

**Energiezustandsdaten –
Informatik-Methoden zur Erfassung,
Analyse und Nutzung**

**Antrag für ein Graduiertenkolleg
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Designierter Sprecher:

Professor Dr.-Ing. Klemens Böhm

Institut für Programmstrukturen und Datenorganisation

Lehrstuhl für Systeme der Informationsverwaltung

Tel.: +49 (0721) 608 43968

E-Mail: klemens.boehm@kit.edu

Web: <http://dbis.ipd.kit.edu/>

Vorgesehene Förderperiode: 01.05.2016 - 31.10.2020

Antragstermin: 15.05.2015

1. Allgemeine Angaben

1.1 Titel in deutscher und englischer Sprache

Energiezustandsdaten – Informatik-Methoden zur Erfassung, Analyse und Nutzung
Energy Status Data – Informatics Methods for its Collection, Analysis, and Exploitation

1.2 Antragsstellende Hochschule

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

1.3 Beteiligte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler

Name, Vorname, akad. Titel	Lehrstuhl/Institut, Dienstanschrift	Telefonnummer, Telefaxnummer, E-Mail-Anschrift, Internetadresse	Fachgebiet
Böhm, Klemens, Prof. Dr. (designierter Sprecher)	Institut für Programmstruktu- ren und Datenorganisation (IPD), Fakultät für Informatik, Am Fasanengarten 5, 76131 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 43968 Fax: (0721) 608 47343 klemens.boehm@kit.edu http://www.ipd.kit.edu	Verteilte Datenhal- tung, Datenanaly- se, Datenschutz
Fichtner, Wolf Prof. Dr. (designierter stellvertreten- der Sprecher)	Institut für Industriebetriebs- lehre und Industrielle Pro- duktion (IIP), Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 44460 Fax: (0721) 608 44682 wolf.fichtner@kit.edu http://www.iip.kit.edu	Energiewirtschaft, Energiesystem- analyse
Hagenmeyer, Veit, Prof. Dr.	Institut für Angewandte Informatik (IAI), Fakultät für Informatik, Hermann-von- Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	Tel.: (0721) 608 29200 Fax: (0721) 608 22602 veit.hagenmeyer@kit.edu http://www.iai.kit.edu	Energieinformatik, Automatisierungs- und Regelungstechnik im Energiebereich
Koziolk, Anne Jun.-Prof. Dr.	Institut für Programmstruktu- ren und Datenorganisation (IPD), Fakultät für Informatik, Am Fasanengarten 5, 76131 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 43473 Fax: (0721) 608 45990 koziolk@kit.edu http://sdq.ipd.kit.edu/people/anne_koziolk/	Qualitätsbewertung von Software-Ar- chitekturen, Quali- tätsanforderungen
Müller-Quade, Jörn Prof. Dr.	Institut für theoretische Informatik (ITI), Fakultät für Informatik, Am Fasanen- garten 5, 73131 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 44205 Fax: (0721) 608 55022 mueller-quade@kit.edu http://www.iks.kit.edu	Kryptographie, IT- Sicherheit, Daten- schutz
Noe, Mathias, Prof. Dr.	Institut für technische Physik (ITEP), Elektrotechnik und Informationstechnik, Hermann-von-Helmholtz- Platz 1,76344 Eggenstein- Leopoldshafen	Tel.: (0721) 608 23500 Fax: (0721) 608 22849 mathias.noel@kit.edu http://www.itep.kit.edu	Energietechnik
Raabe, Oliver, Dr.	Zentrum für angewandte Rechtswissenschaften (ZAR) / Institut für Informations- und Wirtschaftsrecht, Vincenz- Prießnitz-Str. 3, 76131 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 46508 Fax: (0721) 608 46506 raabe@kit.edu http://www.zar.kit.edu	Analyse von Rechtsaspekten komplexer IKT-In- frastrukturen, Com- pliance

Schmeck, Hartmut, Prof. Dr.	Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB), Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Kaiserstr. 89, 76133 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 44242 Fax: (0721) 608 46581 hartmut.schmeck@kit.edu http://www.aifb.kit.edu	Energieinformatik, Organic Computing, Naturinspirierte Optimierung
Wagner, Dorothea, Prof. Dr.	Institut für theoretische Informatik (ITI), Fakultät für Informatik, Am Fasanengarten 5, 76131 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 47330 Fax: (0721) 608 43919 dorothea.wagner@kit.edu http://www.iti.kit.edu	Algorithm Engineering, Graphenalgorithmen, algorithmische Geometrie, Visualisierung
Weber, Marc, Prof. Dr.	Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE), Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	Tel.: (0721) 608 25612 Fax: (0721) 608 25594 marc.weber@kit.edu http://www.ipe.kit.edu	Prozessdatenverarbeitung, Elektronik, Detektoren, Teilchenphysik
Weinhardt, Christof, Prof. Dr.	Institut für Informationswirtschaft und -marketing (IISM), Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Englerstr. 14, 76131 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 48370 Fax: (0721) 608 48399 weinhardt@kit.edu http://www.iism.kit.edu	Market Engineering, Internetökonomie und elektronische Märkte

Gleichberechtigt mit den Antragsstellern sind an diesem Graduiertenkolleg ferner die folgenden Nachwuchswissenschaftler beteiligt.

Jochem, Patrick, Dr.	Karlsruhe Service Research Institute (KSRI), Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Englerstr. 11, 76131 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 44590 Fax: (0721) 608 44682 jochem@kit.edu http://www.ksri.kit.edu	Energiewirtschaft, Transportökonomie, Elektromobilität
Rutter, Ignaz Dr.	Institut für theoretische Informatik (ITI), Fakultät für Informatik, Am Fasanengarten 5, 76131 Karlsruhe	Tel.: (0721) 608 44322 Fax: (0721) 608 44211 ignaz.rutter@kit.edu http://i11www.iti.kit.edu/members/ignaz_rutter	Graphvisualisierung, Algorithmenentwurf, Kombinatorische Optimierung

1.4 Zusammenfassung in deutscher und englischer Sprache

Die Ausgestaltung zukünftiger Energiesysteme, die auch mit fluktuierender Einspeisung und flexibler Nachfrage gut umgehen können, ist ein wichtiges gesellschaftliches Anliegen. Ein grundlegender Aspekt ist der Energieverbrauch, und zwar der komplexer Systeme, beispielsweise von Industrieanlagen oder IT-Infrastrukturen. Wichtig sind u. a. seine Flexibilisierung, so dass mehr nachhaltig und lokal erzeugte Energie genutzt wird, die Resilienz der Versorgung oder die Effizienz neuer Energiesysteme. Eine Voraussetzung für all dies ist eine strukturierte Erfassung und Auswertung von Energiezustandsdaten. Diese Daten beschreiben die Energiebereitstellung, -speicherung, -übertragung und -nutzung in Form von Messwerten, abgeleiteten Größen wie z. B. Grad der Abnutzung von Batterien und Einflussfaktoren wie Strompreise. Dieses GRK zielt auf den Umgang mit diesen Daten.

Dabei ist ein interdisziplinäres Vorgehen (Informatiker, Ingenieure, Ökonomen, Juristen) unumgänglich. Es ermöglicht den Blick auf neue wissenschaftliche Herausforderungen, mit denen wir Doktoranden im Rahmen ihrer Ausbildung konfrontieren können. So haben wir zum Beispiel beobachtet, dass die zeitliche Auflösung der Daten, aber auch die Aggregationsebenen für verschiedene Planungs- und Steuerungsaufgaben sehr unterschiedlich sein können. Diese stark unterschiedliche Granularität führt u. a. zu der Forschungsfrage, wie sich in den Daten Auffälligkeiten auf der richtigen Abstraktionsebene finden lassen. Indem sie entsprechende neu entwickelte Verfahren für das Erkennen von Auffälligkeiten verwenden, können andere Graduierte jetzt ihrerseits systematisch Unzulänglichkeiten in existierenden Modellen von Energiesystemen, z. B. von der Wirkungsweise von Li-Ionen Batterien, identifizieren. Wir werden Infrastruktur für Energieforschung des KIT-Helmholtz-Bereichs wie das EnergyLab 2.0, dessen Verantwortliche Mittragsteller sind, zum Gegenstand der Betrachtung machen. Besonders an unserem Forschungsprogramm, das Graduierte als Teil ihrer Ausbildung durchlaufen werden, ist ferner die übergreifende Betrachtung des Lebenszyklus von Energiezustandsdaten, bestehend aus den Phasen Erfassung, Analyse und Nutzung. Daraus ergibt sich erheblicher Mehrwert verglichen mit Einzelpromotionen, die den gesamten Zyklus abdecken: Dissertationsprojekte, die frühen Phasen des Lebenszyklus entsprechen, können z. B. Verfahren zur Erfassung der Daten maßschneidern, wenn die Art ihrer Nutzung bekannt ist; Projekte der Phase ‚Nutzung‘, die datengestützt Energiesysteme entwerfen wollen, können mit Daten in genau der erforderlichen Qualität arbeiten.

The design of future energy systems which can cope with fluctuating supply and flexible demand is an important societal concern. An essential aspect is the consumption of energy, particularly of complex systems such as factories or IT infrastructures. Important points are the flexibilization of energy consumption, so that the share of locally generated ‘green’ energy increases, robustness of energy provisioning, or the efficient design of new energy systems serving these purposes. To accomplish this, a core prerequisite is a structured collection, storage and analysis of energy status data. Energy status data describes the provisioning of energy, its storage, transmission and consumption, be it the outcomes of measurements, be it metadata such as the extent of fatigue of batteries, be it other relevant data such as electricity rates. This graduate school targets at the handling of such data. To this end, an interdisciplinary approach (computer science, engineering, economics, law) is indispensable. It reveals new scientific challenges we will confront Ph.D. students with as part of their education. For instance, we have observed that different planning and control purposes require data of different temporal resolution and at different aggregation levels. This varying granularity leads to the question how to find outliers in such data at the right level of abstraction. Other graduates benefit from new approaches that detect such outliers. They can now work more efficiently, e.g., can identify shortcomings of existing models of energy systems systematically. An example of such a model would be one describing the behavior of Li-Ion batteries. The infrastructure for energy research of the KIT Helmholtz sector such as the En-ergyLab 2.0 will be subject/object of our graduate school to a significant extent; the persons responsible for these facilities are part of the group of applicants of this graduate school. An-other distinctive feature of the research agenda graduates have to deal with as part of their education with us is the comprehensive treatment of the life cycle of energy status data, which consists of the phases ‘collection’, ‘analysis’ and ‘deployment’. It yields a significant added value, compared to stand-alone Ph.D. work that otherwise would have to cover that entire life cycle by itself: For instance, Ph.D. topics falling into an early phase of the life cycle might tailor specific methods of collecting energy status data if it is known how it will be used. Topics from the phase ‘deployment’ in turn, which want to design better energy systems in a data-driven fashion, can work with data of exactly the right quality.

1.5 Antragszeitraum/Förderbeginn

01.05.2016 – 31.10.2020

2. Profil des Graduiertenkollegs

Inhalt. Energiezustandsdaten beschreiben die Energiebereitstellung, -speicherung, -übertragung und -nutzung quantitativ. Dazu gehören alle Messgrößen, die einen Einfluss auf Energiesysteme haben, also auch Angaben zur Umgebung, z. B. Wetter, alle abgeleiteten Größen wie der Grad der Abnutzung von Batterien und Einflussfaktoren, die direkte oder indirekte Wirkung auf Energiesysteme haben, z. B. Stromverbrauch. Unterkategorien sind Energieverbrauchsdaten oder Daten, die Energieflüsse in Netzen beschreiben. Diese Daten sind in mehrerlei Hinsicht unerlässlich für die Weiterentwicklung von Energiesystemen: (1) Die Verfügbarkeit richtiger, detaillierter Verbrauchsdaten ermöglicht eine genaue Bilanzierung des Energieverbrauchs. Wir erwarten, dass eine genaue Bilanzierung langfristig die Effizienz des Systems signifikant steigert, da mehr fluktuierende Erzeugung einer Nachfrage zugeordnet werden kann. (2) Genaue und verlässliche Energieverbrauchsdaten sind Voraussetzung für eine gute Prognose des zukünftigen Energiebedarfs und -angebots. Dies wiederum ermöglicht eine *verbesserte Steuerung von Energiesystemen*. (3) Schließlich sind Energiezustandsdaten unverzichtbar für die *Planung und Weiterentwicklung von Energiesystemen*. – Energiezustandsdaten verfügen über Eigenschaften, die in dieser Kombination nur für diese Daten gelten, s. b. Abschnitt 3. Sie reflektieren z. B. die Multimodalität von Energie, d. h. es gibt i. Allg. mehrere Energieträger (Strom, Fern- und Nahwärme, Gas), die einander ergänzen oder ersetzen können. Eine weitere beispielhafte spezifische Eigenschaft ist, dass Energiezustandsdaten in sehr unterschiedlicher zeitlicher Auflösung gemessen werden (viertelstündlich, stündlich, jährlich) und verschiedene Periodizitäten aufweisen (täglich, wöchentlich, jährlich). Beispiele für konkrete Forschungsfragen zu Energiezustandsdaten, mit denen wir Doktoranden als Teil ihrer Ausbildung konfrontieren möchten, sind die folgenden:

- Energiezustandsdaten sind Datenströme, die die o. g. Multimodalität reflektieren. Wie lassen sich wesentliche Korrelationen zwischen derartigen Strömen gut erkennen? Wie lassen sie sich für die Komprimierung der Daten nutzen, wie für die Prognose? Wie ist die optimale zeitliche Auflösung?
- Gegenstand der Betrachtung dieser Frage ist die Energieversorgung einer gewerblichen Produktionsstätte mit einer Photovoltaikanlage und einem Batteriesystem einer bestimmten Bauart für den teilautarken Inselbetrieb. Wie lassen sich basierend auf Betriebsdaten die Auslegung und der Betrieb eines solchen Systems optimieren?
- Ist es möglich, für Energieverbrauchsdaten gleichzeitig Anonymität und konkrete Abrechenbarkeit („Accountability“) zu gewährleisten? Haben Energiezustandsdaten besondere Strukturen, z. B. inhärente Entropie, die bessere Anonymisierung erlauben, als dies mit Standardtechniken möglich wäre?

In der Forschung zu Energiesystemen trifft man vielfach auf die Aufteilung des Gebiets in Erzeugung, Übertragung, Speicherung, Verteilung sowie Verbrauch und dezentrale Einspeisung. Aus dieser Sicht konzentrieren sich die Fragen, mit denen wir Doktoranden konfrontieren möchten, zumindest in der ersten Förderungsperiode des Kollegs, auf die letzte Ebene (Verbrauch und dezentrale Einspeisung). Diese Ebene ist die natürliche, um bezüglich einer Verbrauchsreduzierung und -flexibilisierung anzusetzen. Die dazu erforderliche Grundlagenforschung muss rechtliche Aspekte einschließen, z. B. den datenschutzkonformen Umgang mit personenbezogenen Energieverbrauchsdaten.

Um sicherzustellen, dass die Forschung in diesem GRK weitgehend auf Vereinfachungen verzichtet, die eventuell ihre Nützlichkeit in Frage stellen, sind auch Anlagen für Energieforschung aus dem Großforschungsbereich des KIT Gegenstand der Betrachtung. Sie wurden in den vergangenen Jahren mit erheblichem Aufwand aufgebaut (wie der KIT Solarstrom-

Speicherpark im Megawatt-Bereich) oder werden gerade etabliert. Dies gilt für das Energy-Lab 2.0, eine Plattform für die Analyse komplexer Energiesysteme. Verantwortliche für diese Anlagen sind Mit Antragsteller (Weber für die Batteriepark, Hagenmeyer und Noe für den systemintegrierenden IKT-Teil des EnergyLabs 2.0).

Synergien. Dieses Kolleg bietet verglichen mit Einzelpromotionen in zweierlei Hinsicht einen erheblichen Mehrwert; wir beschreiben diese Perspektiven jeweils in diesem und dem folgenden Absatz. Am Forschungsprogramm ist besonders, dass es auf der Ebene ‚Verbrauch und lokale Einspeisung‘ den Lebenszyklus der Daten vollständig abdeckt. Er besteht aus den Phasen Erfassung der Daten, Speicherung und Analyse sowie Nutzung. Nutzung bezeichnet hier die Verwendung der Daten für Planungs- und Steuerungszwecke. Eine angepasste Planung/Steuerung führt zu einem veränderten Verbrauchsverhalten. Hier beginnt dann ein neuer Zyklus. Aus dieser Sichtweise ergeben sich sehr gute Synergieeffekte, verglichen mit Einzelpromotionen, die den gesamten Zyklus abdecken: Dissertationsprojekte, die frühen Phasen des Zyklus zugeordnet sind, können z. B. spezialisierte Verfahren zur Datenanalyse entwickeln, wenn die Art der Nutzung der Daten bekannt ist. Projekte in der Phase ‚Nutzung‘, die bessere Energiesysteme durch Nutzung von Energiezustandsdaten entwerfen wollen, können solche neuen Verfahren verwenden und bei der Anforderungserhebung mitarbeiten.

Auf der methodischen Ebene sind unterschiedliche Arten der interdisziplinären Zusammenarbeit angedacht, denen mehrere konkrete Vorschläge für Dissertationsthemen entsprechen, s. b. Abschnitt 3. Aus diesen Arten der Zusammenarbeit ergeben sich dann unterschiedliche Synergien. So wollen wir z. B. Doktoranden, die energiespezifische Fragen beantworten wollen, dazu bringen, – mit erheblicher Informatikunterstützung – neue Datenanalysemethoden anzuwenden. Dies beispielsweise, um zu systematischen Evaluationen deutlich größeren Umfangs als konventionell üblich zu kommen. Aus Informatiksicht führt die Anwendung der Methoden in Szenarien erheblicher Komplexität zu neuen Forschungsfragen.

