



KIT SCIENTIFIC REPORTS 7747

Ideen und Innovationen für die Energie von morgen

Wissenschaftliche Beiträge des KIT zu den Jahrestagungen
2014, 2016 und 2017 des KIT-Zentrums Energie

Wolfgang Breh und Heike Kull (Hrsg.)

Wolfgang Breh und Heike Kull (Hrsg.)

Ideen und Innovationen für die Energie von morgen

Wissenschaftliche Beiträge des KIT zu den Jahrestagungen
2014, 2016 und 2017 des KIT-Zentrums Energie

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7747

Ideen und Innovationen für die Energie von morgen

Wissenschaftliche Beiträge des KIT zu den Jahrestagungen
2014, 2016 und 2017 des KIT-Zentrums Energie

Herausgegeben von
Wolfgang Breh und Heike Kull

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.

Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-9669

ISBN 978-3-7315-0753-6

DOI 10.5445/KSP/1000078728

Vorwort

Energie für morgen – wie wird das Energiesystem der Zukunft aussehen? Der Anteil der erneuerbaren Energien wird wesentlich steigen. Energiewandlung und -bereitstellung werden dezentraler organisiert sein. Daher bedarf es neuer Technologien zur Speicherung und Verteilung, um Fluktuationen auszugleichen und zu gewährleisten, dass die Energie zur richtigen Zeit am richtigen Ort verfügbar ist. Dies erfordert auch ein intelligentes, das heißt IT-gesteuertes Netz. Das Energiesystem der Zukunft wird Strom, Gas und Wärme miteinander verknüpfen. Um auf künftige Entwicklungen reagieren zu können, müssen wir uns überdies verschiedene technologische Optionen offenhalten. Alles in allem gilt es, langfristig eine sichere, bezahlbare und umweltverträgliche Energieversorgung zu ermöglichen.

In Deutschland erfährt das Energiesystem mit der Energiewende also einen hochkomplexen Transformationsprozess. Dieser stellt die Forschung vor enorme Herausforderungen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedener Disziplinen sind gefordert, gemeinsam Ideen zu erarbeiten und in Innovationen zu überführen. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft, bietet mit seinen breit gefächerten Kompetenzen und seinen hoch entwickelten Infrastrukturen ideale Bedingungen. Im KIT-Zentrum Energie sind die Energieforschungsarbeiten des KIT sowie namhafter Kooperationspartner gebündelt.

Rund 1300 Mitarbeiter machen das KIT-Zentrum Energie zu einer der größten Energieforschungseinrichtungen in Europa. Technik- und naturwissenschaftliche, aber auch wirtschafts-, geistes- und sozialwissenschaftliche sowie rechtswissenschaftliche Kompetenzen erlauben eine ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems. Die Arbeiten erstrecken sich über sieben Topics: Energieumwandlung, Erneuerbare Energien, Energiespeicherung und Energieverteilung, Effiziente Energienutzung, Fusionstechnologie, Kernenergie und Sicherheit sowie Energiesystemanalyse. Darüber hinaus fördert das KIT-Zentrum Energie den Wissenschaftsnachwuchs und fungiert als Ansprechpartner für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft.

Im vorliegenden Band sind Vorträge mehrerer Jahrestagungen des KIT-Zentrums Energie dokumentiert. Die vielfältigen Themen und differenzierten Ansätze vermitteln einen Eindruck von der Breite und Tiefe der Karlsruher Energieforschung. An dieser Stelle möchte ich den Referenten, dem interessierten Publikum und allen, die zum Erfolg der mittlerweile als Tradition etablierten Tagungen beigetragen haben, noch einmal ganz herzlich danken.

Karlsruhe,
im Dezember 2017

Wolfgang Breh
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Das ungenutzte Potential der Geothermie als Grundlastversorger	1
Benedict Holbein, Jörg Isele, Luigi Spatafora	
Electrochemical-calorimetric studies on different lithium-ion cells	9
Boxia Lei, Andreas Melcher, Carlos Ziebert, Magnus Rohde, Hans Jürgen Seifert	
Gekoppelte energetische und stoffliche Nutzung in Biogasanlagen	17
Rainer Bolduan, Philipp Preiss	
Spatial multi-energy system model for the redevelopment of the Berlin Tegel airport	21
Xiubei Ge, Jean-Marie Bahu, Enrique Kremers, Andreas Koch, Diane Pétilion	
Innovative Downhole Tools for Cause Study and Maintenance in Deep Geothermal Energy	27
Benedict Holbein, Stefan Dietze, Jörg Isele, Luigi Spatafora, Friedrich Wiegel, Veit Hagenmeyer	
Investigation of the critical heat flux in a rod bundle configuration under low pressure conditions	37
Florian Kaiser, Stephan Gabriel, Giancarlo Albrecht, Thomas Wetzel	
Beweisbare Privatheitsgarantien durch den Einsatz wiederaufladbarer Energiespeicher	43
Fabian Laforet, Erik Buchmann, Klemens Böhm	
Experimental Analysis of Thermal Runaway in 18650 Cylindrical Li-Ion Cells using an Accelerating Rate Calorimeter	45
B. Lei, W. Zhao, C. Ziebert, A. Melcher, M. Rohde, H. J. Seifert	
ECM Models for Li-Ion Batteries – A Short Mathematical Survey and Simulations	53
Andreas Melcher, Carlos Ziebert, Magnus Rohde, Boxia Lei, Hans Jürgen Seifert	
Auswirkungen eines möglichen Kohleausstiegs im Vereinigten Königreich und in Deutschland auf den Strommix und die CO₂-Emmissionen in Europa	59
Hasan Ümitcan Yilmaz, Dr. Dogan Keles, Quentin Bchini, Rupert Hartel, Prof. Dr. Wolf Fichtner	
Vergleichbarkeit des Energiebedarfs der Intralogistik in Distributionszentren	67
Dr.-Ing. Meike Braun	

Numerische Simulation der Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion bei Flugtriebwerken mit hohem Nebenstromverhältnis: Stand der Forschung	75
Marc C. Keller, Corina Schwitzke, Hans-Jörg Bauer	
Untersuchungen zum Energieeinsparpotenzial von feuchtspeichernden Innenputzen	83
Michael Kleber	
First results from stimulation assessment and monitoring of the 426°C geothermal well RN-15/IDDP-2 (H2020-DEEPEGS project)	91
R. Köpke, N. Haaf, F. Limberger, J. Wang, M. Peters, E. Gaucher, E. Schill, T. Kohl	
'Low-invasive' measures for improving the indoor climate in school buildings, particularly with consideration of warmer summers due to climate change	97
Doctoral Researcher: S. Carolina C. Montano, Doctorate Supervisor: Prof. Andreas Wagner	
Experimentelle Untersuchung von Anstreifvorgängen in Turbomaschinen	101
Oliver Munz, Corina Schwitzke, Sarah Welzenbach, Tim Fischer, Sonun Ulan Kyzy, Hans-Jörg Bauer	
Synthese von Oxymethylenether (OME)	107
Dorian Oestreich, Philipp Haltenort, Kathrin Hackbarth, Ulrich Arnold, Jörg Sauer	
Preliminary Approaches for improving the Smart Grid Cyber Security	115
Kathrin Reibelt, Ghada El Bez, Oliver Schneider, Jörg Matthes, Hubert B. Keller	
Development of the Renewable Energy Sector in Europe	123
Mariya Trifonova	

