



**Fraunhofer**

**ITWM**

M. Dalheimer

## Power to the People – Das Stromnetz der Zukunft

© Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM 2011

ISSN 1434-9973

Bericht 200 (2011)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des Herausgebers ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus in irgendeiner Form durch Fotokopie, Mikrofilm oder andere Verfahren zu reproduzieren oder in eine für Maschinen, insbesondere Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache zu übertragen. Dasselbe gilt für das Recht der öffentlichen Wiedergabe.

Warennamen werden ohne Gewährleistung der freien Verwendbarkeit benutzt.

Die Veröffentlichungen in der Berichtsreihe des Fraunhofer ITWM können bezogen werden über:

Fraunhofer-Institut für Techno- und  
Wirtschaftsmathematik ITWM  
Fraunhofer-Platz 1

67663 Kaiserslautern  
Germany

Telefon: +49(0)6 31/3 1600-4674  
Telefax: +49(0)6 31/3 1600-5674  
E-Mail: [presse@itwm.fraunhofer.de](mailto:presse@itwm.fraunhofer.de)  
Internet: [www.itwm.fraunhofer.de](http://www.itwm.fraunhofer.de)

# Vorwort

Das Tätigkeitsfeld des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM umfasst anwendungsnahe Grundlagenforschung, angewandte Forschung sowie Beratung und kundenspezifische Lösungen auf allen Gebieten, die für Techno- und Wirtschaftsmathematik bedeutsam sind.

In der Reihe »Berichte des Fraunhofer ITWM« soll die Arbeit des Instituts kontinuierlich einer interessierten Öffentlichkeit in Industrie, Wirtschaft und Wissenschaft vorgestellt werden. Durch die enge Verzahnung mit dem Fachbereich Mathematik der Universität Kaiserslautern sowie durch zahlreiche Kooperationen mit internationalen Institutionen und Hochschulen in den Bereichen Ausbildung und Forschung ist ein großes Potenzial für Forschungsberichte vorhanden. In die Berichtreihe werden sowohl hervorragende Diplom- und Projektarbeiten und Dissertationen als auch Forschungsberichte der Institutsmitarbeiter und Institutsgäste zu aktuellen Fragen der Techno- und Wirtschaftsmathematik aufgenommen.

Darüber hinaus bietet die Reihe ein Forum für die Berichterstattung über die zahlreichen Kooperationsprojekte des Instituts mit Partnern aus Industrie und Wirtschaft.

Berichterstattung heißt hier Dokumentation des Transfers aktueller Ergebnisse aus mathematischer Forschungs- und Entwicklungsarbeit in industrielle Anwendungen und Softwareprodukte – und umgekehrt, denn Probleme der Praxis generieren neue interessante mathematische Fragestellungen.



Prof. Dr. Dieter Prätzel-Wolters  
Institutsleiter

Kaiserslautern, im Juni 2001



# Power to the People

Das Stromnetz der Zukunft

Mathias Dalheimer <dalheimer@itwm.fhg.de>

26. Januar 2011

# 1 Einleitung

Wenn morgens in Deutschland die Kaffeemaschinen angeschaltet werden, sorgt ein komplexes System dafür, dass der Tag gut anfängt: Unser Stromnetz. Das deutsche Stromnetz ist über die vergangenen 100 Jahre gewachsen und transportiert den Strom von Kraftwerken zu den Verbrauchern. Bildlich kann man sich das anhand des „Stromsees“ vor Augen führen:

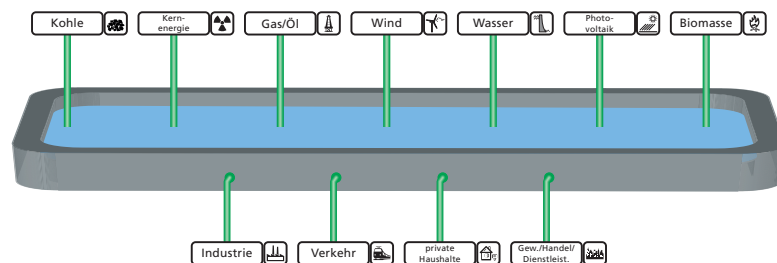


Abbildung 1

Der Stromsee: Kraftwerke erzeugen Strom, der in den gemeinsamen Stromsee eingespeist wird. Alle Verbraucher beziehen ihren Strom aus diesem Netz.

Die einzelnen Kraftwerke produzieren aus verschiedenen Energiequellen elektrischen Strom. Der Strom wird im Netz gesammelt, bis ein beliebiger Verbraucher den Strom benötigt<sup>1</sup>. Konventionelle Kohlekraftwerke tragen genauso wie Atomkraftwerke und Photovoltaiksysteme zur Stromerzeugung bei. Das Stromnetz wird mit einem Wasserleitungssystem verglichen. So anschaulich dieses Modell ist, so vereinfacht es leider zu stark:

- (1) Der Stromsee suggeriert, dass der „Wasserstand“ im See steigen und fallen kann. Das ist im Stromnetz nicht möglich, es gibt keinen Speicher, der Abweichungen zwischen Erzeugung und Verbrauch kompensieren könnte:

$$\text{Erzeugung}(t) = \text{Verbrauch}(t) + \epsilon \quad \forall t \quad (1)$$

Die Erzeugung muss zu jedem Zeitpunkt dem Verbrauch entsprechen — kleinere Abweichungen führen zur Änderung der Netzfrequenz, größere Abweichungen können zu großflächigen Stromausfällen führen. Es ist die Aufgabe der Stromnetzbetreiber, einen zuverlässigen Betrieb sicherzustellen. Dazu wird die Stromerzeugung permanent dem Verbrauch angepasst [30, S. 33ff]. Es ist nicht möglich, beliebige Kapazitäten bei Bedarf an- und abzuschalten: Die Anfahrvorgänge von Kraftwerken dauern je nach Kraftwerkstyp zwischen wenigen Minuten (Wasserkraft- und Gasturbinenkraftwerke) und mehreren Stunden

<sup>1</sup>Streng genommen wird Strom natürlich nicht verbraucht, ich bleibe allerdings bei dieser umgangssprachlichen Formulierung.

(Kohlekraftwerke). Umgekehrt ist es auch nicht ohne weiteres möglich, die Leistung innerhalb von kurzer Zeit beliebig zu reduzieren.

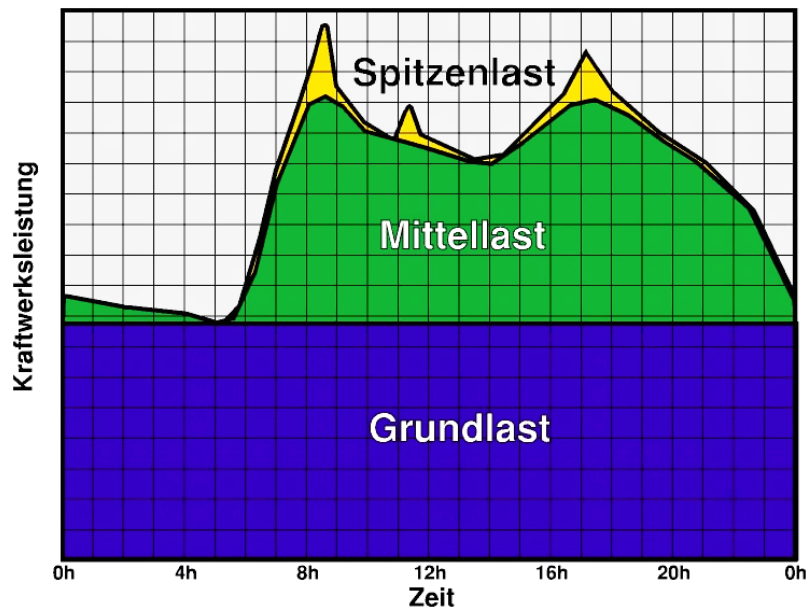


Abbildung 2

Lastkurve. Quelle: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Stromnetz\\_Lastkurve.png](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Stromnetz_Lastkurve.png)

Die Netzbetreiber müssen also die Schwankungen des Stromverbrauchs vorhersagen und auch kurzfristig auf Änderungen reagieren. Dabei unterscheidet man zwischen Grund-, Mittel- und Spitzenlast, vgl. Abbildung 2: Die Grundlast ist der Bedarf, der über 24 Stunden hinweg konstant bleibt, quasi der Grundverbrauch. Dieser wird üblicherweise durch Grundlastkraftwerke wie Braunkohle- und Atomkraftwerke erzeugt. Auch Laufwasserkraftwerke werden üblicherweise zu den Grundlastkraftwerken gerechnet. Die Regelfähigkeit dieser Kraftwerke spielt eine untergeordnete Rolle, die Stückkosten stehen im Vordergrund: Die Erzeugung einer Kilowattstunde ist in diesen Kraftwerken am billigsten. Daher werden diese Kraftwerke wenn möglich rund um die Uhr unter Vollast betrieben.

Die Mittellast entspricht den grundlegenden Schwankungen im Tagesablauf: Nachts wird erheblich weniger Energie verbraucht als tagsüber. Die Mittellast ist relativ gut planbar und wird daher z.B. mittels Steinkohlekraftwerken abgedeckt. Die Spitzenlast ist zwar auch planbar, aber mit erheblich mehr Unsicherheit verbunden. Diese Spitzenlast muss kurzfristig durch das Zuschalten von Spitzenlastkraftwerken wie Gasturbinenkraftwerken, Pumpspeicherkraftwerken oder Druckluftspeicherkraftwerke abgedeckt werden. Spitzenlastkraftwerke können ihre Leistung zum Teil bis zu 20% ihrer Nennleistung innerhalb einer Minute ändern [37][30, S. 108ff]. Da Spitzenlastkraftwerke nur

seltener unter Vollast betrieben werden, ist der erzeugte Strom relativ teuer: Je nach Versorgungslage kann eine Kilowattstunde €1,50 kosten [36][30, S. 60].

Nicht in die aktive Netzregelung einbezogen sind Industriebetriebe mit eigener Stromerzeugung, Windkraftanlagen, Photovoltaiksysteme und auch Blockheizkraftwerke.

Für die Regelung hat das „European Network of Transmission System Operators for Electricity“ (ENTSO-E) Standards geschaffen. Im „UCTE Operation Handbook“ sind die Verfahren der Netzregelung im Abschnitt „Load Frequency Control and Performance“ beschrieben [15]. Als Regelgröße dient die Netzfrequenz: Dieser Wert muss bei 50 Hz liegen. Wenn ein elektrischer Verbraucher eingeschaltet wird, dann sinkt die Netzfrequenz. Wird umgekehrt ein Verbraucher ausgeschaltet, so steigt die Netzfrequenz. Genau umgekehrt wird die Netzfrequenz von der Leistung der Kraftwerke beeinflusst: Wird zusätzliche Leistung eingespeist, so steigt die Netzfrequenz.

Drei aufeinanderfolgende Stufen sind an der Regelung beteiligt:

- (a) Für die *Primärregelung* müssen Netzbetreiber innerhalb von 30 Sekunden zwei Prozent seiner aktuellen Erzeugung als Reserve bereitstellen bzw. die Erzeugung reduzieren können. Die Kraftwerke müssen bis zu 15 Minuten diese Leistungserhöhung liefern können. Die Primärregelung hat die Aufgabe, die Netzfrequenz im Höchstspannungsnetz auf europäischer Ebene stabil zu halten.
  - (b) Die *Sekundärregelung* kann zeitgleich zur Primärregelung anlaufen und hat die Aufgabe, die Frequenzstabilität in einer Regelzone sicherzustellen. Dazu werden zusätzliche Spitzenlastkraftwerke benutzt. Die Sekundärregelung soll nach 15 Minuten abgeschlossen sein.
  - (c) Auch bei der *Tertiärregelung* oder auch *Minutenreserve* ist das Ziel, die Netzfrequenz zu stabilisieren. Hierbei werden zusätzliche Reserven vom Übertragungsnetzbetreiber bei den Lieferanten angefordert. Dies geschieht üblicherweise telefonisch. Die veränderte Lastsituation wird dann permanent durch die Kraftwerke abgedeckt, die Regelung ist abgeschlossen.
- (2) Der Stromsee vernachlässigt auch, dass die Erzeugung und der Verbrauch von Strom geographisch verteilt sind. Eine Kilowattstunde aus einem Grundlastkraftwerk wird normalerweise in das Höchstspannungsnetz (220 und 380 Kilovolt) eingespeist, vgl. Tabelle 1. Die Aufgabe des Höchstspannungsnetzes ist die Verteilung des Stroms über größere Distanzen, auch in das europäische Ausland. Nahe den Verbrauchszentren wird der Strom in das Hochspannungsnetz transformiert, von dort aus auch in das Mittelspannungsnetz. Mittlere Kraftwerke speisen in das Hochspannungsnetz ein, während Stadtwerke und große Windkraft- bzw. Photovoltaikanlagen auch direkt in das Mittelspannungsnetz einspeisen können.
- Über Umspannwerke in den Gemeinden wird das Mittelspannungsnetz an



	Installierte Länge (km)	Spannung (kV)
Höchstspannung	36.000	220 und 380
Hochspannung	75.200	60-220
Mittelspannung	493.000	6-60
Niederspannung	1.067.100	0,4

Tabelle 1

Stromkreise in Deutschland. Quelle: BMWi [3]

das Niederspannungsnetz angeschlossen. Hier wird der Strom schließlich durch private Haushalte und Gewerbebetriebe verbraucht. Eine Ausnahme stellen Industrieabnehmer dar: Diese können ihren Strom auch aus dem Mittelspannungsnetz beziehen.

Die Einspeisung von Solaranlagen auf den Dächern der Privathaushalte kann zu Problemen bei der Netzregulierung führen: Da auf der Niederspannungsebene keine Regelenergie zur Verfügung steht, können signifikante Photovoltaikeinspeisungen die Netzfrequenz nach oben treiben. Darüber hinaus kann eine Einspeisung von dezentral erzeugtem Solarstrom auch die Leitungen als solche überlasten. Daher kommt es schon heute — vor allem in ländlichen Regionen — vor, dass die Netzbetreiber den Anschluss von Photovoltaikanlagen verweigern.

- (3) Der Stromsee stellt schließlich auch die Organisationsstruktur des Stromnetzes nicht dar. Hier sind zunächst die vier großen Übertragungsnetzbetreiber Amprion (RWE/VEW), EnBW Transportnetze AG, Transpower Stromübertragungs GmbH (TenneT) sowie 50Hertz Transmission (Vattenfall) zu nennen, vgl. Abbildung 3. Die vier großen Übertragungsnetzbetreiber sind am ENTSO-E beteiligt und damit auch an der aktiven Netzregelung. Sie betreiben die Höchst- und Hochspannungsnetze. Hinzu kommen noch ca. 900 Verteilnetzbetreiber in Deutschland, welche die Mittel- und Niederspannungsnetze betreiben. Diese agieren lokal und stellen die Versorgung der Haushalte in ihrem Versorgungsgebiet sicher. Oft sind diese Verteilnetzbetreiber in der Hand der Kommunen.

Alle Netzbetreiber kaufen — direkt oder indirekt — ihren Strom auf zwei Märkten ein: Der Termin- und der Spotmarkt an der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig. Auf dem Terminmarkt werden längerfristige Lieferkontrakte gehandelt. Der Spotmarkt dient hingegen dem An- und Verkauf von Strommengen für den folgenden oder auch laufenden Tag. Hier können kurzfristig Strommengen ge- und verkauft werden für den Fall, dass die bisherigen Käufe nicht mit dem erwarteten Verbrauch übereinstimmen.