Qualifizierungskonzept und organisatorischer Rahmen. Unsere Gesellschaft braucht qualifizierte Personen mit guten Kenntnissen und methodischen Fähigkeiten in der Informatik und im Bereich Energie. Auch unser Qualifizierungskonzept reagiert auf diesen Bedarf. Es schafft ferner Voraussetzungen für das angestrebte interdisziplinäre Arbeiten. Lehrveranstaltungen, die ggf. fehlende Methodenkompetenz vermitteln, bilden die Grundlage. Wir ergänzen unser bereits bestehendes Portfolio von Veranstaltungen aktiv um noch fehlende Elemente. Das Lehrangebot der KIT School of Energy, einer Einrichtung des Zentrums für Energie am KIT, beziehen wir ebenfalls mit ein. Die dritte Kategorie von Lehrveranstaltungen vermittelt Soft Skills und Grundlagen zu Persönlichkeitsentwicklung und wird vom Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS, ebenfalls Teil des KIT) angeboten. Neben diesen Lehrveranstaltungen zielt unser Qualifizierungskonzept sehr stark darauf, die Graduierten zu befähigen, ihre Resultate verständlich, überzeugend und strukturiert darzustellen. Außerdem legen wir großen Wert darauf, den Graduierten korrektes wissenschaftliches Arbeiten zu vermitteln. Da der korrekte Umgang mit wissenschaftlichen Daten auch ein Forschungsthema unseres Kollegs sein soll (Abschnitt 3.7.3), wird uns dies vergleichsweise leicht fallen.

Um Internationalität des GRKs zu erreichen, hilft uns das sehr gute Renommee des KIT als Forschungseinrichtung, die Bekanntheit der Fakultät für Informatik sowie die sehr gute Vernetztheit der Antragsteller in ihren jeweiligen wissenschaftlichen Communities. Dadurch ist die Vernetzung mit ausländischen Forschern von vornherein gegeben. Hochrangige Besucher kommen gern zu den am Graduiertenkolleg beteiligten Lehrstühlen am KIT, auch für längere Aufenthalte. Die Sprache des Graduiertenkollegs wird Englisch sein. Die Erfahrung aus der Vergangenheit zeigt auch, dass wir unseren Studierenden und Doktoranden Forschungsaufenthalte an sehr angesehenen ausländischen Einrichtungen bei Bedarf jederzeit vermitteln können. Von bestehenden Graduiertenkollegs am KIT mit Beteiligung der Antragsteller wissen wir auch, dass sich sehr gute Kandidaten aus dem Ausland oft bei uns bewerben, sei es initiativ, sei es auf konkrete Ausschreibungen hin.

3. Forschungsprogramm

3.1 Energiezustandsdaten

Energiezustandsdaten sind in mehrerlei Hinsicht unerlässlich für die Weiterentwicklung von Energiesystemen:

Reduzierung des Energiebedarfs. Die Verfügbarkeit richtiger und detaillierter Verbrauchsdaten ermöglicht eine genaue Bilanzierung des Energieverbrauchs, z. B.

- personenbezogen – dies insbesondere innerhalb von großen Organisationen, in denen die Zuordnung von Verbrauch zum Verursacher derzeit oft nicht genügend klar ist, z. B. für Rechenleistungen in einem Rechenzentrum,
- prozessbezogen – wie viel Energie wird zur Herstellung eines Produkts benötigt,
- bezogen auf unterschiedliche (Dienst-)Leistungen, z. B. wie viel Energie verbraucht ein bestimmtes Unternehmen für Fertigung, wie viel für Verwaltung?
- Kombinationen von Bezugsarten, z. B. bezogen auf Dienstleistungen pro Person.

Diese Daten haben für die Resilienz zukünftiger Elektrizitätssysteme mit fluktuativer Einspeisung aus erneuerbaren Energieträgern einen hohen Stellenwert, um jederzeit einen Ausgleich der Nachfrage und des -angebotes sicherzustellen. Wir erwarten, dass eine genaue Bilanzierung und eine damit mögliche Analyse langfristig den Energieverbrauch reduziert, sei es durch Änderungen im Verhalten oder Optimierungen energieintensiver Dienstleistungen.

Verbesserung der Steuerung von Energiesystemen. Genaue und verlässliche Energieverbrauchsdaten sind Voraussetzung für eine gute Prognose des zukünftigen Energiebedarfs. Dadurch lässt sich nicht nur das Angebot, sondern auch der Verbrauch präziser steuern, Netzstabilität gewährleisten und Energieübertragung genauer planen. All dies führt zum einen zu mehr Nachhaltigkeit. Zum anderen erlauben bessere Daten die Einführung wirksamer Anreizmechanismen für die Flexibilisierung des Energieverbrauchs, mit dem gleichen Ziel (mehr Nachhaltigkeit, in diesem Fall, weil mehr erneuerbare Energieträger genutzt werden).

Optimierte Weiterentwicklung von Energiesystemen. Energiezustandsdaten sind unverzichtbar für die Planung und Weiterentwicklung von Energiesystemen, sei es die Anordnung neuer lokaler Erzeuger oder von Speicherelementen oder die Dimensionierung von Übertragungskapazitäten, sei es die Identifikation von Einsparpotentialen, auch im Zusammenhang mit der Konvergenz der Netze unterschiedlicher Energieformen. Eine bessere Planung verbessert Energiesysteme auch in ihren nichtfunktionalen Eigenschaften wie z. B. Robustheit.

3.2 Besonderheiten von Energiezustandsdaten

Verglichen mit anderen Daten sind Energiezustandsdaten in mehrerlei Hinsicht einzigartig. Zu ihren wesentlichen Eigenschaften gehören die folgenden:

- Energiezustandsdaten sind oft Zeitreihen bzw. Datenströme.
- Energiezustandsdaten sind in vielfältiger Weise Basis für Planung und Steuerung.
- Die Erhebung von Energiezustandsdaten unterscheidet sich von der anderer Daten.
- Energiezustandsdaten werden in sehr unterschiedlicher zeitlicher Auflösung gemessen und weisen verschiedene Periodizitäten auf.
- Energiezustandsdaten liegen i. d. R. auf unterschiedlichen Aggregationsniveaus vor.
- Energiezustandsdaten reflektieren die Multimodalität von Energie.
- Energiezustandsdaten haben i. d. R. einen Orts- und Zeitbezug.
- Es ist unklar, welche Informationen sich in Energiezustandsdaten manifestieren.

- Energiezustandsdaten sind i. d. R. unscharf.
- Energiezustandsdaten haben oft einen Personenbezug.

Wir besprechen diese Eigenschaften im Folgenden.

Energiezustandsdaten sind oft Zeitreihen bzw. Datenströme. Dass es sich bei Energiezustandsdaten oft um Zeitreihen handelt, ist sehr offensichtlich. Wichtige zeitreihenspezifische Verwendungsmöglichkeiten dieser Daten sind auch hier sinnvoll, insbesondere Prognose, z. B. sowohl des Angebots nachhaltig erzeugter Energie als auch des Energieverbrauchs, Segmentierung, d. h. Aufteilung in inhaltlich zusammenhängende Intervalle, oder Signalerkennung, d. h. Zerlegung in einzelne Signale. Fragen, die aufgrund der Zeitreiheneigenschaft auftreten, sind u. a., was Auffälligkeiten oder Regelmäßigkeiten in einem oder mehreren Strömen von Energiezustandsdaten eigentlich sind, wie sich derartige Daten sinnvollerweise speichern bzw. komprimieren lassen, angepasst an nachfolgende konkrete Anfragen, oder wie sie sich zwecks Anonymisierung verfälschen lassen. Die letzte Frage ist schwierig, weil neue Datenobjekte ein Individuum unverwechselbar machen können, und Anonymisierung stückweise i. Allg. nicht funktioniert. Ein sehr einfaches Beispiel für energie-spezifische Besonderheiten, die berücksichtigt werden sollten – und die genaue Art der Berücksichtigung ist unklar – ist, dass eine Stromspitze beim Einschalten eines Geräts keine Auffälligkeit ist und Anwendern nicht als solche präsentiert werden sollte. Ein weiteres Beispiel ist, dass Energieverbrauchsdaten auf unterschiedlichen Granularitätsebenen (täglich, wöchentlich, jährlich) oft periodisches Verhalten aufweisen. Im Kolleg würde die Beantwortung derartiger Fragen anhand von Daten aus dem EnergyLab 2.0 oder dem KIT Smart Home in Zusammenarbeit von Informatikern, Ingenieuren, Ökonomen und Juristen erfolgen.

Energiezustandsdaten sind in vielfältiger Weise Basis für Planung und Steuerung. Dass Energiezustandsdaten Grundlage für Planung und Steuerung sein können, gilt für das gesamte Spektrum möglicher Betrachtungszeiträume, von Steuerung im Millisekundenbereich bis hin zu mehrjähriger Planung z. B. im Anlagenbau. Die Art der Nutzung von Energiezustandsdaten ist speziell und ist ein wichtiger Forschungsgegenstand dieses Kollegs.

Forschungsfragen für Graduierte ergeben sich, weil Versorgungssicherheit, Robustheit und Stabilität bei dezentral organisierten Energiesystemen derzeit nicht gewährleistet werden können [arefifar13, chen10, fang12, moslehi10, pochacker13]. Dabei sind Stromnetze mit einem hohen Anteil dezentraler Erzeuger (z. B. Photovoltaik auf der Niederspannungsebene), Erzeuger mit größeren Prognosefehlern (Photovoltaik, Wind), das Management von Stromspeichern und hybride Netze, die aus gekoppelten Strom-, Hochtemperaturdampf-, Heizwärme/Warmwasser- und Gasnetzen bestehen, besonders herausfordernd. Für solche Netze muss beispielsweise die Einbindung in Regelungs- und Optimierungskonzepte entworfen werden. Erste Vorschläge dazu finden sich u. a. in [green13, rehtanz09, lehnhoff11]. Ein mögliches Dissertationsprojekt unseres Kollegs ist der datengestützte Entwurf von Batteriesystemen bzw. ihrer Steuerung. Ein Beispiel für ein kurzfristiges Planungsproblem ist das Be- und Entladen von Batterieelementen unter Berücksichtigung von Batterienutzungsprofilen. Ein weiteres Beispiel ist die Frage, wie sich die Robustheit der Energieversorgung in einem komplexen Szenario wie der Produktion einer chemischen Fabrik à la BASF quantifizieren lässt, die auch über Möglichkeiten lokaler Einspeisung verfügt. Es gibt auch breite ökonomische Nutzungsmöglichkeiten von Energiezustandsdaten, z. B. für die Preisbildung oder für das Zusammenfinden von Bedarfsgemeinschaften. Die Tragweite datengestützter Planungs- und Steuerungsentscheidungen ist erheblich: Wenn beispielsweise die Daten, die einem Übertragungsnetzbetreiber als Nachfrager von Regelenergie als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung stehen, nicht ausreichen, muss er unnötig hohe Reserven vorhalten. Ein anderes Beispiel ist, dass im gegenwärtigen Energiesystem bestimmte Netzteile „blind gefahren werden“, insbesondere auf der Niederspannungsebene. Dies ist bei größeren Prognosefehlern problematisch und kann zu lokalen Ungleichgewichten führen. Im Zusammenhang mit Energie spielen Kontextdaten insbesondere für die Steuerung eine wichtige Rolle. Ein Beispiel sind Wetterdaten zur Schätzung des Angebots lokal

eingespeister Energie in der nahen Zukunft oder Fernsehinformation zur Vorhersage des Energieverbrauchsverhaltens privater Haushalte [jochem15].

Die Erhebung von Energiezustandsdaten unterscheidet sich von der anderer Daten.

Die Möglichkeiten der Erhebung von Energiezustandsdaten sind vielfältig, verglichen mit anderen Szenarien. Energieverbrauch kann beispielsweise direkt gemessen oder anhand beobachtbarer Eigenschaften des Systems geschätzt werden. Messungen oder Schätzungen des Energieverbrauchs können mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung erfolgen. Nicht zuletzt aufgrund dieser unterschiedlichen Erhebungsmöglichkeiten sind Energiezustandsdaten i. Allg. heterogen. Ihre Speicherung und die Auswertung von Anfragen auf solchen Daten sowie die Sicherstellung ihrer Konsistenz, dass beispielsweise das Ganze stets die Summe der Teile ist, sind allesamt nichttriviale Probleme, die sich daraus ergeben.

Welche Art der Erhebung letztendlich sinnvoll ist, hängt auch entscheidend von der späteren Nutzung der Daten ab. Wenn die Steuerung des Energieverbrauchs eines Systems nur entlang vorhandener Freiheitsgrade wie beispielsweise verschiebbarer Lasten oder nur innerhalb einer kleinen Menge vorgegebener Betriebsmodi möglich ist, muss die Erfassung der Daten nur so ausführlich/ausgefeilt sein, wie es für die Entscheidung zwischen diesen Alternativen erforderlich ist. Allgemeiner formuliert, wenn es in einem Szenario nur bestimmte Informationsbedürfnisse auf Energiezustandsdaten mit bestimmten Qualitätsanforderungen gibt, sollte die Erhebung in Art und Umfang daran angepasst sein. Es gibt darüber hinaus noch weitere Einflussfaktoren, dass nämlich die Erfassung und Analyse von Energieverbrauchsdaten selbst wieder Energie verbraucht und Investitionen in Hardware, z. B. für Smart Meters, erforderlich macht. Wie sich der Erfassungsaufwand zum Einsparpotential in Beziehung setzen lässt, ist eine derzeit weitgehend ungeklärte Frage. All diese Fragen lassen sich im EnergyLab 2.0 gut untersuchen; aufgrund der Realitätsnähe dieser Forschungsplattform rechnen wir mit sehr belastbaren und überzeugenden Ergebnissen. Ein weiterer Aspekt, der die Erhebung von Energiezustandsdaten speziell macht, sind starke gesetzliche Regulierungen und Normungen wie das Energiewirtschaftsgesetz, das Eichrecht und der Datenschutz, die mit Pflichten, z. B. mit Aufbewahrungspflichten, einhergehen. Die Zuordnung gerade erhobener Daten zu einem einzelnen Verbraucher schließlich ist in manchen Fällen keineswegs trivial, beispielsweise im Kontext von Elektromobilität. Die gleichzeitige angemessene Berücksichtigung all dieser Punkte ist ein extrem schwieriges Problem.

Energiezustandsdaten werden in sehr unterschiedlicher zeitlicher Auflösung gemessen und weisen verschiedene Periodizitäten auf. Energiezustandsdaten können sowohl sehr detailliert als auch mit hoher Abstraktion interessant sein. Zwischen den Abstraktionsebenen bestehen natürlich Zusammenhänge – grobe Daten sind eine Zusammenfassung der feinen. Für uns ergeben sich daraus u. a. die folgenden Forschungsfragen: Die Basis der Datenspeicherung (z. B. Zeitreihe vs. Histogramm vs. Wavelets vs. weitere Alternativen) ist derzeit unklar; kann man anhand einer systematischen Betrachtung unterschiedlicher komplexer Anwendungsfälle hier zu neuen Einsichten kommen? Wie könnten integrierte Lösungen für das Datenmanagement über mehrere Ebenen hinweg aussehen? Wie beispielsweise lassen sich die Daten komprimieren, unter Berücksichtigung eines Zugriffsmusters mit unterschiedlich detaillierten Anfragen und der Periodizität der Daten auf mehreren Stufen? Periodizität im Energieverbrauch sowohl in privaten Haushalten als auch in der Industrie kann täglich, wöchentlich und jährlich auftreten. Zu berücksichtigen ist, dass diese Periodizität nicht ganz exakt ist, z. B. weil manche Feiertage jedes Jahr anders liegen. Ein Weg, um personenbezogene Daten wie Energieverbrauchsdaten doch an andere weitergeben oder sie publizieren zu dürfen, besteht darin, sie zu verfälschen; wie kann man dies so tun, dass diese Verfälschungen über mehrere Abstraktionsebenen hinweg konsistent sind? Wie kann die mehrfache Periodizität bei dieser Verfälschung angemessen berücksichtigt werden? Wie lassen sich Prognosen auf unterschiedlichen Granularitätsebenen erstellen, die miteinander konsistent sind? Das Problem der Disaggregation von Energiezustandsdaten schließlich wurde bisher stets auf der Ebene der feinsten zeitlichen Auflösung betrachtet; was ändert sich, wenn man die unterschiedlichen Periodizitäten angemessen berücksichtigt?

Energiezustandsdaten reflektieren die Multimodalität von Energie. Multimodalität im Energiekontext bedeutet, dass es unterschiedliche Arten des Energieverbrauchs gibt, die einander ergänzen bzw. zumindest teilweise ersetzen können. Neben Strom, durchaus in unterschiedlichen Ausprägungen wie lokal eingespeistem vs. extern bezogenem Strom oder regulär bepreistem Strom vs. billigem Nachtstrom, gibt es Gas oder Fern- bzw. Nahwärme, und man kann auch andere Verbrauchsarten wie Wasser oder Kälte in die Betrachtung einbeziehen. Aus Datensicht ist wichtig, dass es zwischen diesen Verbrauchsarten Korrelationen gibt, die im Detail aber unklar und schwer erkennbar bzw. beschreibbar sind. Es steht also die Frage im Raum, wie man diese Korrelationen möglichst gut erkennt, d. h. sowohl zuverlässig als auch mit vertretbarem Rechenaufwand. Insbesondere aufgrund der bereits angesprochenen Datenstromeigenschaft lösen herkömmliche Techniken das Problem nicht in voller Schönheit. Beispielsweise stehen einer naheliegenden Verallgemeinerung statischer Verfahren die Fragen im Weg, welche Zeitfenster oder welche Kombinationen einzelner Datenströme zu betrachten sind. Selbst wenn sich die bis hierhin genannten Fragen gut beantworten lassen sollten, schließen sich weitere Fragen an, u. a. wie sich diese Resultate gut nutzen lassen beispielsweise für Prognosezwecke oder für die bessere Sicherstellung von Privatheit. D. h. hier besteht die Chance, das Zusammenspiel von Daten aus mehreren Quellen unter realistischen Annahmen mit konkreten Nutzungsmöglichkeiten zum Gegenstand der Betrachtung zu machen. Dies anhand von Daten und Szenarien aus dem EnergyLab 2.0, für das BASF-Szenario oder auch anhand von Daten aus dem KIT Smart Home.