Das ungenutzte Potential der Geothermie als Grundlastversorger

Benedict Holbein, Jörg Isele, Luigi Spatafora

*Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland*

Das Potential der Geothermie ist nahezu überall verfügbar und kann sowohl für die Wärme- als auch für die Stromerzeugung genutzt werden. Die Bedeutung der Geothermie als Energieerzeuger ist aber gegenwärtig vernachlässigbar. Auch in Deutschland bleibt ein Großteil dieser Energie ungenutzt. Diese Arbeit vertritt die Hypothese, dass ein entscheidender Grund für die Diskrepanz zwischen dem geothermischen Energiepotential und der tatsächlichen Nutzung in einem Mangel an belastbaren Daten aus Bohrlöchern und deren Umgebung liegt. Dieser Informationsmangel ist die Ursache für zahlreiche Probleme mit dem Investitions- und Risikomanagement oder der Akzeptanz von Geothermieprojekten in der Bevölkerung.

Das seit etwa 5 Jahren am Institut für Angewandte Informatik IAI, KIT, laufende Projekt ZWERG hat sich zum Ziel gesetzt, diese Situation nachhaltig zu verbessern und Betreibern und Wissenschaftlern bessere Möglichkeiten für Untersuchungen, Inspektionen und aktive Eingriffe in Bohrlöchern zu bieten. Es umfasst die Entwicklung einer Systemplattform für die schnelle und effiziente Konstruktion individueller Bohrloch-Geräte sowie die Entwicklung einzelner Prototypen für spezielle Anwendungen. Die Systemplattform bündelt Erfahrungen und Expertisen auf dem Gebiet der Sondenentwicklung und dokumentiert sie in einer nutzbaren Form. Um die Erkenntnisse für weitere Projekte nutzbar zu machen, wird ein möglichst großer Standardisierungsgrad angestrebt. Sogenannte Blueprints und Standardmodule sollen in verschiedensten Geräten zum Einsatz kommen, wodurch Entwicklungskosten, Zeit und Fehlerquellen eingespart werden können. Unter anderem geht es dabei um die Frage, welche Materialien für verschiedene Sonden-teile geeignet sind und wo und zu welchem Preis diese Materialien erworben werden können. Beispiele für auf ZWERG basierende Projekte sind das Anfang nächsten Jahres beendete BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) -Projekt GeoKam zur Entwicklung eines Video-Inspektionssystems für tiefe Bohrlöcher und das geplante BMWi-Projekt COBOLD, bei dem es um die Bereitstellung einer Bohrlochkältemaschine sowie unterschiedlicher Anbindungsmöglichkeiten geht, um in sehr heißen Umgebungen Standardelektronik einsetzbar zu machen.

Durch diese Arbeiten wird ein Beitrag zur Verbesserung der Datensituation von Geothermiebohrungen geleistet. Dies ist ein entscheidender Schritt hin zu einer vielerorts und effizient genutzten Geothermie.

Geothermie Potentiale und Nutzung

Aktuelle Nutzung der Geothermie

Mit der Energiewende in Deutschland, die seit 2000 forciert verfolgt wird, ist die Bedeutung regenerativer Energiequellen größer denn je. Ihr Anteil an der Stromerzeugung in Deutschland ist jedoch immer noch gering verglichen mit konventionellen Energieträgern. Durch den Atomanstieg ist die Braun- und Steinkohlenutzung zudem angestiegen, was sich negativ auf die CO₂-Bilanz der Energieerzeugung auswirkt.

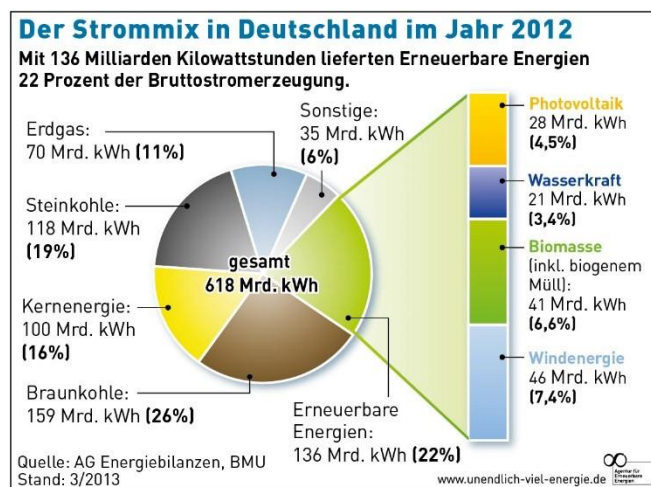


Abb. 1: Strommix in Deutschland 2012.

Betrachtet man aktuelle politische Ereignisse im Osten Europas, ist auch die Abhängigkeit von Energieimporten, wie im Fall Deutschlands vom russischen Gas, ein zu beachtendes Thema. In einer angespannten politischen Lage ist die Energieversorgung auch mit der Sicherheitsfrage verknüpft. Ähnliches gilt grundsätzlich auch für Öllieferungen aus nahöstlichen Ländern, wo immer wieder Zustände politischer Instabilität vorherrschen. Wasserkraft, Strom aus Biomasse, Windenergie und sogar Photovoltaik verzeichnen steigende Anteile am Energiemix. Der Anteil geothermischer Stromerzeugung ist verschwindend gering. (AGEB, 2013)

Um die erneuerbaren Energien voranzubringen, sind Investitionen nötig. Dabei geht es um die Förderung von Projekten und die Schaffung der nötigen Infrastruktur, Stichwort Netzausbau, aber auch um Gelder für die Forschung. Um effiziente, sichere und wirtschaftliche Technologien zu entwickeln, sind Forschungsprojekte im Grundlagenbereich ebenso entscheidend wie Produktentwicklungsvorhaben. Erstere haben jedoch ein größeres Finanzierungsproblem, weil sich ein wirtschaftlicher Nutzen oft nicht direkt ableiten lässt und Industrieinvestoren daher schwer zu gewinnen sind. Umso wichtiger sind an dieser Stelle staatliche Förderungen.

Was vor allem gebraucht wird sind grundlastfähige Energieträger. Die Geothermie ist eine erneuerbare Energiequelle, die diese Rolle einnehmen könnte. Bei den Förderbeträgen hängt sie jedoch

deutlich hinter Solar-, Wind- und Bioenergie zurück. Die Investitionen in Geothermie-Anlagen liegen seit 2006 bei knapp 1 Mrd. Euro jährlich und sind seitdem kaum gestiegen. Bei den Gesamtinvestitionen von rund 19,5 Mrd. Euro in erneuerbare Energieanlagen im Jahr 2012 kommen ihnen nur etwa 4,6 % zu, während 62,5 % der Förderung in Solarenergieanlagen fließen. (BMU, 2012)

An der Verteilung des Primärenergieverbrauchs auf die einzelnen Energieträger im Jahr 2013 erkennt man, dass selbst unter Berücksichtigung von Wärmepumpen für die Gebäudeklimatisierung u.a. die Geothermie gerade einmal 0,2 % ausmacht. Bei einem Gesamtbedarf von etwa 13900 PJ (Petajoule) pro Jahr bzw. 3861 TWh (Terrawattstunden) entspricht dies einer Energiemenge von 7722 GWh (Gigawattstunden) oder einer Gesamtleistung von 881,5 MW (Megawatt, bei 365 Vollbetriebstagen). Zum Vergleich beträgt die erreichbare elektrische Gesamtleistung der beiden Blöcke des AKW Phillipsburg etwa 2300 MW.

