

Chancen der Digitalisierung für die Energiewende

Simon Waczowicz, Franziska Müller-Langer, Michael Kröner, Michael Steubing, Manfred Fishedick, Paul Weigel und Veit Hagenmeyer

Digitalisierung, Energiewende, Vollautomatisierung, Energiesystemmodellierung, Nachhaltigkeitsbewertung

Der vorliegende Beitrag zeigt auf, dass die Digitalisierung sowohl Enabler als auch Beschleuniger der Energiewende ist. Die Digitalisierung ermöglicht die Virtualisierung komplexer Energiesysteme: Konkret wird an sechs Anwendungsbeispielen gezeigt, dass die Digitalisierung zu einem wirtschaftlichen und sicheren Betrieb komplexer Energiesysteme und zu einer verbesserten Netzplanung für ein effizienteres Gesamtsystem führt. Zudem wird erst durch die Digitalisierung die Berechnung hochkomplexer Szenarien möglich.

Opportunities of digitisation for energy transition

The present contribution shows that digitisation is both an enabler and an accelerator of the energy revolution. Digitisation enables the virtualisation of complex energy systems: In concrete terms, six application examples show that digitisation leads to the economic and secure operation of complex energy systems and to improved network planning for a more efficient overall system. In addition, digitalisation is the only way to calculate highly complex scenarios.

1. Einführung

Der schnell fortschreitende Digitalisierungs- und Automatisierungsprozess ist heute schon ein wichtiger Wegbegleiter für die Transformation des aktuellen Energiesystems. Im vorliegenden Beitrag werden sechs Anwendungsbeispiele vorgestellt, die deutlich machen, dass die Energiewende ohne Digitalisierung nicht denkbar ist. Der vorliegende Beitrag ist maßgeblich im Rahmen der FVEE-Jahrestagung 2018 entstanden.

2. Neue Leitwartentechnologien zur Vollautomatisierung

In einem Energiesystem mit einer Vielzahl an verteilten erneuerbaren Energieanlagen (Distributed Energy Resources - DER) und einem eng vernetzten Gesamtsystem müssen neue Leitwartekonzepte und -technologien entwickelt werden, die eine Vollautomatisierung des Energiesystems ermöglichen. Eine vielversprechende Lösung ist hierbei ein automatisierter Multi-Agenten-Ansatz für die Einsatzplanung der im System beteiligten

regelbaren Komponenten (z. B. Prosumer, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Batteriespeicher). Sogenannte Agenten sammeln und vereinen virtuell die von den Komponenten bereitgestellten Flexibilitäten. In einem weiteren Schritt nutzt der Aggregator die Verfahren der Kraftwerkseinsatzplanung und der Optimierung zur Berechnung von geeigneten Gesamtlösungen (**Bild 1**). Die Automatisierung dieses Prozesses bedingt allerdings die parallele und hoch-performante Ausführung von Metaheuristik-basierten Optimierungsproblemen, dies wird durch ein generisches Container- und Microservice-basiertes Framework ermöglicht [1].

3. Simulation, Analyse und Konzeption komplexer Energiesysteme

Die Digitalisierung ermöglicht die Virtualisierung komplexer Energiesysteme auf allen Skalen vom Einzelgebäude bis zum internationalen Netzverbund („Digitaler Zwilling“). Die Hauptaufgabe besteht darin, in einem ganzheitlichen Ansatz alle Energienetze, von klein bis groß, zu