Energiezustandsdaten haben i. d. R. einen Orts- und Zeitbezug. Dass Energiezustandsdaten einen Ortsbezug haben, bedeutet, dass ein Ort existiert und bekannt ist, an dem sie generiert wurden, und die Berücksichtigung dieser zusätzlichen Information ermöglicht i. Allg. neue Einsichten. Der Ortsbezug ist darstellbar beispielsweise in Form von Geokoordinaten oder von Positionen in einem Graphen (der beispielsweise ein Energienetz repräsentiert). Dieser Ortsbezug ist relevant für unterschiedliche inhaltliche Ziele dieses GRKs, beispielsweise Robustheit der Versorgung oder die Steuerung von Batterieelementen. Zu den Forschungsfragen gehört u. a. die Verallgemeinerung von Konzepten räumlich-zeitlicher Anfragen auf Netze. Beispiele für derartige Anfragen im Energiekontext sind:

- Wo hat sich der Energieverbrauch in den letzten fünf Minuten erheblich erhöht?
- In welchen Verteilnetzen laden zu welcher Stunde verstärkt Elektrofahrzeuge?

Der Ortsbezug ist schließlich auch ein Aspekt, der bei der Ermittlung von Korrelationen in Energieverbrauchsdaten (vorangegangener Punkt) wichtig ist.

Es ist unklar, welche Informationen sich in Energiezustandsdaten manifestieren. Diese Eigenschaft von Energiezustandsdaten ist schwer formalisierbar und lässt sich am besten anhand einer vergleichenden Betrachtung erklären. Für beispielsweise Bewegungsprofile ist – im Gegensatz zu Energiezustandsdaten – die Bedeutung der Daten für betroffene Personen relativ gut erkennbar bzw. vermittelbar; Aussagen der Form „A war an Ort X.“, „B war zu bestimmter Zeit an Ort Y.“ oder „C ist regelmäßig am Ort Z.“ sind intuitiv klar. Entsprechend sind Informationsbedürfnisse auf solchen Daten vergleichsweise einfach formulierbar und auswertbar. Für Energiezustandsdaten hingegen ist relativ unklar, welche Informationen überhaupt in den Daten enthalten sind bzw. mit Hintergrundwissen eines Angreifer daraus ableitbar sind. Dies wäre aber eine Voraussetzung für wirksame Privatheitsmaßnahmen. Jene Eigenschaft von Energiezustandsdaten macht die Bewertung der Angemessenheit von Datenschutzverfahren schwierig. Wünschenswert wäre eine Klassifikation der Informationen in Daten gemäß des Risikos für den oder die jeweils Betroffenen. Interessante Fragen sind jetzt, wie man zu einer sinnvollen Einschätzung dieses Risikos kommt, und wie man es darstellt und angemessen berücksichtigt. Eine juristische Betrachtung muss stets anhand eines oder mehrerer sehr konkreter Kontexte erfolgen. Für wohldefinierte energiewirtschaftliche Szenarien, die diesem Kolleg zugrunde liegen, sind diese gegeben.

Energiezustandsdaten sind i. d. R. unscharf. Daten sind unscharf, wenn sie ungenau oder unsicher sind. ‚Ungenau‘ wiederum bedeutet, dass die Daten nicht elementare Ereignisse

beschreiben, und es sich vielmehr um aggregierte Werte handelt (und man die Werte, die Elementarereignissen entsprechen, bestenfalls schätzen kann). Unsicher sind Daten dann, wenn es sich nicht um exakte Werte handelt, sondern um Wahrscheinlichkeitsverteilungen über Wertebereiche. Energiezustandsdaten sind ungenau, weil sie i. Allg. mehrere Verbräuche, z. B. von unterschiedlichen Geräten, zusammengefasst beschreiben. Sie sind unsicher, weil verschiedene Erhebungsmethoden unterschiedlichen Aufwands existieren, die Resultate unterschiedlicher Qualität generieren, i. d. R. aber nicht exakte Werte. Beispielsweise erfassen Gaszähler i. d. R. das verbrauchte Volumen, nicht aber den Energiegehalt, der aber Grundlage der Abrechnung ist. Wesentliche Probleme, die Informatiker nur gemeinsam mit Wissenschaftlern anderer Disziplinen angehen können, sind die Modellierung dieser Unsicherheit und die Quantifizierung ebendieser Unsicherheit und der Korrelationen der Daten. S. b. das mögliche Dissertationsthema CHARAKTERIS in Abschnitt 3.7.6. Aus Informatiksicht sind darauf aufbauend die Fragen interessant, inwieweit existierende Indextierungs- und Datenanalysemethoden für diese Daten geeignet sind, bzw. wie gute Weiterentwicklungen aussehen könnten. Beispielsweise gibt es unseres Wissens noch keine Disaggregationsmethode für unscharfe Daten.

Energiezustandsdaten haben oft einen Personenbezug. Daten sind personenbezogen, wenn sie eindeutig einer bestimmten natürlichen Person zugeordnet sind, oder wenn diese Zuordnung anhand identifizierender Besonderheiten im Datenbestand mittelbar erfolgen kann. Für bestimmte Energiezustandsdaten (z. B. Verbräuche privater Haushalte) gilt die erste Eigenschaft offensichtlich. Auch die zweite Eigenschaft gilt, denn man kann Daten anhand weniger Merkmale leicht den entsprechenden Personen zuordnen und weitere Merkmale bestimmen [buchmann13a]. Der aktuelle Stand der Forschung ist beispielsweise, anhand der Energieverbrauchsdaten zu sagen, welches Fernsehprogramm ein Haushalt gerade konsumiert. Die allgemeine Forschungsfrage ist deshalb, wie Energiezustandsdaten vor der Weitergabe/vor dem Publizieren verfälscht werden sollten. Für die Verfälschung von Energieverbrauchsdaten ist wichtig, dass es nicht nur darum geht, einzelne Verbrauchswerte zu ‚verstecken‘, sondern Daten so zu verfälschen, dass bestimmte Muster in den Daten, die für ein bestimmtes Gerät oder ein bestimmtes Verhalten typisch sind, nicht mehr auffällig sind. Auf einer anderen Ebene ist wichtig, dass sich in unserem Kolleg ganzheitlichere Antworten auf die Frage nach der geeigneten Verfälschung finden lassen. Dies ist u. a. der Fall, weil Energiespeicher, die Lastverlagerung und damit die Verfälschung des tatsächlichen Bedarfs ermöglichen, Gegenstand der Betrachtung sein werden, und weil Informatiker zusammen mit Ökonomen ausgefeilte Wirtschaftlichkeitsüberlegungen durchführen können.

3.3 Methodische Ebene

Betreuung und Anleitung von Graduierten, die in ihrer Ausbildung Forschungsfragen wie die oben genannten bearbeiten werden, macht Zusammenarbeit zwischen Informatikern, Ingenieuren, Ökonomen und Juristen erforderlich. Dieses GRK ist deshalb interdisziplinär – Antragsteller kommen aus den Fakultäten Informatik (zu der auch das Zentrum für Angewandte Rechtswissenschaft gehört), Elektrotechnik und Informationstechnik und Wirtschaftswissenschaften. Zwar haben wir bereits die Notwendigkeit dieser Zusammenarbeit betont und inhaltlich begründet. Im Folgenden beschreiben wir hingegen unterschiedliche Arten der Zusammenarbeit (denen dann durchaus mehrere mögliche Dissertationsthemen entsprechen) und sich daraus ergebende Synergien, wie folgt. Die Bezeichnungen in Klammern verwenden wir im Folgenden u. a. in einer Abbildung.

- Planung und Steuerung auf Grundlage unscharfer Daten (Datenqualität).
- Durchdringung von Energieszenarien mit Datenanalysemethoden (Datenanalyse).
- Wirklichkeitstreue Modellierung von Energieszenarien (Modellierung).

Planung und Steuerung auf Grundlage unscharfer Daten. Planungs- und Steuerungsentscheidungen im Kontext von Energie sind vielfältig. Zum einen kann es um die Verteilung von Energie gehen, zum anderen um die Zuordnung eines beliebigen Guts (z. B. Ladekapazität) unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs. Die Evaluation eines Algorithmus oder eines ökonomischen Mechanismus zum Fällen solcher Entscheidungen erfolgt bisher i. d. R.

mit möglichst ‚guten‘, realistischen Daten. Es gilt: Je genauer und realistischer die Daten, desto besser bzw. aussagekräftiger sind die Experimente. Energiezustandsdaten sind i. Allg. aber von unterschiedlicher Qualität, z. B. weil ihre Erfassung mit mehr oder weniger Aufwand erfolgt ist. Derzeit gibt es für viele Energiesysteme keine Festlegung/Vereinheitlichung der Konzepte zur Datenerhebung. Eine Erfassungsinfrastruktur kann die Datenqualität innerhalb gewisser Grenzen festlegen. Man kann die Qualität der Daten auch reduzieren, indem man sie aus Datenschutzgründen verfälscht. Dies führt zur weitgehend neuen Forschungsfrage, wie gut jene Entscheidungen abhängig von der Qualität der zugrunde liegenden Daten sein können. Uns geht es um Entscheidungen möglichst realistischer Komplexität. Die Frage ist wichtig, weil Entscheidungen in Energiesystemen sicherheitskritisch oder zumindest von erheblicher wirtschaftlicher Tragweite sein können, beispielsweise im Fall großer Industrieanlagen à la BASF; eine reduzierte Datenqualität, die falsche Entscheidungen nach sich zieht, muss vermieden werden. Aufwand bei der Erfassung, der nicht zu besseren Entscheidungen führt, aber auch. Eine erste interdisziplinäre Vorarbeit der Antragsteller mit diesem Vorgehen betrachtet Energieauktionen [buchmann13]. Die Anwendungsmöglichkeiten sind jedoch viel breiter; weitere Beispiele von vielen sind der datengestützte Entwurf von Batteriesteuerungen oder das Dissertationsthema LEICHTGEWICHTIG. Derartige Zusammenarbeit zwischen Graduierten unterschiedlicher Disziplinen wird dazu führen, dass die Weiterentwicklung von Modellen und Systemen so weniger aufwendig ist, und dass sich neue Forschungsfragen ergeben. Neben der Frage, wie sich Abstufungen in der Datenqualität explizit vornehmen lassen, steht auch im Raum, wie sich Datenqualität möglichst allgemein beschreiben lässt.

Durchdringung von Energieszenarien mit Datenanalysemethoden. Methoden der Datenanalyse haben sich in den letzten Jahren zum einen dahingehend weiterentwickelt, dass sie hinsichtlich der Datenverteilung auffällige Teilräume sowie Ausreißer und Cluster zuverlässig finden (Subspace Search bzw. Subspace-Outlier Detection und Subspace Clustering) [keller12]. Eine andere neuere Errungenschaft sind Constraint-Repair Techniken [glavic11]. Sie gestatten Aussagen dazu, ob sich ein Datenbestand eher durch die Korrektur einzelner Datenobjekte oder eine Anpassung des zugrunde liegenden Schemas verbessern lässt. Derartige Methoden können jetzt verwendet werden, um Folgendes herauszufinden:

- An welchen Stellen besteht besonderer Bedarf, ein (White Box-)Modell eines Energiesystems zu verfeinern? Dabei geht es um Modelle, die Experten mit ihrem Domänenwissen explizit erstellt haben. Die Schwachpunkte eines solchen Modells lassen sich erkennen, indem man die Vorhersagen des Modells mit Daten, die das tatsächliche Systemverhalten beschreiben, mit o. g. Methoden vergleicht und nach Auffälligkeiten in diesem Differenz-Datenbestand sucht. Geeignete Methoden werden diese auf der richtigen Abstraktionsebene zurückgeben.
- Auf welcher Ebene sollte die Anpassung eines Modells erfolgen? Sollten eher Parametereinstellungen überprüft werden, oder sollte das Modell angepasst werden?
- Wie kann im Energiebereich außerdem eine kompakte, automatisierte Anpassung von White Box Modellen durch Identifizieren von Auffälligkeiten auf der richtigen Abstraktionsebene erfolgen? D. h. kann das Tuning dieser Modelle Black-Box mäßig datengetrieben erfolgen (sofern genügend einschlägige Daten vorliegen) und damit einen Grey Box Charakter erhalten?

Informatikmethoden können also helfen, die wissenschaftliche Arbeit der Ingenieure oder Ökonomen zu steuern. Gemeint ist, dass sie helfen können, Schwachpunkte in bestehenden Modellen systematisch und auf der richtigen Abstraktionsebene zu erkennen. Es wird außerdem grundsätzlich möglich sein, größenordnungsmäßig mehr Experimente durchzuführen, weil ihre Auswertung mit Hilfe von Datenanalysemethoden teilweise automatisiert erfolgen kann. Da Hypothesen jetzt mit tendenziell weniger Aufwand verifizierbar sind, sind kaum Restriktionen bei der Auswahl der Hypothesen erforderlich, die dann betrachtet werden.

In Abschnitt 3.7 beschriebene mögliche Dissertationsthemen SKALNETZ und ROBUST sehen diese Art der interdisziplinären Zusammenarbeit vor, zumindest teilweise. Die daran be-

teiligten Graduierten profitieren nicht nur, weil sie das vorliegende energiespezifische Problem ganz oder teilweise lösen können. Die Erwartung ist auch, dass sie durch die Verwendung für sie neuer Methoden bzw. der Mitarbeit an ihrer Weiterentwicklung auch andere Forschungsfragen in Zukunft besser und effizienter beantworten können. Außerdem ist diese Art der Zusammenarbeit lohnenswert, weil sich so Möglichkeiten erkennen lassen, Datenanalysemethoden weiterzuentwickeln und diese dann zu evaluieren. Das Dissertationsthema KONTRAST zielt auf die Entwicklung einer Datenanalysemethode, die auch für die bis hierhin beschriebene Herangehensweise nützlich ist (Identifizieren von Auffälligkeiten auf der richtigen Abstraktionsebene). Schließlich hoffen wir auch, dass diese Art der Zusammenarbeit auch Hinweise zur Beantwortung sehr grundlegender Forschungsfragen geben kann, nämlich welche Kriterien für die Aufteilung eines Modells in einen Black Box- und einen White Box-Anteil wichtig sind, und welche Möglichkeiten der Bewertung es gibt.

Wirklichkeitstreue Modellierung von Energieszenarien. Mögliche Gründe dafür, einen Weltausschnitt formal zu beschreiben, sind vielfältig. Sicherstellung von Privatheit oder (obwohl derzeit von uns nicht konkret angedacht) Systemunterstützung für Abläufe sind derartige Gründe. Viele Forschungsergebnisse aus der Vergangenheit im Bereich Datenschutz/Privatheit sind anwendungsunabhängig; oft ist es transparent, um welche Domäne es sich handelt, und um welche Daten es geht. Ansätze, die anwendungsspezifisch konfigurierbar sind, sind tendenziell eher neu. Ein prominentes Beispiel ist Pufferfish [kifer12], das im Dissertationsthema VORWISSEN zentral ist. Veröffentlichungen solcher Ansätze beschränken sich oft naturgemäß auf einfache Beispiele. Allerdings ist es manchmal schon unklar, inwieweit Vereinfachungen den Erfordernissen der Wirklichkeit standhalten. Bestehende Möglichkeiten, beispielsweise Hintergrundwissen eines Angreifers oder Privatheitsbedürfnisse von Betroffenen adäquat darzustellen, reichen nicht immer aus: Darstellbares Hintergrundwissen bzw. darstellbare Privatheitsbedürfnisse haben oft nur eine einfache Struktur, die fest vorgegeben ist. Bestehende Ansätze sind auch oft nicht darauf angelegt, große Datenbestände beispielsweise an Hintergrundwissen zu berücksichtigen. In diesem GRK besteht aufgrund des institutionalisierten Austausches zwischen Wissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen hingegen die Möglichkeit, komplexe Energieszenarien in einer Ausführlichkeit und Wirklichkeitstreue zu modellieren, die deutlich über Bestehendes hinausgehen. Dabei sollen, verkürzt gesagt, Domänenexperten die relevanten Sachverhalte identifizieren und Informatiker sie beschreiben. Neben dem recht naheliegenden Ziel, zu wirksameren Privatheitsmechanismen zu kommen, erhoffen wir uns ein grundlegenderes Verständnis des Datenaustauschs in Energiesystemen. Wir versprechen uns auch Einsichten, wie einschlägige Ansätze ggf. weiterentwickelt werden sollen, damit die zugrunde liegenden Sachverhalte sich angemessen darstellen und mit vertretbarem Aufwand modellieren lassen.

Die möglichen Dissertationsthemen, die wir in Abschnitt 3.7 beschreiben, lassen sich zweidimensional anordnen: Die erste Dimension entspricht den Phasen des Lebenszyklus von Energiezustandsdaten, die zweite den methodischen Herangehensweisen:

Datenqualität	DEPERSONALIS		FLEXIB SW-ARCH
Datenanalyse	LEICHTGEWICHTIG	KONTRAST CHARAKTERIS	ROBUST SKALNETZ BATTERIEN
Modellierung	FORSCHDATEN	VORWISSEN	
	Erfassung	Analyse	Nutzung

3.7 Dissertationsprojekte

In diesem Abschnitt beschreiben wir fünf Dissertationsthemen ausführlicher, sechs Themen kürzer. Die Abbildung zu Beginn von Abschnitt 3 ist eine Übersicht. Sie verwendet Abkürzungen der Titel der Themen, die der folgende Text jeweils einführt. Themen, die zu mehreren Zellen passen, haben wir nur einer Zelle explizit zugeordnet, damit die Abbildung übersichtlich bleibt. Erst- und Zweitbetreuer jedes Themas werden Antragsteller sein – Ausnahmen bespricht die Gruppe der Betreuer vorab intern. Wichtig ist uns, dass diese Themen nur Beispiele für mögliche Themen sind, die wir uns in diesem Kolleg vorstellen können; wir haben Ideen für weitere sinnvolle Themen, die sehr gut hierher passen.