Potentiale der Geothermie

Der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Situation der geothermischen Energiegewinnung stehen die Potentiale der Geothermie in Deutschland gegenüber. Wie aus dem Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung für den Bundestag hervorgeht (ABFT, 2003), ist das Potential der Heißwasseraquifere alleine ausreichend, um den gesamten Energiebedarf der BRD mehrfach zu decken.

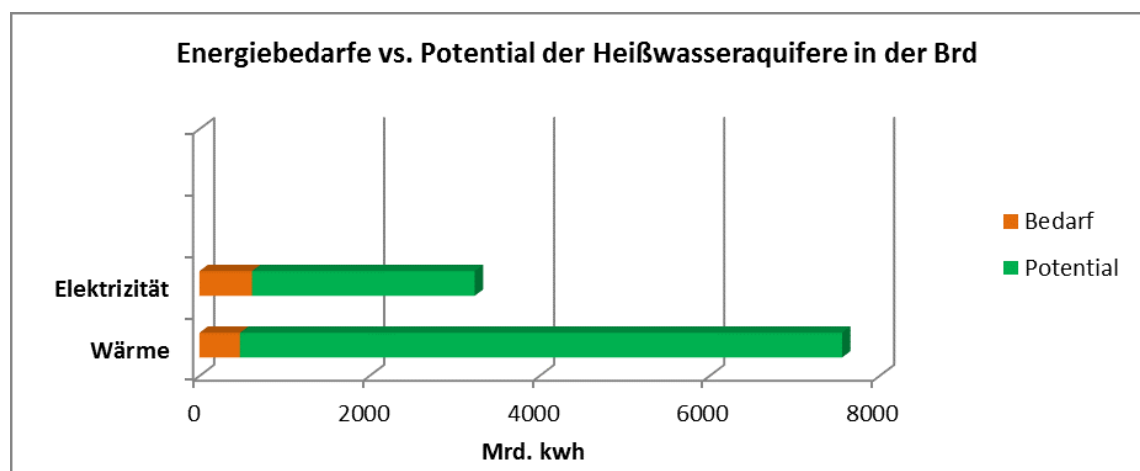


Abb. 2: Energiepotential der Heißwasseraquifere in Deutschland und Gesamt-Energiebedarfe.

Selbstverständlich entsprechen diese theoretischen Potentiale nicht der real wirtschaftlich gewinnbaren Energiemenge. Die Darstellung macht jedoch eindrücklich klar, dass hier ein erhebliches Potential für die regenerative Energieerzeugung ungenutzt ist.

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Geothermieprojekten ist komplex und stark standortabhängig. Der größte Kostenfaktor sind die Bohrkosten für die Förder- und Injektionsbohrung. Nach „Haenel“ lässt sich eine einfache Kostenabschätzung wie folgt durchführen (UBA, 1991):

$$\text{Produktionskosten je kWh} = \frac{1}{N} \cdot \left[\left(i \sum_{n=1}^n \frac{S_n(1+i)^{a_n}}{(1+i)^{a_n-1}} \right) \right] + S_{n+1} \quad (1)$$

wobei N die Jahresproduktion in kWh, S_n die Installationskosten, S_{n+1} die jährlichen Betriebskosten, i der Zinssatz und a_n die Amortisationszeit sind. Eine exemplarische Berechnung für ein fiktives Kraftwerk mit etwa 5 MW elektrischer Leistung ergibt die in Tabelle 1 dargestellten Kosten.

Tab. 1: Beispielrechnung für Produktionskosten geothermischer Energie

Kostenpunkt		Amortisationszeit [a]	Betrag [€]
Bohrkosten [1200 €/m]	Injektion (2000 m)	55	S1 2.400.000
	Produktion (3000 m)	55	S2 3.600.000
Anlage [€]	Pumpen (3 Stück)	30	S3 300.000
	Kreislauf (ORC und Transformation)	50	S4 6.500.000
	Anbindung	40	S5 2.000.000
Betrieb [€/a]	Strom für Pumpen Grundverbrauch (Strom, Heizung...)	Sn+1	2.646.000
Personal	Techniker (2 x 55000 €/a) Sonstige (200 000 €/a)		
Summe:			0,076 [€/kWh]

In dem einigermaßen realistischen Beispiel müsste also mit Produktionskosten von rund 7,6 Cent/kWh gerechnet werden. Die Vergütung für die Einspeisung von geothermisch erzeugtem Strom beträgt nach Erneuerbare-Energien-Gesetz 2009 § 28 (bis 10 MW) 16 Cent/kWh. Eine wirtschaftliche Stromerzeugung scheint hier demnach durchaus möglich.

Verbesserung durch Wissen

Wissensmangel als Hauptursache

Warum die Nutzung der Geothermie trotz der scheinbar vielversprechenden wirtschaftlichen Möglichkeiten soweit hinter dem vorhandenen Potential zurückbleibt, hat verschiedene Gründe, auf die hier Bezug genommen wird. Im Grunde hängen alle auftretenden Probleme mit einem akuten Wissensmangel über die Vorgänge in interessanten Arealen, z. B. über Ursachen unvorhergesehener Ereignisse, zusammen.

Der richtige Weg zur Senkung der Risiken sowie zum Abbau vorhandener Ängste und Vorbehalte ist eine breite Aufklärung, getragen von umfassenden Forschungsuntersuchungen. Für die Erforschung von Bohrlöchern, ob für wissenschaftliche Zwecke oder aufgrund eines akuten Zwischenfalls, für den nach Erklärungen gesucht wird, werden bohrlochtaugliche Mess- und Interaktionsgeräte (Tools) benötigt. Im Bereich der Öl- und Gasindustrie gibt es viele solcher Tools, die für teils ähnliche Einsatzbedingungen konzipiert sind. Diese sind jedoch nicht angepasst für die speziellen Anforderungen und Bedarfe der Geothermie. Dort wird zum Beispiel üblicherweise nur bei Temperaturen bis 120 °C operiert. Zudem wird der Markt der Bohrloch-Tools für alle Bereiche von einer handvoll Unternehmen dominiert, die ihre Geräte lediglich verleihen oder den Service für Untersuchungen anbieten. Die Kosten für solche Dienste sind hoch und aus Sicht vieler Betreiber und der Wissenschaft nicht finanzierbar. Zielführend und aus wissenschaftlicher Sicht wünschenswert wäre es, wenn derartige Geräte, etwa zur Messung unterschiedlicher Thermalwassereigenschaften, zur Entnahme und Sicherung von Proben aus dem Bohrloch, zur videotecnischen Untersuchung von Bohrlochwänden bis hin zur Vor-Ort-Reparatur beschädigter Bohrloch-Casings, erschwinglich erwerbbar und das nötige Know-how für deren Konstruktion frei zugänglich wären. Das würde die Geothermieforschung und damit letztlich die Geothermie als regenerative Energiequelle an sich, stark voranbringen. Aus diesem Grund wird bei den Forschungsbemühungen in ZWERG dieser offene Ansatz verfolgt. Dabei geht es sowohl um die Schaffung einer Basis für vielfältige Entwicklungen je nach Bedarf durch den Aufbau einer Systemplattform mit standardisierten Modulen und Materialbeständen, als auch um die Entwicklung einiger zentraler Sondenmodule, die wichtige Einsatzmöglichkeiten bieten und die Leistungsfähigkeit von ZWERG demonstrieren.