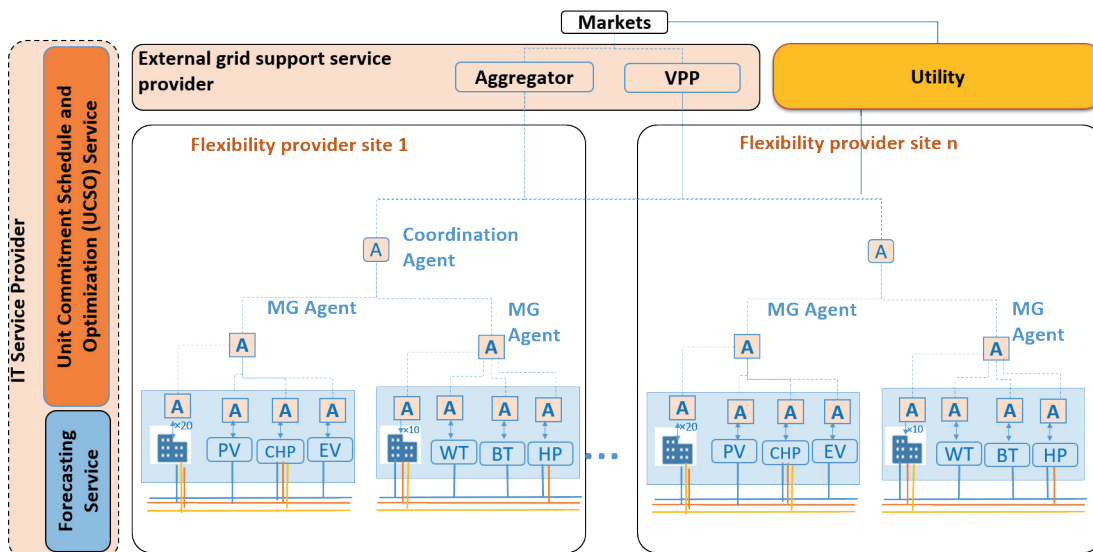


Bild 1: Automatisierter Multi-Agenten-Ansatz für die Einsatzplanung (bereitgestellt von Dr. C. Döpmeier, KIT-IAI, © KIT-IAI)

modellieren, zu simulieren und verschiedene Energieträger, Energiemeteorologie und verschiedene Energiemärkte zu verbinden. Daher wurde ein umfangreiches Portfolio an Modellen zur Simulation und Optimierung von Niederspannungsstromnetzen bis hin zum paneuropäischen Übertragungsnetz entwickelt [1]. Zur Berücksichtigung der geografisch verteilten erneuerbaren Energien wurde ein Modell des deutschen Übertragungsnetzes (380 kV/220 kV) um das komplette 110 kV-Verteilnetz sowie einige ausgewählte Mittel- und Niederspannungsnetze erweitert (Beispiel siehe **Bild 2**). Zudem wurden neueste, nicht offen verfügbare Topologiedaten der deutschen Übertragungsnetzbetreiber und Verteilernetzbetreiber für diese Modelle genutzt. Die entwickelten Modelle bilden die Grundlage für umfangreiche Lastflussberechnungen für Verteil- und Übertragungsnetze, wobei u. a. das Softwareframework eSiMoV zum Einsatz kommt [2].

Komplexe Energiesysteme sind durch energietechnische Anlagen, Gebäude, Energie- und Informationsnetze gekennzeichnet. Sollen diese Energiesysteme simuliert werden, muss u. a. das thermische Verhalten der Gebäude modelliert werden. Am KIT wurden hierzu Verfahren weiterentwickelt, um 3D-Gebäudemodelle einer Liegenschaft automatisiert aus dem Datenaustauschformat CityGML zu erzeugen [3]. Die Gebäudemodelle werden in einem weiteren Schritt mit Netzmodellen für Strom und Wärme verknüpft, sodass der Strom- und Wärmebedarf größerer Gebäudegruppen simuliert werden kann.

Eine erfolgreiche Energiewende impliziert auch wesentliche Veränderungen im Wärmesektor. Aus regenera-

tiven Quellen gespeiste Wärmenetze können hier einen entscheidenden Beitrag leisten und sind notwendig, um die angestrebte Reduzierung der Treibhausgasemissionen von 95 % gegenüber 1990 zu erreichen [4]. Digitale Wärmebedarfskarten, die in der Planung von Wärmenetzen eingesetzt werden, identifizieren Wärmequellen und -senken sowie deren räumliche Beziehung und unterstützen somit die Bewertung von standortspezifischen Wärme(netz)optionen. Weiterhin können dadurch energieträgerspezifische (z. B. Biomasse) Potenziale quantifiziert und räumlich verortet werden.