Die Erzeugung des Stroms wird in Deutschland von den vier Konzernen Vattenfall, RWE, e-on und EnBW dominiert. Daneben gibt es eine große Anzahl von Stadtwerken, die mit eigenen Kraftwerken Strom erzeugen. Hinzu kommt noch eine Vielzahl von kleinen Erzeugern, die mittels BHKW und Photovoltaik lokal Strom in das Netz einspeisen. Die Monopolkommission der Bundesregierung stellte in ihrem Gutachten

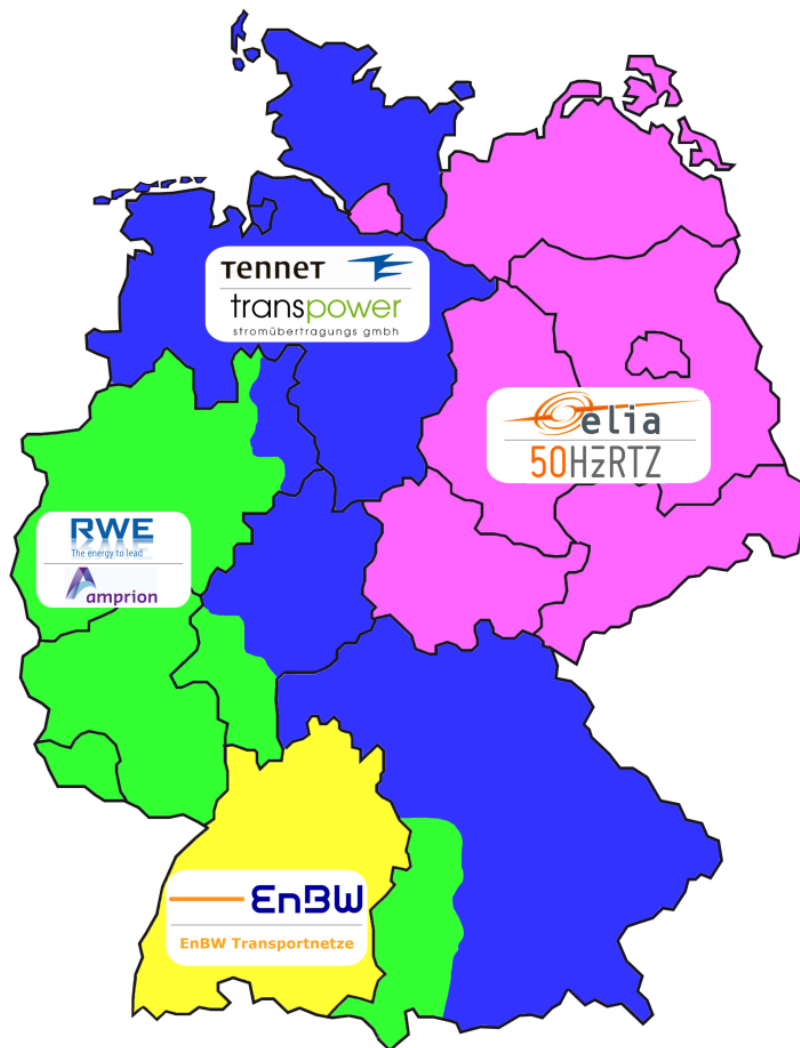


Abbildung 3 Überblick über die Regelzonen im deutschen Stromnetz. CC-BY-SA Ice gixxe

„Strom und Gas 2009“ fest, dass insbesondere im Bereich der Stromerzeugung signifikante Wettbewerbsprobleme aufgrund der hohen Marktkonzentration vorliegen. Sie empfiehlt unter anderem eine Zusammenlegung der vier Regelzonen zu einer einzigen, unter einer unabhängigen Regelinstanz operierenden Regelzone [32].

Unser Stromnetz ist also weit komplexer als der Stromsee suggeriert. Der Ausbau der erneuerbaren Energien verändert dabei viele der Grundannahmen, unter denen unser Stromnetz gebaut wurde. Da der Netzbetreiber die Einspeisungen von Solaranlagen entgegennehmen und vergüten muss, sind sowohl technische Änderungen als auch organisatorische Anpassungen nötig.

Die Stromerzeugung aus Wind, Photovoltaik und Biomasse hat einen steigenden Anteil, im Jahr 2009 betrug er 15,6 % [4]. Die Tendenz ist weiter steigend, einzelne Studien gehen von einem Anteil zwischen mindestens 20 % [10] und 47 % [19] der Erneuerbaren Energien bis 2020 aus. Grundsätzlich macht dieser Trend aus ökologischer Sicht Sinn. Die unregelmässige Verfügbarkeit des EE-Stromes führt dazu, dass z.B. in Phasen starken Windes Grundlastkraftwerke heruntergefahren werden müssen, um die zusätzlichen Strommengen aufzunehmen. Die Machbarkeit ist hier umstritten: Gegner der erneuerbaren Energien weisen darauf hin, dass Grundlastkraftwerke nicht ohne weiteres innerhalb von Stunden heruntergefahren werden können. Befürworter halten dagegen, dass aufgrund von speziellen Windprognosen die Stromeinspeisungen auf Tagesfrist recht genau vorhergesagt werden können und daher eine Abschaltung von Kohle- und Atomkraftwerken machbar ist.

Klar ist in jedem Fall, dass sich durch den zunehmenden Anteil regenerativer Energien im deutschen Strommix Grundlastkraftwerke immer schlechter auslasten lassen. Es verändert sich auch die finanzielle Grundlage für den Betrieb von Grundlastkraftwerken: Diese sind darauf optimiert, möglichst permanent mit hoher Auslastung Strom zu produzieren.

Das derzeit praktizierte Anhalten von Windkraftanlagen in Phasen starken Windes durch die Netzbetreiber ist aus ökologischer Sicht nicht wünschenswert. Die Gründe hierfür liegen laut der Bundesregierung zum einen an Verzögerungen im Netzausbau und andererseits im Fehlen von Energiespeichern [2]. Der Anteil des nicht eingespeisten regenerativen Stroms wird derzeit nicht erfasst. Dies ist bedauerlich, da die Netzbetreiber auch Betreiber von Grundlastkraftwerken sind und so ein Zielkonflikt entsteht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Erneuerbare Energien — so wünschenswert ihr Einsatz ist — führen zu Veränderungen im Stromnetz. Neben technischen Anpassungen sind auch ökonomische Anpassungen notwendig. Wohin also mit dem „grünen“ Strom? Wie kann unser Stromnetz angepasst werden?

## 2 Flexibel durch Demand-Side Management

Klar ist, dass unser Stromnetz flexibler werden muss [20]. Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten, dies zu schaffen: Einerseits können Speichermöglichkeiten für Strom im Netz geschaffen werden, andererseits kann die Nachfrage nach Strom an das Angebot angepasst werden. In Pumpspeicherkraftwerken kann Strom zwischengespeichert werden, in dem Wasser von einem niedrigen Reservoir in ein höher gelegenes gepumpt wird. Wird der Strom wieder benötigt, so wird die in der Höhe gespeicherte Energie über ein Wasserkraftwerk wieder in Strom verwandelt. Üblicherweise werden Pumpspeicherkraftwerke so dimensioniert, dass sie über 4-8 Stunden ihre Leistung abgeben können. Dabei steht die Leistung innerhalb von Minuten zur Verfügung und kann in weiten Bereichen geregelt werden. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 75 % [30, S. 175].

Strom kann auch in Druckluftspeichern zwischengespeichert werden. Diese Technik ist jedoch nicht weit verbreitet — weltweit existieren nur zwei Kraftwerke dieser Bauart, eines davon im niedersächsischen Huntorf [13]. Druckluftspeicher benötigen geologisch geeignete, luftdichte Salzstöcke und können daher nicht überall errichtet werden. Entlang der Nordseeküste könnten allerdings in Zukunft entsprechende Standorte genutzt werden, um Erzeugungsspitzen von Windanlagen aufzunehmen und später wieder an das Netz abzugeben.

In Schwungrädern kann ebenso Strom zwischengespeichert werden. Die Energiedichte ist hier sehr hoch, allerdings kann in Schwungrädern nur relativ wenig Energie gespeichert werden. Schwungräder werden daher überwiegend zur Netzstabilisierung eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit zur Stromspeicherung liegt in modernen Batteriespeichern. Hier gibt es verschiedene Technologien: Neben Lithium-Ionen-Batterien werden auch Redox-Flow-Zellen oder Natrium-Schwefel-Hochtemperaturzellen in Betracht gezogen. Allen Speichern ist gemeinsam, dass Strom in chemische Energie umgewandelt wird. Je nach Batterietyp erfordert die Ladung des Speichers eine komplexe Laderegulierung und spezielle Sicherheitsvorkehrungen. Die Lebensdauer von Batterien wird erheblich durch die Betriebsparameter beeinflusst.

Es gibt derzeit erste Projekte, die den großtechnischen Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien erproben [5]. Dabei werden dezentral Batteriespeicher installiert, die im Falle eines Überschusses Strom aufnehmen und später wieder abgeben können. In die gleiche Kategorie fallen auch Elektrofahrzeuge, die ihre Batteriekapazität nach aussen hin zugänglich machen. Technisch sind stationäre Systeme jedoch einfacher zu betreiben: Die Lade- und Entladeregulierung muss

nicht die hohen Leistungen zur Verfügung stellen, die in einem Elektroauto notwendig sind. Darüber hinaus werden stationäre Systeme auch nur bis zu 30 % ihrer Kapazität entladen. Mit aktuell verfügbaren Technologien können so Batterielebenszeiten von 25 Jahren erreicht werden. Dezentrale Batteriespeicher haben auch den Vorteil, dass sie direkt am Niederspannungsnetz hängen und so z.B. die Einspeisungen von privaten Photovoltaiksystemen aufnehmen können. Der so zwischengespeicherte Strom belastet die Übertragungsnetze nicht, sondern verbleibt lokal in einem Versorgungsnetz, bis der Strom dort benötigt wird.

Die zweite Möglichkeit, das Stromnetz flexibler zu machen, liegt im *Demand-Side Management*. Statt auf der Seite der Stromerzeugung und -verteilung Änderungen vorzunehmen, wird der Verbrauch von Strom beeinflusst. Damit ist jedoch zunächst nicht die Reduzierung des Stromverbrauchs gemeint, obwohl dies natürlich eine sinnvolle Anstrengung ist. Stattdessen wird der Stromverbrauch auf der Zeitachse verschoben. Das Ziel ist es, Stromverbraucher dann zu betreiben, wenn sowieso viel Strom erzeugt wird. Umgekehrt laufen diese Verbraucher nicht, wenn zu einem anderen Zeitpunkt weniger Strom erzeugt wird.

Im Industriebereich ist diese Herangehensweise schon lange Standard — unter dem Stichwort „Lastabwurf“ hat ein Netzbetreiber die Möglichkeit, den Stromverbrauch von einzelnen Industriebetrieben gezielt zu reduzieren, um Engpässe zu vermeiden. Im Gegenzug erhält der Industriebetrieb bessere Bezugskonditionen für Strom. Ein Verteilnetzbetreiber ist so in der Lage, relativ schnell erhebliche Lasten im Netz der momentanen Erzeugung anzupassen. Üblicherweise sind — unter anderen — die folgenden Eingriffe möglich [22, S. 23f] [33, S. 85ff]:

- (1) *Lastspitzenreduzierung*: Dabei werden einzelne Lastspitzen gekappt, in dem zur Spitzenzeit Verbraucher abgeschaltet werden. In den Spitzenzeiten werden so höhere Kosten zur Stromerzeugung vermieden.
- (2) *Lasttauffüllung*: Falls Strom zu Grenzkosten angeboten werden kann, lohnt es sich, Verbraucher zu diesem Zeitpunkt zu betreiben. Ein Tiefkühlhaus könnte in solchen Phasen als Energiespeicher dienen, in dem die Temperatur abgesenkt wird. Durch diese Temperaturabsenkung wird dann später weniger Strom benötigt. Gleichzeitig werden eventuelle Überschüsse sinnvoll genutzt.
- (3) *Lastverschiebung*: Generell können natürlich Lasten im Stromnetz auf einen anderen Zeitpunkt verschoben werden, um vielfältige Ziele zu erreichen. Speziell bei kurzfristigen Lastveränderungen („Flexible Load Shaping“) wird kurzfristig Regelenergie durch einen Lastabwurf frei.

Allen Eingriffen gemein ist, Lastspitzen zu glätten oder zu verschieben, um den Einsatz teurer Spitzenlastkraftwerke zu verhindern. Bei entsprechenden Prognosen können diese Techniken auch dazu eingesetzt werden, Strom aus

Jahr	Kapazität in GW
2008	11,45
2010	11,50
2013	12,15
2015	12,82
2020	13,32

Tabelle 2

Prognose der Demand Side Management-Kapazitäten im Bereich der UCTE. Quelle: [34]

den erneuerbaren Energiequellen aufzunehmen und gezielt zu nutzen. Im Jahr 2007 nutzen die europäischen Übertragungsnetzbetreiber Demand Side Management-Kapazitäten im Bereich von mehreren GWh [16]. Torriti et al. [34] gehen von einem stetigen Wachstum der Kapazitäten in Europa aus, vgl. Tabelle 2. Zusammengenommen können momentan 2,9 % der Spitzenlast durch Demand Side Management verschoben werden.

Im Privathaushalt ist Demand Side Management jedoch noch nicht im Einsatz, hier können noch erhebliche Kapazitäten erschlossen werden. Die Gründe hierfür sind vielfältig:

- (1) Die notwendige Regelungstechnik ist in nur wenigen Haushalten vorhanden. Die Grundlage für die Steuerung von Geräten ist ein Hausbus, über den Steuersignale kommuniziert werden. Die gegenwärtig verfügbaren Systeme (KNX, EIB) sind recht aufwendig und teuer, sodass hier noch weitere Entwicklungen notwendig sind.
- (2) In die Haushaltsgeräte ist normalerweise kein Zugang für ein Energiemanagementsystem eingebaut. Zum Beispiel gibt es bei einer Spülmaschine üblicherweise keine Schnittstelle, um ein Startkommando zu übermitteln.
- (3) Es gibt kaum finanzielle Anreize für Privathaushalte, um in diese Technologien zu investieren. Gegenwärtig sind einzig Nachtstromtarife darauf zugeschnitten, den Verbrauch in Nebenzeiten zu fördern. Diese Tarife fördern jedoch eher den Betrieb von Grundlastkraftwerken als den sinnvollen Verbrauch von Strom zu Zeiten hoher Ökostromproduktion.

Im Rahmen der E-Energy Initiative der Bundesregierung arbeiten diverse Projekte daran, Demand Side Management-Technologien in Haushalte zu integrieren [11]. Auch Gerätehersteller wie Miele integrieren spezielle Energiemanagementschnittstellen in ihre Geräte [25]. Allen diesen Lösungen gemein ist jedoch, dass sie modellhaften Charakter haben und allenfalls in Pilotprojekten getestet werden.

In diesen Pilotprojekten ist neben den Managementtechnologien vor allem die Einführung von intelligenten Stromzählern (Smart Metern) ein Thema. Smart Meter sind elektronische Stromzähler, welche die bekannten schwarzen Ferraris-Zähler ersetzen. Sie bieten neben der Anzeige des Gesamtzählerstandes

auch die Möglichkeit, den Momentanverbrauch oder den Wochenverbrauch anzuzeigen. Einige Modelle bieten zudem auch die Möglichkeit, den Stromverbrauch an den Netzbetreiber zurückzumelden, oft in 15-minütigen Intervallen. Stromkunden können, wenn Informationen zum Momentanverbrauch unmittelbar zur Verfügung stehen, ihr Verhalten direkt verändern und so ihren Strombezug um 15-20 % reduzieren [20]. Ebenso ist es denkbar, mit den gesammelten Strombezugsinformationen weiterführende Analysen durchzuführen. Diese können zum Beispiel Geräte identifizieren, die einen erheblichen Anteil am Stromverbrauch haben. Daraufhin können automatisiert Hinweise gegeben werden, dass sich z.B. die Anschaffung eines energiesparenden Kühlschranks schon nach einem Jahr amortisiert hätte.

Für die Netzbetreiber bzw. den Messtellenbetreiber ist dies eine Herausforderung, da Kunden nicht bereit sind, für die neue Messtechnik zu bezahlen. Zwar sind durch die direkte Rückmeldung von Stromverbrauchsdaten Einsparungen zu erwarten, jedoch stehen diese Einsparpotentiale in keinem Verhältnis zu den Mehrkosten der Smart Meter: Die Bundesnetzagentur geht von einem Einsparpotential von 12€ bis 50€ im Jahr aus [6, S. 70]. Zudem erlauben gerade zeitlich eng aufgelöste Daten im 15-Minuten-Bereich erhebliche Rückschlüsse auf die Lebensgewohnheiten der Anschlussinhaber.