3.7.1 Auslegungsmethoden für teilautarke Energieversorgungssysteme mit volatilen erneuerbaren Energiequellen und Li-Ion Speichern für produzierende Betriebe (BATTERIEN; Weber, Jochem)

Elektrische Energie aus Photovoltaikanlagen ist stark volatil. Wetter, Tages- und Jahreszeit, Ausrichtung und Alter der Anlage bestimmen ihren Ertrag. Derartigen nur begrenzt vorher-sagbaren Erzeugerleistungen stehen schwankende und stark individuell geprägte Verbraucherlasten gegenüber. Für einen autarken Inselbetrieb und eine verbesserte Netzstabilität sind effiziente elektronische Energieflusssteuerungssysteme und zuverlässige, langlebige Batteriespeicher mit hoher Energie- und Leistungsdichte erforderlich. Li-Ion Speicher erfüllen die Anforderungen an Speicher heute am besten. Sie müssen jedoch aufgrund des hohen Gefährdungspotenzials infolge der chemischen Energiedichte aufwendig überwacht und betrieben werden. Gerade die Betriebsstrategie der Batterie beeinflusst aber ihr Alterungsverhalten und ihre langfristige Nutzbarkeit maßgeblich. Die Frage des optimalen Betriebs betrifft auch vorgealterte Li-Ion Batterien aus Elektrofahrzeugen („Second Life Batteries“) für die Verwendung in stationären Speichersystemen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Methoden für die Auslegung einer Energieversorgungsanlage mit PV-Generatoren und Li-Ionen Batteriesystemen für den teilautarken Inselbetrieb gewerblicher Produktionsstätten. Dabei sind Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Kosten der Energieversorgung wesentliche Optimierungskriterien. Im speziellen sind diese Methoden auf stabile und planbare Produktionsprozesse der exemplarisch gewählten Elektronik-Produktionsstätte mit einem Jahresenergiebedarf von 150.000 kWh hin auszurichten. Die Methoden sollen auf der Datenbasis einer in Hardware realisierten Kleinanlage entwickelt werden. Sie besteht aus einem 14 kWh Batteriespeicher, einer beliebig ausrichtbaren 5 kW PV-Anlage und der umfassend instrumentierten und verbraucherseitig steuerbaren Elektronikfertigung. Dieses System wird in ein ‚Hardware In the Loop‘-Simulationsmodell überführt, das für die Optimierung der hardwaretechnischen Anlagenauslegung und der Betriebsstrategie genutzt werden soll. Das Modell berücksichtigt unter anderem Aspekte der Energieflusssteuerung, des Alterungsverhaltens verschiedener Batteriemodule sowie Art, Zahl und Abfragefrequenz der Messensoren. Daneben wollen wir aus dem experimentellen Aufbau ein grundlegendes Verständnis des Verhaltens vorgealterter Batterien aus elektromobilen Anwendungen in stationären Anwendungen gewinnen. Daraus wollen wir dann neue Batterieaufbaukonzepte und Strategien für den langfristigen Betrieb in stationären Speichern ableiten.

Bei einer Bearbeitung dieses Themas im Kolleg profitieren hardwareorientierte Elektrotechniker von Datenanalysemethoden. Andererseits steht dem Kolleg ein Datenerfassungs- und Simulationsumfeld zur Verfügung, um beispielsweise in weiteren Arbeiten basierend auf

grundlegenden Erkenntnissen, was Interaktionen zwischen verschiedenen Demand-Side-Management Szenarien und dem Produktionsprozess angeht, Konzepte für den Betrieb von Produktionsstätten bei fluktuierender elektrischer Versorgung abzuleiten und zu validieren.

Derzeit kann auf die Daten von vier Li-Ion Speichersystemen zurückgegriffen werden. Sie sind sowohl an PV-Anlagen als auch an das Netz angeschlossen [blank15, weber15a, weber14, weber15]. Die Systeme stehen an verschiedenen Orten (Ulm, KIT, Griechenland). Alle Systemdaten sind transparent und stehen dem Kolleg zur Verfügung, da Institutsmitarbeiter die Datenerfassung entwickelt haben und betreiben [chilingaryan10, stotzka11].

3.7.2 Erfassung und Depersonalisierung von Energieverbrauchsdaten (DEPERSONALIS; Böhm, Müller-Quade)

Betrachtungsgegenstand dieses Themas ist eine Infrastruktur zur feingranularen Erfassung des Energieverbrauchs. Ihren Kern bilden beispielsweise Smart Meter oder Software, die den Stromverbrauch von beispielsweise Rechnern anhand von Zustandsinformationen wie CPU-Last oder IO-Intensität schätzt [fan07, rivoire08]. Die Infrastruktur sammelt derartige Verbrauchsdaten, um Auswertungen zu ermöglichen, z. B. welche Organisationseinheit verbraucht wie viel Energie, wann genau wird wie viel Energie verbraucht usw. Feingranulare Energieverbrauchsdaten sind i. d. R. personenbezogen. Solche Daten dürfen nicht ohne weiteres weitergegeben oder veröffentlicht werden – obwohl dies Innovationen im Energiebereich befördern würde [european11]. Das übliche Vorgehen, um derartige Daten doch zu veröffentlichen, besteht darin, sie vor dem Veröffentlichen zu verfälschen. Verfälschungen können sein, dass man Energieverbrauch in der Zeit verschiebt oder verbrauchte Energie einer Person einer anderen Person zuschreibt [estivill99]. Die Datenqualität nach der Verfälschung soll möglichst hoch sein, d. h. die Verfälschung an sich soll möglichst geringfügig sein, und man soll den Daten selbst keine privaten Informationen einzelner Personen entnehmen können. Dabei muss zwischen der Privatheit und dem Grad der Veränderung abgewogen werden [li09]. Energieverbrauchsdaten sind aus folgenden Gründen speziell, was derartige Verfälschungen angeht: Zum einen müssen verfälschte Daten Randbedingungen genügen. Eine Randbedingung könnte sein, dass die Verfälschungen beispielsweise den Gesamtenergieverbrauch unverändert lassen sollen. Zum anderen ist hier die Konsistenz der verfälschten Daten wichtig: Wenn eine Verfälschung z. B. den Energieverbrauch von Mitarbeiter A verändert, der Gesamtenergieverbrauch aber nicht verändert werden darf, muss auch der Verbrauch von Mitarbeiter B oder C verfälscht werden. In Data Warehousing Szenarien, in denen der Benutzer bequem zwischen unterschiedlichen Sichten auf den Datenbestand wechseln kann, ist diese Art der Konsistenz unerlässlich [zhuge95]. Dies führt zu folgenden Forschungsfragen: (a) Wie können Sprachen zur Spezifikation jener Randbedingungen aussehen? Im Dissertationsprojekt soll eine solche Sprache beispielhaft entwickelt werden. Sie soll sich an tatsächlichen Analysebedürfnissen orientieren, die sich aus anderen Dissertationen dieses Kollegs ergeben. (b) Was genau bedeutet ‚möglichst geringfügig‘ im o. g. Sinn in einem Szenario, in dem mehrere Sichten auf einmal verfälscht werden? (c) Wie findet man in unserem Szenario möglichst geringfügige konsistente Verfälschungen? Synergien mit anderen Dissertationsthemen sind u. a. die folgenden: Da Doktoranden mit realen Energieverbrauchsdaten arbeiten, müssen wir uns auch um eine datenschutzkonforme Erfassung dieser Daten kümmern. Die hier beschriebene Forschung ermöglicht auch Betrachtungen zur Nützlichkeit von zum Zweck der Anonymisierung verfälschten Energieverbrauchsdaten in anderen Dissertationsprojekten, fällt also in die Kategorie ‚Datenqualität‘. Umgekehrt werden diese anderen Projekte helfen, hier zu realistischen Randbedingungen im o. g. Sinn zu kommen. Das hier vorgeschlagene Thema ist jedoch nicht ‚existenzabhängig‘ von diesen Projekten: Schlimmstenfalls würde der Bearbeiter sich an selbst entwickelten Informationsbedürfnissen oder solchen aus anderen Energieprojekten orientieren.

3.7.3 Verfügbarkeit und Zugang zu personalisierbaren Forschungsdaten in Energieinformationsnetzen (FORSCHDATEN; Raabe, Jochem)

Die vorhandenen gesetzlichen Regelungen zum Datenschutz beim Umgang mit Forschungsdaten führen wegen des absoluten Gebotes einer frühzeitigen Anonymisierung der Daten aus § 40 BDSG regelmäßig dazu, dass die gewonnenen Ergebnisse, beispielsweise aus experimentellen Smart Homes, bei Längsschnittbeobachtungen nicht hinreichend verfügbar sind. Das Fehlen eines Datenschutz-Managements führt oftmals zu Doppelerhebungen von Energiezustandsdaten. Diese widersprechen dem Gebot der Datensparsamkeit. Auch die ungenügende Ausgestaltung des Einwilligungsvorbehaltes (Einwilligung in unbekannte Forschungszwecke) macht die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse auf Basis der Originaldaten unmöglich. Das bestehende gesetzliche Schutzkonzept wird also der Personenbezogenheit von Forschungsdaten zum Energiezustand nicht gerecht.

Der Ausgangspunkt der in dem Dissertationsprojekt thesisch zu entwickelnden Rechtsnormen ist die Neubestimmung des Ausgleichs der Sicherung der grundrechtlich geschützten informationellen Selbstbestimmung und der ebenfalls grundrechtlich gesicherten Forschungsfreiheit. Für die rechtswissenschaftliche Begutachtung bedarf es stets eines Referenzszenarios. Hierfür sind die im GRK angestrebten Untersuchungen von Energiezustandsdaten ideal: Das für die Subsumtion erforderliche Sachverhaltsmodell des zu untersuchenden Weltausschnitts bietet in der Differenzierung der Verwendungszwecke, beispielsweise Simulationsdaten, elektrotechnische Analysen oder Verwendung für die organisationsinterne Steigerung der Energieeffizienz, das Spektrum der Sachverhalte ab, die in einer gutachterlichen Bewertung zum Umgang mit personalisierten Forschungsdaten zu leisten ist.

Im Hinblick auf die thesisch behaupteten Schwachstellen des geltenden Rechtsrahmens sind dann insbesondere Aspekte wie die Reichweite des Forschungsprivilegs aus § 40 BDSG bzw. §35 LDSG-BW zu betrachten. Das Verhältnis zu spezialgesetzlichen Regelungen wie beispielsweise von Landesarchivgesetzen ist einzubeziehen. Ein Schwerpunkt wird die bislang regelmäßig praktizierte Einwilligungslösung sein, wie sie im Smart Home des KIT nutzerbezogen praktiziert wird. Es ist zu untersuchen, ob die bestehende gesetzliche Ausgestaltung den Besonderheiten der Forschung gerecht wird. So können die geforderten umfangreichen Informationspflichten zu einer Verzerrung des Nutzerverhaltens führen. Ferner ist unklar, wie der Betroffene überhaupt wirksam in unbekannte Forschungszwecke einwilligen kann. Außerdem ist zusammen mit der Informatik zu untersuchen, ob ein rechtswissenschaftliches Begriffsverständnis entwickelt werden kann, das z. B. das Rechnen auf verfälschten Daten für die Erfordernisse der Anonymisierung aus § 40 BDSG hinreichen lässt.

Schließlich sind die grundrechtlichen Grenzen und der Ausgleich zwischen informationeller Selbstbestimmung und Forschungsfreiheit zu konkretisieren. Die in der einen uns bekannten engen Vorarbeit [berliner02] angesprochenen Konzepte für die Etablierung einer Datentreuhänderschaft sind Ausgangspunkt für das eigene Konzept. In diesem Zusammenhang werden wir zudem an Hippokratische Datenbanken [agrawal02] anknüpfen, da datenschutzrechtliche Grundprinzipien hier schon eine technische Sicherung erfahren. Weitere spezifisch einschlägige Arbeiten außer einer zu rechtlichen Problemen der elektronischen Langzeitarchivierung wissenschaftlicher Primärdaten [hillegeist12] sehen wir nicht.

3.7.4 Analyse von Energiedaten auf verschiedenen Granularitätsebenen (KONTRAST; Böhm, Rutter)

Energiedaten werden auf unterschiedlichen Granularitätsebenen erhoben und lassen sich mit Disaggregation feiner auflösen [chen11]. Weil Energiedaten diese Eigenschaft haben, ist es erforderlich, neue Datenanalysemethoden zu entwickeln, die aggregierte Werte auf ihren Informationsgehalt hin bewerten. Während fein aufgelöste Daten in Millisekunden möglicherweise Rückschlüsse bezüglich der Schaltzeiten eines Gerätes ermöglichen, lassen sich mit dieser Auflösung aus Energieverbrauchsdaten ganzer Gebäude nur eher wenige sinnvolle Erkenntnisse gewinnen. Unerwartete Muster wie Ausreißer oder Gruppen ähnlicher Messwerte lassen sich nur finden, wenn die Daten signifikant vom erwarteten Verhalten ab-

weichen und damit unbekannte Strukturen aufzeigen. Betrachtet man z. B. die Granularitätsebene ‚Fakultäten‘ in ‚Monatsauflösung‘, so erkennt man einen klaren Kontrast zwischen unterschiedlichen Nutzungsprofilen (Gruppen von Verbrauchern) im Sommer und Winter und einzelnen Ausreißern. Eine Gruppe von Verbrauchern (Informatikgebäude) hat z. B. hohen Energieverbrauch für Kühlung im Sommer, während eine andere Gruppe (Biologiegebäude) im Winter einen hohen Wärmebedarf für Gewächshäuser hat. Nur auf einer Granularitätsebene mit einem solchen Kontrast zwischen ähnlichen und unähnlichen Verbrauchern kann ein Algorithmus auffällige Verbraucher erkennen. Forschungsziele sind die formale Definition und die effiziente Berechnung von Kontrastmaßen anhand der Datenverteilung. Dies ist für unterschiedliche Granularitätsebenen, aber auch für den übergreifenden Vergleich des Informationsgehaltes unterschiedlicher Ebenen noch unerforscht. In eigenen Vorarbeiten zur Ausreißererkennung haben wir uns schon mit Kontrastdefinitionen auf statischen Daten beschäftigt [keller12]. Energiedaten bringen aber noch dynamisches Verhalten ins Spiel, insbesondere über die Zeit. Die Zeitreihencharakteristik von Messwerten ist herausfordernd für die Kontrastanalyse im o. g. Sinn. Auch ist pro Dimension (z. B. Ort, Zeit, Verbraucher) noch eine hierarchische Komponente zu betrachten.

Aus technischer Sicht betrachtet man hierarchische Daten bisher nur im Data Warehousing. Die Techniken beschränken sich auf die manuelle Exploration durch den Benutzer. Hierfür stehen OLAP-Techniken zur Verfügung [chaudhuri97]. Sie erlauben es dem Benutzer, manuell eine höhere Aggregationsebene auszuwählen und sich Werte auf dieser Ebene ausgeben zu lassen. Techniken zur automatischen Datenanalyse wurden bisher nur ohne solche Granularitätsebenen entwickelt. In den Bereichen Datenströme und Zeitreihenanalyse existieren Verfahren zur Analyse von Sensordaten [gama08, muenen10]. Diese betrachten jedoch keine Aggregate in beliebigen Dimensionen (Zeit, Ort, Gerät), sondern lediglich die zeitliche Abhängigkeit von rohen Messwerten, d. h. die feinste Zeitebene. Eine automatische Selektion von höheren Aggregaten ist auch hier nicht vorgesehen. Somit lassen sich potentiell interessante Muster auf höheren Ebenen nicht finden. Insgesamt wurde bisher die Nützlichkeit von Daten auf unterschiedlichen Ebenen nicht betrachtet. Während sich auf einer Granularitätsebene Gruppierungen und Ausreißer erkennen lassen, enthalten andere Ebenen keinen solchen Kontrast und sind deshalb nicht nützlich. Unsere Kontrastanalyse quantifiziert die Nützlichkeit einer Granularitätsebene.

3.7.5 Modellierung individueller Nachfrageflexibilität (FLEXIBILITÄT; Weinhardt, Fichtner)

Eine beschleunigte Marktdurchdringung von Smart Metering ermöglicht erstmalig eine zeitlich hochaufgelöste Erfassung und nachfolgende Verarbeitung und Nutzung von Energiezustands- und -flussdaten von einer breiten Grundgesamtheit [ramchurn12]. Diese Analysen können als Grundlage einer systemeffizienten Abrechnung des Konsums elektrischer Energie dienen. Da der Preis zur Bereitstellung elektrischer Energie bereits heute über die Zeit fluktuiert, und dies in der Zukunft durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung zunimmt, kann durch eine „verursachergerechtere“ Zuteilung der Kosten die Gesamteffizienz des Systems gesteigert werden, indem Kunden durch dynamische Tarife Systemengpässe in ihrer Elektrizitätsnachfrage berücksichtigen [schweppe88, faruqui09]. Eine realistische Modellierung zeitlich verschiebbarer Lasten unter Berücksichtigung der Nutzerakzeptanz, die wir als Schlüssel zur Integration erneuerbarer Energien sehen, ist bisher erst in Ansätzen und unter starken Einschränkungen geschehen. Nach derzeitigem Stand der Forschung existiert kein Rahmenwerk für dezentrale Entscheidungen, das die Komplexität des Allokationsproblems annähernd erfasst.