4. Dezentrale optimierungsbasierte Einsatzplanung für Batteriespeicher mittels stochastischer Prognosen

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (z. B. Wind, Sonne) ist aufgrund der intrinsischen Volatilität nicht frei regelbar (abgesehen des Abregelns im Falle von Netzüberlastung). Die Integration von Strom aus erneuerbaren Energiequellen in den Strommarkt und der Betrieb des Stromnetzes kann insofern gelingen, als Energiespeichersysteme eingesetzt werden, die diese Volatilität ausgleichen. In der Regel erfolgt die Planung und Steuerung derartiger Energiesysteme mithilfe eines hierarchischen Ansatzes. D. h., auf der oberen Ebene wird zunächst ein Optimierungsproblem zur Berechnung eines Betriebsfahrplans (Dispatch Schedule) gelöst und die entsprechenden Energiemengen zugeordnet. Auf der unteren Ebene werden anschließend Online-Anpassungen des Betriebsfahrplans mithilfe der modellprädiktiven Regelung durchgeführt.

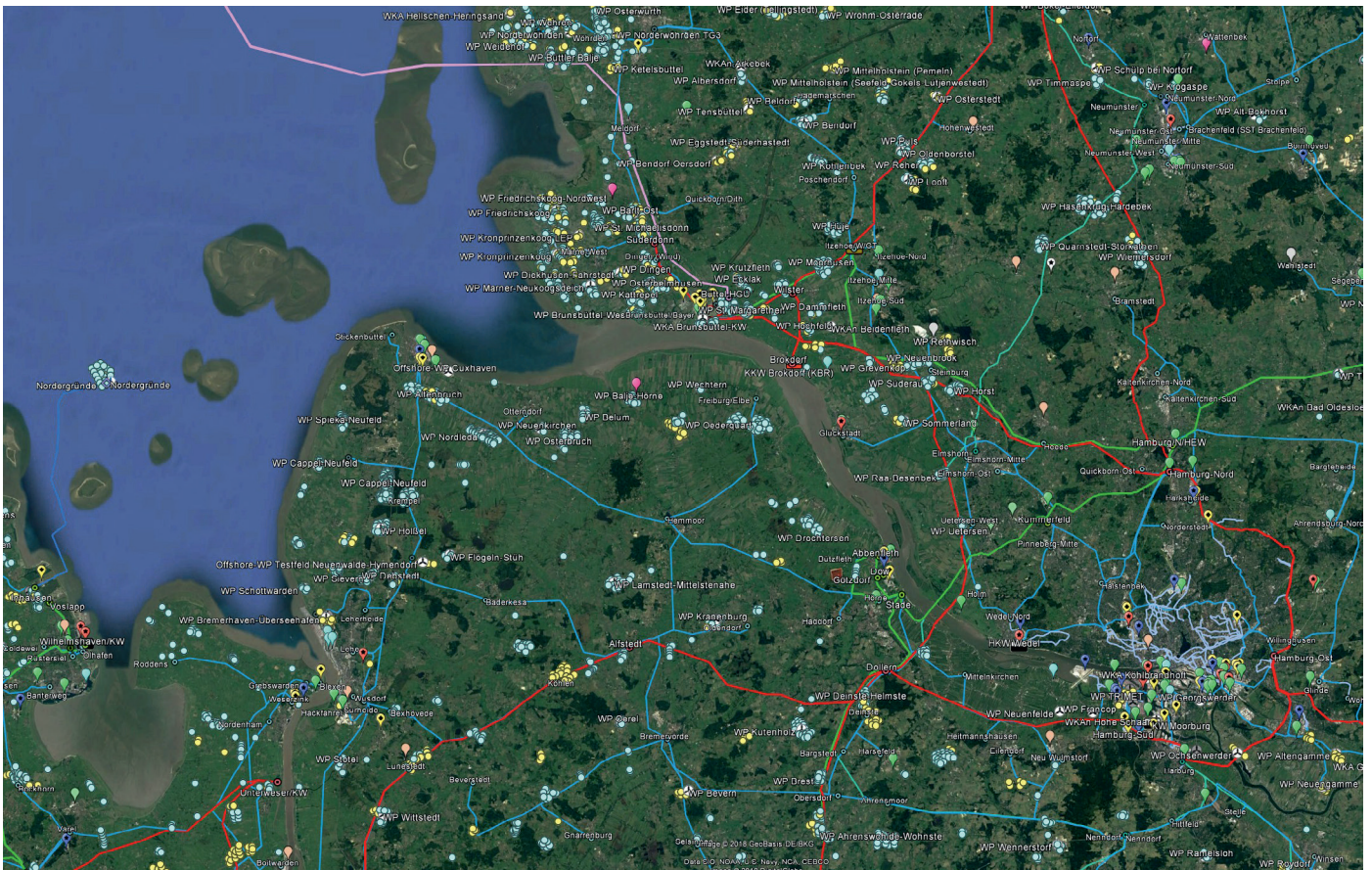


Bild 2: Stromnetz bei Hamburg. Dargestellt sind das Transport- (220/380-kV) und Verteilnetz (110-kV AC) und erneuerbare Energieanlagen (bereitgestellt von Dr. U. Kühnapfel, KIT-IAI, © KIT-IAI)

In einem neuartigen Ansatz für die optimierungs-basierte Einsatzplanung für Batteriespeicher werden datengetriebene wahrscheinlichkeitsbasierte Prognosen der Leistungs- und Energieproduktion von erneuerbaren Energieanlagen mit einer numerischen Optimierung zur Minimierung der ökonomischen Kosten kombiniert [5] (**Bild 3**). Oberstes Ziel ist die Einhaltung des Betriebsfahrplans mit einem bestimmten Sicherheitsniveau, obgleich wahrscheinlichkeitsbasierte