### 3 Datenschutz

Einerseits sind diese Daten natürlich für den Stromkunden interessant, da er den Einfluss seines Verhaltens auf den Stromverbrauch vor Augen geführt bekommt und so insgesamt weniger verbrauchen wird. Andererseits sind die Stromverbrauchsdaten aus Netzbetreibersicht auch sehr interessant, da sich hier völlig neue Möglichkeiten für Preismodelle und auch für das Marketing ergeben. Momentan werden Privathaushalte über Standardlastprofile abgerechnet, d.h. ein Verteilnetzbetreiber wird nicht für die real gelieferte Strommenge bezahlt, sondern auf der Basis eines durchschnittlichen Lastprofils und der Anzahl der versorgten Haushalte wird eine Pauschale abgerechnet. Mit Smart Metern kann nun der reale Verbrauch bestimmt werden und wird in Zukunft wohl zur Grundlage der Abrechnung werden <sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Entsprechende Änderungen werden derzeit von der Bundesnetzagentur diskutiert.

Um diese Abrechnung vorzunehmen gehen die Netzbetreiber davon aus, dass die Stromverbrauchsdaten in hoher zeitlicher Auflösung an sie übertragen werden, um dann eine verbrauchsgenaue Abrechnung gegenüber den Stromanbietern machen zu können. Diese Daten sind jedoch als sehr sensibel einzustufen, da hieraus auf Lebens- und Konsumgewohnheiten geschlossen werden kann.

Ein beispielhafter Tagesverlauf des Autors ist in [Abbildung 4](#) dargestellt. Die

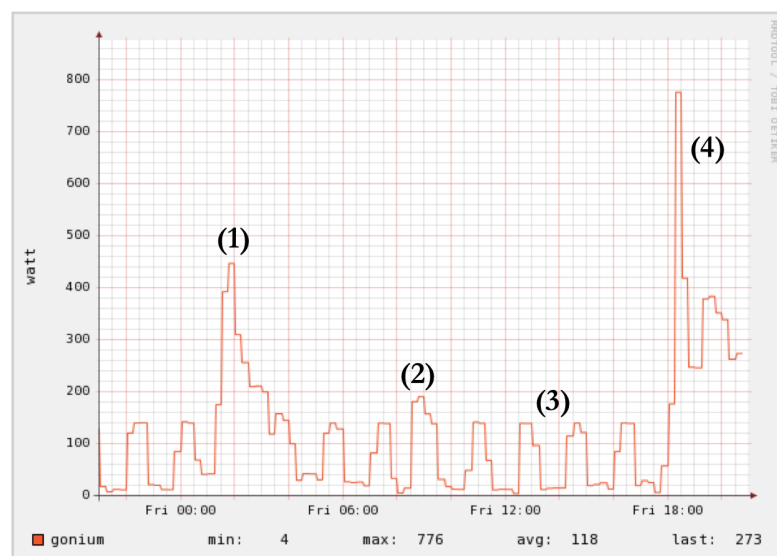


Abbildung 4

Der Stromverbrauch des Autors am Beispiel eines Tages.

Kurve gibt den Stromverbrauch in fünfminütigen Intervallen wieder. Bei Markierung (1) ist der Autor aufgestanden, weil er aufgrund einer Kanada-Reise an Jetlag litt. Die Benutzung von Wasserkocher und der Rechners schlägt sich deutlich nieder. Gegen 4:00 wurde weitergeschlafen. Um acht Uhr morgens (2) läuft die kleine Senseo-Kaffeemaschine, tagsüber war der Autor arbeiten. Während dieser Zeit führt der Kühlschrank zu regelmässigen Ausschlägen (3). Gegen 18:00 kam der Autor nach Hause und benutzte die Mikrowelle.

Die Gerätesignaturen sind natürlich spezifisch für einzelne Geräte bzw. Betriebszustände. Eine Waschmaschine bietet verschiedene Programme, die auch zu leicht unterschiedlichen Signaturen führen. Zusätzlich führt die Reduktion auf — in diesem Beispiel — fünf-Minuten-Messintervalle zum Verlust von Information. Die Senseo-Kaffeemaschine (2) zeigt bei einminütigen Messintervallen einen recht spezifischen Spitzenverbrauch von 1400 Watt für ca. 1 Minute. Wenn die Werte jedoch als Durchschnittsverbrauch der letzten fünf Minuten dargestellt werden, bleibt davon nur noch eine kleine Spitze übrig.



Derzeit sehen die Smart Meter-Infrastrukturen eine zeitnahe Übermittlung von 15-Minuten-Intervallwerten an die Messstellenbetreiber vor. Daraus lassen sich immer noch einzelne Geräte identifizieren, wobei natürlich wenig charakteristische Signaturen herausgemittelt werden<sup>3</sup>. Dennoch ergeben sich hier erhebliche Privacy-Probleme: Durch statistische Verfahren lässt sich recht einfach entscheiden, wie oft und wie lange ein Bewohner in der Wohnung ist. Daraus kann zum Beispiel abgeleitet werden, ob der Bewohner einer regelmässigen Tätigkeit nachgeht [26] [24].

Derzeit argumentieren die Messstellenbetreiber, dass die Installation von Zählern und die Übertragung und Speicherung von Verbrauchsdaten für die Abrechnung notwendig ist. Die Einwilligung zur Datenverarbeitung lassen sie sich durch den Anschlussinhaber bestätigen. Da dieser jedoch üblicherweise gar keine andere Wahl hat, steht diese Argumentation juristisch auf tönernen Füßen [23].

Auch wenn die Daten anonymisiert werden würden, lassen sich unter Umständen die Datenbestände wieder auf einzelne Personen bzw. Messstellen beziehen. So weisen Narayanan und Shmtikov auf die Möglichkeiten der "De-Anonymisierung" von Datensätzen hin [27]. Sie beschreiben dabei die prinzipielle Unmöglichkeit, einmal erhobene Daten zu anonymisieren und dabei die Rückverfolgbarkeit auszuschliessen. Ebenso argumentiert Shapiro und weist darauf hin, dass Privacy als nichtfunktionale Anforderung nur als Designkriterium am Anfang in die Systementwicklung integriert werden kann [31]. Eine nachträgliche Integration von Privacy in ein bereits existierendes System ist quasi nicht möglich [8].

Als Fazit lässt sich festhalten, dass einmal in Umlauf gebrachte Daten wieder auf individuelle Verbraucher zurückgeführt werden können. Stromverbrauchswerte sind in ihrer Sensibilität mit Bankdaten gleichzusetzen sind. Es ist unverständlich, dass hier keine besonderen Anforderungen an die Verarbeitung von solchen Daten vorgesehen sind.

Generell ist die Datenübertragung zum Messstellenbetreiber natürlich nicht zur Abrechnung erforderlich. Moderne Zähler sind mit mehreren „Zählregistern“ ausgestattet. Abhängig von einzelnen Tarifstufen werden gemessene Kilowattstunden auf den verschiedenen Zählregistern erfasst. Einmal im Monat können diese Zählregisterstände dann an den Messstellenbetreiber übertragen werden, ohne dass Rückschlüsse auf die Lebensgewohnheiten des Anschlussinhabers möglich sind. Auch die Bundesnetzagentur hat die Anforderungen an Smart Meter kürzlich konkretisiert [7]: Eine zeitnahe Übertragung der Messwerte an den Messstellenbetreiber ist nicht erforderlich, wohl aber eine Kundenschnittstelle, mit der Kunden herstellerübergreifend die Verbrauchsdaten auslesen können.

---

<sup>3</sup>Auch hier gilt natürlich das Nyquist-Theorem.

In den Niederlanden wurde der flächendeckende Rollout der Smart Metering-Infrastruktur nach Bekanntwerden der Datenschutz-Problematik gestoppt [21]. Die Installation der Smart Meter ist nun freiwillig — damit sind die erwarteten Kosteneinsparungen für den Betrieb des Zählwesens nicht mehr zu erreichen. Bleibt zu hoffen, dass es in Deutschland nicht zu einer vergleichbaren Situation kommt.

## 4 Open-Source Demand Side Management: mySmartGrid

Wie oben bereits dargestellt, ist Demand Side Management eine interessante Technik vor allem für die Verteilnetzbetreiber. Diese müssen den Strom von privaten Photovoltaikanlagen aufnehmen und verteilen. In ländlichen Gegenden kommt es momentan in den ersten Gemeinden zu einem Anschlussstopp für neue PV-Anlagen, weil das Leitungsnetz die zusätzlichen Einspeisungen nicht aufnehmen kann. Neben der dezentralen Speicherung von PV-Strom kann auch Demand Side Management dabei helfen, mehr PV-Anlagen an das Netz zu bringen.

Im Projekt *mySmartGrid*<sup>4</sup> wird zur Zeit in Kaiserslautern eine entsprechende Infrastruktur aufgebaut. Das Projekt wird vom Land Rheinland-Pfalz im Rahmen des Konjunkturprogramm II gefördert. Alle Technologien werden in enger Zusammenarbeit sowohl mit den Stromverbrauchern als auch mit den Verteilnetzbetreibern aus der Region (Technische Werke Kaiserslautern, Pfalzwerke) entwickelt. Unser Ziel ist es, ein Ökosystem von freien Komponenten aufzubauen, aus denen dann für einen konkreten Anwendungsfall eine Lösung kombiniert werden kann. Bei der Hardware setzen wir auf modifizierte Consumer-Geräte, die einen hohen Verbreitungsgrad haben. Ein möglichst großer Anteil der Funktionen soll in Software implementiert werden, da diese quasi ohne weitere Kosten vervielfältigt werden kann. Selbstverständlich werden alle Projektergebnisse (Soft- und Hardware) unter einer Open-Source Lizenz veröffentlicht.

Im Projekt wird die Kommunikation nicht über Techniken wie Powerline oder GPRS-Verbindungen umgesetzt, sondern wir benutzen die bereits existierende Internet-Flatrate unserer Teilnehmer. Die Größe der übertragenen Daten ist dabei

---

<sup>4</sup>Siehe auch <http://www.mysmartgrid.de>

sehr gering. Die anfängliche Idee, das Mobilfunknetz zur Datenübertragung zu benutzen, wurde schnell verworfen — es wäre schlicht zu teuer.

Momentan werden bis zu 1000 Haushalte in Kaiserslautern und Umgebung mit der Technik ausgerüstet. Die Geräte müssen sich also im Praxiseinsatz bewähren. Da die Installation von Geräten durch Handwerker aus der Region erfolgt, ist eine möglichst gute Installationsunterstützung durch Softwarewerkzeuge notwendig.

#### 4.1 Messen und Verstehen

In der ersten Projektphase geht es darum, den Teilnehmern ein Verständnis für den individuellen Stromverbrauch zu geben. Hierzu benutzen wir den „Flukso“ [17], um den Stromverbrauch eines Haushalts zentral zu messen, vgl. Abb. 5. Technisch ist der Flukso ein modifizierter WLAN-Router. Das System



Abbildung 5

Der Flukso ist ein Strommessgerät. An den Schraubklemmen an der Oberseite werden die Sensoren angeschlossen. Für die Kommunikation sind eine WLAN-Schnittstelle und eine Ethernet-Schnittstelle integriert. Quelle: CC-BY-SA-NC Mathias Dalheimer.

besteht aus zwei Teilen: Ein kleiner Mikrocontroller kümmert sich um die Messwerterfassung. Die Installation erfordert keine Neuverkabelung, da die Messung indirekt über Halleffektsensoren erfolgt. Diese können einfach um die existierenden Phasenzuleitungen gelegt werden. Die Sensoren geben eine Spannung zwischen 0V und 5V aus, die proportional zum Strom in den Phasenleitungen ist. Der Mikrocontroller misst diese Spannung und rekonstruiert den aktuellen Stromverbrauch. Über die serielle Schnittstelle werden diese Messwerte an das WLAN-Routerboard übertragen.

Das Routerboard basiert auf einem Atheros-Chipsatz und läuft unter OpenWRT. Die Messdaten des Mikrocontrollers werden von einem Lua-Script entgegengenommen, aufbereitet und dann zur mySmartGrid-Webseite übertragen, wo sie visualisiert werden können. Ausserdem können die Messwerte auch lokal abgefragt werden.

Die Daten werden auf der mySmartGrid-Webseite nicht dauerhaft gespeichert, sondern nach und nach vergessen. Für die erste Stunde sind Minutenwerte gespeichert, für die letzten 24 Stunden nur noch fünfminütige Werte. Danach sinkt die Auflösung rapide. Wer die Daten dennoch in hoher Auflösung haben möchte, muss die API der Webseite benutzen. Weil viele Teilnehmer dies tun möchten, haben wir auch einen „Rekorder-Dienst“ implementiert, welcher die Daten in höchster Auflösung mitschreiben kann. Die API ist als RESTful Webservice umgesetzt und liefert die verfügbaren Daten im JSON-Format.

Die Webseite bietet auch die Möglichkeit, seine eigenen Stromverbrauchswerte anderen Benutzern der Webseite zugänglich zu machen. Diese können dann die eigenen Stromkurven mit denen von anderen Benutzern vergleichen. Obwohl dies erhebliche Privacy-Implicationen hat, geben die meisten Benutzer ihre Stromverbrauchswerte frei. Der Vergleich des eigenen Stromverbrauchs mit anderen Teilnehmern wird im Forum diskutiert.

Natürlich kann man nun argumentieren, dass die Daten eigentlich nicht übertragen werden müssen. Wir gehen diesen Weg, damit auch unbedarfte Projektteilnehmer eine schnelle Visualisierung ihrer Daten in Anspruch nehmen können, ohne eine eigene Infrastruktur betreiben zu müssen. Mit dem Volkszähler [35] ist eine Alternative zum Flukso verfügbar, bei der die anonyme Speicherung von Daten im Vordergrund steht. Es ist auch denkbar, alle Messdaten lokal bei den Teilnehmern aufzubereiten. Dies würde dann auf dem Chumby (s.u.) geschehen. Zur langfristigen Datenspeicherung sind die in unseren Geräten verbauten Flashspeicher allerdings nicht geeignet. Falls in Zukunft kleine und billige SSD-basierte Speicher verfügbar sind, kann einfach auf eine lokale Datenhaltung umgestellt werden.

Aber auch die kommerziellen und von den Messstellenbetreibern eingesetzten Smart Meter müssen eine lokal auslesbare Kundenschnittstelle bieten [7]. Prinzipiell ist es natürlich möglich, die Smart Meter in die mySmartGrid-Infrastruktur anzubinden. Über die optische serielle Kundenschnittstelle wird jede Sekunde ein Datagramm mit allen relevanten Informationen gesendet. Ein Mikrocontroller mit zugehöriger Fotodiode ist prinzipiell alles, was zum Auslesen benötigt wird — eine Open-Source Lösung hierfür fehlt derzeit. Die momentan verfügbaren Ausleseköpfe sind entweder als USB-Adapter oder auch als Wireless MBUS-Komponenten ausgelegt. Eine direkte Übermittlung der Daten zur mySmartGrid-Webseite erfordert also noch weitere Komponenten. Die Erfassung über den Flukso ist momentan die preiswerteste Variante.

Hinzu kommt, dass die Umsetzung der Kundenschnittstelle zunächst dem Hersteller des Stromzählers überlassen ist. Viele Hersteller setzen auf den elektronischen Einheitszähler, der vom VDE standardisiert wird [18]. Aber selbst hier finden sich Inkompatibilitäten in den Umsetzungen — derzeit ist kein einheitlicher Übertragungsstandard für die lokale Schnittstelle absehbar.