Zentrale Optimierungs- und Entscheidungsansätze erreichen, bezogen auf die soziale Wohlfahrt, zwar optimale Ergebnisse, allerdings berücksichtigen sie Anreize für individuelle Konsumenten nicht hinreichend [nisan07]. In dieser Arbeit soll hierfür ein anreizkompatibler Online-Mechanismus entworfen werden [porter04]. Zur Schätzung von Modellparametern unterschiedlicher Flexibilitätsmodelle sollen Energiezustandsdaten dienen, die wir u. a. im Rahmen dieses Kollegs selbst sammeln. Wie gut sich diese Parameter auf Grundlage weniger

guter Verbrauchsdaten, z. B. weil diese verrauscht wurden, schätzen lassen, ist eine Instanziierung jener übergeordneten Forschungsfrage, die hier auch betrachtet werden soll. Das Ziel des Mechanismus ist die effiziente Allokation flexibler Lasten im Bereich von Forschungseinrichtungen und privaten Haushalten. Individuelle Verhaltensweisen (Konsumenten werden durch Teilnahme am Mechanismus nicht schlechter gestellt als bei Nicht-Teilnahme) und Budget-Balanciertheit (keine Bezuschussung von außen und keine übermäßige Benachteiligung von Nutzergruppen) sind neben der Sicherstellung der gewünschten Privatheit explizit zu erreichende Ziele dieses Ansatzes [nissim12].

In einem solchen System kann es für Marktteilnehmer vorteilhaft sein, sich zu Bedarfsgemeinschaften zusammenzuschließen (mehr Marktmacht, mehr Privatheit) [chalkiadakis11]. Dabei gibt der den Teilnehmer repräsentierende Agent die wahren Präferenzen nur an diese Gemeinschaft weiter, und nur die Bedarfsgemeinschaft nimmt am Marktgeschehen teil. Idealerweise finden sich Teilnehmer mit flexiblem Konsum und jene mit weniger flexiblen Angebot (z. B. Photovoltaik) zu solchen Gemeinschaften zusammen. Größe und Volatilität der Zusammensetzung von Bedarfsgemeinschaften ergeben sich aus empirisch zu bestimmenden Wertschätzungen für Privatheit und angenommener Entscheidungsträgheit einzelner Teilnehmer sowie durch die lokale Netzstruktur. Als Vorarbeit für Bedarfsgemeinschaften ist der Entwurf einer Sprache notwendig, die den Konsumenten erlaubt, ihr Flexibilitätspotential zu beschreiben. Neben der ökonomischen Betrachtung des Allokationsproblems unter opportunistischen Agenten ist zusätzlich die Dimension ‚Mensch‘ zu berücksichtigen. Um festzustellen, unter welchem Mechanismus und unter welcher Nutzerschnittstelle Menschen bereit sind, in einem solchen Kontext ihre Präferenzen zu offenbaren und damit einen Teil ihrer Privatheit aufzugeben, bieten sich methodisch sozio-ökonomische Labor- und Feldexperimente an [paetz12a, hillemacher13]. Darüber hinaus können Onlinebefragungen oder Befragungen in einem Experimentallabor durchgeführt werden.

Die Wirtschaftswissenschaften im Allgemeinen profitieren von dieser Forschung dahingehend, dass die Modellierung von Nachfrageflexibilität einen realistischen und gleichzeitig handhabbaren Modellrahmen zur Bewertung von Konsumentenflexibilität schafft. Er kann als Grundlage für weitere Arbeiten in anderen Disziplinen, aber auch in den Wirtschaftswissenschaften dienen. Die empirische Wirtschaftsforschung profitiert von der Möglichkeit, Abweichungen der tatsächlichen von der vorhergesagten Beteiligung der Nutzer zu messen und die dafür verantwortlichen Einflussfaktoren zu identifizieren sowie entsprechende Mechanismen zur Effizienzsteigerung des Systems zu entwickeln. Generell ist Wissen über den Wert von Nachfrageflexibilität Grundlage ökonomischer Mechanismen, die zwischen Privatheit/Anonymität einerseits und der Nutzung von Effizienzpotenzialen basierend auf feingranularer Konsumenteninformation andererseits moderieren.

3.7.6 Weitere mögliche Dissertationsthemen

Im Folgenden beschreiben wir kurz weitere mögliche Dissertationsthemen.

Nachbildung elektrischer Energienetze mittels skaliertener Modelle und Netzzustandsdaten (SKALNETZ; Noe, Hagenmeyer). Bisher wird zukünftiger Netzausbau in simulierten Netzmodellen geplant, und neue Technologien werden in aufwendigen Leistungs- und Feldtests schrittweise eingeführt. Eine Untersuchung des stationären und transienten Verhaltens neuer Betriebsmittel in Energienetzen ist daher zunächst nur durch geeignete Simulationsmodelle möglich. Mit dem Einsatz von Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Testständen in Verbindung mit Echtzeitsimulation ist es möglich, neue Betriebsmittel wie z. B. Transformatoren, Generatoren und Leitungen in eine Simulationsumgebung zu integrieren und das Verhalten direkt zu untersuchen. Weiterhin ermöglicht dies die Untersuchung und Bewertung neuer Netzstrukturen und Regelalgorithmen. In einem am ITEP bereits aufgebauten PHIL Teststand soll ein Doktorand in einem ersten Schritt skalierte Netzkomponenten entwickeln. Hierbei handelt es sich um maßstäbliche Hardware-Nachbildungen elektrischer Betriebsmittel, die das stationäre und transiente Verhalten ausreichend genau nachbilden. Danach können mit diesen skalierten Modellen neue Netzstrukturen aufgebaut und z. B. Regelalgorithmen

men entwickelt und untersucht werden. Zur Validierung der Modelle sind reale Netzzustandsdaten erforderlich. Außerdem bedarf es Kenntnisse in der Handhabung großer Daten, da z. B. eine Vielzahl von realen Daten im EnergyLab 2.0 gewonnen wird. Auch dieses Thema wird also von der Einbindung ins Graduiertenkolleg erheblich profitieren.

Datengetriebene Robustheitsanalyse und Modellierung lokaler Energiesysteme (RO-BUST; Hagenmeyer, Wagner). Dieses Thema hat Versorgungssicherheit in Gegenwart fluktuierender und dezentraler Einspeisung zum Ziel. Für lokale Energiesysteme, die autark sein sollen, ist es wichtig, die Balance zwischen Verbrauch und Erzeugung (bzw. zusätzlicher Speicherung) zu halten. Um eine Notreserve an Erzeugung als Systemdienstleistung aktuell dimensionieren zu können, müssen aus den vorliegenden Energiezustandsdaten Spitzenbedarfe extrahiert werden. Dies muss automatisiert erfolgen, weil das Verfügbarkeitsmanagement sonst nicht mehr wirtschaftlich wäre. [hagenmeyer14] beschreibt, wie sich diese Spitzenbedarfe ‚von Hand‘ für ein komplexes Energienetz ermitteln lassen. Für lokale Netze mit fluktuierender Einspeisung wollen wir nun Robustheitsmaße entwickeln, die Lastabwurf- und Lastanforderungsszenarien berücksichtigen („Demand Side Management“ mit abwerfbaren, regelbaren und zeitlich verschiebbaren Lasten sowie aus Sicherheitsgründen nicht veränderbaren Grundlasten). Aus den Energiezustandsdaten sollen über Verbrauchsähnlichkeiten Nutzergruppen verschiedener Granularität ermittelt werden. Aus den Daten wollen wir Abhängigkeiten zwischen Verbrauchern ableiten, um bei Lastabwurf unbeabsichtigte Kettenreaktionen zwischen Gruppen zu vermeiden. Außerdem ist offen, wie man aus den Zustandsdaten Lastanforderungsreserven automatisiert oder halbautomatisiert unter Einbeziehung von Nutzerwissen extrahieren kann. All dies wollen wir anhand eines Anwendungsfalls mit komplexer Struktur untersuchen. Die Möglichkeit, BASF Ludwigshafen als diesen Anwendungsfall und als Evaluationsrahmen heranzuziehen, ist gegeben.

Die Bearbeitung dieses Themas innerhalb des Kollegs hat zum einen durch die methodische Verknüpfung mit Datenanalyse erheblichen Mehrwert. Da eine automatisierte Methode für Lastanforderung und Lastabwurf angestrebt ist, müssen wir auch Aspekte der IT-Sicherheit berücksichtigen. Für die Auswahl von Nutzergruppen für den Lastabwurf oder dual für die Lastanforderung schließlich sind wirtschaftliche Kostenfunktionale wichtig.

Leichtgewichtige Erfassung des Energieverbrauchs (LEICHTGEWICHTIG; Schmeck, Böhm). Dieses Thema zielt auf die leichtgewichtige Ausgestaltung der bereits erwähnten Software-gestützten Infrastruktur für die Erfassung des Energieverbrauchs. Die erhobenen Daten werden verwendet, um bestimmte Anfragen auszuwerten oder Analysen zu fahren [minartz12]. Es ist fundamental wichtig, den Aufwand für die Erhebung von Energieverbrauchsdaten und für die Kommunikation möglichst gering zu halten, gleichzeitig aber ein gewisses Maß an Zuverlässigkeit von Anfrage-/Analyseergebnissen garantieren zu können [gottschalk10, chen05, ganesh12]. Software-Schätzer des Energieverbrauchs sind in unterschiedlicher Weise parametrisiert: Wie detailliert werden Daten auf einem Rechner erhoben – von allen Prozessen oder nur den k wichtigsten? Welche Aspekte werden erfasst – nur CPU-Last oder auch Festplatte oder Speicher? Mit welcher Frequenz erfolgt die Erfassung? (Bei niedriger Frequenz entgehen uns kurze Prozesse.) Die Datenübertragung ist ebenfalls in ähnlicher Weise parametrisiert. Daraus ergeben sich u. a. die folgenden Forschungsfragen: Was sind die Zusammenhänge zwischen dem Grad der Genauigkeit der Anfrage-/Analyseergebnisse einerseits und der Parametrisierung der Erfassungsinfrastruktur andererseits? Wie aufwendig ist die Erfassung des Energieverbrauchs mit unterschiedlichen Parametrisierungen? Um diese Fragen zu beantworten, ist sowohl das Verhalten des Schätzers als auch der Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit einzelner Schätzungen und der Genauigkeit von Anfrageergebnissen zu modellieren, Letzteres systematisch für die unterschiedlichen Anfrage-Klassen. Während andere Dissertationsprojekte im Graduiertenkolleg von der Erfassungsinfrastruktur und der systematischen Herangehensweise dieses Dissertationsprojekts profitieren, lernen wir umgekehrt aus diesen, welche Arten von Anfragen wichtig sind, und in welcher Qualität die Daten realistischerweise gebraucht werden.

Maßgeschneiderte Privatheitsmaße für Energiezustandsdaten (VORWISSEN; Müller-Quade, Schmeck). Die Qualität von Methoden zur Datenanonymisierung kann man mit verschiedenen Privatheitsmaßen messen. Diese Maße dürfen nicht direkt als Garantien verstanden werden, da es sehr stark vom Vorwissen eines Angreifers abhängt, wie viel er trotz der Anonymisierung aus den Daten herauslesen kann. Vorwissen oder Informationen aus einer anderen Quelle können Konzepte wie k-Anonymität vollständig zusammenbrechen lassen. Im Unterschied dazu geht das Privatheitsmaß Differential Privacy von sehr großem Vorwissen aus, ist dadurch aber so strikt, dass selbst das Aggregieren von Daten ohne ein zusätzliches Addieren von Fehlertermen nicht ausreicht, um Differential Privacy zu erreichen. Aus diesem Grund wurde ein Rahmenwerk für Privatheitsmaße entwickelt, bei dem man das Vorwissen explizit modellieren kann [kifer12]. Im Extremfall kann dieses Framework so streng sein wie Differential Privacy. Eine Instanziierung des Frameworks mit Energiezustandsdaten ist wünschenswert, setzt aber die Beantwortung wichtiger grundlegender Fragen voraus. So ist beispielsweise unklar, welche Informationen innerhalb der Energiezustandsdaten tatsächlich versteckt werden müssen. Dazu muss zuerst eine geeignete Definition eines identifizierenden Merkmals bezüglich Energiezustandsdaten gefunden werden. Um solche Merkmale zu identifizieren, ist eine Zusammenarbeit mit Experten für Datenanalyse innerhalb des Graduiertenkollegs von großem Nutzen. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Aggregation von Verbrauchsdaten über einen gewissen Zeitraum oder über mehrere Geräte hinweg Geheimnisse hinreichend versteckt. Möglicherweise reicht die Entropie der eingehenden Daten sogar aus, um die Daten nicht weiter verrauschen zu müssen. Dies steht in engem Zusammenhang zur wichtigen Frage nach einer geeigneten Modellierung des Vorwissens eines Angreifers. Entnimmt man der zu anonymisierenden Datenbank, was das Vorwissen sein könnte, so kann keine Garantie mehr gegeben werden, da das Angreiferwissen im Allgemeinen unabhängig von einer konkreten Datenbank ist. In diesem Kontext existieren Modelle, um Vorwissen zu modellieren [kifer12, he14]; welches sich für Energiezustandsdaten eignet, muss jedoch untersucht werden. Im Rahmen des Kollegs besteht nun die große Chance, mit realen Daten und Verhaltensmodellen Vorwissen zu modellieren und insbesondere auch zu untersuchen, wie groß die Fehleinschätzung des Privatheitsmaßes wird, wenn man das Vorwissen falsch modelliert. Gute Maße sollten gegenüber solchen Fehlern unempfindlich sein, um verlässliche Privatheitsgarantien zu geben.

Charakterisierung des Energieverbrauchs eines Industriekomplexes (CHARAKTERIS; Fichtner, Böhm). Die Energieverbrauchsdaten von Forschungs- und Industriekomplexen (auf Basis der Anwendungsbeispiele BASF und/oder KIT) wollen wir nutzen, um den Strom- und Wärmeverbrauch von solch großen Organisationseinheiten zu charakterisieren. Die Charakterisierung soll sowohl über eine manuelle Modellierung von Einflussfaktoren als auch durch automatische Analyse unerwarteter Zusammenhänge zwischen diesen Faktoren erfolgen. Dabei sollen die Energieverbrauchsdaten nach unterschiedlichen Typen von Verbrauchseinheiten gruppiert und charakteristische Besonderheiten in der Verbrauchsstruktur erkannt werden. In einem ersten Schritt können Verbrauchseinheiten, z. B. Bereiche oder Abteilungen, manuell modelliert werden. Zu den Einflussfaktoren gehören u. a. die Größe (Mitarbeiterzahl, Nutzfläche, Budget) der Einheit oder der Technisierungsgrad (mit/ohne Labor, Produktionsbetrieb, etc.). Hieraus lassen sich Charakteristiken der Einheiten ableiten und als Hypothesen modellieren. Parallel dazu sollen automatische Analysetechniken die Verbrauchseinheiten auf Grundlage der Verbrauchsdaten in Cluster gruppieren und Charakteristika jedes Clusters identifizieren. Für die einzelnen Cluster sollen dann Trends und Muster (Saisonalität, Typtage) in der Verbrauchsstruktur identifiziert werden. Ferner sollen die Auswirkungen weiterer Faktoren wie des Wetters auf die kurzfristige Verbrauchs- bzw. Laststruktur ermittelt werden. Übergreifend sollen aber auch weitere Daten betrachtet werden, die an dem jeweiligen Forschungs-/Industriekomplex erhoben werden, insbesondere erstmals die von den Einheiten nachgefragten Energiedienstleistungen. Ziel ist, die Abhängigkeit des Endenergieverbrauchs von den nachgefragten Energiedienstleistungen zu quantifizieren und diese Erkenntnisse für Prognosemodelle zu nutzen. Neben konventionellen Analysemethoden wie Clusteranalyse und Methoden aus der Statistik sollen auch Subspace Cluster Methoden zur Anwendung kommen. Die Erkenntnisse können u. a. verwendet wer-

den, um die optimale Versorgung durch dezentrale Eigenerzeugung und zentrale Beschaffung zu ermitteln. Auch könnte untersucht werden, welche Arten von Verbrauchseinheiten für eine dezentrale Versorgung überhaupt in Frage kommen. Die Erkenntnisse können auch helfen, Lastverschiebepotentiale in der Strom- und Wärmeversorgung zu ermitteln.

Modellbasierte Energieverbrauchsvorhersage für Software-Architekturen zur Unterstützung von Entwurfs- und Betriebsentscheidungen (SW-ARCH; Koziolk, Wagner).

Qualitätseigenschaften von (Software-)Systemen werden von der Software-Architektur beeinflusst [bass03], d. h. von Entwurfsentscheidungen [taylor09] wie der statischen Struktur und der Interaktion der Komponenten. Bisher werden auf Architekturebene Qualitätseigenschaften wie Performanz oder Wartbarkeit betrachtet. Auch der Energieverbrauch eines Systems hängt von der Architektur ab und ist relevant. Dies macht Verfahren zur architekturbasierten Energievorhersage erforderlich. Dazu müssen die Software-Komponenten hinsichtlich ihres Energieverbrauchs anhand detaillierter Energiezustandsdaten charakterisiert werden. Aktuelle Energiesparmaßnahmen sind oft auf den Hardware- oder Betriebssystembereich fokussiert [liu10]. Entscheidungen, die Anwendungen betreffen, wie die Fragen, welche Anwendungen zusammen auf einem Rechner betrieben werden (Konsolidierung), oder welche Standardkomponenten verwendet werden sollen, werden nicht unterstützt. Weiterhin macht die Komplexität und Heterogenität von Anwendungen eine detaillierte Analyse basierend auf Quellcode oder eine feingranulare Modellierung der Ressourcen wie Prozessor und Speicher aufwändig und teuer. Ziel dieses Dissertationsprojekts ist daher ein modellbasiertes Vorhersageverfahren für Software-Architekturen basierend auf leichter verfügbaren, aber unsicheren Energiezustandsdaten. Dazu erarbeitet der Doktorand ein Modell für den Energieverbrauch von Software-Komponenten anhand von Energiezustandsdaten. Er entwickelt Methoden, um Modellinstanzen teilautomatisiert für konkrete Systeme aus Energiezustandsdaten abzuleiten, und Bewertungsverfahren. Auf Basis der Bewertungen soll er Optimierungsmethoden für den energiegewahren Entwurf von Software-Systemen entwickeln und mit Simulationen evaluieren. Dazu kommen Modelle und Algorithmen des energiegewahren Scheduling zur Anwendung. Jenes hier angestrebte Vorhersageverfahren ist eine (weitere) Anwendung von Energiezustandsdaten als Planungsgrundlage, und es lassen sich Anforderungen an den benötigten Detailgrad und die Genauigkeit der Daten ableiten.