Auf zwei Beispiele, das Videoinspektionssystem GeoKam und die Bohrlochkältemaschine COBOLD, wird nachfolgend näher eingegangen.

Lösungsansatz ZWERG

Das Prinzip von ZWERG besteht darin, eine breite Wissens- und Erfahrungsbasis für die Entwicklung von Bohrlochgeräten zu schaffen und der Allgemeinheit zugänglich zu machen. Dies soll beispielsweise über ein Wiki stattfinden. Das Konzept kann allerdings nur dann wirklich funktionieren, wenn sich möglichst viele Forschungsgruppen auch über das KIT hinaus beteiligen und ihr Wissen zum Austausch zur Verfügung stellen. Das zweite Grundprinzip von ZWERG ist das bereits angesprochene plattformbasierte Vorgehen verbunden mit einer modularen Bauweise

der Sonden. Auf diese Weise soll eine Standardisierung erreicht werden, die u.a. durch die Wiederverwendung gleicher Bauteile und Sonderelemente die Entwicklungskosten stark senkt.

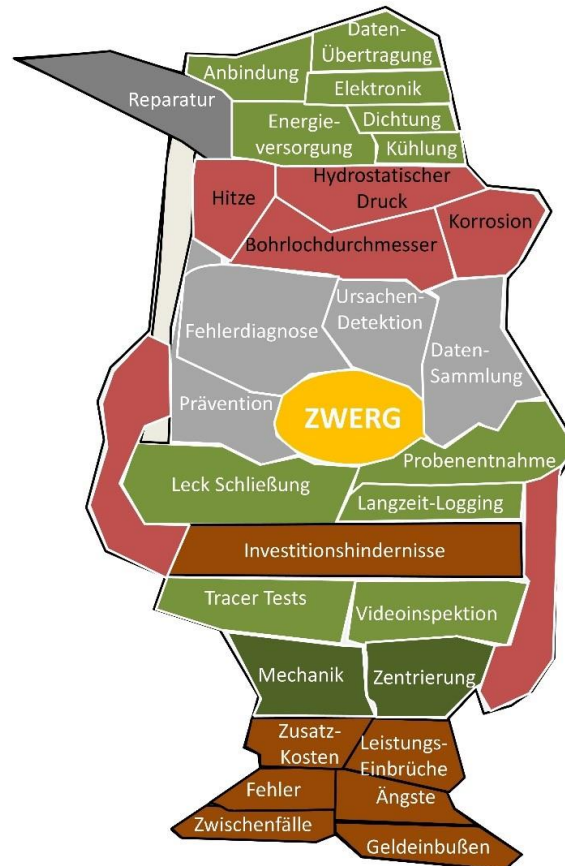


Abb. 3: Themenkomplex des ZWERG Projekts.

Abbildung 3 soll einen Überblick über die Fragestellungen geben, welche im ZWERG-Projekt beinhaltet sind. Beispiele für laufende und geplante Entwicklungen sind die GeoKam, die Bohrlöchkältemaschine COBOLD und SOHLE, ein Gerät zur sicheren Befahrung von open-holes, also den Bohrlösch-Endbereichen ohne Casing (Isele, Bauer, Dietze, Holbein, & Spatafora, 2014).

GeoKam

Die GeoKam ist eine Videoinspektionssonde für die Live-Übertragung hochauflösender Videos aus dem Inneren von Bohrlöchern, die im Rahmen eines BMWi-Projekts entwickelt wird. Sie besitzt Kameras mit einstellbaren Blenden und Fokus in Umfangs- und Frontrichtung sowie ein System für eine gute Ausleuchtung des Betrachtungsbereichs. Zudem beinhaltet sie ein Kühlsystem sowie ausreichende Wärmedämmung zur Befahrung von Bohrlöchern bis 165 °C für mehrere Stunden. Sie soll in Einsatziefen bis 4000 m gelangen und dabei Umgebungsdrücken bis 600 bar standhalten (Spatafora, Holbein, Isele, Heuser, Basuki, & Dahm, 2014). Im Februar 2014 wurde ein Prototyp auf der GeoTHERM Messe in Offenburg ausgestellt.

COBOLD

COBOLD (Cooling Of Borehole Objects in Large Depths) steht in gewisser Weise für eine Ausgründung aus ZWERG, bei der ein neues Basismodul für verschiedenste Anwendungen entwickelt werden soll. Im Mittelpunkt steht dabei eine Kältemaschine für Bohrlöcher, durch die der Einsatz von Standardelektronik, die für zahlreiche Anwendungen benötigt wird, auch in sehr heißen Umgebungen und ohne zeitliche Beschränkung ermöglicht wird. Bei dem BMWi-Projekt soll zunächst ein 1-stufiges System für 200 °C Umgebungen konstruiert werden, durch eine Weiterentwicklung mit 2-stufigem Aufbau sind aber in Zukunft auch Systeme für Umgebungstemperaturen von 350 °C und mehr realisierbar. Als erste Anwendung soll COBOLD Sensorik für die Erfassung von chemischen Parametern von Thermalwässern beherbergen, grundsätzlich ist er aber für jede Anwendung geeignet, die Elektronik benötigt und in heißen Umgebungen bzw. über längere Zeiträume stattfinden soll (Holbein & Isele, 2014).

SOHLE

Bei SOHLE handelt es sich um ein Projekt für die sichere Befahrung des sogenannten open-holes in Bohrlöchern. Dieser Bereich, in dem es kein Casing mehr gibt, ist aus wissenschaftlicher Sicht äußerst interessant für Befahrungen für Messungen und Inspektionen, weil dort die eigentlich relevanten Vorgänge für den Wärmetransport durch Thermalwässer und in der Erdkruste ablaufen. Bislang sind Einsätze in diesen Endabschnitten von Bohrungen kaum möglich. In erster Linie hindert die unwegbare geklüfte Bohrlochbeschaffenheit daran, mit Sonden dort hinein zu fahren, weil die Gefahr besteht, dass sich die meist über Wirelines, also letztendlich lange Drahtseile, gesteuerten Geräte verhaken und stecken bleiben. Verlorene Tools verursachen hohe Kosten und bergen das Risiko, das Bohrloch selbst stark zu beeinträchtigen oder sogar unbrauchbar zu machen. SOHLE soll diese Gefahr vermeiden, indem ein spezielles Kontaktarmsystem stets für die richtige Positionierung im Bohrloch sorgt, diese bei Bedarf anpassen kann, etwa um den Blickwinkel bei einer Kamerabefahrung zu verbessern und eine Sonde im Falle eines Festhängens aktiv befreien kann. Dies sind nur einige Beispiele für geplante und laufende Entwicklungen. Casing-Reparatur-Einheiten, diverse Sensorik-Module und weitere Geräte können durch ZWERG zur Realisierung gebracht werden.