Prognosen der Leistungs-/Energieprofile der Nachfrage/Erzeugung die Grundlage bilden. Die Wirksamkeit des vorgeschlagenen Ansatzes konnte in umfangreichen Simulationen und Experimenten am KIT gezeigt werden, die auf realen Produktions- und Verbrauchsdaten von Haushalten basieren [6].

5. Automatisierte Flexibilitätserkennung in Industrieprozessen

Die Flexibilisierung des Stromverbrauchs von Industrie- und Haushaltsstromkunden wird als ein Mittel zur Syn-

chronisation von Stromerzeugung und -verbrauch gesehen. Die Verfahren zur Beeinflussung des Stromverbrauchsverhaltens werden in der Regel unter dem Begriff Demand Side Management (DSM) zusammengefasst. Um DSM-Strategien zu implementieren, sollte zunächst die Flexibilität des Verbrauchers ermittelt werden. Das Flexibilitätspotenzial für Haushalte sowie für einige energieintensive Industrieprozesse wurde in der Literatur bereits umfangreich analysiert, jedoch wurden industrielle Batchprozesse bisher nicht berücksichtigt.

So stellt [7] einen neuen Ansatz vor, um wiederkehrende Muster (Fachbegriff: Motive) in industriellen Energiedaten zu finden. Der hierfür eingesetzte zweistufige Algorithmus (Motif Discovery Algorithmus) erweist sich als sehr effizient bei der Suche nach wiederkehrenden Mustern in industriellen Prozesszeitreihendaten. Die wiederkehrenden Muster lassen sich als „Standardprozessprofile“ begreifen und die Variation der Muster kann als Indikator für Flexibilitätspotenziale verwendet werden [8]. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass Flexibilitätspotenziale in Industrieprozessen automatisiert erkannt werden,