Das Messen ist allerdings zumeist nicht genug, um eine nachhaltige Änderung des Stromverbrauchsverhaltens anzuregen. Dazu setzen wir auf zwei Ansätze:

- (1) Automatisierte Analysen helfen, den eigenen Stromverbrauch zu beurteilen. Dazu sind zunächst recht fein aufgelöste Stromverbrauchswerte nötig, um einzelne Verbraucher erkennen zu können. Daher muss dieses Verfahren optional bleiben und nur bei Bedarf vorgenommen werden. Wir schneiden dann für zwei Wochen die Stromverbrauchswerte mit und identifizieren einzelne Verbraucher. Basierend auf dieser Analyse ist es dann recht einfach, konkrete Handlungsempfehlungen zu geben, z.B. „Tauschen Sie Ihren Kühlschrank aus — das amortisiert sich nach 2, 4 Jahren.“ Diese Analysen sind im Moment noch im Forschungsstadium.
- (2) Weiterhin ist es für Stromkunden hilfreich, den Effekt ihrer Handlungen unmittelbar zu sehen [9]. Ein Wasserkocher verbraucht in etwa 2kW - das führt zu einem gut sichtbaren Sprung in der Stromverbrauchskurve. Die logische Konsequenz wäre es, nur die wirklich benötigte Menge Wasser in den Wasserkocher zu füllen und das Wasser wirklich zu benutzen.

Zur lokalen Anzeige der Verbrauchsinformationen bekommen die Teilnehmer zusätzlich auch einen „Chumby“, vgl. Abbildung 6. Der Chumby basiert technisch ebenso wie der Flukso auf einem WLAN-Router, hat allerdings einen Touchscreen und einen Lautsprecher integriert. Es sind schon viele Applikationen für den Chumby verfügbar, sodass das Gerät neben Stromverbrauchsinformationen auch den Wetterbericht anzeigen und Internetradio abspielen kann. Da der Chumby permanent angeschaltet ist, kann er im Hintergrund Informationen anzeigen. Diese müssen auf einen Blick verständlich sein. Das Ziel ist hier, eine permanente Verbrauchsanzeige zu realisieren. Welche Darstellungsformen für die Strominformationen am Sinnvollsten sind, werden wir in der kommenden Zeit zusammen mit unseren Projektteilnehmern erarbeiten. Zusätzlich wird der Chumby auch als Schaltzentrale für den Haushalt genutzt, siehe Abschnitt 4.2.

Auch für andere Anwendungen ist die Messung von Stromverbräuchen interessant. Für die Eigentümer von Photovoltaik-Anlagen werden wir in Zukunft spezielle Monitoring-Möglichkeiten anbieten. Dabei wird über eine lokale Wettervorhersage der mögliche Ertrag für den kommenden Tag prognostiziert und dann mit der tatsächlichen Produktion verglichen. Kommt es hier zu größeren Abweichungen, kann der Eigentümer der Anlage verständigt werden. Diese Informationen lassen sich auch zur Optimierung des



Abbildung 6

Der Chumby zeigt kleine Widgets an: Wetterbericht, Nachrichten und zukünftig auch den Stromverbrauch. Mit dem integrierten Internetradio ist er optimal als Küchenradio einzusetzen. Bild: CC-BY-SA-NC Mathias Dalheimer.

Eigenstromverbrauchs verwenden: Wenn sich abschätzen lässt, wann entsprechende Strommengen produziert werden, kann man Hinweise zur Steuerung von Stromverbrauchern geben. So lässt man dann die Waschmaschine vielleicht nicht morgens, sondern mittags laufen, wenn einen Tag im Voraus klar ist, wann die Sonne scheinen wird.

## 4.2 Regelung von Verbrauchern

Der nächste Schritt ist das automatische Steuern von Verbrauchern im Haushalt. Mit Hilfe von meteorologischen Modellen ist es möglich, die Stromproduktion auf Tagesfrist recht genau vorherzusagen. Wenn also morgen Mittag der Wind weht oder die Sonne scheint, führt dies auch zu einer erhöhten Stromproduktion. Diese Information kann dann einen Tag im Voraus zu den Haushalten transportiert und angezeigt werden. Die Nutzer können ihr Verhalten entsprechend anpassen — für eine Spülmaschine ist es meist recht egal, ob sie morgens oder mittags läuft.

Natürlich ist dies aber nicht genug, denn eigentlich sollte diese Regelung automatisch passieren. Leider bieten die meisten Haushaltsgeräte keine Möglichkeit, Steuerbefehle à la „heute mittag um 14:00 Strom verbrauchen“ zu verarbeiten. Ebenso ungelöst ist die Frage nach einem universellen und nachrüstbaren Bussystem, welches diese Steuerinformationen zu den Verbrauchern transportiert. Bussysteme wie EIB und KNX sind nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn gleichzeitig größere Umbauten an der Wohnung

vorgenommen werden. Darüber hinaus sind diese Systeme auch recht teuer. Dies schließt alle Leute aus, die in einer Mietwohnung wohnen, denn beim Auszug ist es nicht ohne weiteres möglich, das Bussystem mitzunehmen.

Mit „digitalStrom“ wird derzeit ein anderes System entwickelt, welches mit relativ geringem Aufwand nachrüstbar ist und Steuerinformationen über das Stromnetz transportiert. Dieses System ist jedoch noch nicht am Markt verfügbar — die Markteinführung wurde in den vergangenen Jahren immer wieder verschoben. Ausserdem ist das digitalStrom-System eine proprietäre Lösung, die nur von einem Anbieter angeboten wird.

Langfristig ist eine Lösung wünschenswert, die eine IP-basierte Kommunikationsinfrastruktur auf kleinen Mikrocontrollern umsetzt. Eine solche Lösung wäre bezahlbar, gleichzeitig könnte durch die Verwendung von IPv6 das Problem der Adressvergabe an die Endgeräte gelöst werden. Unsere Prototypen auf der Basis von 6LoWPAN und funkbasierter Kommunikation (868 MHz) zeigen, dass eine solche Lösung sehr wohl kostengünstig umzusetzen ist<sup>5</sup>. Der

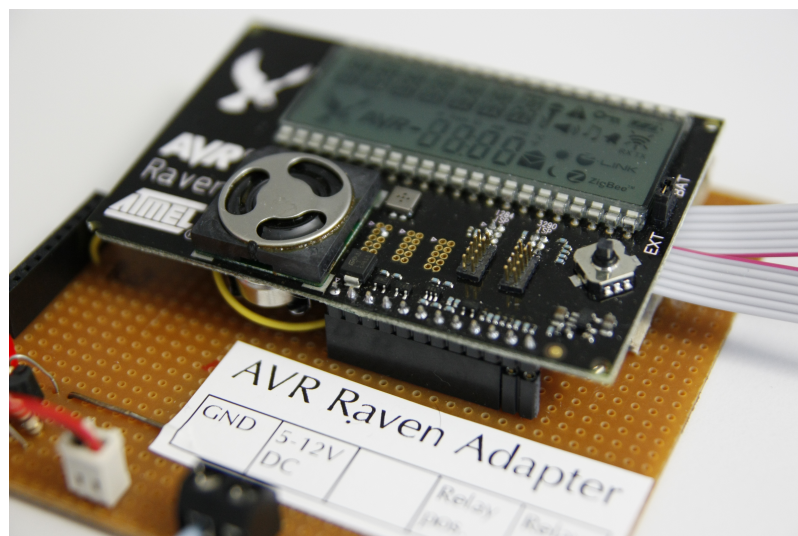


Abbildung 7

Logikteil des OctoBus-Prototyps, basierend auf dem AVR Raven Evaluation Kit. Auf dem Kit läuft Contiki. Ein externes Relais wird geschaltet, wenn ein entsprechendes UDP-Paket empfangen wird. Bild: CC-BY-NC-SA Matthias Dalheimer

Prototyp „OctoBus“ kann derzeit von beliebigen IPv6-Rechnern aus ein Relais schalten, siehe Abb. 7. Als Betriebssystem benutzt OctoBus Contiki [38]. Alternativ ist auch mit Ethersex eine etablierte Lösung verfügbar [14]. Da hochintegrierte Funkchipsätze sowie leistungsfähige 8Bit-Mikrocontroller verfügbar sind, kann eine Funkschaltsteckdose für 20 Euro Materialkosten hergestellt werden. Momentan arbeiten wir mit Partnern daran, eine Kleinserie

<sup>5</sup>Eine komplette Dokumentation inklusive Kalkulation der Materialkosten des Prototyps ist unter [http://developer.mysmartgrid.de/doku.php?id=project\\_octobus](http://developer.mysmartgrid.de/doku.php?id=project_octobus) beschrieben.

von 300 Funkschaltsteckdosen-Sets zu entwickeln und zu fertigen. Diese Technik wird dann auch in unseren Teilnehmerhaushalten installiert.

Für das Projekt optimal sind Haushaltsgeräte, die einerseits recht viel Strom im Betrieb verbrauchen und bei denen andererseits das Verzögern des Betriebs möglich ist. Realistische Geräte für diese Anwendung sind also Waschmaschinen und Spülmaschinen, aber auch Tiefkühlgeräte oder Wärmepumpen. Sowohl Waschmaschinen als auch Spülmaschinen sind allerdings nicht einfach einzubinden, da diese vor dem Betrieb natürlich beladen werden müssen und eventuell auch ein Wasserhahn geöffnet werden muss. Daher liegt der Schwerpunkt unserer Arbeit zunächst einmal auf Kühlgeräten und Wärmepumpen. Die Einbindung von weiteren Geräten (vgl. [22, S. 22]) ist aber vorgesehen.

Wir greifen dabei nicht in die interne Regelung der Geräte ein<sup>6</sup>. Für Kühlschränke und Gefriertruhen funktioniert folgender Ansatz: Die Geräte werden über einen Zwischenstecker von der Stromversorgung getrennt. In der Folge steigt die Innentemperatur an. Wenn nun der Stromverbrauch zu einem Zeitpunkt  $t$  maximiert werden soll, muss die Innentemperatur zu diesem Zeitpunkt also recht hoch sein. Dann wird das Kühlgerät wieder ans Netz angeschlossen. Die Regelung des Kühlgerätes wird nun aufgrund der (relativ) hohen Innentemperatur den Kompressor anschalten und wie gewünscht Strom verbrauchen. Diese Herangehensweise darf jedoch nicht dazu führen, dass Lebensmittel verderben oder Tiefkühlware auftaut.

Eine einfache Lösung wäre, die Innenraumtemperatur des Kühlgerätes über einen Sensor zu überwachen. Dieser Sensor verursacht jedoch Zusatzkosten. Daher prognostizieren wir das Verhalten der internen Regelung des Gerätes und übersteuern diese gezielt. Das setzt eine Systemidentifikation und eine Einrichtungsprozedur voraus. Diese ermittelt dann Regelparameter, die dazu benutzt werden, das Kühlgerät gezielt vor dem geplanten Anschaltzeitpunkt auszuschalten. Gleichzeitig ist gewährleistet, dass die Kühlkette nicht unterbrochen wird. Aus den Strommessungen lässt sich lokal auch feststellen, ob der Kompressor eines Kühlgerätes anläuft. Durch kurzes Einschalten ist es auch ohne Temperatursensor möglich, Rückschlüsse auf die Innentemperatur des Kühlgerätes zu ziehen. Die Technik hierfür funktioniert schon. Da aber im Moment noch kein brauchbares Hausbussystem zur Verfügung steht, sind derzeit nur zwei Testkühlschränke entsprechend ausgerüstet. Für Wärmepumpen funktioniert der gleiche Ansatz, die entsprechende Regelungstechnik wird derzeit entwickelt.

Der wichtigste Faktor ist jedoch die Akzeptanz der Technologie bei den Anwendern: Diese müssen jederzeit in der Lage sein, die vorgeschlagenen Regeleingriffe abzulehnen. Da die Regelungsalgorithmen sowieso auf dem

---

<sup>6</sup>Es wäre für unsere Teilnehmer wohl nicht akzeptabel, Haushaltsgeräte konstruktiv zu verändern.



Chumby laufen werden, ist hier auch der logische Platz, um den Benutzer über die aktuelle Planung zu informieren. Dort wird es dann auch die Möglichkeit geben, die Regelung zu beeinflussen oder auch zu deaktivieren. Sobald entsprechende Schnittstellen zu weiteren Geräten verfügbar sind, spricht natürlich auch nichts dagegen, diese einzubinden.

Schliesslich ist eine weitere Gruppe von Stromkunden sehr interessant für den Einsatz von Haussteuerungen: Für Photovoltaikanlagenbesitzer ist ab diesem Sommer der Eigenverbrauch des selbst erzeugten Stroms die rentabelste Option, wenn die Anlage nach dem 1. Juli 2010 ans Netz geht. Dafür ist es notwendig, Haushaltsgeräte möglichst dann zu betreiben, wenn die Photovoltaikanlage auf dem Dach gerade Strom liefert. Für jede selbst erzeugte und selbst verbrauchte Kilowattstunde (am 30 % Eigenverbrauchsanteil) bekommt der Anlagenbesitzer  $0,22 \text{ €/kWh}$ . Dazu kommen natürlich noch circa  $0,20 \text{ €/kWh}$ , die gespart werden, weil der Strom nicht über den Hausanschluss von aussen eingekauft werden muss. Im Vergleich dazu bekommt der Anlagenbesitzer maximal  $0,34 \text{ €/kWh}$ , wenn eine Kilowattstunde selbst erzeugten Stroms in das Netz eingespeist wird. Unter dem Strich kann der Anlagenbesitzer also  $0,08 \text{ €/kWh}$  mehr einnehmen, wenn der Strom selbst verbraucht wird. In Zukunft werden die Zuschüsse weiter sinken, die Relationen zwischen Einspeisung und Eigenverbrauch werden jedoch gleich bleiben. Dies macht auch ökonomisch Sinn, denn der selbstverbrauchte Strom muss nicht über das Stromnetz transportiert werden und entlastet es. Ein teurer Netzausbau kann so vielleicht nicht ganz vermieden, aber doch verzögert bzw. reduziert werden.

Praxistauglich ist so ein System nur, wenn vorab bekannt ist, wann die Photovoltaikanlage Strom liefert und wann nicht. Daher müssen Wetterprognosen in die Regelung der Geräte einbezogen werden, um den optimalen Betriebszeitpunkt zu ermitteln. Diese können dann auch auf dem Chumby angezeigt werden, sodass die Haushaltsbewohner diese Informationen bewusst in ihr Nutzungsverhalten einbeziehen können.

Die Hersteller von Wechselrichtern für Solaranlagen sind dabei, entsprechende Managementfunktionen in ihre Geräte zu integrieren. Dabei rechnen sie damit, dass zwischen 30 und 50 % des eigenen Solarstroms selbst verbraucht werden können [28]. Die Geräte hierfür werden zwischen 700 und 900 Euro kosten und zusätzlich zum Wechselrichter installiert werden. Auch hier werden Tiefkühlgeräte als regelbare Geräte eingebunden [28].

Basierend auf den hier dargestellten Projektergebnissen gehen wir davon aus, eine entsprechende Überwachungsfunktionalität — je nach Ausbaustufe — zwischen 150 und 400 Euro anbieten zu können. Dazu kommt dann noch ein Datenabo, da die Wetterprognosen in die Geräteüberwachung einfließen. Dabei ist unsere Lösung herstellerunabhängig.

### 4.3 Virtueller Verbraucher

Natürlich ist es für einen einzelnen Haushalt nicht möglich, signifikanten Einfluss auf das Stromnetz zu haben. Allerdings gibt es ja recht viele Haushalte, auf die man potentiell Einfluss nehmen könnte. Alle Teilnehmer rufen also einen Tag im Voraus die Prognose für den nächsten Tag ab und versuchen, diese umzusetzen. Zusammen genommen sind 1000 Haushalte dann in der Lage, vielleicht 1 MWh zu verschieben. Die genaue Modellierung ist hier ein statistisches Problem, denn nicht jeder Haushalt wird sich an die Handlungsempfehlungen halten. Zusammengenommen dürfte es jedoch möglich sein, einen signifikanten Einfluss auf das lokale Stromnetz zu haben.