Zusammenfassung

Die Nutzung der Geothermie bleibt derzeit weit hinter den Potentialen zurück. Ein Grund dafür ist die Unsicherheit bezüglich der Vorgänge in den Bohrlöchern.

Das Projekt ZWERG bietet eine open Source Systemplattform an, die künftige Entwicklungen von Messsystemen und Arbeitsgeräten für Bohrlöcher wesentlich vereinfachen wird. Wenn damit eine größere Klarheit über den Zustand der Bohrlöcher geschaffen wird und z. B. defekte Casings fernbedient repariert werden können, dann trägt ZWERG zur Risikominimierung für Investoren und mehr Akzeptanz bei kritischen Bevölkerungsschichten bei.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Strommix in Deutschland 2012.	2
Abb. 2: Energiepotential der Heißwasseraquifere in Deutschland und Gesamt-Energiebedarfe.....	3
Abb. 3: Themenkomplex des ZWERG Projekts.....	6

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Beispielrechnung für Produktionskosten geothermischer Energie	4
---	---

Literaturverzeichnis

- [1] ABFT. (24. 10 2003). Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. Monitoring. Berlin, Deutschland: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH.
- [2] AGEB. (März 2013). Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2013. Berlin, Deutschland: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
- [3] BMU. (03 2012). Erneuerbare Energien Statistik 2012. Berlin, Deutschland: Bundesministerium für Umwelt BMU.
- [4] Greenpeace. (2010). Staatliche Förderungen der Atomenergie. Berlin, Deutschland: Green Budget Germany GBG - Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V.
- [5] Holbein, B., & Isele, J. (02 2014). Development of a Cooling System for Geothermal Borehole Probes. Journal of Earth Science and Engineering, Vol.4, Nr.2, S. 74-79.
- [6] Isele, J., Bauer, C., Dietze, S., Holbein, B., & Spatafora, L. (05 2014). Standardisierte Bausteine für Geothermiesonden. bbr - Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie, S. 56-63.
- [7] Spatafora, L., Holbein, B., Isele, J., Heuser, P., Basuki, W. W., & Dahm, R. (24.-26. Februar 2014). Video Inspection Probe for deep Geothermal Boreholes – GeoKam. Proceedings, 39th Geothermal Workshop. Stanford, Kalifornien, USA: Stanford University.
- [8] UBA. (12 1991). Energetische Nutzung der Geothermie. Wien, Österreich: Umweltbundesamt Wien.

Electrochemical-calorimetric studies on different lithium-ion cells

Boxia Lei, Andreas Melcher, Carlos Ziebert, Magnus Rohde, Hans Jürgen Seifert

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Materialien – Angewandte Werkstoffphysik (IAM-AWP), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

Abstract

The lithium-ion batteries used in current electric vehicles evidently have reserves. When the capacity in each cell was optimally utilized, more energy could be put in and delivered again. Thus, the driving range of electric vehicles could be significantly increased.

In this work, commercial lithium-ion pouch cells were cycled at varying C-rates under isoperibolic and adiabatic conditions in an accelerating rate calorimeter (ARC) with external battery cycler to investigate their performance and their thermal behavior. A thermal camera was also used to investigate the heat effects and the local temperature distribution during cycling in more details.

Different factors that have influence on the performance of energy storage such as temperature, charging/discharging current and state of charge (SOC) have been studied. The isoperibolic investigations were performed at specific temperatures in the range from 25 to 60 °C. The results show that the applied environmental temperature did not largely influence the battery thermal behavior. Both isoperibolic and adiabatic tests were performed at different charging/discharging rates in the range from C/4 to 3C. The results show a considerable temperature rise with increasing rate. Additionally, the heat capacities and the calorimeter constant were determined to calculate the total generated heat during cycling.

Electrochemical-calorimetric measurements

As kind of clean energy, lithium ion batteries used in electric vehicles are getting more and more attention. Therefore it is important to understand the heat generation and dissipation of single lithium ion cells and packs, respectively, since this is closely coupled to battery performance and safety issues.

Energy balance

The heat generation and heat dissipation in a single cell obey an energy balance [1]:

$$\dot{q}_{Tot} = \dot{q}_{enth} + \dot{q}_{diss} = m c_p \frac{dT_{cell}}{dt} - hA(T_{cell} - T_{env}) \quad (1)$$

where \dot{q}_{Tot} is the total heat generation rate, \dot{q}_{enth} the enthalpy accumulation rate, \dot{q}_{diss} the heat dissipation rate, m the mass of the cell, c_p the measured heat capacity of the cell, h heat transfer coefficient, A the battery area exposed to the environment, T_{cell} and T_{env} the cell surface and environment temperatures, respectively [1].

The heat effect of lithium-ion cells was measured using an Accelerating Rate Calorimeter (ARC) with a battery cycler (internal or external) as seen Figure 1.



Fig. 1: ES ARC, EV+ ARC and Digatron MCT Cell Tester

Isoperibolic and adiabatic studies

In this study, commercial 18650 lithium ion cells (1.6Ah) with LiMn_2O_4 cathodes as well as 20Ah pouch cells with LiFePO_4 cathodes were cycled under isoperibolic and adiabatic conditions in an Accelerating Rate Calorimeter (ARC, THT Company). Isoperibolic condition means that all the heat produced in the cell is dissipated out of the system, so that the environmental temperature is constant. Under adiabatic conditions there is no heat loss in the system and all the heat generated in the cell is used to heat up the cell. This is important because in reality the cell is surrounded with other cells in a battery pack. Figure 2 a) shows for example the experimental results for the cylindrical cell.