Dispatchable feeder

Stochastische Prognosen für Verbrauch und Erzeugung

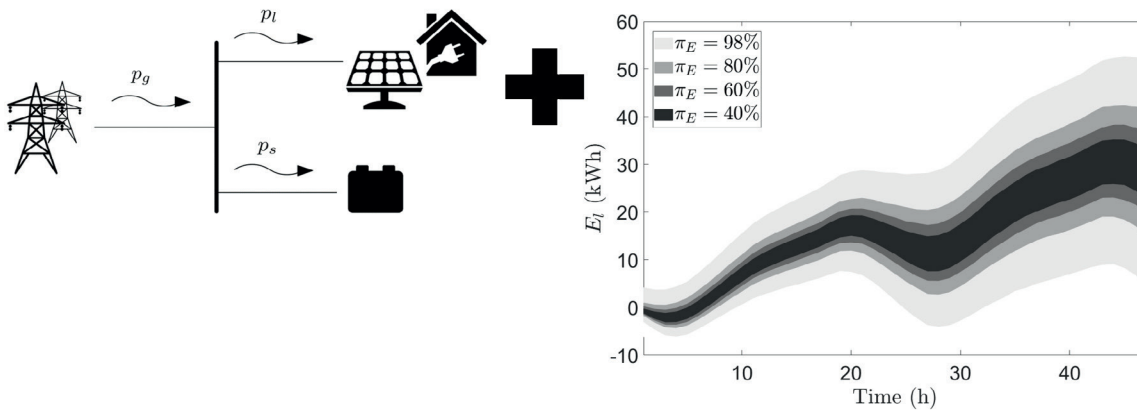


Bild 3: Optimierungsbasierte Einsatzplanung für Batteriespeicher unter Berücksichtigung von stochastischen Prognosen des Verbrauchs und der Erzeugung (bereitgestellt von R. Appino, KIT-IAI, © KIT-IAI)

ohne dass Expertenwissen über den zugrundeliegenden Industrieprozess einbezogen wird.

6. Chancen der Digitalisierung für den Verkehr

Der Verkehrssektor steht vor enormen Herausforderungen, trotz wachsender Verkehrsleistungen insbesondere Klimagase [9] und lokale Schadstoffemissionen massiv zu reduzieren [10]. Ein wesentlicher Baustein ist dafür die Energiewende im Verkehr und in diesem Zusammenhang auch die möglichen Chancen, die eine fortschreitende Digitalisierung mit sich bringt. So hat vernetzte Mobilität das Potenzial, den Energieverbrauch –und damit i. d. R. Emissionen– zu reduzieren. Weiterhin kann die Kopplung der Energiesektoren „Strom“ und „Mobilität“ zur Netzstabilität beitragen. So ist in diesem Zusammenhang der Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen (z. B. unter Ausschöpfung der Synergien, die sich aus dem Bioenergie- und Stromsektor ergeben in Bezug auf SynBioP-Tx-Produkte) als Stromspeicherelement zu nennen [11]. Diese Kraftstoffe können beispielsweise in Elektrofahrzeugen mit Range-Extendern zur Reichweitenverlängerung zum Einsatz kommen. Eine weitere erfolgversprechende Kopplung zeigt sich auf Haushaltsebene mit Link zum Smart Home Grid. Teils vielversprechende Ansatzpunkte ergeben sich insbesondere im Zusammenhang mit bedarfsgerechter Energiebereitstellung respektive -verwaltung und dem Einsatz von (Range-Extender-)Elektrofahrzeugen als lokale Pufferspeicher. Eine Herausfor-

derung, die es dabei zu bewältigen gilt, ist die Entwicklung und Implementierung eines intelligenten lokalen Lastmanagements, welches das Laden und Rückspeisen im Sinne von bidirektionalem Laden orchestriert.

7. Multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung

Komplexe Energiesysteme hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit zu bewerten bedarf der Berücksichtigung einer Vielzahl unterschiedlicher Kriterienkategorien (Technologie, Sicherheit, Ökonomie, Gesellschaft & Politik, Ökologie) und beteiligter Akteure (z. B. Erzeuger, Netze, Vertrieb, Verbraucher). Im Rahmen einer multikriteriellen Analyse werden der technische Lebenszyklus sowie die Spannungsfelder bewertet.

8. Fazit

Der vorliegende Beitrag verdeutlicht, dass die Digitalisierung die Virtualisierung komplexer Energiesysteme nicht nur ermöglicht, sondern ohne den „Digitalen Zwilling“ die Energiewende nicht gelingen kann. Denn nur die Digitalisierung führt zu wirtschaftlichem und sicherem Betrieb komplexer Energiesysteme, nur sie führt zu einer verbesserten Netzplanung für ein effizienteres Gesamtsystem, nur sie ermöglicht Berechnung hochkomplexer Szenarien. Zusammengefasst: Die Digitalisierung ist sowohl Enabler als auch Beschleuniger der Energiewende.