Dieser Eingriff bietet Chancen für die lokalen Netzbetreiber. Diese können dieses Regelpotential in ihre kurzfristige Planung mit einbeziehen. Wenn normalerweise Lastspitzen durch den teuren, kurzfristigen Zukauf von Strom abgedeckt werden müssen, können sie durch die Verschiebung von Lasten Geld sparen. Diesen Profit können sie sich dann mit den teilnehmenden Haushalten teilen. Hier sind zwei Modelle denkbar:

- (1) Die Haushalte schliessen sich zu einer Genossenschaft zusammen und verhandeln direkt mit dem lokalen Netzbetreiber. Die Vermarktung des Regelpotentials ist nicht an einen Stromlieferanten gebunden, d.h. die Mitglieder der Genossenschaft können ihren Strom bei unterschiedlichen Lieferanten einkaufen. Die Einnahmen der Genossenschaft können zur Finanzierung der Geräte verwendet werden. Dieses Modell macht dort Sinn, wo kleinere Netzbetreiber wie unabhängige Stadtwerke den Netzbetrieb organisieren.
- (2) Ein anderes Modell wäre die Finanzierung der Geräte etc. über den Stromvertrieb, d.h. ein Stromkunde bekommt andere Lieferkonditionen, wenn er mit der Regelung seiner Geräte einverstanden ist. Hier hat der Stromkunde gegenüber dem Genossenschaftsmodell eine schwächere Position. Zudem ist dieses Modell aufgrund der Organisation des Strommarkts schwierig umzusetzen.

Für mySmartGrid favorisieren wir das Genossenschaftsmodell. Nach Projektende werden wir die Geräte aus dem Projekt bei den Teilnehmern belassen und die Gründung einer Genossenschaft fördern. Derzeit sind wir jedoch noch nicht soweit, dass wir ein abschliessendes Konzept für ein Geschäftsmodell haben.

Ein alternatives Konzept — das derzeit auch meistens im Rahmen der E-Energy-Projekte diskutiert wird — sind flexible Stromtarife. Dabei ändert sich der Preis für eine Kilowattstunde Strom in Abhängigkeit davon, wie die Situation im Stromnetz gerade ist. Die Stromkunden sollen dann ihre Geräte entsprechend steuern. Im Gegensatz zu einem virtuellen Verbraucher stärkt das Konzept flexibler Strompreise jedoch die großen Stromanbieter und damit die gegenwärtigen Marktstrukturen. Ein virtueller Verbraucher verlagert hingegen die Marktmacht in Richtung der Stromkunden und kleineren Stadtwerke.

Nicht vergessen darf man an dieser Stelle auch die Probleme des Systemdesigns: Als großes verteiltes System muss die Umsetzung zu einem stabilen Systemverhalten führen. Ausfälle von einzelnen Systemkomponenten dürfen nicht zu Störungen des Gesamtsystems führen. Wir favorisieren einen dezentralen Ansatz: Steuergeräte in den einzelnen Haushalten verhalten sich dabei autonom und lassen sich jederzeit von den Bewohnern beeinflussen. Lediglich ein gewünschtes Lastprofil wird den Haushalten vorgegeben. Die einzelnen Haushalte entscheiden dann autonom, wie einzelne Geräte zu steuern sind. Die Verteilung des Lastprofils kann dabei durch standardisierte Protokolle über das Internet erfolgen.

## 5 Schlussfolgerungen

Das Smart Grid, „intelligentes Stromnetz“, ist eines der Themen, welche von der Politik und natürlich auch der Stromwirtschaft immer wieder in den Vordergrund gestellt werden. Das Potential der erneuerbaren Energien reicht aus, um Deutschland und Europa zuverlässig mit Strom zu versorgen [29]. Der Umbau der Stromnetze ist dabei von zentraler Bedeutung und bedarf einer Anstrengung der gesamten Gesellschaft. Leider kommt dabei der Stromkunde zu kurz — die Bedürfnisse von Stromkunden werden weitgehend ignoriert und der Datenschutz wird oft ausser acht gelassen [12].

Aber auch kleinere Stadtwerke haben mit dieser Entwicklung Probleme: Aufgrund politischer Vorgaben müssen sie zum Beispiel Smart Meter einführen, obwohl ihnen dadurch Kosten entstehen, die sie nicht direkt auf den Kunden umlegen können. Die Bereitschaft der Kunden, für ein Smart Grid mehr Geld zu bezahlen, ist wohl kaum vorhanden. Gleichzeitig ist es aber notwendig, die bestehenden Stromnetze zu flexibilisieren und auf einen weiter steigenden Anteil von erneuerbaren Energiequellen vorzubereiten. Damit dieser Wandel funktionieren kann, müssen viele Rahmenbedingungen beachtet werden:

- (1) *Kunden* müssen im Endeffekt diesen Wandel bezahlen. Daher sollten alle Änderungen auch im Sinne des Kunden gestaltet werden. Die im Moment verfügbaren Lösungen sind oft zu teuer und werden eher als Lifestyle-Produkt vermarktet. Hier gibt es noch erhebliches Potential.
- (2) Die Rolle der *Stadtwerke* und kleinen Verteilnetzbetreiber wird wichtiger werden. Hier besteht wiederum die Chance, dass diese – oft in

- kommunaler Hand befindlichen – Unternehmen partnerschaftlich mit Kunden und kleineren Energieerzeugern kreative Lösungen erarbeiten.
- (3) Schliesslich müssen auch rechtliche Rahmenbedingungen im Interesse der Kunden gestaltet werden. Die derzeitige Debatte um die Laufzeitverlängerungen für Atomkraftwerke zeigt, dass politische Entscheidungen nicht immer zu langfristig guten Lösungen führen und auch die meisten Expertenaussagen nicht beachtet wurden. Hier müssen konstruktive Vorschläge erarbeitet und auch an die politischen Entscheidungsträger kommuniziert werden.

Das Stromnetz ist ein historisch gewachsenes System. Viele unterschiedliche Konzepte wurden kombiniert, ebenso wurden viele rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen. Insofern ist eine Veränderung nur in kleinen Schritten möglich. Einzelne Komponenten werden nacheinander ausgetauscht und müssen natürlich gleichzeitig ein Teil des Gesamtkonzepts werden.

Für dieses Problemfeld bieten sich Open Source-Lösungen an: Diese können aufgrund der offenen Spezifikationen und Quellcodes recht schnell an neue Gegebenheiten angepasst werden. Ebenso ist es möglich, diese Anpassungen dezentral durch viele Anbieter vornehmen zu lassen. Diese Flexibilität kommt sowohl den Verteilnetzbetreibern als auch den Geräteherstellern zugute. Gleichzeitig ist es elementar, auf bereits existierende Kommunikationsstandards wie TCP/IP zu setzen.

In diesem Bericht wurde die Thematik des Stromhandels weitgehend ausser Acht gelassen. Hier sei auf den Bericht von Andreas Wagner (Fraunhofer ITWM) hingewiesen [1].

## Danksagung

Mein Dank für Anregungen und Diskussionen gilt Dr. Franz-Josef Pfreundt, Ely Wagner Aguiar de Oliveira, Matthias Klein, Stephan Platz, Simon Birnbach sowie Dominik Keller. Das Projekt mySmartGrid wird durch das Land Rheinland-Pfalz im Rahmen des Konjunkturprogramm II gefördert.

## Literatur

- [1] Andreas Wagner. *The German Electricity Market and Supply/Demand Power Price Models*. 2011. to appear.
- [2] Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Rolf Hempelmann, Hubertus Heil (Peine), Ingrid Arndt-Brauer, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD. "Beschleunigung des Ausbaus der Höchstspannungsnetze". 2010. Drucksache des Bundestages 17/2047.
- [3] BMWi: Stromnetze, 2010. <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Energietraeger/strom,did=292512.html>.
- [4] BMWi Energiedaten, 2010. <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html>.
- [5] M. Braun, K. Büdenbender, D. Magnor, and A. Jossen. Photovoltaic Self-Consumption in Germany - Using Lithium-Ion Storage to Increase Self-Consumed Photovoltaic Energy. *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2009.
- [6] Bundesnetzagentur. *Wettbewerbliche Entwicklungen und Handlungsoptionen im Bereich Zähl- und Messwesen und bei variablen Tarifen*. 10.03.2010.  
<http://www.bundesnetzagentur.de/cae/servlet/contentblob/151968/publicationFile/6321/BerichtZaehlMesswesenpdf.pdf>.
- [7] Bundesnetzagentur. "Positionspapier zu den Anforderungen an Messeinrichtungen nach § 21b Abs. 3a und 3b EnWG". 23.06.2010.  
[http://www.bundesnetzagentur.de/cae/servlet/contentblob/156202/publicationFile/7513/Positionspapier\\_Anforderungen\\_Messeinrichtungen.pdf](http://www.bundesnetzagentur.de/cae/servlet/contentblob/156202/publicationFile/7513/Positionspapier_Anforderungen_Messeinrichtungen.pdf).
- [8] Ann Cavoukian, Jules Polonetsky, and Christopher Wolf. SmartPrivacy for the Smart Grid: Embedding Privacy into the Design of Electricity Conservation. *Identity in the Information Society*, 3(2):275–294, August 2010.
- [9] Sarah Darby. The effectiveness of feedback on energy consumption. *A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and direct Displays*, April, 2006.
- [10] Deutsche Energie-Agentur (DENA). "Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020". 2005.
- [11] E-Energy - Smart Grids made in Germany, 2010. Webseite des BMWi zu den E-Energy-Projekten, <http://www.e-energy.de>.
- [12] "Nutzerschutz im Energieinformationsnetz", 2010. Webseite zur Konferenz, <http://www.e-energy.de/de/986.php>.
- [13] EON Kraftwerke: Huntorf, 2011. [http://www.kraftwerk-wilhelmshaven.com/pages/ekw\\_de/Huntorf/Uebersicht/index.htm](http://www.kraftwerk-wilhelmshaven.com/pages/ekw_de/Huntorf/Uebersicht/index.htm).
- [14] Ethersex Project, 2010. <http://ethersex.de>.
- [15] European Network of Transmission System Operators. *UCTE Operations*

- Handbook*. 2010. <https://www.entsoe.eu/index.php?id=57>.
- [16] European Transmission System Operators. *Demand Response as a Resource for the Adequacy and Operational Reliability of the Power Systems*. 2007. Explanatory Note, [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/etso/security\\_of\\_supply/Demand%20Side%20Response%20Explanatory%20Note.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/etso/security_of_supply/Demand%20Side%20Response%20Explanatory%20Note.pdf).
- [17] Flukso - Community Metering, 2010. <http://flukso.net>.
- [18] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE. *Lastenheft EDL — Elektronische Haushaltszähler*. 13.01.2010.
- [19] Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Kassel. *Abschlussbericht der Studie "Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche"*. 2009. Im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energien.
- [20] Tom Geller. Beyond the Smart Grid. *Commun. ACM*, 53(6):16–17, 2010.
- [21] Wilmer Heck. Smart energy meter will not be compulsory. *nrc handelsblad*, (8. April 2009).
- [22] Holger Wiechmann. *Neue Betriebsführungsstrategien für unterbrechbare Verbrauchseinrichtungen*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2008.
- [23] Moritz Karg. Datenschutzrechtliche Rahmenbedingungen beim Einsatz intelligenter Zähler. *Datenschutz und Datensicherheit*, 34(6):365–372, 2010.
- [24] Constanze Kurz. Sorgsam mit smarten Zählern. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, (1. April 2010).
- [25] "Smart Grid": Miele und RWE testen Tarif-Idee, 2010. Pressemitteilung der Miele & Cie. KG Nr. 110/2010.
- [26] Klaus J. Müller. Gewinnung von Verhaltensprofilen am intelligenten Stromzähler. *Datenschutz und Datensicherheit*, 34(6):359–364, 2010.
- [27] Arvind Narayanan and Vitaly Shmatikov. Myths and Fallacies of Personally Identifiable Information. *Commun. ACM*, 53(6):24–26, 2010.
- [28] Ralf Ossenbrink and Jörn Iken. Aus eigener Herstellung. *Sonne, Wind & Wärme*, 34(11):138–143, 2010.
- [29] Sachverständigenrat für Umweltfragen. *100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar*. 2010. Stellungnahme Nr. 15, ISSN 1612-2968.
- [30] Adolf J Schwab. *Elektroenergiesysteme*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [31] Stuart S. Shapiro. Privacy by Design: Moving from Art to Practice. *Commun. ACM*, 53(6):27–29, 2010.
- [32] Sondergutachten der Monopolkommission. *"Strom und Gas 2009 – Energiemärkte im Spannungsfeld von Politik und Wettbewerb"*. 2009. Drucksache des Bundestages 16/14060.
- [33] Studie im Auftrag des BMWi. *"Potenziale der Informations- und Kommunikations-Technologien zur Optimierung der Energieversorgung und des Energieverbrauchs (eEnergy)"*. 2006.
- [34] Jacopo Torriti, Mohamed G. Hassan, and Matthew Leach. Demand

- response experience in Europe: Policies, programmes and implementation. *Energy*, 35(4):1575–1583, April 2010.
- [35] Volkszähler, 2010. <http://volkszaehler.org>.
- [36] Wikipedia: Regelleistung, 2010.  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Regelleistung>.
- [37] Wikipedia: Spitzenlast, 2010.  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Spitzenlast>.
- [38] Dogan Yazar and Adam Dunkels. Efficient Application Integration in IP-based Sensor Networks. In *Proceedings of ACM BuildSys 2009, the First ACM Workshop On Embedded Sensing Systems For Energy-Efficiency In Buildings*, Berkeley, CA, USA, November 2009.

# Published reports of the Fraunhofer ITWM

The PDF-files of the following reports are available under:

[www.itwm.fraunhofer.de/de/zentral\\_\\_berichte/berichte](http://www.itwm.fraunhofer.de/de/zentral__berichte/berichte)