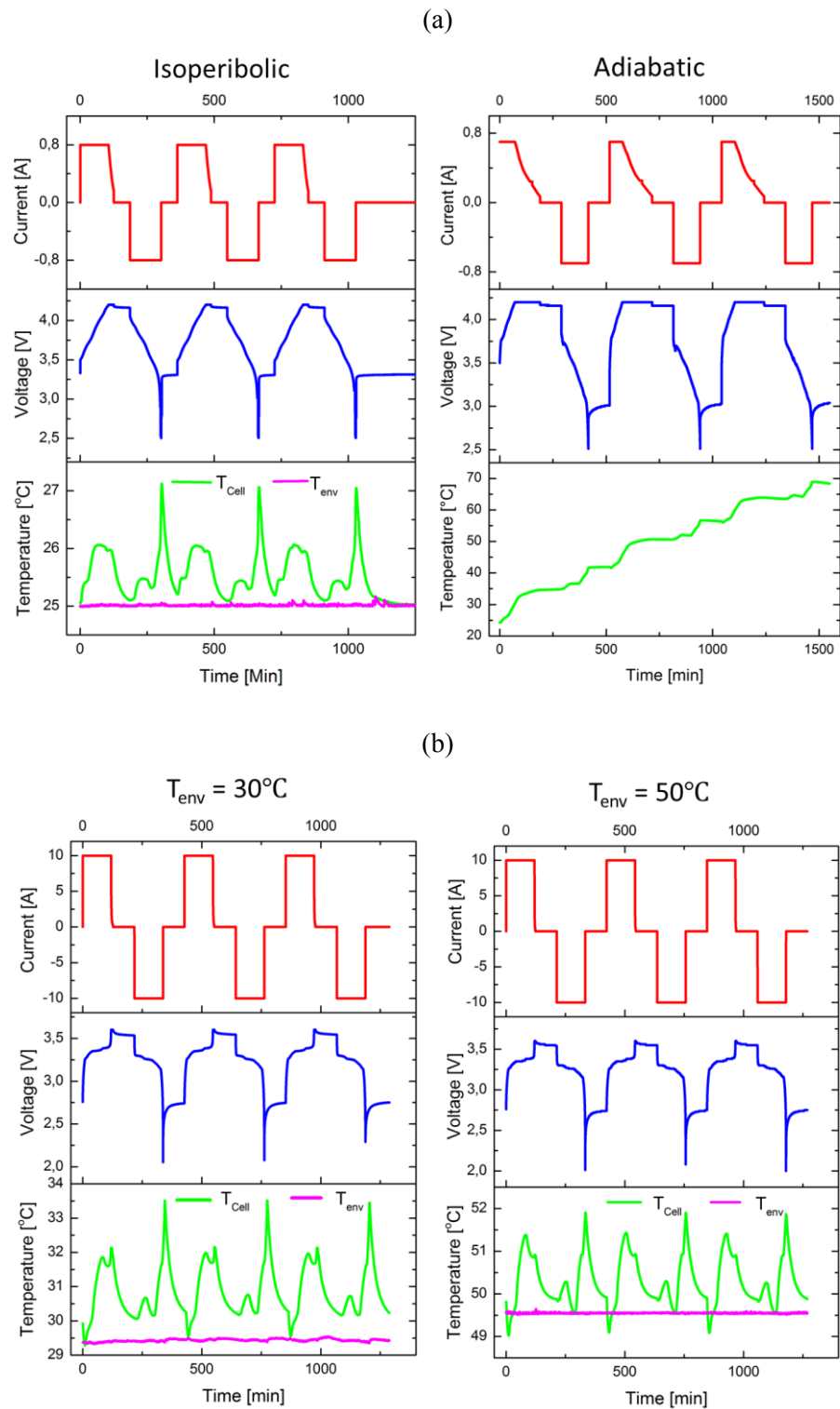


Fig. 2: a) Isoperibolic and adiabatic cycling of the cylindrical cell
 b) Isoperibolic cycling of the pouch cell

During isoperibolic cycling the temperature rise of cylindrical cell is only about 2 °C. Under adiabatic conditions the temperature rise of the cell after one cycle is about 18 °C. In Figure 2 b) under isoperibolic conditions the temperature rise of the pouch cell is about 3 °C at 30 °C and 2 °C at 50 °C. Obviously the environmental temperature did not largely influence the battery thermal behavior.

DC-impedance technique: CIT

In battery modeling the equivalent circuit model (ECM) is commonly used for two purposes: to predict battery performance and to provide state of charge (SOC) estimation in battery management systems [2]. Figure 3 shows a general equivalent circuit model. For the description of this ECM see [3] for more details.

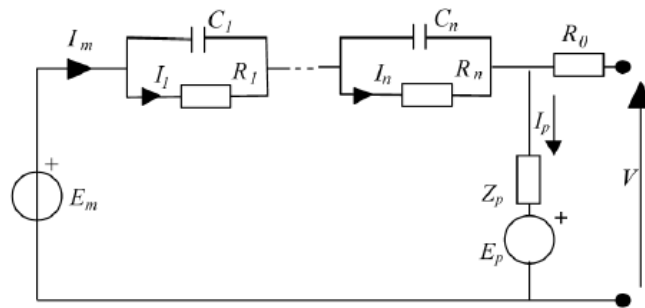


Fig. 3: General equivalent circuit model of an electrochemical cell [2]

The current interruption technique (CIT) is a frequently used tool to provide data for the different elements in the ECM. In the CIT the cell is charged and discharged stepwise by interrupting the current at a certain voltage or after a certain time followed by a defined relaxation time. Lookup-tables are used to model the nonlinear behavior of ECM to extract its system parameters. These lookup-tables can be measured via CIT as described in Figure 4. This pulse provided important information about the open-circuit voltage and the circuit dynamics at the given SOC [2].

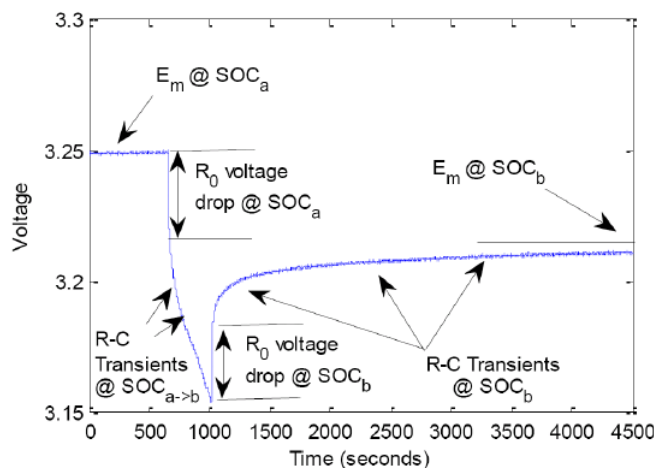


Fig. 4: Pulse discharge tests [2]

In this work the charge and discharge current was $I = 10 \text{ A}$ ($C/2$ rate) for the pouch (20 Ah) cell. After each current interruption, the cell was left to relax for 60 min at open circuit (see Figure 5). The instantaneous voltage drop (V_i) was measured after current interruption, and the cell voltage drop during relaxation (V_{rel}) was also recorded. The instantaneous voltage drop (V_i) is mainly due to the ohmic resistance of the cell and partially due to the concentration polarization. The relaxation voltage drop (V_{rel}) is due to concentration polarization in the liquid electrolyte and in the solid electrode materials. The instantaneous impedance (R_i) and the relaxation impedance (R_{rel}) were estimated using Eq. (2) [4].

$$R_i = \frac{V_i}{I} \quad R_{rel} = \frac{V_{rel}}{I} \quad (2)$$

In Figure 6 a closer look at a single pulse (Fig. 6a)) and at the cell impedance at different points of depth of discharge (DOD) (Fig. 6b)) are shown. The instantaneous impedance was almost identical at the beginning of discharge and a sudden increase was noticed at DOD 0.98, which means the ohmic resistance of the cell increases at the end of discharge. A slight increase with a slight decrease in the relaxation impedance was noticed at DOD 0.90-0.98. This may be due to a phase change in the cathode material or to structural transformation in the anode electrode [4]. There was also a sudden increase in the the relaxation impedance at DOD 0.98. This may be due to the concentration polarization, which usually increases significantly with DOD [4].