Literatur

- [1] *Hagenmeyer, V.; Cakmak, H. K.; Düpmeier, C.; Faulwasser, T.; Isele, J.; Keller, H. B.; Kohlhepp, P.; Kühnapfel, U.; Stucky, U.; Waczowicz, S. und Mikut, R.*: Information and Communication Technology in Energy Lab 2.0: Smart Energies System Simulation and Control Center with an Open-Street-Map-based Power Flow Simulation Example. In: *Energy Technology* 4 (2016), S. 145–162. <http://dx.doi.org/10.1002/ente.201500304>. – DOI 10.1002/ente.201500304
- [2] *Kyesswa, M.; Cakmak, H.; Kühnapfel, U. und Hagenmeyer, V.*: A Matlab-Based Dynamic Simulation Module for Power System Transients Analysis in the eASIMOV Framework. In: *2017 European Modelling Symposium (EMS)*, IEEE, nov 2017
- [3] *Geiger, A.; Benner, J.; Häfele, K.-H. und Hagenmeyer, V.*: Thermal Energy Simulation of Buildings based on the CityGML Energy Application Domain Extension. In: *Both, P. von (Hrsg.): BauSIM2018 – 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz, KIT, Karlsruhe, 295-302*
- [4] *Fraunhofer IWES/IBP*: Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor/Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Version:2017. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf. – Forschungsbericht
- [5] *Appino, R. R.; González Ordiano, J.; Mikut, R.; Faulwasser, T. und Hagenmeyer, V.*: On the Use of Probabilistic Forecasts in Scheduling of Renewable Energy Sources Coupled to Storages. In: *Applied Energy* 210 (2018), S. 1207 – 1218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.133>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2017.08.133
- [6] *Appino, R. R.; González Ordiano, J.; Mikut, R.; Hagenmeyer, V. und Faulwasser, T.*: Storage Scheduling with Stochastic Uncertainties: Feasibility and Cost of Imbalances. In: *Proc., 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2018, S. 1–7
- [7] *Ludwig, N.; Waczowicz, S.; Mikut, R. und Hagenmeyer, V.*: Mining Flexibility Patterns in Energy Time Series from Industrial Processes. In: *Proc., 27. Workshop Computational Intelligence, Dortmund, 2017*, S. 13–32
- [8] *Barth, L.; Hagenmeyer, V.; Ludwig, N. und Wagner, D.*: How much demand side flexibility do we need? – Analyzing where to exploit flexibility in industrial processes. In: *9th ACM International Conference on Future Energy Systems (ACM e-Energy)*, 12th - 15th June 2018, Karlsruhe, Germany, ACM, New York, 2018. – 37.06.01
- [9] *BMUB*: Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Version:2016. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf. – Forschungsbericht. – Kabinettsbeschluss vom 14.11.2016
- [10] *BMVI*: Verkehrsprognose 2030 / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Version:2014. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsprognose-2030-praesentation.pdf?__blob=publicationFile. – Forschungsbericht. – Zugriff: 03.03.2017
- [11] *Müller-Langer, F.; Dietrich, R.-U.; Krol, R. van d.; Arnold, K. und Harnisch, F.*: Erneuerbare Kraftstoffe für Mobilität und Industrie / FVEE-Jahrestagung 2016. Forschungsbericht

Autoren

Dr. **Simon Waczowicz**

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Automation und angewandte Informatik | Karlsruhe |
Tel.: +49 721 608 26713 |
simon.waczowicz@kit.edu

Dr. **Franziska Müller-Langer**

DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH | Leipzig |
Tel.: +49 341 2434 423 |
franziska.mueller-langer@dbfz.de

Dr. **Michael Kröner**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Vernetzte Energiesysteme | Oldenburg |
Tel.: +49 441 99906 317 |
michael.kroener@dlr.de

Michael Steubing

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ | Leipzig |
Tel.: +49 341 2434 390 |
michael.steubing@ufz.de

Prof. Dr.-Ing. **Manfred Fishedick**

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gemeinnützige GmbH | Wuppertal |
Tel.: +49 202 2492 121 |
manfred.fishedick@wupperinst.org

Paul Weigel

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gemeinnützige GmbH | Wuppertal |
Tel.: +49 157 33194980 |
paul.weigel@rocketmail.com

Prof. Dr. **Veit Hagenmeyer**

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Automation und angewandte Informatik | Karlsruhe |
Tel.: +49 721 608 29200 |
veit.hagenmeyer@kit.edu