2 Verzeichnis der Literaturliste zum Forschungsprogramm

- [abul08] Abul, O.; Bonchi, F.; Nanni, M.: Never Walk Alone: Uncertainty for Anonymity in Moving Objects Databases. 24th International Conference on Data Engineering (ICDE), 376–385, 2008.
- [acs11] Acs, G.; Castelluccia, C.: I have a DREAM! Differentially PrivatE smart Metering. 13th international conference on Information Hiding (IH), 118–132, 2011.
- [agrawal02] Agrawal, R.; et al.: Hippocratic Databases. 28th International Conference on Very Large Databases (VLDB), 143-154, 2002.
- [albers10] Albers, S.: Energy-Efficient Algorithms. Magazine Communications 53(5): 86-96, 2010.
- [albers11] Albers, S.: Algorithms for Dynamic Speed Scaling. 28th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS 2011), 1-11, 2011.
- [albert12] Albert, A.; Rajagopal, R.: Smart Meter Driven Segmentation: What Your Consumption Says About You. stanford.edu, 1-8, 2012.
- [aleti13] Aleti, A.; Buhnova, B.; Grunske, L.; Koziolok, A.; Meedeniya, I.: Software architecture optimization methods: A systematic literature review. Transaction on Software Engineering, 2013. preprint . <http://dx.doi.org/10.1109/TSE.2012.64>
- [alfares02] Alfares, H. K.; Nazeeruddin, M.: Electric Load Forecasting: Literature Survey and Classification of Methods, International Journal of Systems Science, 33: 23-34, 2002.
- [anders13] Anders, D.; Krämer, J.; Weinhardt, C.: Determining the Optimal Level of Information Granularity for Efficient Energy Consumption Decisions: Experimental Evidence. In Proceedings of the 21st European Conference on Information Systems, http://aisel.aisnet.org/ecis2013_rip/28, 2013.
- [arefifar13] Arefifar, S.; Mohamed, Y.-R.; EL-Fouly, T. :Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security. IEEE Transactions on Smart Grid, 4, 1567-1575, 2013.
- [arenas10] Arenas-Martíandnez, M., Herrero-Lopez, S., Sanchez, A., Williams, J.R., Roth, P., Hofmann, P., Zeier, A.: A Comparative Study of Data Storage and Processing Architectures for the Smart Grid. International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 285-290, 2010.

- [bao11] Bao, K.; Allering, F.; Schmeck, H.: User Behavior Prediction for Energy Management in Smart Homes. 8th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 1335-1339, 2011.
- [barowski14] Babrowski, S., Heffels, T., Jochem, P., Fichtner, W.: Reducing computing time of energy system models by a myopic approach – A case study based on the PERSEUS-NET model, *Energy Systems* 5(1), 283-293, 2014.
- [barowski14a] Babrowski, S., Heinrichs, H., Jochem, P., Fichtner, W.: Load shift potential of electric vehicles in Europe: chances and limits, *Journal of Power Sources* 255, 283-293, 2014.
- [barowski14b] Babrowski, S., Heffels, T., Jochem, P., Fichtner, W.: Reducing computing time of energy system models by a myopic approach – A case study based on the PERSEUS-NET model, *Energy Systems* 5(1), 283-293, 2014.
- [barowski15] Babrowski S., Jochem, P., Fichtner, W.: Electricity Storage Systems in the Future German Energy Sector An Optimization of the German Electricity Generation System until 2040 Considering Grid Restrictions, *Computers & Operations Research* (accepted), 2015.
- [bass03] Bass, L.; Clements, P.; and Kazman, R.: *Software Architecture in Practice*, Second Edition. Addison-Wesley, 2003.
- [bast14] Bast, H.; Delling, D.; Goldberg, A. V.; Müller-Hannemann, M.; Pajor, T.; Sanders, P.; Wagner, D.; Werneck, R.F.: *Route Planning in Transportation Networks*. Microsoft Research MSR-TR-2014-4, 2014.
- [bauer13] Bauer, R.; Columbus, T.; Rutter, I.; Wagner, D.: Search-Space Size in Contraction Hierarchies. 40th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP'13), 2013.
- [baum13] Baum, M.; Dibbelt, J.; Pajor, T.; Wagner, D.: Energy-Optimal Routes for Electric Vehicles. 21st ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS'13). 54-63, 2013.
- [beckert11] Beckert, B.; Hofheinz, D.; Müller-Quade, J.; Pretschner, A.; Snelting, G.: Software Security in Virtualized Infrastructures - The Smart Meter Example. *Information Technology (IT)* 53(3), 142-151, 2011.
- [berliner02] Berliner Beauftragter für Datenschutz, und Informationsfreiheit, Hessischer Datenschutzbeauftragter, *Datenschutz in Wissenschaft und Forschung, Materialien zum Datenschutz Nr. 28* (Stand: Dezember 2002)
- [berndt94] Berndt, D.J.; Clifford, J.: Using dynamic time warping to find patterns in time series. *KDD workshop*, 10 (16), 359–370, 1994.
- [bertsch14] Bertsch, V., Schwarz, H.; Fichtner, W.: Layout optimisation of decentralised energy systems under uncertainty, in: *Operations Research Proceedings 2013*, Springer, 29 – 35, 2014.
- [betz14] Betz, G., Gemsa, A., Mathies, C., Rutter, I., Wagner, D.: Column-Based Graph Layouts. *Journal of Graph Algorithms and Applications*, 18(5): 677-708, 2014.
- [bhaskar11] Bhaskar, R.; Bhowmick, A.; Goyal, V.; Laxman, S.; Thakurta, A.: Noiseless Database Privacy. *SIGMOD Conference*, 2011.
- [billinton98] Billinton, R.; Wang, P.: Distribution System Reliability Cost/Worth Analysis using Analytical and Sequential Simulation Techniques *IEEE Transactions on Power Systems*, 13, 1245-1250, 1998.
- [bircher12] Bircher, W.L.; John, L.K.: Complete System Power Estimation Using Processor Performance Events. *IEEE Transactions on Computers*, vol. 61(4), 563-577, 2012.

- [bisciglia09] Bisciglia, C.: The Smart Grid: Hadoop at the Tennessee Valley Authority (TVA), Blog of Cloudera, Inc, USA, 2009.
- [bohli09] Bohli, J.-M.; Henrich, C.; Kempka, C.; Müller-Quade, J.; Röhrich, S.: Enhancing Electronic Voting Machines on the Example of Bingo Voting. Transactions on Information Forensics and Security (T-IFS) 4(4), 745-750, 2009.
- [bonchi11] Bonchi, F.; Lakshmanan, L.: Trajectory Anonymity in Publishing Personal Mobility Data. Explorations Newsletter, 13 (1), 30-42, 2011.
- [bonn10] Beschluss im Festlegungsverfahren der BNetzA zur Standardisierung von Verträgen und Geschäftsprozessen im Bereich des Messwesen BK7-09-001 / BK6-09-034, Bonn 2010.
- [brandes07] Brandes, U., Gaertler, M., Wagner, D.: Engineering Graph Clustering: Models and Experimental Evaluation, ACM Journal of Experimental Algorithmics, 12(1.1): 1-26, 2007.
- [brauner03] Brauner, G.: Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Energieversorgung. e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Springer, 120, 133-137, 2003.
- [brosig15] Brosig, F.; Meier, P.; Becker, S.; Koziol, A.; Koziol, H.; Kounev, S.: Quantitative evaluation of model-driven performance analysis and simulation of component-based architectures. Software Engineering, IEEE Transactions on, 41(2), 157-175, Feb 2015.
- [brunel14] Brunel, E., Gemsa, A., Krug, M., Rutter, I., Wagner, D.: Generalizing Geometric Graphs. Journal of Graph Algorithms and Applications, 18(1): 35-76, 2014.
- [bsi14] https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Zertifizierung/ReportePP/pp0073b_pdf.
- [buchmann12] Buchmann, E.; Böhm, K.; Burghardt, T.; Kessler, S.: Re-identification of Smart Meter Data. Personal and Ubiquitous Computing, Springer Verlag, 2012.
- [buchmann13] Buchmann, E.; Kessler, S.; Jochem, P.; Böhm, K.: The Costs of Privacy in Local Energy Markets, IEEE Conference on Business Informatics (CBI), 2013.
- [buchmann13a] Buchmann, E., Böhm, K., Burghardt, T., Heine, M., Kessler, S.: Re-Identification of Smart Meter Data, Personal and Ubiquitous Computing, 17(4): 653-662, 2013.
- [buchwald15] Buchwald, S., Mohr, M., Rutter, I.: Optimal Shuffle Code with Permutation Instructions. Proceedings of the 14th International Symposium on Algorithms and Data Structures (WADS'15), 2015. Accepted for Publication.
- [chalkiadakis11] Chalkiadakis, G. et al.: Cooperatives of Distributed Energy Resources for Efficient Virtual Power Plants. 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS) 2, 787-794, 2011.
- [chaudhuri97] Chaudhuri, S.; Dayal, U.: An Overview of Data Warehousing and OLAP Technology. Record 26(1): 65-74, 1997.
- [chen05] Chen, Y.; Das, A.; Qin, W.; Sivasubramaniam, A.; Wang, Q.; Gautam, N: Managing Server Energy and Operational Costs in Hosting Centers. International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS), 303-314, 2005.
- [chen10] Chen, X.; Dinh, H.; Wang, B.: Cascading Failures in Smart Grid - Benefits of Distributed Generation. First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 73-78, 2010.
- [chen11] Chen, F.; Dai, J.; Wang, B.; Sahu, S.; Naphade, M.; Lu, C.: Activity Analysis Based on Low Sample Rate Smart Meters. International Conference on Knowledge

Discovery and Data Mining (KDD), 240-248, 2011.

- [chen12] Chen, H.; Li, Y.; Shi, W.: Fine-grained power management using process-level profiling. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2012
- [chen13] Chen, J.-J.; Kao, M.-J.; Lee, D.T.; Rutter, I.; Wagner, D.: Online Power-Managing Strategy with Hard Real-Time Guarantees. Technical Report 2013, rXiv:1304.1590. <http://arxiv.org/abs/1304.1590>
- [chen14] Chen, J.-J.; Kao, M.-J.; Lee, D.T.; Rutter, I.; Wagner, D.: Online Dynamic Power Management with Hard Real-Time Guarantees. 31st International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS'14). 226-238, 2014.[cheng03] Cheng, R.; Kalashnikov, D.V.; Prabhakar, S.: Evaluating Probabilistic Queries over Imprecise Data. International Conference on Management of Data (COMAD), 551–562, 2003.
- [chicco02] Chicco, G., Napoli, R., Postolache, P., Scutariu, M., Toader, C.: Customer Characterization Options for Improving the Tariff Offer, IEEE Transactions on Power Systems, 18 (1), 381-387, 2003.
- [chilingaryan10] Chilingaryan, S. et al: Advanced data extraction infrastructure: Web based system for management of time series data. J. Phys.: Conf. Ser, 219 (4), 042034, http://iopscience.iop.org/1742-6596/219/4/042034/pdf/1742-6596_219_4_042034.pdf, 2010.
- [chow09] Chow, C., Aref, W. G.: Casper*: Query processing for location, ACM Transactional Database Systems, 2009.
- [cicconi12] Cicconi, P.; Landi, D.; Morbidoni, A.; Germani, M.: Feasibility analysis of second life applications for Li-Ion cells used in electric powertrain using environmental indicators. IEEE International Energy Conference (ENERGYCON 2012), 985–990, 2012.
- [daebler] Däubler-Klebe/Wedde/Weichert-Weichert, § 3 Rn. 3; Leupold/Glossner-Scheja/Haag, Teil 4, Rn. 37 f.
- [dannecker10] Dannecker, L., Böhm, M., Fischer, U., Rosenthal, F., Hackenbroich, G., Lehner, W.: State-of-the-Art Report on Forecasting – A Survey of Forecast Models for Energy Demand and Supply, Public Deliverable D4.1, The MIRACLE Consortium (European Commission Project Reference: 248195), 2010.
- [degooijer12] de Gooijer, T.; Jansen, A.; Koziolok, H.; Koziolok, A.: An Industrial Case Study of Performance and Cost Design Space Exploration. Lizy Kurian John and Diwakar Krishnamurthy, editors, Proceedings of the third joint WOSP/SIPEW international conference on Performance Engineering (ICPE 2012), 205-216, 2012. ICPE best industry paper award.
- [delling09] Delling, D., Sanders, P., Schultes, D., Wagner, D.: Engineering Route Planning Algorithms, in Algorithmics of Large and Complex Networks, volume 5515 of Lectures Notes in Computer Science, Pages 117-139. Springer, 2009.
- [delling14] Delling, D., Gemsa, A., Nöllenburg, M., Pajor, T., Rutter, I.: On d-regular Schematization of Embedded Paths. Computational Geometry: Theory and Applications, 47(3A): 381-406, 2014.
- [dietz11] Dietz, B.; Ahlert, K.; Schuller, A.; Weinhardt, C.: Economic Benchmark of Charging Strategies for Battery Electric Vehicles. Powertech Conference, 1-8, 2011.
- [doettling11] Döttling, N.; Kraschewski, D.; Müller-Quade, J.: Unconditional and Composable Security Using a Single Stateful Tamper-Proof Hardware Token. 8th Theory of Cryptography Conference (TCC), 164-181, 2011.
- [duan09] Duan, Y.: Differential privacy for sum queries without external noise. ACM Conference on Information and Knowledge Management (CIKM), 2009.

- [dwork06] Dwork, C.: Differential Privacy. 33rd International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP), 1–12, 2006.
- [ebner07] Ebner, A.; Conte, F.V.; Pirker, F.: Rapid Validation of Battery Management System with a Dymola Hardware-in-the-Loop Simulation Energy Storage Test Bench. World Electric Vehicle Association Journal, Vol. 1, 2007.
- [efros14] Efros, P.; Buchmann, E.; Böhm, K.: FRESCO: A Framework for the Energy Estimation of Computers. 16th IEEE Conference on Business Informatics (CBI), 2014.
- [efthymiou10] Efthymiou, C.: Smart Grid Privacy via Anonymization of Smart Metering Data, International Conference on Smart Grid Communications, 2010.
- [eichinger14] Eichinger, F.; Efros, P.; Karnouskos, S.; Böhm, K.: A Time-Series Compression Technique and its Application to the Smart Grid. VLDB Journal 24(2), 193-218, 2014.
- [elmeleegy09] Elmeleegy, H.; Elmagarmid, A.K.; Cecchet, E.; Aref, W.G.; Zwaenepoel, W.: Online piece-wise linear approximation of numerical streams with precision guarantees. Proceedings of the VLDB Endowment, 2 (1), 145–156, 2009.
- [engell09] Engell, S.; Handschin, E.; Rehtanz, C.; Schultz, R.: Ressourceneinsatzplanung In der Energie-und Verfahrenstechnik. In: Grötschel, M.; Lucas, K. & Mehrmann, V. (Eds.) Produktionsfaktor Mathematik. Springer, 341-373, 2009.
- [espinoza08] Espinoza, M., Joye, C., Belmans, R., Moor, B. D.: Short-Term Load Forecasting, Profile Identification, and Customer Segmentation: A Methodology Based on Periodic Time Series”, IEEE Transactions on Power Systems, 20 (3), 1622-1630, 2005.
- [estivill99] Estivill-Castro, V.; Brankovic, L.: Data Swapping: Balancing Privacy against Precision in Mining for Logic Rules. 1st International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery (DaWaK), 1676, 389-398, 1999.
- [european11] European Commission, Smart Grids: from Innovation to Deployment, 2011.
- [fan07] Fan, X.; Weber, W.-D.; Barroso, L. A.: Power Provisioning for a Warehouse-Sized Computer. 34th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), 13-23, 2007
- [fang12] Fang, X.; Misra, S.; Xue, G.; Yang, D.: Smart Grid - the New and Improved Power Grid: A Survey. IEEE Communications Surveys Tutorials, 14, 944-980, 2012.
- [farinaccio99] Farinaccio, L.; Zmeureanu, R.: Using a Pattern Recognition Approach to Disaggregate the Total Electricity Consumption in a House into the Major End-Uses, Energy and Buildings, 30(3): 245-259, 1999.
- [faruqui09] Faruqui, A.; Hledik, R.; Tsoukalis, J.: The Power of Dynamic Pricing. The Electricity Journal, 22(3), 42-56, 2009.
- [fehrenbach14] Fehrenbach, D; Merkel, E.; Mckenna, R.; Karl, U.; Fichtner, W.: On the economic potential for electric load management in the German residential heating sector – An optimising energy system model approach, in: Energy, Vol. 71, 263 – 276, 2014.
- [fichtner02] Fichtner, W.; Wietschel, M.; Rentz, O.: Long Term Planning of Inter-Company Energy Supply Concepts. OR Spektrum, 24(4), 497–520, 2002.
- [fichtner04] Fichtner, W.; Rentz, O.: Strategisches Produktionsmanagement unter den neuen Rahmenbedingungen des europäischen CO₂-Emissionsrechtshandels. Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 12, 1191–1216, 2004.
- [figueiredo05] Figueiredo, V., Rodrigues, F., Vale, Z., Gouveia, J. B.: An Electric Energy Consumer Characterization Framework Based on Data Mining Techniques, IEEE

