerpunktprogramms zur Verfügung.

Es ist naturgemäß davon auszugehen, dass die im späteren Abschnitt genannten, voraussichtlichen und einschlägigen Teilnehmer, bereits in dem Themenfeld des Schwerpunktprogramms mit Vorarbeiten tätig sind und hierfür auch Fördermittel erhalten haben und erhalten werden. Das Schwerpunktprogramm bietet jedoch die Möglichkeit diese gestreuten Aktivitäten zu bündeln.

6.4 Förderinstrumente der DFG

Im Bereich der elektrischen Energietechnik ist die Forschergruppe 1511 "Schutz- und Leitsysteme zur zuverlässigen und sicheren elektrischen Energieübertragung" als Partner- und Synergieprojekt zu dem hier beantragten Schwerpunktprogramm zu nennen. Ausgewählte Aspekte der Schutz- und Leittechnik werden hierin untersucht. Insbesondere wird das Zusammenspiel zwischen Energie- und IKT-Netzen betrachtet. Die Forschergruppe ist Mitte 2014 in die zweite Phase von 3 Jahren eingetreten, so dass nur eine geringe zeitliche Überlappung mit dem Schwerpunktprogramm

besteht. Neben anderen publizierten Ergebnissen kann ein Hybridsimulator für Energie- und IKT-Netze zusammen mit regionalen bis hin zu europäischen Netzmodellen als Basis für das Schwerpunktprogramm zur Verfügung stehen.

Weitere größere Projekte seitens der DFG die im thematischen Zusammenhang mit dem Schwerpunktprogramm stehen sind nicht bekannt.

7 Qualifikation des Koordinators im Hinblick auf die Steuerung eines Forschungsverbundes

Der Koordinator Prof. Rehtanz besitzt langjährige Erfahrung in der Koordination und Durchführung nationaler und internationaler Forschungsprojekte. Neben mehreren DFG-Einzelanträgen hat er die DFG Forschergruppe 1511 "Schutz- und Leitsysteme zur zuverlässigen und sicheren elektrischen Energieübertragung" als federführender Antragsteller erfolgreich beantragt, koordiniert und in die zweite Förderphase, die bis 2017 läuft, geführt.

Er hat an mehreren internationalen EU-Projekten als Partner teilgenommen (Grid-4-EU, Grid-4 Vehicles, RealizeGrid). Das Projekt ICOEUR, als erstes europäisch-russisch gemeinsam finanziertes Projekt, mit über 20 Partnern wurde von ihm beantragt und koordiniert. Für die Projektleitung wurde er mit dem FRP.NRW Award 2011 für die herausragende Koordination eines EU-Verbundforschungsprojektes im 7. EU-Rahmenprogramm ausgezeichnet. Darüberhinaus war er zusammen mit seinem Institut Koordinator mehrerer Verbundforschungsprojekte, die vom BMBF, BMWi und anderer Bundes- und Landesministerien gefördert wurden (Projekte: iProtect, Stadt als Speicher, KonVeTro, SMEDEA, TIE-IN, Agent.Netz, ZAESAR).

Die Infrastruktur des vom Koordinator geleiteten Instituts kann für die Koordination des Schwerpunktprogramms herangezogen werden. Zur Unterstützung des Koordinators bei der Organisation der wissenschaftlichen Aktivitäten des Schwerpunktprogramms und bei der Berichterstattung wird eine wissenschaftliche Mitarbeiterstelle beantragt.

8 Liste von potentiellen Antragstellenden

Die folgende nach DFG-Fachgebieten sortierte Liste nennt renommierte Experten, von denen neben den Initiatoren eine Teilnahme an dem hier beantragten Schwerpunktprogramm erwartet werden kann.