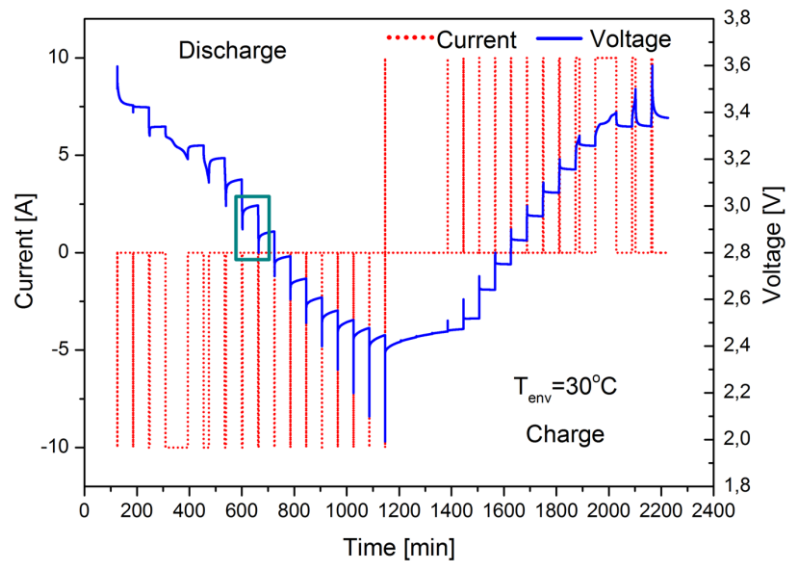


Fig. 5: Schematic of the DC-impedance (current interruption) technique

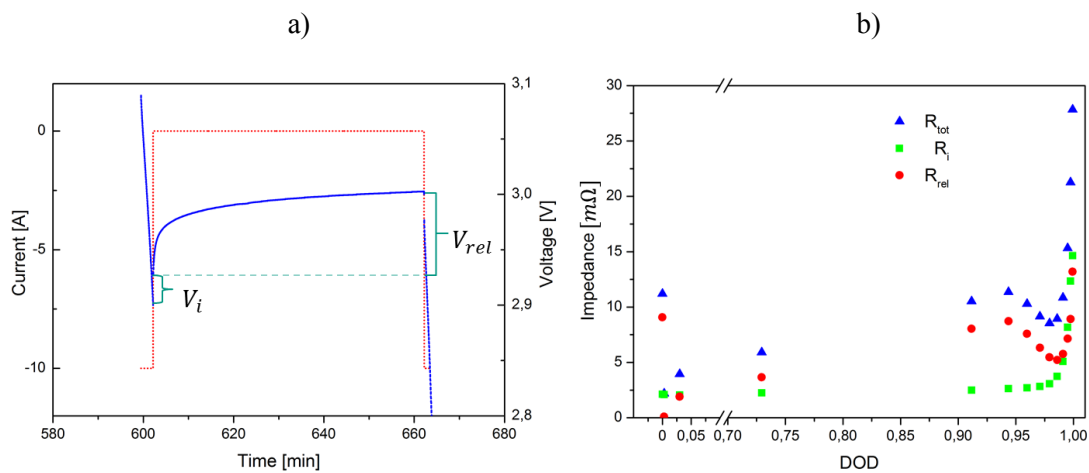


Fig. 6: a) One pulse from the test and b) impedance as a function of DOD

Thermography

Accelerating Rate Calorimeters are reliable and very useful for spot temperature measurement, but for scanning large areas or components, it is easy to miss critical effects. A thermal imaging camera can scan entire components at once – never missing any overheating hazards. In our work, a thermal camera (FLIR X6540 sc, France) was used to investigate the heat effects and the local temperature distribution during cycling in more details. The camera has 640 by 512 pixels and the wavelength range is 3.5 to 5 μm . The camera is connected to a computer to save the thermal imaging using software (FLIR Research IR, FLIR Systems, France). Figure 7 shows the thermal imaging setup for the lithium iron phosphate pouch cell in an environmental chamber (Vötsch, VT³ 4018-S, Germany). The cell was oriented in a vertical configuration and connected to the Digatron MCT Cell Tester. The aluminum packaging of the cells provides a too low emissivity ($\epsilon = 0.09$) for accurate IR imaging. Therefore, the surface of the cell was coated with graphite that has an emissivity of approximately 1.0 to ensure a uniform emissivity. A high emissivity surface effectively eliminates reflections from the object being imaged [5].



Fig. 7: Thermal imaging setup

The cell was thermally imaged at charge/discharge rate $C/2$ at room temperature. Figure 8 shows the thermal images taken at the beginning and the end of the discharge. The cell was fully discharged from 100 % to 0 % SOC. In Figure 8, a rectangle outlines a separate area (Ar1), where the cathode, separator, and anode are physically located. The thermal imaging was almost symmetrical with the maximum temperature at the center of the cell area (Ar1) and minimum temperature at corner. At the end of the discharge the cell has the temperature difference of $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{max}} = 27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{min}} = 26.1\text{ }^{\circ}\text{C}$), compared to the beginning of the discharge where it is $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{max}} = 21.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{min}} = 20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$). So the cell shows relative good temperature uniformity during discharge at discharge rate $C/2$.

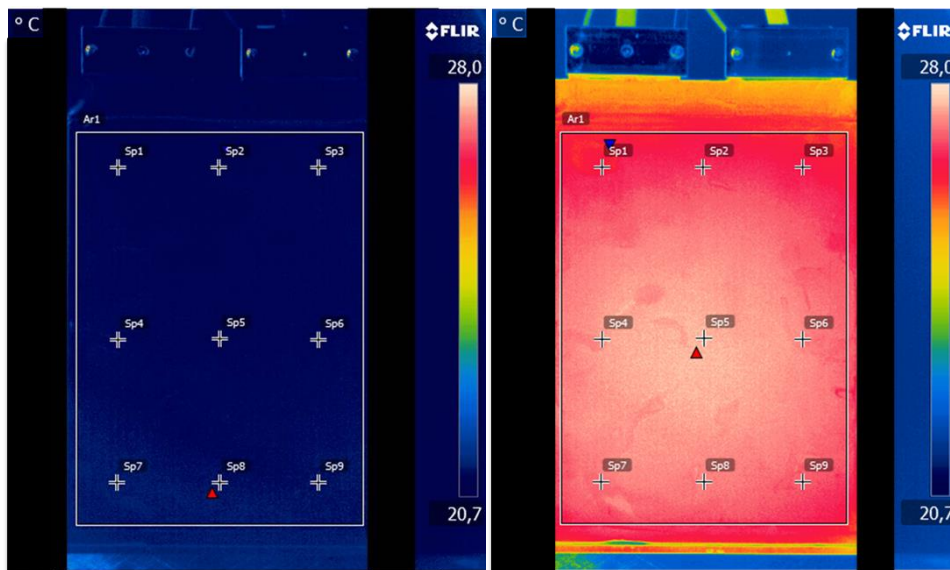


Fig. 8: Thermal imaging at the beginning and the end of discharge

Conclusion and outlook

Experimental results for isoporibolic and adiabatic cycling were presented. The measured data were then applied to the energy balance getting the total heat generated in the cell during cycling. An endothermic effect was noticed at the beginning of charge, followed with an exothermic effect. This is due to the deintercalation of Li ions from positive electrode at lower SOC and at higher SOC ohmic and polarization impedance increase significantly and is greater than the entropic heat effect. The total cell impedance during discharge was defined by using CIT. Its change is well matched with the heat effect of the cell at the end of the discharge. Results of two different methods (ARC and thermocamera) can be compared. In future research the measured temperature data can be transferred into heat data, which can then be used as input data for thermal modeling.