1. D. Hietel, K. Steiner, J. Struckmeier  
**A Finite - Volume Particle Method for Compressible Flows**  
(19 pages, 1998)
2. M. Feldmann, S. Seibold  
**Damage Diagnosis of Rotors: Application of Hilbert Transform and Multi-Hypothesis Testing**  
Keywords: Hilbert transform, damage diagnosis, Kalman filtering, non-linear dynamics  
(23 pages, 1998)
3. Y. Ben-Haim, S. Seibold  
**Robust Reliability of Diagnostic Multi-Hypothesis Algorithms: Application to Rotating Machinery**  
Keywords: Robust reliability, convex models, Kalman filtering, multi-hypothesis diagnosis, rotating machinery, crack diagnosis  
(24 pages, 1998)
4. F.-Th. Lentens, N. Siedow  
**Three-dimensional Radiative Heat Transfer in Glass Cooling Processes**  
(23 pages, 1998)
5. A. Klar, R. Wegener  
**A hierarchy of models for multilane vehicular traffic**  
**Part I: Modeling**  
(23 pages, 1998)  
**Part II: Numerical and stochastic investigations**  
(17 pages, 1998)
6. A. Klar, N. Siedow  
**Boundary Layers and Domain Decomposition for Radiative Heat Transfer and Diffusion Equations: Applications to Glass Manufacturing Processes**  
(24 pages, 1998)
7. I. Choquet  
**Heterogeneous catalysis modelling and numerical simulation in rarified gas flows**  
**Part I: Coverage locally at equilibrium**  
(24 pages, 1998)
8. J. Ohser, B. Steinbach, C. Lang  
**Efficient Texture Analysis of Binary Images**  
(17 pages, 1998)
9. J. Orlik  
**Homogenization for viscoelasticity of the integral type with aging and shrinkage**  
(20 pages, 1998)
10. J. Mohring  
**Helmholtz Resonators with Large Aperture**  
(21 pages, 1998)
11. H. W. Hamacher, A. Schöbel  
**On Center Cycles in Grid Graphs**  
(15 pages, 1998)
12. H. W. Hamacher, K.-H. Küfer  
**Inverse radiation therapy planning - a multiple objective optimisation approach**  
(14 pages, 1999)
13. C. Lang, J. Ohser, R. Hilfer  
**On the Analysis of Spatial Binary Images**  
(20 pages, 1999)
14. M. Junk  
**On the Construction of Discrete Equilibrium Distributions for Kinetic Schemes**  
(24 pages, 1999)
15. M. Junk, S. V. Raghurame Rao  
**A new discrete velocity method for Navier-Stokes equations**  
(20 pages, 1999)
16. H. Neunzert  
**Mathematics as a Key to Key Technologies**  
(39 pages, 1999)
17. J. Ohser, K. Sandau  
**Considerations about the Estimation of the Size Distribution in Wicksell's Corpuscle Problem**  
(18 pages, 1999)
18. E. Carrizosa, H. W. Hamacher, R. Klein, S. Nickel  
**Solving nonconvex planar location problems by finite dominating sets**  
Keywords: Continuous Location, Polyhedral Gauges, Finite Dominating Sets, Approximation, Sandwich Algorithm, Greedy Algorithm  
(19 pages, 2000)
19. A. Becker  
**A Review on Image Distortion Measures**  
Keywords: Distortion measure, human visual system  
(26 pages, 2000)
20. H. W. Hamacher, M. Labbé, S. Nickel, T. Sonneborn  
**Polyhedral Properties of the Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem**  
Keywords: integer programming, hub location, facility location, valid inequalities, facets, branch and cut  
(21 pages, 2000)
21. H. W. Hamacher, A. Schöbel  
**Design of Zone Tariff Systems in Public Transportation**  
(30 pages, 2001)
22. D. Hietel, M. Junk, R. Keck, D. Teleaga  
**The Finite-Volume-Particle Method for Conservation Laws**  
(16 pages, 2001)
23. T. Bender, H. Hennes, J. Kalcsics, M. T. Melo, S. Nickel  
**Location Software and Interface with GIS and Supply Chain Management**  
Keywords: facility location, software development, geographical information systems, supply chain management  
(48 pages, 2001)
24. H. W. Hamacher, S. A. Tjandra  
**Mathematical Modelling of Evacuation Problems: A State of Art**  
(44 pages, 2001)
25. J. Kuhnert, S. Tiwari  
**Grid free method for solving the Poisson equation**  
Keywords: Poisson equation, Least squares method, Grid free method  
(19 pages, 2001)
26. T. Götz, H. Rave, D. Reinel-Bitzer, K. Steiner, H. Tiemeier  
**Simulation of the fiber spinning process**  
Keywords: Melt spinning, fiber model, Lattice Boltzmann, CFD  
(19 pages, 2001)
27. A. Zemitis  
**On interaction of a liquid film with an obstacle**  
Keywords: impinging jets, liquid film, models, numerical solution, shape  
(22 pages, 2001)
28. I. Ginzburg, K. Steiner  
**Free surface lattice-Boltzmann method to model the filling of expanding cavities by Bingham Fluids**  
Keywords: Generalized LBE, free-surface phenomena, interface boundary conditions, filling processes, Bingham viscoplastic model, regularized models  
(22 pages, 2001)
29. H. Neunzert  
**»Denn nichts ist für den Menschen als Menschen etwas wert, was er nicht mit Leidenschaft tun kann«**  
**Vortrag anlässlich der Verleihung des Akademiepreises des Landes Rheinland-Pfalz am 21.11.2001**  
Keywords: Lehre, Forschung, angewandte Mathematik, Mehrskalalanalyse, Strömungsmechanik  
(18 pages, 2001)
30. J. Kuhnert, S. Tiwari  
**Finite pointset method based on the projection method for simulations of the incompressible Navier-Stokes equations**  
Keywords: Incompressible Navier-Stokes equations, Meshfree method, Projection method, Particle scheme, Least squares approximation  
AMS subject classification: 76D05, 76M28  
(25 pages, 2001)
31. R. Korn, M. Krekel  
**Optimal Portfolios with Fixed Consumption or Income Streams**  
Keywords: Portfolio optimisation, stochastic control, HJB equation, discretisation of control problems  
(23 pages, 2002)
32. M. Krekel  
**Optimal portfolios with a loan dependent credit spread**  
Keywords: Portfolio optimisation, stochastic control, HJB equation, credit spread, log utility, power utility, non-linear wealth dynamics  
(25 pages, 2002)
33. J. Ohser, W. Nagel, K. Schladitz  
**The Euler number of discretized sets – on the choice of adjacency in homogeneous lattices**  
Keywords: image analysis, Euler number, neighborhood relationships, cuboidal lattice  
(32 pages, 2002)



34. I. Ginzburg, K. Steiner  
**Lattice Boltzmann Model for Free-Surface flow and Its Application to Filling Process in Casting**  
Keywords: Lattice Boltzmann models; free-surface phenomena; interface boundary conditions; filling processes; injection molding; volume of fluid method; interface boundary conditions; advection-schemes; up-wind-schemes (54 pages, 2002)
35. M. Günther, A. Klar, T. Materne, R. Wegener  
**Multivalued fundamental diagrams and stop and go waves for continuum traffic equations**  
Keywords: traffic flow, macroscopic equations, kinetic derivation, multivalued fundamental diagram, stop and go waves, phase transitions (25 pages, 2002)
36. S. Feldmann, P. Lang, D. Prätzel-Wolters  
**Parameter influence on the zeros of network determinants**  
Keywords: Networks, Equicofactor matrix polynomials, Realization theory, Matrix perturbation theory (30 pages, 2002)
37. K. Koch, J. Ohser, K. Schladitz  
**Spectral theory for random closed sets and estimating the covariance via frequency space**  
Keywords: Random set, Bartlett spectrum, fast Fourier transform, power spectrum (28 pages, 2002)
38. D. d'Humières, I. Ginzburg  
**Multi-reflection boundary conditions for lattice Boltzmann models**  
Keywords: lattice Boltzmann equation, boundary conditions, bounce-back rule, Navier-Stokes equation (72 pages, 2002)
39. R. Korn  
**Elementare Finanzmathematik**  
Keywords: Finanzmathematik, Aktien, Optionen, Portfolio-Optimierung, Börse, Lehrerweiterbildung, Mathematikunterricht (98 pages, 2002)
40. J. Kallrath, M. C. Müller, S. Nickel  
**Batch Presorting Problems: Models and Complexity Results**  
Keywords: Complexity theory, Integer programming, Assignment, Logistics (19 pages, 2002)
41. J. Linn  
**On the frame-invariant description of the phase space of the Folgar-Tucker equation**  
Key words: fiber orientation, Folgar-Tucker equation, injection molding (5 pages, 2003)
42. T. Hanne, S. Nickel  
**A Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Scheduling and Inspection Planning in Software Development Projects**  
Key words: multiple objective programming, project management and scheduling, software development, evolutionary algorithms, efficient set (29 pages, 2003)
43. T. Bortfeld, K.-H. Küfer, M. Monz, A. Scherrer, C. Thieke, H. Trinkaus  
**Intensity-Modulated Radiotherapy - A Large Scale Multi-Criteria Programming Problem**  
Keywords: multiple criteria optimization, representative systems of Pareto solutions, adaptive triangulation, clustering and disaggregation techniques, visualization of Pareto solutions, medical physics, external beam radiotherapy planning, intensity modulated radiotherapy (31 pages, 2003)
44. T. Halfmann, T. Wichmann  
**Overview of Symbolic Methods in Industrial Analog Circuit Design**  
Keywords: CAD, automated analog circuit design, symbolic analysis, computer algebra, behavioral modeling, system simulation, circuit sizing, macro modeling, differential-algebraic equations, index (17 pages, 2003)
45. S. E. Mikhailov, J. Orlik  
**Asymptotic Homogenisation in Strength and Fatigue Durability Analysis of Composites**  
Keywords: multiscale structures, asymptotic homogenization, strength, fatigue, singularity, non-local conditions (14 pages, 2003)
46. P. Domínguez-Marín, P. Hansen, N. Mladenovic, S. Nickel  
**Heuristic Procedures for Solving the Discrete Ordered Median Problem**  
Keywords: genetic algorithms, variable neighborhood search, discrete facility location (31 pages, 2003)
47. N. Boland, P. Domínguez-Marín, S. Nickel, J. Puerto  
**Exact Procedures for Solving the Discrete Ordered Median Problem**  
Keywords: discrete location, Integer programming (41 pages, 2003)
48. S. Feldmann, P. Lang  
**Padé-like reduction of stable discrete linear systems preserving their stability**  
Keywords: Discrete linear systems, model reduction, stability, Hankel matrix, Stein equation (16 pages, 2003)
49. J. Kallrath, S. Nickel  
**A Polynomial Case of the Batch Presorting Problem**  
Keywords: batch presorting problem, online optimization, competitive analysis, polynomial algorithms, logistics (17 pages, 2003)
50. T. Hanne, H. L. Trinkaus  
**knowCube for MCDM – Visual and Interactive Support for Multicriteria Decision Making**  
Key words: Multicriteria decision making, knowledge management, decision support systems, visual interfaces, interactive navigation, real-life applications. (26 pages, 2003)
51. O. Iliev, V. Laptev  
**On Numerical Simulation of Flow Through Oil Filters**  
Keywords: oil filters, coupled flow in plain and porous media, Navier-Stokes, Brinkman, numerical simulation (8 pages, 2003)
52. W. Dörfler, O. Iliev, D. Stoyanov, D. Vassileva  
**On a Multigrid Adaptive Refinement Solver for Saturated Non-Newtonian Flow in Porous Media**  
Keywords: Nonlinear multigrid, adaptive refinement, non-Newtonian flow in porous media (17 pages, 2003)
53. S. Kruse  
**On the Pricing of Forward Starting Options under Stochastic Volatility**  
Keywords: Option pricing, forward starting options, Heston model, stochastic volatility, cliquet options (11 pages, 2003)
54. O. Iliev, D. Stoyanov  
**Multigrid – adaptive local refinement solver for incompressible flows**  
Keywords: Navier-Stokes equations, incompressible flow, projection-type splitting, SIMPLE, multigrid methods, adaptive local refinement, lid-driven flow in a cavity (37 pages, 2003)
55. V. Starikovicus  
**The multiphase flow and heat transfer in porous media**  
Keywords: Two-phase flow in porous media, various formulations, global pressure, multiphase mixture model, numerical simulation (30 pages, 2003)
56. P. Lang, A. Sarishvili, A. Wirsen  
**Blocked neural networks for knowledge extraction in the software development process**  
Keywords: Blocked Neural Networks, Nonlinear Regression, Knowledge Extraction, Code Inspection (21 pages, 2003)
57. H. Knaf, P. Lang, S. Zeiser  
**Diagnosis aiding in Regulation Thermography using Fuzzy Logic**  
Keywords: fuzzy logic, knowledge representation, expert system (22 pages, 2003)
58. M. T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha da Gama  
**Largescale models for dynamic multi-commodity capacitated facility location**  
Keywords: supply chain management, strategic planning, dynamic location, modeling (40 pages, 2003)
59. J. Orlik  
**Homogenization for contact problems with periodically rough surfaces**  
Keywords: asymptotic homogenization, contact problems (28 pages, 2004)
60. A. Scherrer, K.-H. Küfer, M. Monz, F. Alonso, T. Bortfeld  
**IMRT planning on adaptive volume structures – a significant advance of computational complexity**  
Keywords: Intensity-modulated radiation therapy (IMRT), inverse treatment planning, adaptive volume structures, hierarchical clustering, local refinement, adaptive clustering, convex programming, mesh generation, multi-grid methods (24 pages, 2004)
61. D. Kehrwald  
**Parallel lattice Boltzmann simulation of complex flows**  
Keywords: Lattice Boltzmann methods, parallel computing, microstructure simulation, virtual material design, pseudo-plastic fluids, liquid composite moulding (12 pages, 2004)
62. O. Iliev, J. Linn, M. Moog, D. Niedziela, V. Starikovicus  
**On the Performance of Certain Iterative Solvers for Coupled Systems Arising in Discretization of Non-Newtonian Flow Equations**

Keywords: Performance of iterative solvers, Preconditioners, Non-Newtonian flow (17 pages, 2004)

63. R. Ciegis, O. Iliev, S. Rief, K. Steiner  
**On Modelling and Simulation of Different Regimes for Liquid Polymer Moulding**  
Keywords: Liquid Polymer Moulding, Modelling, Simulation, Infiltration, Front Propagation, non-Newtonian flow in porous media (43 pages, 2004)

64. T. Hanne, H. Neu  
**Simulating Human Resources in Software Development Processes**  
Keywords: Human resource modeling, software process, productivity, human factors, learning curve (14 pages, 2004)

65. O. Iliev, A. Mikelic, P. Popov  
**Fluid structure interaction problems in deformable porous media: Toward permeability of deformable porous media**  
Keywords: fluid-structure interaction, deformable porous media, upscaling, linear elasticity, stokes, finite elements (28 pages, 2004)

66. F. Gaspar, O. Iliev, F. Lisbona, A. Naumovich, P. Vabishchevich  
**On numerical solution of 1-D poroelasticity equations in a multilayered domain**  
Keywords: poroelasticity, multilayered material, finite volume discretization, MAC type grid (41 pages, 2004)

67. J. Ohser, K. Schladitz, K. Koch, M. Nöthe  
**Diffraction by image processing and its application in materials science**  
Keywords: porous microstructure, image analysis, random set, fast Fourier transform, power spectrum, Bartlett spectrum (13 pages, 2004)

68. H. Neunzert  
**Mathematics as a Technology: Challenges for the next 10 Years**  
Keywords: applied mathematics, technology, modelling, simulation, visualization, optimization, glass processing, spinning processes, fiber-fluid interaction, turbulence effects, topological optimization, multicriteria optimization, Uncertainty and Risk, financial mathematics, Malliavin calculus, Monte-Carlo methods, virtual material design, filtration, bio-informatics, system biology (29 pages, 2004)

69. R. Ewing, O. Iliev, R. Lazarov, A. Naumovich  
**On convergence of certain finite difference discretizations for 1D poroelasticity interface problems**  
Keywords: poroelasticity, multilayered material, finite volume discretizations, MAC type grid, error estimates (26 pages, 2004)

70. W. Dörfler, O. Iliev, D. Stoyanov, D. Vassileva  
**On Efficient Simulation of Non-Newtonian Flow in Saturated Porous Media with a Multigrid Adaptive Refinement Solver**  
Keywords: Nonlinear multigrid, adaptive renement, non-Newtonian in porous media (25 pages, 2004)

71. J. Kalcsics, S. Nickel, M. Schröder  
**Towards a Unified Territory Design Approach – Applications, Algorithms and GIS Integration**  
Keywords: territory design, political districting, sales territory alignment, optimization algorithms, Geographical Information Systems (40 pages, 2005)

72. K. Schladitz, S. Peters, D. Reinelt-Bitzer, A. Wiegmann, J. Ohser  
**Design of acoustic trim based on geometric modeling and flow simulation for non-woven**  
Keywords: random system of fibers, Poisson line process, flow resistivity, acoustic absorption, Lattice-Boltzmann method, non-woven (21 pages, 2005)

73. V. Rutka, A. Wiegmann  
**Explicit Jump Immersed Interface Method for virtual material design of the effective elastic moduli of composite materials**  
Keywords: virtual material design, explicit jump immersed interface method, effective elastic moduli, composite materials (22 pages, 2005)

74. T. Hanne  
**Eine Übersicht zum Scheduling von Baustellen**  
Keywords: Projektplanung, Scheduling, Bauplanung, Bauindustrie (32 pages, 2005)

75. J. Linn  
**The Folgar-Tucker Model as a Differential Algebraic System for Fiber Orientation Calculation**  
Keywords: fiber orientation, Folgar-Tucker model, invariants, algebraic constraints, phase space, trace stability (15 pages, 2005)

76. M. Speckert, K. Dreßler, H. Mauch, A. Lion, G. J. Wierda  
**Simulation eines neuartigen Prüfsystems für Achserproben durch MKS-Modellierung einschließlich Regelung**  
Keywords: virtual test rig, suspension testing, multibody simulation, modeling hexapod test rig, optimization of test rig configuration (20 pages, 2005)

77. K.-H. Küfer, M. Monz, A. Scherrer, P. Süß, F. Alonso, A. S. A. Sultan, Th. Bortfeld, D. Craft, Chr. Thieke  
**Multicriteria optimization in intensity modulated radiotherapy planning**  
Keywords: multicriteria optimization, extreme solutions, real-time decision making, adaptive approximation schemes, clustering methods, IMRT planning, reverse engineering (51 pages, 2005)