- Transactions on Power Systems, 20 (2): 596- 602, 2005.
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1425550&isnumber=30784>
- [flath12] Flath, C.; Ilg, J.; Weinhardt, C.: Decision Support for Electric Vehicle Charging. 18th Americas Conference on Information Systems (AMCIS), 2012.
- [flath13] Flath, C.M.; Ilg, J.P.; Gottwalt, S.; Schmeck, H.; Weinhardt, C.: Improving Electric Vehicle Charging Coordination Through Area Pricing. Transportation Science, July. doi:10.1287/trsc.2013.0467, 2013.
- [fluhr10] Fluhr, J.; Ahlert, K.H.; Weinhardt, C.: A Stochastic Model for Simulating the Availability of Electric Vehicles for Services to the Power Grid. 43rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 1-10, 2010.
- [gama08] Gama, J.; Aguilar-Ruiz, J.S.; Klinkenberg, R.: Knowledge Discovery from Data Streams. Journal Intelligent Data Analysis, 12(3): 251-252, 2008.
- [ganesh12] Ganesh, L.: Data Center Energy Management. Dissertation at Cornell University, <http://www.cs.utexas.edu/~lakshmi/files/thesis.pdf>, 2012.
- [ganta08] Ganta. S. R., Prasad, S., Smith, A.: Composition Attacks and Auxiliary Information in Data Privacy, Computing Research Repository (CoRR), 2008.
- [ge10a] Ge, R.; et al: PowerPack: Energy Profiling and Analysis of High-Performance Systems and Applications, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 21, 2010.
- [glavic11] Glavic, B., Du, J., Miller, R. J., Alonso, G., Haas, L. M.: “Debugging Data Exchange with Vagabond”, Proceeding of the Very Large Data Base, 4(12): 1383-1386, 2011.
- [gola] Gola/Schomerus, § 3a, Rn. 9; Bergmann/Möhrle/Herb, § 3, Rn. 130; Däubler/Klebe/Wedde/Weichert-Weichert, § 3, Rn. 49.
- [gola09] Gola/Schomerus, § 3 Rn. 10; Kazemi/Leopold, § 2, Rn. 39; Härting, ITRB 2009, 35 (36); Simitis-Damman, § 3, Rn. 33.
- [gomes11] Gomes, L.: “The Challenges of Big Data on the Smart Grid”, Technology Review, 2011.
- [goncalves11] Goncalves, H.; Oceanu, A.; Berges, M.: Unsupervised Disaggregation of Appliances Using Aggregated Consumption Data, Workshop on Data Mining Applications in Sustainability (SustKDD), 2011.
- [gottschalk10] Gottschalk, K.: Energy Management for HPC with IBM. International Conference on Energy-Aware High Performance Computing. September 16 – 17, <http://www.ena-hpc.org/2010/talks/EnA-HPC2010-Gottschalk-Energy-Management-for-HPC-with-IBM.pdf>, 2010.
- [gottwalt11] Gottwalt, S.; Ketter, W.; Block, C.; Collins, J.; Weinhardt, C.: Demand Side Management – A Simulation of Household Behavior under Variable Prices. Energy Policy 39(12): 8163–174, 2011.
- [green13] Green, R.; Wang, L.; Alam, M.: Applications and Trends of High Performance Computing for Electric Power Systems: Focusing on Smart Grid. IEEE Transactions on Smart Grid, 4, 922-931, 2013.
- [greveler12] Greveler, U.; Justus, B.; Loehr, D.: Multimedia Content Identification through Smart Meter Power Usage Profiles. 5th International Conference on Computers, Privacy and Data Protection (CPDP), 2012.
- [guralnik99] Guralnik, V.; Srivastava, J.: Event detection from time series data. Proceedings of the 5th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data

- mining. ACM, 33–42, 1999.
- [hagenmeyer14] Hagenmeyer, V.; Langner, H.; Hartwig, W.: Eine Methode zur Bewertung der Energieversorgungssicherheit von komplexen Produktionsstätten. VGB-Fachtagung Dampferzeuger, Wirbelschichtfeuerungen, Industrie- und Heizkraftwerke, 2014.
- [hahn13] Hahn, T., Schönfelder, M., Jochem, P., Heuveline, V., Fichtner, W.: Model-based Quantification of Load Shift Potentials and Optimized Charging of Electric Vehicles, *Smart Grid and Renewable Energy* 4 (5), 398–408, 2013.
- [hart92] Hart, G.W.: Nonintrusive Appliance Load Monitoring. *Proceedings of the IEEE*, 80(12), 1870–1891, 1992.
- [hayn14] Hayn, M.; Bertsch, V.; Fichtner, W.: Electricity load profiles in Europe: The importance of household segmentation, in: *Energy Research & Social Science*, Vol.3, 30 – 45, 2014.
- [he14] He, X.; Machanavajjhala, A.; Ding, B.: Blowfish privacy: tuning privacy-utility trade-offs using policies. *SIGMOD Conference*, 2014.
- [heidinger10] Heidinger, C.; Buchmann, E.; Huber, M.; Böhm, K.; Müller-Quade, J.: Privacy-Aware Folksonomies. *14th European Conference on Research and Advanced Technology for Digital Libraries (ECDL)*, 156-167, 2010.
- [heinrichs14] Heinrichs, H., Jochem, P., Fichtner, W.: Modelling implications of an extended EU-ETS on the German energy and transport sector, *Energy* 69, 708–720, 2014.
- [hillegeist12] Hillegeist, T.: *Rechtliche Probleme der elektronischen Langzeitarchivierung wissenschaftlicher Primärdaten*, Diss. Göttingen 2012.
- [hillemacher13] Hillemacher, L.; Hufendiek, K.; Bertsch, V.; Wiechmann, H.; Gratenau, J.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Ein Rollenmodell zur Einbindung der Endkunden in eine smarte Energiewelt, *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 37(3), 195-210, 2013.
- [hippert01] Hippert, H.S., Pedreira, C. E., Castro Souza, R.: Neural Networks for Short-Term Load Forecasting: A Review and Evaluation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(1):44–55, (2001).
- [hkoziolak11] Koziolak, H., Schlich, B., Bilich, C., Weiss, R., Becker, S., Krogmann, K., Trifu, M., Mirandola, R., Koziolak, A.: An industrial case study on quality impact prediction for evolving service-oriented software. *33rd international conference on Software engineering (ICSE 2011)*, Software Engineering in Practice Track, Richard N. Taylor, Harald Gall, and Nenad Medvidovic, editors, Waikiki, Honolulu, HI, USA, 2011, 776-785, 2011.
- [huber14] Huber, N., van Hoorn, A., Koziolak, A., Brosig, F., Kounev S.: Modeling Run-Time Adaptation at the System Architecture Level in Dynamic Service-Oriented Environments. *Service Oriented Computing and Applications Journal (SOCA)*, 8(1):73-89, 2014.
- [hung13] Hung, N.Q.V.; Jeung, H.; Aberer, K.: An evaluation of model-based approaches to sensor data compression. *Knowledge and Data Engineering*, *IEEE Transactions on*, 25, 2434–2447, 2013.
- [hyndman14] Hyndman, R. J.; Fan, S.: *Monash {Electricity} {Forecasting} {Model}*, 2014.
- [hyndman14a] Hyndman, R. J.; Athanasopoulos, G.: *Forecasting: principles and practice*, otexts, 2014.
- [inagaki11] Inagaki, S.; Egami, T.; Suzuki, T.; Nakamura, H.; Ito, K.: Nonintrusive Appliance Load Monitoring Based on Integer Programming. *Electrical Engineering in Japan*, 174 (2), 18–25, 2011.
- [intel] Intel, “Intelligent platform management interface,” [Online]. Available:

<http://www.intel.com/design/servers/ipmi/index.htm>

[interact] <http://interact.ira.uka.de/index.php>

- [irani05] Irani, S., Pruhs, K.: Algorithmic problems in power management. ACM Special Interest Group on Algorithms and Computation Theory (SIGACT) News 36 (2): 63-76, 2005. <http://doi.acm.org/10.1145/1067309.1067324>
- [isci03] Isci, C.; Martonosi, M.: Runtime Power Monitoring in High-End Processors: Methodology and Empirical Data. 36th Annual International Symposium on Microarchitecture, 93, 2003.
- [jimenez11] Jimenez, V.; Gioiosa, R.; Cazorla, F.J.; Valero, M.; Kursun, E.; Isci, C.; Buyuktosunoglu, A.; Bose, P., "Energy-Aware Accounting and Billing in Large-Scale Computing Facilities," *Micro, IEEE*, vol.31, no.3, pp.60,71, May-June 2011
- [jin12] Jin, P.; Ou, Y.; Härder, T.; Li, Z.: AD-LRU: An Efficient Buffer Replacement Algorithm for Flash-Based Databases. *Data & Knowledge Engineering (DKE)*, 72, 83-102, 2012.
- [jochem12] Jochem, P.; Kaschub, T.; Paetz, A.-G.; Fichtner, W.: Integrating Electric Vehicles into the German Electricity Grid – an Interdisciplinary Analysis. 26th Electric Vehicle Symposium, 1919-1926 (EVS26), 2012.
- [jochem15] Jochem, P.; Schönfelder, M.; Fichtner, W.: An Efficient Two-stage Algorithm for Decentralized Scheduling of Micro-CHP Units, *European Journal of Operational Research* (pre-print), doi: 10.1016/j.ejor.2015.04.016, 2015. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221715003094>
- [kalogridis10] Kalogridis, G.; Efthymiou, C.; Denic, S.Z.; Lewis, T.A.; Cepeda, R.: Privacy for Smart Meters: Towards Undetectable Appliance Load Signatures. 1st International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 232–237, 2010.
- [kalogridis11] Kalogridis, G.; Denic, S.: Privacy Protection System and Metrics for Hiding Electrical Events. *International Journal of Security and Networks*, 6 (1), 14–27, 2011.
- [kamper12] Kamper, A.; Schmeck, H.: Adaptives verteiltes Lastmanagement in Bilanzkreisen. *Informatik-Spektrum*, 35 (2), 102-111, 2012.
- [kansal10] Kansal, A.; et al: Virtual Machine Power Metering and Provisioning," in *ACM Symposium on Cloud Computing*, 39-50, 2010.
- [kant09] Kant, K.: Toward a Science of Power Management, *IEEE Computer* 42 (9): 99-101, 2009.
- [katz10] Katz, B., Krug, M., Lochbihler, A., Rutter, I., Snelling, G., Wagner, D.: Gateway Decompositions for Constrained Reachability Problems. *Proceedings of the 9th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA'10)*, volume 6049 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 449-461, 2010.
- [keles12] Keles, D.; Genoese, M.; Möst, D.; Fichtner, W.: Comparison of Extended Mean-Reversion and Time Series Models for Electricity Spot Price Simulation Considering Negative Prices. *Energy Economics*, 34 (4), 1012–1032, 2012.
- [keller12] Keller F.; Müller E.; Böhm K.: HiCS: High Contrast Subspaces for Density-Based Outlier Ranking. 28th International Conference on Data Engineering (ICDE), 1037-1048, 2012.
- [kessler14] Kessler, S.; Flath, C.; Böhm, K.: Allocative and Strategic Effects of Privacy Enhancement in Smart Grids. *Information Systems Journal*, special issue on Information Integrity in Smart Grid Systems, Elsevier Science Publisher, 2014.
- [kessler15] Kessler, S.; Buchmann, E.; Böhm, K.: Deploying and Evaluating Pufferfish Privacy for Smart Meter Data. *E-Energy*, 2015.

- [ketelaer14] Ketelaer, T.; Kaschub, T.; Jochem, P.; Fichtner, W.: The potential of carbon dioxide emission reductions in German commercial transport by electric vehicles, *International Journal of Environmental Science and Technology* 11(8), 2169-2184, doi: 10.1007/s13762-014-0631-y, 2014.
- [kifer11] Kifer, D.; Machanavajjhala, A.: No Free Lunch in Data Privacy. *International Conference on Management of data (SIGMOD Conference)*, 193-204, 2011.
- [kifer12] Kifer, D.; Machanavajjhala, A.: A Rigorous and Customizable Framework for Privacy. *Principles of Database Systems (PODS)*, 77-88, 2012.
- [kim11] Kim, H.; Marwah, M.; Arlitt, M.; Lyon, G.; Han J.: Unsupervised Disaggregation of Low Frequency Power Measurements. *International Conference on Data Mining (ICDM)*, 747-758, 20101.
- [klaiber13] Klaiber, S.; Bretschneider, P.; Waczowicz, S.; Mikut, R.; Konotop, I.; Westermann, D.: Intelligente Prognoseverfahren für beeinflusstes Verbrauchsverhalten in Energiesystemen. 23. *Workshop Computational Intelligence*, 2013.
- [klaiber15] Klaiber, S.; Waczowicz, S.; Mikut, R.; Konotop, I.; Westermann, D.; Bretschneider, P.: A Contribution to the Load Forecast of Price Elastic Consumption Behavior Proc. *IEEE Powertech*, Eindhoven, in press, 2015.
- [knapper11] Knapper, R., Flath, C., Blau, B., Sailer, A., Weinhardt, C.: A Multi-Attribute Service Portfolio Design Problem. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Service Oriented Computing & Applications (SOCA 2011)*, 2011.
- [kolter11] Kolter, J. Z.; Johnson, M.: REDD: A Public Data Set for Energy Disaggregation Research, *Workshop on Data Mining Applications in Sustainability (Sust KDD)*, 2011.
- [koziolak12] Koziolak, A: Architecture-Driven Quality Requirements Prioritization. *First International Workshop on the Twin Peaks of Requirements and Architecture (TwinPeaks 2012)*, 15-19, 2012.
- [koziolak13] Koziolak, A., Ardagna, D., Mirandola, R.: Hybrid multi-attribute QoS optimization in component based software systems. *Journal of Systems and Software*, 86(10):2542 - 2558, 2013.
- [krioukov11] Krioukov, A.; Goebel, C.; Alspaugh, S.; Chen, Y.; Culler, D.E.; Katz, R.H.: Integrating Renewable Energy Using Data Analytics Systems: Challenges and Opportunities. *Data Engineering Bulletin*, 34(1): 3-11, 2011.
- [kuehling13] Kühling, J.; Klar, M.: *NJW* 2013, 3611, 3614f.
- [latecki07] Latecki, L.; Wang, Q.; Koknar-Tezel, S.; Megalooikonomou, V.: Optimal subsequence bijection. *7th IEEE International Conference on Data Mining*, 565-570, 2007.
- [laughman03] Laughman, C.; Kwangduk, L.; Cox, R.; Shaw, S.; Leeb, S.; Norford, L.; Armstrong, P.: Power Signature Analysis. *Power and Energy Magazine*, 1 (2): 56-63, 2003.
- [lazaridis03] Lazaridis, I.; Mehrotra, S.: Capturing sensor-generated time series with quality guarantees. *19th International Conference on Data Engineering*, 429-440, 2003.
- [lehnhoff11] Lehnhoff, S.; Krause, O.; Rehtanz, C.; Wedde, H. F.: Dezentrales autonomes Energiemanagement. *at-Automatisierungstechnik*, 59, 167-179, 2011.
- [leibfried15] Leibfried, T., Mchedlidze, T., Meyer-Hübner, N., Rutter, I., Sanders, P., Wagner, D., Wegner, F.: Operating Power Grids with Few Control Buses. Poster: *Proceedings of the 6th ACM e-Energy International Conference on Future Energy Systems*, 2015. Artikel: *Proceedings of the International Workshop on Distributed Energy Networks (DEN)*, 2015.

- [li09] Li, T.; Li, N.: On the Tradeoff between Privacy and Utility in Data Publishing. 15th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD), 517, 2009.
- [li10] Li, X.; Bowers, C.P.; Schnier, T.: Classification of Energy Consumption in Buildings With Outlier Detection. Transactions on Industrial Electronics, 57(11):3639–3644, 2010.
- [lijesen07] Lijesen, M. G.: The Real-Time Price Elasticity of Electricity. Energy Economics, 29 (2): 249-258, 2007.
- [liu10] Liu, Y.; Zhu, H.: A Survey of the Research on Power Management Techniques for High-Performance Systems. Software: Practice and Experience, 40(11), 943–964, 2010.
- [liu13] Liu, S.; Yamada, M.; Collier, N.; Sugiyama, M.: Change-point detection in time-series data by relative density-ratio estimation. Neural Networks, 43 (0), 72-83, 2013.
- [lu13] Lu, M., Shi, Z., Lu, R., Sun, R., Shen, X. S. : PPPA: A practical privacy-preserving aggregation scheme for smart grid communications, IEEE/CIC International Conference on Communications, 2013.
- [maaß15] Maaß, H.; Cakmak, H. K.; Bach, F.; Mikut, R.; Harrabi, A.; Süß, W.; Jakob, W.; Stucky, K.-U.; Kühnapfel, U. G.; Hagenmeyer, V.: Data Processing of High Rate Low Voltage Distribution Grid Recordings for Smart Grid Monitoring and Analysis. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2015.
- [machanavajjhala08] Machanavajjhala, A.; Kifer, D.; Abowd, J.; Gehrke, J.; Vilhuber, L.: Privacy: Theory meets Practice on the Map, 24th International Conference on Data Engineering (ICDE), 277–286, 2008.
- [martens10] Martens, A.; Koziolk, H.; Becker, S.; Reussner, R. H.: Automatically Improve Software Models for Performance, Reliability and Cost Using Genetic Algorithms. WOSP/SIPEW '10: 1st joint WOSP/SIPEW International Conference on Performance Engineering (ICPE), 105-116, 2010.
- [martens11] Martens, A.; Koziolk, H.; Prechelt L.; Reussner, R.: From Monolithic to Component-Based Performance Evaluation of Software Architectures. Empirical Software Engineering, 16(5):587-622, 2011.
- [mböhm12] Böhm, M. et al: Data Management in the MIRABEL Smart Grid System. International Conference on Extending Database Technology/ International Conference on Database Theory Workshops (EDBT/ICDT), 2012.
- [mcdaniel09] McDaniel, P., McLaughlin, S.: Security and Privacy Challenges, in the Smart Grid. IEEE Security & Privacy 7 (3): 75-77, 2009.
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5054916&isnumber=5054895>
- [meritxell14] Meritxell, V.; Robu, V.; Rogers, A.; Jennings, N.R.: Prediction-of-Use Games: A Cooperative Game Theory approach to Sustainable Energy Tariffs. International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 829–36. AAMAS '14. Richland, SC: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2014. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2615731.2615864>, 2014.
- [merkel14] Merkel, E.; Fehrenbach, D.; Mckenna, R.; Fichtner, W.: Modelling decentralised heat supply: An application and methodological extension in TIMES, in: Energy, Vol. 73, 592-606, 2014.
- [minartz12] Minartz, T.; Molka, D.; Kunkel, J.; Knobloch, M.; Kuhn, M.; Ludwig, T.: Tool Environments to Measure Power Consumption and Computational Performance. Handbook of Energy-Aware and Green Computing, 709–743, Chapman and Hall, ISBN: 978-1-4398-5040-4, 2012.