407-01 Automatisierungstechnik, Regelungssysteme, Robotik, Mechatronik

- Prof. Dr.-Ing. Georg Frey, Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme, Universität des Saarlandes, Tel.: +49 681 302 57590, georg.frey@aut.uni-saarland.de
- Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Rudolph, Lehrstuhl für Systemtheorie und Reglungstechnik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Tel.: +49 681 302 64721, j.rudolph@lsr.uni-saarland.de
- Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Tel.: +49 711 685 66302, oliver.sawodny@isys.uni-stuttgart.de

408-03 Elektrische Energieerzeugung, -übertragung, -verteilung und -anwendung

- Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Anlagen, Technische Univ. Braunschweig, Tel.: +49 531 391 7740, bernd.engel@tu-braunschweig.de
- Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Tel.: +49 9131 85-23445, matthias.luther@fau.de
- Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz erneuerbarer Energien, Tel.: +49 6151 16 3015, jutta.hanson@e5.tu-darmstadt.de
- Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Tel.: +49 511 762-2801, hofmann@iee.uni-hannover.de
- Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann, Elektrotechnisches Institut, Elektrische Antriebe und Maschinen, Technische Universität Dresden, Tel.: +49 351 463 37634, wilfried.hofmann@tu-dresden.de
- Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme, Friedrich- Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Tel.: +49 9131 85-29523, johann.jaeger@fau.de
- Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau, Lehrstuhl für Hochspannungstechnik, Technische Universität Dortmund, Tel.: +49 231 755 4471, frank.jenau@tu-dortmund.de

- Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Anlagen, Technische Univ. Braunschweig, Tel.: +49 531 391 7735, m.kurrat@tu-braunschweig.de
- Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, KIT, Tel.: +49 721 608 2520, leibfried@kit.edu
- Prof. Dr. Antonello Monti, Lehrstuhl für Automation of Complex Power Systems, RWTH Aachen, Tel.: +49 241 80-49700, amonti@eonerc.rwth-aachen.de
- Prof. Dr.-Ing. Albert Moser, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Tel.: +49 241 80-97652, Albert.Moser@IAEW.RWTH-Aachen.de
- Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik, Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft, Technische Universität Dortmund, Tel.: +49 231 755 2359, johanna.myrzik@tu-dortmund.de
- Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Technische Universität Dresden, Tel. +49 351 463-34374, peter.schegner@tu-dresden.de
- Prof. Dr.-Ing. Detlef Schulz, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme, Helmut-Schmid-Universität Hamburg, +49 40 6541-2757, Detlef.Schulz@hsu-hh.de
- Prof. Dr.-Ing. Kai Strunz, Fachgebiet Energieversorgungsnetze und Integration erneuerbarer Energien, Technische Universität Berlin, Tel.: +49 30 314 23390, kai.strunz@tu-berlin.de
- Prof. Dr.-Ing. Georg Schaub, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Tel.: +49 721 608-42572, georg.schaub@kit.edu
- Prof. Dr. -Ing. Krzysztof Rudion, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart, Tel.: +49 711 685 67872, krzysztof.rudion@ieh.uni-stuttgart.de
- Prof. Dr.-Ing. Harald Weber, Institut für Elektrische Energietechnik, Universität Rostock, Tel.: +49 381 498 7100, harald.weber@uni-rostock.de
- Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann, Institut für Elektrische Energie- und Steuerungstechnik, FG Elektrische Energieversorgung, Technische Universität Ilmenau, Tel.: +49 3677 69 2838, di-we@tu-Ilmenau.de
- Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann, Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze, Technische Universität München, +49 89 289 22002, rolf.witzmann@tum.de
- Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter, Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Tel.: +49 391 67 18866, martin.wolter@ovgu.de
- Prof. Dr.-Ing. Peter Zacharias, Institut für Elektrische Energietechnik. Univ. Kassel, Tel.: +49 561 804 6344, peter.zacharias@uni-kassel.de
- Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek, Lehrstuhl für elektrische Energieversorgungstechnik, Univ. Wuppertal, Tel.: +49 202 439 1976, zdrallek@uni-wuppertal.de

408-02 Nachrichten- und Hochfrequenztechnik, Kommunikationstechnik und -netze, Theoretische Elektrotechnik

- Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Technische Universität Dortmund, Tel.: +49 231 755 4515, christian.wietfeld@tu-dortmund.de

408-01 Elektronische Halbleiter, Bauelemente und Schaltungen, Integrierte Systeme

- Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet, Elektrotechnisches Institut, Leistungselektronik, Technische Universität Dresden, Tel.: +49 351 463 42136, steffen.bernet@tu-dresden.de
- Prof. Dr.-Ing. Michael Braun, Elektrotechnisches Institut, Universität Karlsruhe, Tel.: +49 721 608 2472, braun@etu.uni-karlsruhe.de
- Prof. Dr. ir. Rik W. De Doncker, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Anlagen, RWTH Aachen, Tel.: +49 241 80-96920, post@isea.rwth-aachen.de
- Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik, Technische Universität München, Tel.: +49 89 289 28452, ralph.kennel@tum.de
- Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens, Institut für Antriebe und Leistungselektronik, Leibniz Universität Hannover, Tel.: +49 511 762-2471, mertens@ial.uni-hannover.de
- Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik, Institut für Elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente, Universität Bremen, Tel.: +49 421 218 62680, orlik@ialb.uni-bremen.de
- Prof. Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow, Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe, Universität Stuttgart, Tel.: +49 711 685 67401, ilea@ilea.uni-stuttgart.de

9 Begründung des beantragten jährlichen Mittelbedarfs für die erste Förderperiode von drei Jahren

Das geplante Schwerpunktprogramm wird für eine Laufzeit von insgesamt sechs Jahren beantragt und soll zwei Förderperioden umfassen. Die Ausschreibung der ersten Förderperiode ist für Juli 2016 geplant.

Es wird davon ausgegangen, dass pro Förderperiode etwa 18 Teilprojekte gefördert werden müssen, um sowohl die Breite als auch Tiefe der Thematik angemessen abzudecken und das Forschungspotential in Deutschland zu diesem wichtigen Thema angemessen zu heben. Auf dieser Basis ergibt sich der folgende Mittelbedarf:

- **Basismodule**

  Der Mittelbedarf ergibt sich durchschnittlich aus bis zu 1,5 Stellen für wissenschaftliche Mitarbeiter (100% TV-L-E13) pro Teilprojekt. Darüber hinaus sind Mittel für Prüffeldexperimente sowie Spezialsoftware vorzusehen. Ergänzend müssen für Prüffeldaufgaben sowie zur Softwareerstellung studentische Hilfskräfte eingeplant werden. Reisekosten und Konferenzaufenthalte sind ebenfalls vorzusehen.

  Pro Forschungsprojekt werden daher durchschnittlich 110 T€ für pro Jahr budgetiert.

- **Modul Projektspezifische Workshops**

  Zur Durchführung der Jahrestreffen, Zusammenarbeitsworkshops und Sommerschulen sind 30 T€ pro Jahr vorzusehen. Hierin enthalten sind die Reisekosten und Pauschalen für externe Referenten.

- **Modul Öffentlichkeitsarbeit**

  Die Darstellung des Schwerpunktprogramms in Print- und Internetmedien sowie die Erstellung spezieller Webseiten und Brochüren sowie von Ausstellungmaterial für Tagungen wird mit 5 T€ pro Jahr veranschlagt.

- **Modul Koordinierung**

  Die Koordinierung des Schwerpunktprogramms umfasst die Organisation der Workshops sowie des Informationsflusses zwischen den Teilprojekten. Hierunter ist auch die Unterstützung beim Austausch der inhaltlichen Ergebnisse zu verstehen. Hierzu sind Mittel für Koordinationsaufgaben (TV-L-E13) plus Reisekosten in Summe von 40 T€ pro Jahr zu veranschlagen.

- **Verbundmittel**

  Für den gesamten Verbund sollen Mittel in Höhe von 60 T€ pro Jahr als Verbundmittel zur Verfügung stehen. Diese Mittel können eingesetzt werden, um kurzfristig in- und ausländische Wissenschaftler für den Austausch in das Schwerpunktprogramm und zwischen den Teilprojekten einzubinden.

- **Chancengleichheitsmaßnahmen in Forschungsverbünden**

  Für gezielte Maßnahmen zur Gleichstellung von Männern und Frauen in der Wissenschaft werden pro Jahr 15 T€ veranschlagt, die bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden.

In Summe ergibt sich ein Mittelbedarf von 2,135 Mio. € pro Jahr der ersten Förderperiode.