78. S. Amstutz, H. Andrä  
**A new algorithm for topology optimization using a level-set method**  
Keywords: shape optimization, topology optimization, topological sensitivity, level-set (22 pages, 2005)

79. N. Ettrich  
**Generation of surface elevation models for urban drainage simulation**  
Keywords: Flooding, simulation, urban elevation models, laser scanning (22 pages, 2005)

80. H. Andrä, J. Linn, I. Matei, I. Shklyar, K. Steiner, E. Teichmann  
**OPTCAST – Entwicklung adäquater Strukturoptimierungsverfahren für Gießereien Technischer Bericht (KURZFASSUNG)**  
Keywords: Topologieoptimierung, Level-Set-Methode, Gießprozesssimulation, Gießtechnische Restriktionen, CAE-Kette zur Strukturoptimierung (77 pages, 2005)

81. N. Marheineke, R. Wegener  
**Fiber Dynamics in Turbulent Flows Part I: General Modeling Framework**  
Keywords: fiber-fluid interaction; Cosserat rod; turbulence modeling; Kolmogorov's energy spectrum; double-velocity correlations; differentiable Gaussian fields (20 pages, 2005)

**Part II: Specific Taylor Drag**  
Keywords: flexible fibers;  $k-\epsilon$  turbulence model; fiber-turbulence interaction scales; air drag; random Gaussian aerodynamic force; white noise; stochastic differential equations; ARMA process (18 pages, 2005)

82. C. H. Lampert, O. Wirjadi  
**An Optimal Non-Orthogonal Separation of the Anisotropic Gaussian Convolution Filter**  
Keywords: Anisotropic Gaussian filter, linear filtering, orientation space, nD image processing, separable filters (25 pages, 2005)

83. H. Andrä, D. Stoyanov  
**Error indicators in the parallel finite element solver for linear elasticity DDFEM**  
Keywords: linear elasticity, finite element method, hierarchical shape functions, domain decomposition, parallel implementation, a posteriori error estimates (21 pages, 2006)

84. M. Schröder, I. Solchenbach  
**Optimization of Transfer Quality in Regional Public Transit**  
Keywords: public transit, transfer quality, quadratic assignment problem (16 pages, 2006)

85. A. Naumovich, F. J. Gaspar  
**On a multigrid solver for the three-dimensional Biot poroelasticity system in multilayered domains**  
Keywords: poroelasticity, interface problem, multigrid, operator-dependent prolongation (11 pages, 2006)

86. S. Panda, R. Wegener, N. Marheineke  
**Slender Body Theory for the Dynamics of Curved Viscous Fibers**  
Keywords: curved viscous fibers; fluid dynamics; Navier-Stokes equations; free boundary value problem; asymptotic expansions; slender body theory (14 pages, 2006)

87. E. Ivanov, H. Andrä, A. Kudryavtsev  
**Domain Decomposition Approach for Automatic Parallel Generation of Tetrahedral Grids**  
Key words: Grid Generation, Unstructured Grid, Delaunay Triangulation, Parallel Programming, Domain Decomposition, Load Balancing (18 pages, 2006)

88. S. Tiwari, S. Antonov, D. Hietel, J. Kuhnert, R. Wegener  
**A Meshfree Method for Simulations of Interactions between Fluids and Flexible Structures**  
Key words: Meshfree Method, FPM, Fluid Structure Interaction, Sheet of Paper, Dynamical Coupling (16 pages, 2006)

89. R. Ciegis, O. Iliev, V. Starikovicius, K. Steiner  
**Numerical Algorithms for Solving Problems of Multiphase Flows in Porous Media**  
Keywords: nonlinear algorithms, finite-volume method, software tools, porous media, flows (16 pages, 2006)

90. D. Niedziela, O. Iliev, A. Latz  
**On 3D Numerical Simulations of Viscoelastic Fluids**  
Keywords: non-Newtonian fluids, anisotropic viscosity, integral constitutive equation  
(18 pages, 2006)
91. A. Winterfeld  
**Application of general semi-infinite Programming to Lapidary Cutting Problems**  
Keywords: large scale optimization, nonlinear programming, general semi-infinite optimization, design centering, clustering  
(26 pages, 2006)
92. J. Orlik, A. Ostrovska  
**Space-Time Finite Element Approximation and Numerical Solution of Hereditary Linear Viscoelasticity Problems**  
Keywords: hereditary viscoelasticity; kern approximation by interpolation; space-time finite element approximation, stability and a priori estimate  
(24 pages, 2006)
93. V. Rutka, A. Wiegmann, H. Andrä  
**EJIM for Calculation of effective Elastic Moduli in 3D Linear Elasticity**  
Keywords: Elliptic PDE, linear elasticity, irregular domain, finite differences, fast solvers, effective elastic moduli  
(24 pages, 2006)
94. A. Wiegmann, A. Zemitis  
**EJ-HEAT: A Fast Explicit Jump Harmonic Averaging Solver for the Effective Heat Conductivity of Composite Materials**  
Keywords: Stationary heat equation, effective thermal conductivity, explicit jump, discontinuous coefficients, virtual material design, microstructure simulation, EJ-HEAT  
(21 pages, 2006)
95. A. Naumovich  
**On a finite volume discretization of the three-dimensional Biot poroelasticity system in multilayered domains**  
Keywords: Biot poroelasticity system, interface problems, finite volume discretization, finite difference method  
(21 pages, 2006)
96. M. Krekel, J. Wenzel  
**A unified approach to Credit Default Swap-tion and Constant Maturity Credit Default Swap valuation**  
Keywords: LIBOR market model, credit risk, Credit Default Swap-tion, Constant Maturity Credit Default Swap-method  
(43 pages, 2006)
97. A. Dreyer  
**Interval Methods for Analog Circuits**  
Keywords: interval arithmetic, analog circuits, tolerance analysis, parametric linear systems, frequency response, symbolic analysis, CAD, computer algebra  
(36 pages, 2006)
98. N. Weigel, S. Weihe, G. Bitsch, K. Dreßler  
**Usage of Simulation for Design and Optimization of Testing**  
Keywords: Vehicle test rigs, MBS, control, hydraulics, testing philosophy  
(14 pages, 2006)
99. H. Lang, G. Bitsch, K. Dreßler, M. Speckert  
**Comparison of the solutions of the elastic and elastoplastic boundary value problems**  
Keywords: Elastic BVP, elastoplastic BVP, variational inequalities, rate-independency, hysteresis, linear kinematic hardening, stop- and play-operator  
(21 pages, 2006)
100. M. Speckert, K. Dreßler, H. Mauch  
**MBS Simulation of a hexapod based suspension test rig**  
Keywords: Test rig, MBS simulation, suspension, hydraulics, controlling, design optimization  
(12 pages, 2006)
101. S. Azizi Sultan, K.-H. Küfer  
**A dynamic algorithm for beam orientations in multicriteria IMRT planning**  
Keywords: radiotherapy planning, beam orientation optimization, dynamic approach, evolutionary algorithm, global optimization  
(14 pages, 2006)
102. T. Götz, A. Klar, N. Marheineke, R. Wegener  
**A Stochastic Model for the Fiber Lay-down Process in the Nonwoven Production**  
Keywords: fiber dynamics, stochastic Hamiltonian system, stochastic averaging  
(17 pages, 2006)
103. Ph. Süß, K.-H. Küfer  
**Balancing control and simplicity: a variable aggregation method in intensity modulated radiation therapy planning**  
Keywords: IMRT planning, variable aggregation, clustering methods  
(22 pages, 2006)
104. A. Beaudry, G. Laporte, T. Melo, S. Nickel  
**Dynamic transportation of patients in hospitals**  
Keywords: in-house hospital transportation, dial-a-ride, dynamic mode, tabu search  
(37 pages, 2006)
105. Th. Hanne  
**Applying multiobjective evolutionary algorithms in industrial projects**  
Keywords: multiobjective evolutionary algorithms, discrete optimization, continuous optimization, electronic circuit design, semi-infinite programming, scheduling  
(18 pages, 2006)
106. J. Franke, S. Halim  
**Wild bootstrap tests for comparing signals and images**  
Keywords: wild bootstrap test, texture classification, textile quality control, defect detection, kernel estimate, nonparametric regression  
(13 pages, 2007)
107. Z. Drezner, S. Nickel  
**Solving the ordered one-median problem in the plane**  
Keywords: planar location, global optimization, ordered median, big triangle small triangle method, bounds, numerical experiments  
(21 pages, 2007)
108. Th. Götz, A. Klar, A. Unterreiter, R. Wegener  
**Numerical evidence for the non-existing of solutions of the equations describing rotational fiber spinning**  
Keywords: rotational fiber spinning, viscous fibers, boundary value problem, existence of solutions  
(11 pages, 2007)
109. Ph. Süß, K.-H. Küfer  
**Smooth intensity maps and the Bortfeld-Boyer sequencer**  
Keywords: probabilistic analysis, intensity modulated radiotherapy treatment (IMRT), IMRT plan application, step-and-shoot sequencing  
(8 pages, 2007)
110. E. Ivanov, O. Gluchshenko, H. Andrä, A. Kudryavtsev  
**Parallel software tool for decomposing and meshing of 3d structures**  
Keywords: a-priori domain decomposition, unstructured grid, Delaunay mesh generation  
(14 pages, 2007)
111. O. Iliev, R. Lazarov, J. Willems  
**Numerical study of two-grid preconditioners for 1d elliptic problems with highly oscillating discontinuous coefficients**  
Keywords: two-grid algorithm, oscillating coefficients, preconditioner  
(20 pages, 2007)
112. L. Bonilla, T. Götz, A. Klar, N. Marheineke, R. Wegener  
**Hydrodynamic limit of the Fokker-Planck equation describing fiber lay-down processes**  
Keywords: stochastic differential equations, Fokker-Planck equation, asymptotic expansion, Ornstein-Uhlenbeck process  
(17 pages, 2007)
113. S. Rief  
**Modeling and simulation of the pressing section of a paper machine**  
Keywords: paper machine, computational fluid dynamics, porous media  
(41 pages, 2007)
114. R. Ciegis, O. Iliev, Z. Lakdawala  
**On parallel numerical algorithms for simulating industrial filtration problems**  
Keywords: Navier-Stokes-Brinkmann equations, finite volume discretization method, SIMPLE, parallel computing, data decomposition method  
(24 pages, 2007)
115. N. Marheineke, R. Wegener  
**Dynamics of curved viscous fibers with surface tension**  
Keywords: Slender body theory, curved viscous fibers with surface tension, free boundary value problem  
(25 pages, 2007)
116. S. Feth, J. Franke, M. Speckert  
**Resampling-Methoden zur mse-Korrektur und Anwendungen in der Betriebsfestigkeit**  
Keywords: Weibull, Bootstrap, Maximum-Likelihood, Betriebsfestigkeit  
(16 pages, 2007)
117. H. Knaf  
**Kernel Fisher discriminant functions – a concise and rigorous introduction**  
Keywords: wild bootstrap test, texture classification, textile quality control, defect detection, kernel estimate, nonparametric regression  
(30 pages, 2007)
118. O. Iliev, I. Rybak  
**On numerical upscaling for flows in heterogeneous porous media**

- Keywords: numerical upscaling, heterogeneous porous media, single phase flow, Darcy's law, multiscale problem, effective permeability, multipoint flux approximation, anisotropy (17 pages, 2007)
119. O. Iliev, I. Rybak  
**On approximation property of multipoint flux approximation method**  
Keywords: Multipoint flux approximation, finite volume method, elliptic equation, discontinuous tensor coefficients, anisotropy (15 pages, 2007)
120. O. Iliev, I. Rybak, J. Willems  
**On upscaling heat conductivity for a class of industrial problems**  
Keywords: Multiscale problems, effective heat conductivity, numerical upscaling, domain decomposition (21 pages, 2007)
121. R. Ewing, O. Iliev, R. Lazarov, I. Rybak  
**On two-level preconditioners for flow in porous media**  
Keywords: Multiscale problem, Darcy's law, single phase flow, anisotropic heterogeneous porous media, numerical upscaling, multigrid, domain decomposition, efficient preconditioner (18 pages, 2007)
122. M. Brickenstein, A. Dreyer  
**POLYBORI: A Gröbner basis framework for Boolean polynomials**  
Keywords: Gröbner basis, formal verification, Boolean polynomials, algebraic cryptanalysis, satisfiability (23 pages, 2007)
123. O. Wirjadi  
**Survey of 3d image segmentation methods**  
Keywords: image processing, 3d, image segmentation, binarization (20 pages, 2007)
124. S. Zeytun, A. Gupta  
**A Comparative Study of the Vasicek and the CIR Model of the Short Rate**  
Keywords: interest rates, Vasicek model, CIR-model, calibration, parameter estimation (17 pages, 2007)
125. G. Hanselmann, A. Sarishvili  
**Heterogeneous redundancy in software quality prediction using a hybrid Bayesian approach**  
Keywords: reliability prediction, fault prediction, non-homogeneous poisson process, Bayesian model averaging (17 pages, 2007)
126. V. Maag, M. Berger, A. Winterfeld, K.-H. Küfer  
**A novel non-linear approach to minimal area rectangular packing**  
Keywords: rectangular packing, non-overlapping constraints, non-linear optimization, regularization, relaxation (18 pages, 2007)
127. M. Monz, K.-H. Küfer, T. Bortfeld, C. Thieke  
**Pareto navigation – systematic multi-criteria-based IMRT treatment plan determination**  
Keywords: convex, interactive multi-objective optimization, intensity modulated radiotherapy planning (15 pages, 2007)
128. M. Krause, A. Scherrer  
**On the role of modeling parameters in IMRT plan optimization**  
Keywords: intensity-modulated radiotherapy (IMRT), inverse IMRT planning, convex optimization, sensitivity analysis, elasticity, modeling parameters, equivalent uniform dose (EUD) (18 pages, 2007)
129. A. Wiegmann  
**Computation of the permeability of porous materials from their microstructure by FFF-Stokes**  
Keywords: permeability, numerical homogenization, fast Stokes solver (24 pages, 2007)
130. T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha da Gama  
**Facility Location and Supply Chain Management – A comprehensive review**  
Keywords: facility location, supply chain management, network design (54 pages, 2007)
131. T. Hanne, T. Melo, S. Nickel  
**Bringing robustness to patient flow management through optimized patient transports in hospitals**  
Keywords: Dial-a-Ride problem, online problem, case study, tabu search, hospital logistics (23 pages, 2007)
132. R. Ewing, O. Iliev, R. Lazarov, I. Rybak, J. Willems  
**An efficient approach for upscaling properties of composite materials with high contrast of coefficients**  
Keywords: effective heat conductivity, permeability of fractured porous media, numerical upscaling, fibrous insulation materials, metal foams (16 pages, 2008)
133. S. Gelareh, S. Nickel  
**New approaches to hub location problems in public transport planning**  
Keywords: integer programming, hub location, transportation, decomposition, heuristic (25 pages, 2008)
134. G. Thömmes, J. Becker, M. Junk, A. K. Vainkuntam, D. Kehrwald, A. Klar, K. Steiner, A. Wiegmann  
**A Lattice Boltzmann Method for immiscible multiphase flow simulations using the Level Set Method**  
Keywords: Lattice Boltzmann method, Level Set method, free surface, multiphase flow (28 pages, 2008)
135. J. Orlik  
**Homogenization in elasto-plasticity**  
Keywords: multiscale structures, asymptotic homogenization, nonlinear energy (40 pages, 2008)
136. J. Almqvist, H. Schmidt, P. Lang, J. Deitmer, M. Jirstrand, D. Prätzel-Wolters, H. Becker  
**Determination of interaction between MCT1 and CAII via a mathematical and physiological approach**  
Keywords: mathematical modeling; model reduction; electrophysiology; pH-sensitive microelectrodes; proton antenna (20 pages, 2008)
137. E. Savenkov, H. Andrä, O. Iliev  
**An analysis of one regularization approach for solution of pure Neumann problem**  
Keywords: pure Neumann problem, elasticity, regularization, finite element method, condition number (27 pages, 2008)
138. O. Berman, J. Kalcsics, D. Krass, S. Nickel  
**The ordered gradual covering location problem on a network**  
Keywords: gradual covering, ordered median function, network location (32 pages, 2008)
139. S. Gelareh, S. Nickel  
**Multi-period public transport design: A novel model and solution approaches**  
Keywords: Integer programming, hub location, public transport, multi-period planning, heuristics (31 pages, 2008)
140. T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama  
**Network design decisions in supply chain planning**  
Keywords: supply chain design, integer programming models, location models, heuristics (20 pages, 2008)
141. C. Lautensack, A. Särkkä, J. Freitag, K. Schladitz  
**Anisotropy analysis of pressed point processes**  
Keywords: estimation of compression, isotropy test, nearest neighbour distance, orientation analysis, polar ice, Ripley's K function (35 pages, 2008)
142. O. Iliev, R. Lazarov, J. Willems  
**A Graph-Laplacian approach for calculating the effective thermal conductivity of complicated fiber geometries**  
Keywords: graph laplacian, effective heat conductivity, numerical upscaling, fibrous materials (14 pages, 2008)
143. J. Linn, T. Stephan, J. Carlsson, R. Bohlin  
**Fast simulation of quasistatic rod deformations for VR applications**  
Keywords: quasistatic deformations, geometrically exact rod models, variational formulation, energy minimization, finite differences, nonlinear conjugate gradients (7 pages, 2008)
144. J. Linn, T. Stephan  
**Simulation of quasistatic deformations using discrete rod models**  
Keywords: quasistatic deformations, geometrically exact rod models, variational formulation, energy minimization, finite differences, nonlinear conjugate gradients (9 pages, 2008)
145. J. Marburger, N. Marheineke, R. Pinnau  
**Adjoint based optimal control using mesh-less discretizations**  
Keywords: Mesh-less methods, particle methods, Eulerian-Lagrangian formulation, optimization strategies, adjoint method, hyperbolic equations (14 pages, 2008)
146. S. Desmettre, J. Gould, A. Szimayer  
**Own-company stockholding and work effort preferences of an unconstrained executive**  
Keywords: optimal portfolio choice, executive compensation (33 pages, 2008)