- [mobius14] Möbius, C.; Dargie, W.; Schill, A.: Power Consumption Estimation Models for Processors, Virtual Machines, and Servers, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1600-1614, 2014.
- [molina10] Molina-Markham, A.; Shenoy, P.: Private Memoirs of a Smart Meter. *BuildSys*, 61–66, 2010.
- [moslehi10] Moslehi, K.; Kumar, R.: A Reliability Perspective of the Smart Grid, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1, 57-64, 2010.
- [msysv13] Referentenentwurf der Bundesregierung zur Verordnung über technische Mindestanforderungen an den Einsatz intelligenter Messsysteme (Messsystemverordnung – MsysV) <http://www.derenergieblog.de/wp-content/uploads/2013/05/BMWi-Entwurf-MsysV.pdf>
- [mueen10] Mueen, A.; Keogh, E.J.: Online Discovery and Maintenance of Time Series Motifs. 16th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD), 1089-1098, 2010.
- [muellerquade10] Müller-Quade, J.; Unruh, D.: Long-Term Security and Universal Composability. *Journal of Cryptology*, 23(4), 594-671, 2010.
- [mültin12] Mültin, M.; Allering, F.; Schmeck, H.: Integration of Electric Vehicles in Smart Homes – An ICT-based Solution for V2G Scenarios , *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2012.
- [nergiz08] Nergiz, M.; Atzori, M.; Saygin, Y.; Güc, B.: Towards Trajectory Anonymization: a Generalization-Based Approach. *International Workshop on Security and Privacy in GIS and LBS*, 2(106), 47–75, 2008.
- [nisan07] Nisan, N.: *Algorithmic game theory*. Cambridge Univ Pr., 2007.
- [nissim12] Nissim, K.; Orlandi, C.; Smorodinsky, R.: Privacy-Aware Mechanism Design. 13th Conference on Electronic Commerce (EC), 774-789, 2012
- [nizar06] Nizar, A. H.; Dong, Z. Y.; Zhao, J. H.: Load Profiling and Data Mining Techniques in Electricity Deregulated Market. *Power Engineering Society General Meeting (PES)*, 2006.
- [noureddine12] Noureddine, A.; et al: Runtime Monitoring of Software Energy Hotspots. in *IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering*, 160-169, 2012.
- [paetz12] Paetz, A.-G.; Dütschke, E.; Fichtner W.: Smart Homes as a Means to Sustainable Energy Consumption: A Study of Consumer Perceptions. *Journal of Consumer Policy*, 35(1), 23-41, 2012.
- [paetz12a] Paetz, A.-G.; Kaschub, T.; Kopp, M.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Monetäre Anreize zur Steuerung der Ladelast von Elektrofahrzeugen – eine modellgestützte Optimierung, *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 37, 1-12, ISSN: 10.1007/s12398-012-0095-z, 2012.
- [paetz13] Paetz, A.-G., Kaschub, T., Jochem, P., Fichtner, W.: Load-Shifting Potentials in Households including Electric Mobility – a Comparison of User Behaviour with Modelling Results, 10th International Conference on Energy Markets, 2013.
- [pallas10] Pallas, F.; Raabe, O.; Weis, E.: Beweis- und eichrechtliche Aspekte der Elektromobilität. *Computer & Recht (CR)*, 404-410, 2010.
- [papadimitriou07] Papadimitriou, S. Li, F.; Kollios, G.; Yu, P.S.: Time Series Compressibility and Privacy. 33rd International Conference on Very Large Data Bases (VLDB), 459–470, 2007.

- [papaioannou11] Papaioannou, T.G.; Riahi, M.; Aberer, K.: Towards online multimodel approximation of time series. 12th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM), 1, 33–38, 2011.
- [parson12] Parson, O.; Ghosh, S.; Weal, M.; Rogers, A.: Non-Intrusive Load Monitoring Using Prior Models of General Appliance Types, Conference on Artificial Intelligence (AAAI), 2012.
- [parson14] Parson, O.; Ghosh, S.; Weal, M.; Rogers, A.: An unsupervised training method for non-intrusive appliance load monitoring, Artificial Intelligence, vol. 217, 1-19, 2014.
- [plöger11] Plöger, M.; Haupt, H.; Bracker, J.: High Voltage Guaranteed HIL Testing of Battery Management Systems. Automobil Elektronik, 2011.
- [pochacker13] Pochacker, M.; Sobe, A.; Elmenreich, W.: Simulating the Smart Grid. IEEE PowerTech, Grenoble, 1-6, 2013.
- [porter04] Porter, R.: Mechanism Design for Online Realtime Scheduling. 5th Conference on Electronic Commerce (EC), 61-70, 2004.
- [prothmann09] Prothmann, H.; Branke, J.; Schmeck, H.; Tomforde, S.; Rochner, F.; Hähner, J.; Müller-Schloer, C.: Organic Traffic Light Control for Urban Road Networks. International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems, 2(3), 203-225, 2009.
- [qureshi09] Qureshi, A.; Weber, R.; Balakrishnan, H.; Guttag, J.V.; Maggs, B.V.: Cutting the Electric Bill for Internet-Scale Systems. Conference on Data communication (SIGCOMM), 123-134, 2009.
- [raabe10] Raabe, O.: Datenschutz im Smart Grid - Anpassungsbedarf des Rechts und des Systemdatenschutzes. Datenschutz und Datensicherheit (DuD), 379 ff., 2010.
- [raabe11] Raabe, O.; Pallas, F.; Weis, E.; Lorenz, M.; Boesche, K.V. (Hrsg.): Datenschutz im Smart Grid – Anmerkungen und Anregungen. Berlin, 2011.
- [raabe11a] Raabe, O.; Lorenz, M.; Pallas, F.; Weis, E.: Harmonisierung konträrer Kommunikationsmodelle im Datenschutzkonzept des EnWG – „Stern trifft Kette“. Computer und Recht (C&R), 831-840, 2011.
- [raabe11b] Raabe, O.; Lorenz, M.; Pallas, F.; Weis, E.: Harmonisierung konträrer Kommunikationsmodelle im Datenschutzkonzept des EnWG – „Stern trifft Kette“, Computer und Recht (C&R), 2011.
- [raabe13] Raabe, O.; Lorenz, M.: Kommentierung der §§ 21g und h EnWG in F.J. Säcker, Berliner Kommentar zum Energierecht, Energiewettbewerbsrecht, Energieregulierungsrecht und Energieumweltschutzrecht, [erscheint Juni 2013]
- [raabe13a] O. Raabe, J. Ullmer: Legal Aspects of Demand Side Management in Germany. In: it – Information Technology, 63-69, 2013.
- [raabe14] O. Raabe, E. Weis: Datenschutz im "SmartHome". In: Recht der Datenverarbeitung (RDV) 5/2014, 177-186, 2014.
- [ramchurn12] Ramchurn, S. et al.: Putting the 'Smarts' into the Smart Grid: A Grand Challenge for Artificial Intelligence. Magazine Communications , 55(4), 86-97, 2012.
- [ramos08] Ramos, S.; Vale, Z.: Data Mining Techniques Application in Power Distribution Utilities. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 1-8, 2008.
- [ratanamahatana05] Ratanamahatana, C.A.; Keogh, E.: Three myths about dynamic time warping data mining. Proceedings of SIAM International Conference on Data Mining, 2005.
- [regalado12] Regalado, A.: Rage Against the Smart Meter, Technology Review, (2012).

- [rehtanz09] Rehtanz, C.; Wietfeld, C.: Das Internet der Energie. Trends in der Automatisierung von Energienetzen, *at-Automatisierungstechnik*, 57, 514-524, 2009.
- [rivoire08] Rivoire, S.; Ranganathan, P.; Kozyrakis, C.: A Comparison of High-Level Full-System Power Models. *Conference on Power Aware Computing and Systems (Hot Power)*, 2008.
- [robu12] Robu, V.; Kota, R.; Chalkiadakis, G.; Rogers, A.; Jennings, N. R.: Cooperative Virtual Power Plant Formation Using Scoring Rules, *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, vol. 3, 2012.
- [roßnagel98] Roßnagel, NVwZ 1998, S.1; Gola/Schomerus, § 3a, Rn.6.
- [rusischka10] Rusischka, S.; Eger, K.; Gerdes, C.: Smart Grid Data Cloud: A Model for Utilizing Cloud Computing in Smart Grid Domain. *International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 483-488, 2010.
- [saatçi10] Saatçi, Y.; Turner, R.D.; Rasmussen, C.E.: Gaussian process change point models. *Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML-10)*, 927–934, 2010.
- [sánchez15] Sánchez, P., Müller, E., Korn, U., Böhm, K., Kappes, A., Hartmann, T., Wagner, D.: Efficient Algorithms for a Robust Modularity-Driven Clustering of Attributed Graphs. *2015 SIAM International Conference on Data Mining*. SIAM, April 2015.
- [santos08] Santos, P. J., Martins, A. G., Pires, A. J.: Next Hour Load Forecast in Medium Voltage Electricity Distribution. *International Journal of Energy Sector Management*, 2 (3), 439-448, 2008.
- [savio10] Savio, D.; Karlik, L.; Karnouskos, S.: Predicting Energy Measurements of Service-Enabled Devices in the Future Smartgrid. *International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim)*, 450-455, 2010.
- [schepperle11] Schepperle, H.; Pulter, N.; Böhm, K.: How Agents Can Help Curbing Fuel Combustion – a Performance Study of Intersection Control. *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, 2011.
- [schmeck10] Schmeck, H.; Müller-Schloer, C.; Cakar, E.; Mnif, M.; Richter, U.: Adaptivity and Self-Organisation in Organic Computing Systems. *Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, 5(3), 2010.
- [schnitzler08] Schnitzler, B. et al.: Trading Grid Services - A Multi-attribute Combinatorial Approach. *European Journal of Operational Research (EJOR)*, 187(3), 943–961, 2008.
- [schoenfelder13] Schönfelder, M.: Optimierung des Einsatzes brennstoffzellenbasierter Mikro-KWK-Anlagen unter Berücksichtigung des gesteuerten Ladens von Elektrofahrzeugen, Cuvillier Verlag, Göttingen (ISBN 978-3-95404-496-2), 2013.
- [schulz00] Schulz, F.; Wagner, D.; Weihe, K.: Dijkstra's Algorithm On-Line: An Empirical Case Study from Public Railroad Transport. *Journal of Experimental Algorithmics* 5(12), 2000.
- [schwab12] Schwab, A. J.: *Elektroenergiesysteme - Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*, Elektroenergiesysteme, Springer, 2012.
- [schweppe88] Schweppe, F.C.: et al.: *Spot Pricing of Electricity*. Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [shou11] Shou, L.; Shang, X.; Chen, K.; Chen, G.; Zhang, C.: Supporting Pattern-Preserving Anonymization For Time-Series Data. *Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1–16, 2011.
- [shukla12] Shukla, P.K.; Hirsch, C.; Schmeck, H.: Towards a Deeper Understanding of

Trade-offs Using Multi-objective Evolutionary Algorithms. EvoStar 2012, Bio-inspired algorithms for continuous parameter optimisation, 396–405, Springer, LNCS 7248, 2012.

[sigmod11] http://www.sigmod2011.org/calls_papers_sigmod_research_repeatability.shtml

[simitis] Simitis-Scholz, § 3a, Rn. 32; Taeger/Gabel-Zscherpe, § 3a, Rn. 31; Gola/Schomerus, § 3a, Rn.6.

[simitisa] Simitis-Damman, § 3, Rn. 28; Redeker-Redeker, 935; a.A. Kazemi/Leopold, § 2, Rn. 39.

[singh07] Singh, L.; Sayal, M.: Privacy Preserving Burst Detection of Distributed Time Series Data Using Linear Transforms. Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM), 646–653, 2007.

[snowdon05] Snowdon, D.C.; Petters, S.M.; Heiser, G.: Power Measurement as the Basis for Power Management, in Workshop on Operating Systems Platforms for Embedded Real-Time Applications, 2005.

[song07] Song, X.; Wu, M.; Jermaine, C.; Ranka, S.: Statistical change detection for multi-dimensional data. 13th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, 667–676, 2007.

[steinherz01] Steinherz Hippert, H.; Pedreira, C. E.; Castro Souza, R.: Neural Networks for Short-Term Load Forecasting: A Review and Evaluation, Transactions on Power Systems, 16(1), 44–55, 2001.

[stier14] Stier, C., Groenda, H., Koziolok, A.: Towards Modeling and Analysis of Power Consumption of Self-Adaptive Software Systems in Palladio. Technical report, University of Stuttgart, Faculty of Computer Science, Electrical Engineering, and Information Technology, 2014.

[stluka11] Stluka, P.; Godbole, D.; Samad, T.: Energy Management for Buildings and Microgrids, 50th Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 5150-5157, 2011.

[stotzka11] Stotzka, R.; et al: Perspective of the Large Scale Data Facility (LSDF) Supporting Nuclear Fusion Applications. 19th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP), 2011.

[stroehle14] Ströhle, P.; Gerding, E.H.; de Weerd, M.M.; Stein, S.; Robu, V.: Online Mechanism Design for Scheduling Non-Preemptive Jobs Under Uncertain Supply and Demand. International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 437–44. AAMAS '14. Richland, SC: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2615731.2615803>, 2014.

[sweeney02] Sweeney, L.: k-Anonymity: a Model for Protecting Privacy. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 10(5), 557–570, 2002.

[taeger] Taeger/Gabel-Zscherpe, § 3, Rn. 45; Plath-Schreiber, § 3a, Rn. 17; Wolff/Brink-Schulz, § 3a, Rn. 72.

[taylor09]: Taylor, R. N.; Medvidovic, N.; Dashofy, E. M.: Software Architecture: Foundations, Theory, and Practice, Wiley, 2009.

[vangerwen09] van Gerwen, J. W.: Smart Metering, 2009.

[verdú06] Verdú, S.V.; García, M.O.; Senabre, C.; Marín, A.G.; Franco, F. J. G.: Classification, Filtering, and Identification of Electrical Customer Load Patterns Through the Use of Self-Organizing Maps, Transactions on Power Systems, 21(4), 1672–1682, 2006.

[vlachos03] Vlachos, M.; Hadjieleftheriou, M.; Gunopulos, D.; Keogh, E.: Indexing multi-

- dimensional time-series with support for multiple distance measures. 9th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 216-225, 2003.
- [waczowicz14] Waczowicz, S.; Klaiber, S.; Bretschneider, P.; Konotop, I.; Westermann, D.; Reischl, M.; Mikut, R.: Data Mining zur Analyse der Auswirkungen von Preissignalen auf Haushaltsstromkunden at - Automatisierungstechnik, 62, 740-752, 2014
- [waczowicz15a] Waczowicz, S.; Reischl, M.; Hagenmeyer, V.; Klaiber, S.; Bretschneider, P.; Konotop, I.; Westermann, D.; Mikut, R.: Demand Response Clustering – How do Dynamic Prices affect Household Electricity Consumption? Proc. IEEE Powertech, Eindhoven, in press, 2015
- [weber14] Copper thick-film substrates for power electronic applications, Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), 2014.
- [weber15] Weber, M.; et al: The Role of Energy Status Data in Solar Power Plants with Li-Ion Batteries, Energy Science Technology Conference 2015, Karlsruhe, 20-22 May 2015 (accepted oral presentation)
- [weber15a] Weber, M.; Blank, T.; Lipps, C.; Reiling, V.; Ott, W.; Hoffmann, P.: Influence of varying ambient temperatures on the sensing accuracy of Li-Ion Battery Management Systems with Passive Charge Balancing, EPE'15 17th European Conference on Power Electronics and Applications, 2015.
- [weiss10] Weiss, M.; Guinard, D.: Increasing Energy Awareness Through Web-Enabled Power Outlets. 9th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM), 20, 2010.
- [weiss12] Weiss, M.; Staake, T.; Mattern, F.; Fleisch, E.: PowerPedia: Changing Energy Usage with the Help of a Community-Based Smartphone Application. Personal and Ubiquitous Computing (PUC), 16(6), 655-664, 2012.
- [wietschel97] Wietschel, M.; Fichtner, W.; Rentz, O.: Integration of Price-Depending Demand Reactions in an Optimising Energy Emission Model for the Development of CO₂-Mitigation Strategies. European Journal of Operational Research, 102(3), 432-444, 1997.
- [wolff] Wolff/Brink-Schulz spricht von Stufenverhältnis, § 3a, Rn. 39.
- [yao95] Yao, F.F.; Demers, A.J.; Shenker, S.: A Scheduling Model for Reduced CPU Energy. 36th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS 1995), 374-382, 1995.
- [yarovoy08] Yarovoy, B.: Anonymizing moving objects: how to hide a mob in a crowd? 11th International Conference on Extending Database Technology (EDBT), 2008.
- [yukun13] Yukun, N., Xiaobin, T., Shi, C.: A security privacy protection scheme for data collection of smart meters based on homomorphic encryption. EUROCON, 2013.
- [zhuge95] Zhuge, Y.; Garcia-Molina, H.; Hammer, J.; Widom, J.: View Maintenance in a Warehousing Environment. International Conference on Management of Data (COMAD), 316-327, 1995.