147. M. Berger, M. Schröder, K.-H. Küfer  
**A constraint programming approach for the two-dimensional rectangular packing problem with orthogonal orientations**  
Keywords: rectangular packing, orthogonal orientations non-overlapping constraints, constraint propagation (13 pages, 2008)
148. K. Schladitz, C. Redenbach, T. Sych, M. Godehardt  
**Microstructural characterisation of open foams using 3d images**  
Keywords: virtual material design, image analysis, open foams (30 pages, 2008)
149. E. Fernández, J. Kalcsics, S. Nickel, R. Ríos-Mercado  
**A novel territory design model arising in the implementation of the WEEE-Directive**  
Keywords: heuristics, optimization, logistics, recycling (28 pages, 2008)
150. H. Lang, J. Linn  
**Lagrangian field theory in space-time for geometrically exact Cosserat rods**  
Keywords: Cosserat rods, geometrically exact rods, small strain, large deformation, deformable bodies, Lagrangian field theory, variational calculus (19 pages, 2009)
151. K. Dreßler, M. Speckert, R. Müller, Ch. Weber  
**Customer loads correlation in truck engineering**  
Keywords: Customer distribution, safety critical components, quantile estimation, Monte-Carlo methods (11 pages, 2009)
152. H. Lang, K. Dreßler  
**An improved multi-axial stress-strain correction model for elastic FE postprocessing**  
Keywords: Jiang's model of elastoplasticity, stress-strain correction, parameter identification, automatic differentiation, least-squares optimization, Coleman-Li algorithm (6 pages, 2009)
153. J. Kalcsics, S. Nickel, M. Schröder  
**A generic geometric approach to territory design and districting**  
Keywords: Territory design, districting, combinatorial optimization, heuristics, computational geometry (32 pages, 2009)
154. Th. Fütterer, A. Klar, R. Wegener  
**An energy conserving numerical scheme for the dynamics of hyperelastic rods**  
Keywords: Cosserat rod, hyperelastic, energy conservation, finite differences (16 pages, 2009)
155. A. Wiegmann, L. Cheng, E. Glatt, O. Iliev, S. Rief  
**Design of pleated filters by computer simulations**  
Keywords: Solid-gas separation, solid-liquid separation, pleated filter, design, simulation (21 pages, 2009)
156. A. Klar, N. Marheineke, R. Wegener  
**Hierarchy of mathematical models for production processes of technical textiles**  
Keywords: Fiber-fluid interaction, slender-body theory, turbulence modeling, model reduction, stochastic differential equations, Fokker-Planck equation, asymptotic expansions, parameter identification (21 pages, 2009)
157. E. Glatt, S. Rief, A. Wiegmann, M. Knefel, E. Wegenke  
**Structure and pressure drop of real and virtual metal wire meshes**  
Keywords: metal wire mesh, structure simulation, model calibration, CFD simulation, pressure loss (7 pages, 2009)
158. S. Kruse, M. Müller  
**Pricing American call options under the assumption of stochastic dividends – An application of the Korn-Rogers model**  
Keywords: option pricing, American options, dividends, dividend discount model, Black-Scholes model (22 pages, 2009)
159. H. Lang, J. Linn, M. Arnold  
**Multibody dynamics simulation of geometrically exact Cosserat rods**  
Keywords: flexible multibody dynamics, large deformations, finite rotations, constrained mechanical systems, structural dynamics (20 pages, 2009)
160. P. Jung, S. Leyendecker, J. Linn, M. Ortiz  
**Discrete Lagrangian mechanics and geometrically exact Cosserat rods**  
Keywords: special Cosserat rods, Lagrangian mechanics, Noether's theorem, discrete mechanics, frame-indifference, holonomic constraints (14 pages, 2009)
161. M. Burger, K. Dreßler, A. Marquardt, M. Speckert  
**Calculating invariant loads for system simulation in vehicle engineering**  
Keywords: iterative learning control, optimal control theory, differential algebraic equations (DAEs) (18 pages, 2009)
162. M. Speckert, N. Ruf, K. Dreßler  
**Undesired drift of multibody models excited by measured accelerations or forces**  
Keywords: multibody simulation, full vehicle model, force-based simulation, drift due to noise (19 pages, 2009)
163. A. Streit, K. Dreßler, M. Speckert, J. Lichter, T. Zenner, P. Bach  
**Anwendung statistischer Methoden zur Erstellung von Nutzungsprofilen für die Auslegung von Mobilbaggern**  
Keywords: Nutzungsvielfalt, Kundenbeanspruchung, Bemessungsgrundlagen (13 pages, 2009)
164. I. Correia, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama  
**The capacitated single-allocation hub location problem revisited: A note on a classical formulation**  
Keywords: Capacitated Hub Location, MIP formulations (10 pages, 2009)
165. F. Yaneva, T. Grebe, A. Scherrer  
**An alternative view on global radiotherapy optimization problems**  
Keywords: radiotherapy planning, path-connected sub-levelsets, modified gradient projection method, improving and feasible directions (14 pages, 2009)
166. J. I. Serna, M. Monz, K.-H. Küfer, C. Thieke  
**Trade-off bounds and their effect in multi-criteria IMRT planning**  
Keywords: trade-off bounds, multi-criteria optimization, IMRT, Pareto surface (15 pages, 2009)
167. W. Arne, N. Marheineke, A. Meister, R. Wegener  
**Numerical analysis of Cosserat rod and string models for viscous jets in rotational spinning processes**  
Keywords: Rotational spinning process, curved viscous fibers, asymptotic Cosserat models, boundary value problem, existence of numerical solutions (18 pages, 2009)
168. T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama  
**An LP-rounding heuristic to solve a multi-period facility relocation problem**  
Keywords: supply chain design, heuristic, linear programming, rounding (37 pages, 2009)
169. I. Correia, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama  
**Single-allocation hub location problems with capacity choices**  
Keywords: hub location, capacity decisions, MILP formulations (27 pages, 2009)
170. S. Acar, K. Natcheva-Acar  
**A guide on the implementation of the Heath-Jarrow-Morton Two-Factor Gaussian Short Rate Model (HJM-G2++)**  
Keywords: short rate model, two factor Gaussian, G2++, option pricing, calibration (30 pages, 2009)
171. A. Szimayer, G. Dimitroff, S. Lorenz  
**A parsimonious multi-asset Heston model: calibration and derivative pricing**  
Keywords: Heston model, multi-asset, option pricing, calibration, correlation (28 pages, 2009)
172. N. Marheineke, R. Wegener  
**Modeling and validation of a stochastic drag for fibers in turbulent flows**  
Keywords: fiber-fluid interactions, long slender fibers, turbulence modelling, aerodynamic drag, dimensional analysis, data interpolation, stochastic partial differential algebraic equation, numerical simulations, experimental validations (19 pages, 2009)
173. S. Nickel, M. Schröder, J. Steeg  
**Planning for home health care services**  
Keywords: home health care, route planning, meta-heuristics, constraint programming (23 pages, 2009)
174. G. Dimitroff, A. Szimayer, A. Wagner  
**Quanto option pricing in the parsimonious Heston model**  
Keywords: Heston model, multi asset, quanto options, option pricing (14 pages, 2009)
174. G. Dimitroff, A. Szimayer, A. Wagner  
**Model reduction of nonlinear problems in structural mechanics**  
Keywords: flexible bodies, FEM, nonlinear model reduction, POD (13 pages, 2009)

176. M. K. Ahmad, S. Didas, J. Iqbal  
**Using the Sharp Operator for edge detection and nonlinear diffusion**  
Keywords: maximal function, sharp function, image processing, edge detection, nonlinear diffusion (17 pages, 2009)
177. M. Speckert, N. Ruf, K. Dreßler, R. Müller, C. Weber, S. Weihe  
**Ein neuer Ansatz zur Ermittlung von Erprobungslasten für sicherheitsrelevante Bauteile**  
Keywords: sicherheitsrelevante Bauteile, Kundenbeanspruchung, Festigkeitsverteilung, Ausfallwahrscheinlichkeit, Konfidenz, statistische Unsicherheit, Sicherheitsfaktoren (16 pages, 2009)
178. J. Jegorovs  
**Wave based method: new applicability areas**  
Keywords: Elliptic boundary value problems, inhomogeneous Helmholtz type differential equations in bounded domains, numerical methods, wave based method, uniform B-splines (10 pages, 2009)
179. H. Lang, M. Arnold  
**Numerical aspects in the dynamic simulation of geometrically exact rods**  
Keywords: Kirchhoff and Cosserat rods, geometrically exact rods, deformable bodies, multibody dynamics, partial differential algebraic equations, method of lines, time integration (21 pages, 2009)
180. H. Lang  
**Comparison of quaternionic and rotation-free null space formalisms for multibody dynamics**  
Keywords: Parametrisation of rotations, differential-algebraic equations, multibody dynamics, constrained mechanical systems, Lagrangian mechanics (40 pages, 2010)
181. S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama, H.-P. Ziegler  
**Stochastic programming approaches for risk aware supply chain network design problems**  
Keywords: Supply Chain Management, multi-stage stochastic programming, financial decisions, risk (37 pages, 2010)
182. P. Ruckdeschel, N. Horbenko  
**Robustness properties of estimators in generalized Pareto Models**  
Keywords: global robustness, local robustness, finite sample breakdown point, generalized Pareto distribution (58 pages, 2010)
183. P. Jung, S. Leyendecker, J. Linn, M. Ortiz  
**A discrete mechanics approach to Cosserat rod theory – Part 1: static equilibria**  
Keywords: Special Cosserat rods; Lagrangian mechanics; Noether's theorem; discrete mechanics; frame-indifference; holonomic constraints; variational formulation (35 pages, 2010)
184. R. Eymard, G. Printsypar  
**A proof of convergence of a finite volume scheme for modified steady Richards' equation describing transport processes in the pressing section of a paper machine**  
Keywords: flow in porous media, steady Richards' equation, finite volume methods, convergence of approximate solution (14 pages, 2010)
185. P. Ruckdeschel  
**Optimally Robust Kalman Filtering**  
Keywords: robustness, Kalman Filter, innovation outlier, additive outlier (42 pages, 2010)
186. S. Repke, N. Marheineke, R. Pinnau  
**On adjoint-based optimization of a free surface Stokes flow**  
Keywords: film casting process, thin films, free surface Stokes flow, optimal control, Lagrange formalism (13 pages, 2010)
187. O. Iliev, R. Lazarov, J. Willems  
**Variational multiscale Finite Element Method for flows in highly porous media**  
Keywords: numerical upscaling, flow in heterogeneous porous media, Brinkman equations, Darcy's law, subgrid approximation, discontinuous Galerkin mixed FEM (21 pages, 2010)
188. S. Desmettre, A. Szimayer  
**Work effort, consumption, and portfolio selection: When the occupational choice matters**  
Keywords: portfolio choice, work effort, consumption, occupational choice (34 pages, 2010)
189. O. Iliev, Z. Lakdawala, V. Starikovicius  
**On a numerical subgrid upscaling algorithm for Stokes-Brinkman equations**  
Keywords: Stokes-Brinkman equations, subgrid approach, multiscale problems, numerical upscaling (27 pages, 2010)
190. A. Latz, J. Zausch, O. Iliev  
**Modeling of species and charge transport in Li-Ion Batteries based on non-equilibrium thermodynamics**  
Keywords: lithium-ion battery, battery modeling, electrochemical simulation, concentrated electrolyte, ion transport (8 pages, 2010)
191. P. Popov, Y. Vutov, S. Margenov, O. Iliev  
**Finite volume discretization of equations describing nonlinear diffusion in Li-Ion batteries**  
Keywords: nonlinear diffusion, finite volume discretization, Newton method, Li-Ion batteries (9 pages, 2010)
192. W. Arne, N. Marheineke, R. Wegener  
**Asymptotic transition from Cosserat rod to string models for curved viscous inertial jets**  
Keywords: rotational spinning processes; inertial and viscous-inertial fiber regimes; asymptotic limits; slender-body theory; boundary value problems (23 pages, 2010)
193. L. Engelhardt, M. Burger, G. Bitsch  
**Real-time simulation of multibody-systems for on-board applications**  
Keywords: multibody system simulation, real-time simulation, on-board simulation, Rosenbrock methods (10 pages, 2010)
194. M. Burger, M. Speckert, K. Dreßler  
**Optimal control methods for the calculation of invariant excitation signals for multibody systems**  
Keywords: optimal control, optimization, mbs simulation, invariant excitation (9 pages, 2010)
195. A. Latz, J. Zausch  
**Thermodynamic consistent transport theory of Li-Ion batteries**  
Keywords: Li-Ion batteries, nonequilibrium thermodynamics, thermal transport, modeling (18 pages, 2010)
196. S. Desmettre  
**Optimal investment for executive stockholders with exponential utility**  
Keywords: portfolio choice, executive stockholder, work effort, exponential utility (24 pages, 2010)
197. W. Arne, N. Marheineke, J. Schnebele, R. Wegener  
**Fluid-fiber-interactions in rotational spinning process of glass wool production**  
Keywords: Rotational spinning process, viscous thermal jets, fluid-fiber-interactions, two-way coupling, slender-body theory, Cosserat rods, drag models, boundary value problem, continuation method (20 pages, 2010)
198. A. Klar, J. Maringer, R. Wegener  
**A 3d model for fiber lay-down in nonwoven production processes**  
Keywords: fiber dynamics, Fokker-Planck equations, diffusion limits (15 pages, 2010)
199. Ch. Erlwein, M. Müller  
**A regime-switching regression model for hedge funds**  
Keywords: switching regression model, Hedge funds, optimal parameter estimation, filtering (26 pages, 2011)
200. M. Dalheimer  
**Power to the people – Das Stromnetz der Zukunft**  
Keywords: Smart Grid, Stromnetz, Erneuerbare Energien, Demand-Side Management (27 pages, 2011)

Status quo: January 2011