Acknowledgement

This R&D project is partially funded by the Federal Ministry for Education and Research (BMBF) within the framework „IKT 2020 Research for Innovations“ under the grant 16N12515 and is supervised by the Project Management Agency VDI | VDE | IT.

References

- [1] E. Schuster, C. Ziebert, A. Melcher, P. Franke, M. Rohde, H.J. Seifert, Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40 Ah lithium ion pouch cell, *Journal of Power Sources* 268 (2015) 580-589.
- [2] R. Jackey, M. Saginaw, P. Sanghvi, J. Gazzarri, T. Huria, M. Ceraolo, Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell, SAE International, 2013-01-1547, (2013).
- [3] A. Melcher, B. Lei, C. Ziebert, M. Rohde, H. J. Seifert, ECM Models for Li-Ion Batteries, *This Proceeding*, (2016).
- [4] S. Al Hallaj, J. Prakash, J. R. Selman, Characterization of commercial Li-ion batteries using electrochemical-calorimetric measurements, *Journal of Power Sources*, 87 (2000) 186-194.
- [5] Matthew A. Keyser, Ahmad Pesaran, Mark Mihalic, Ji-Sang Yu, Soo-Ryung Kim, Mohamed Alamgir, Daniel Rivers, Thermal Characterization of Advanced Lithium-Ion Polymer Cells, Third Advanced Automotive Battery Conference, June 2003.

Gekoppelte energetische und stoffliche Nutzung in Biogasanlagen

Projekt „Optigär“ – Bioökonomie und Umweltaspekte

Rainer Bolduan, Philipp Preiss

*Karlsruher Institut für Technologie, EIFER (Europäisches Institut für Energieforschung),
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland*

Einleitung

EIFER (Europäisches Institut für Energieforschung) arbeitet im Rahmen des FNR-Verbundprojekts „Optigär“ an der Entwicklung eines Vorhabens zur integrierten stofflichen Nutzung von zweiphasigen Biogasanlagen (Hydrolysereaktor getrennt vom Methanreaktor) mit. Mit diesem Konzept soll über die Abtrennung von Säureanteilen, die die Vergärung stören, eine Effizienzsteigerung des Biogasprozesses und eine gekoppelte stoffliche und energetische Nutzung der Biogassubstrate ermöglicht werden. Ziel ist eine nachhaltigere und ganzheitlichere Verwertung von Agrarrohstoffen und die Schaffung eines Mehrwerts durch die Nutzung von Koppelprodukten als Basischemikalie (kurzkettige einfache Carbonsäuren) mit potenziell hohen Preisen.

Als Begleitforschung werden hierbei auch die Umweltaspekte des präferierten neuen Verfahrens gegenüber der konventionellen Produktion von Biogas und Säuren betrachtet. Nach einem Upscaling auf Industriemaßstab wird auch eine ökonomische Abschätzung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt.

Planung und Durchführung

Zunächst werden Labor-Untersuchungen zur Säureproduktion im Hydrolysereaktor an Rüben- und Maissilage von der Universität Hohenheim durchgeführt. Hierbei werden nach Ermittlung der für die chemische Industrie marktrelevantesten Säuren die Optimierbarkeit der Produktion dieser Säuren getestet und die Biogausausbeuten dieser Varianten ermittelt. Das Fraunhofer-ICT arbeitet an einem Säure-Online-Monitoring im Hydrolysereaktor sowie an der Abtrennung des Säuregemischs mittels Membranen und der anschließenden Aufreinigung zum Säureprodukt. In Abb. 1 ist ein Schema des Verfahrens dargestellt.

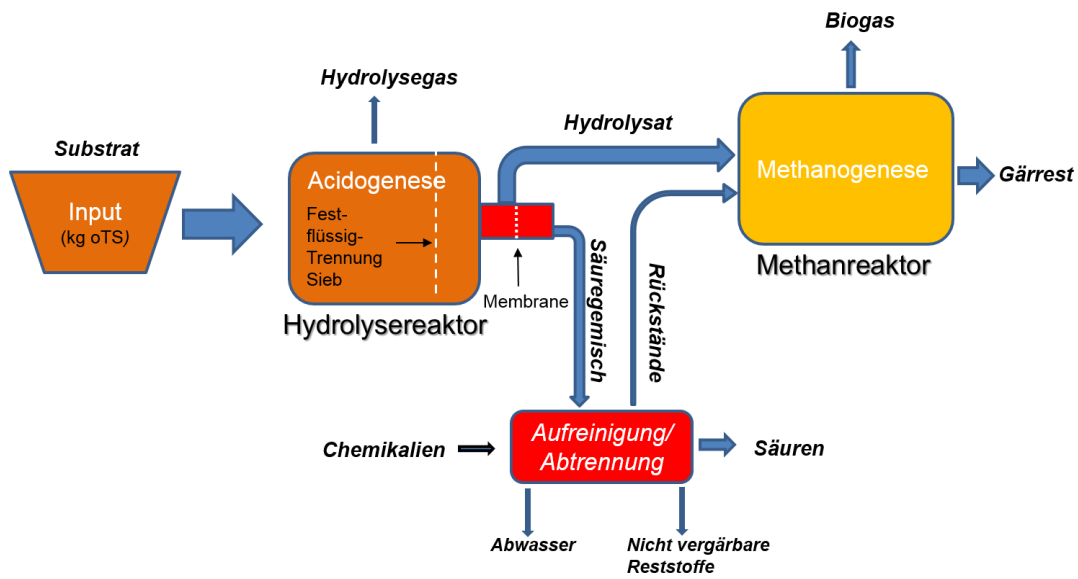


Abb. 1: Prozessschema „Optigär“-Projekt.

Zur Umweltbewertung werden Material- und Energieflüsse sowie deren Bilanzen und mögliche Emissionen der einzelnen Teilprozesse von der Substratinputseite bis zur Entsorgung der Anlagen ermittelt und hochskaliert. Diese Daten werden denjenigen der konventionellen Biogas- und Säureproduktion gegenübergestellt (Abb. 2). In den Bereichen, in denen Daten fehlen (z.B. konventionelle Säureproduktion), wird die Ökobilanzdatenbank ecoinvent verwendet.

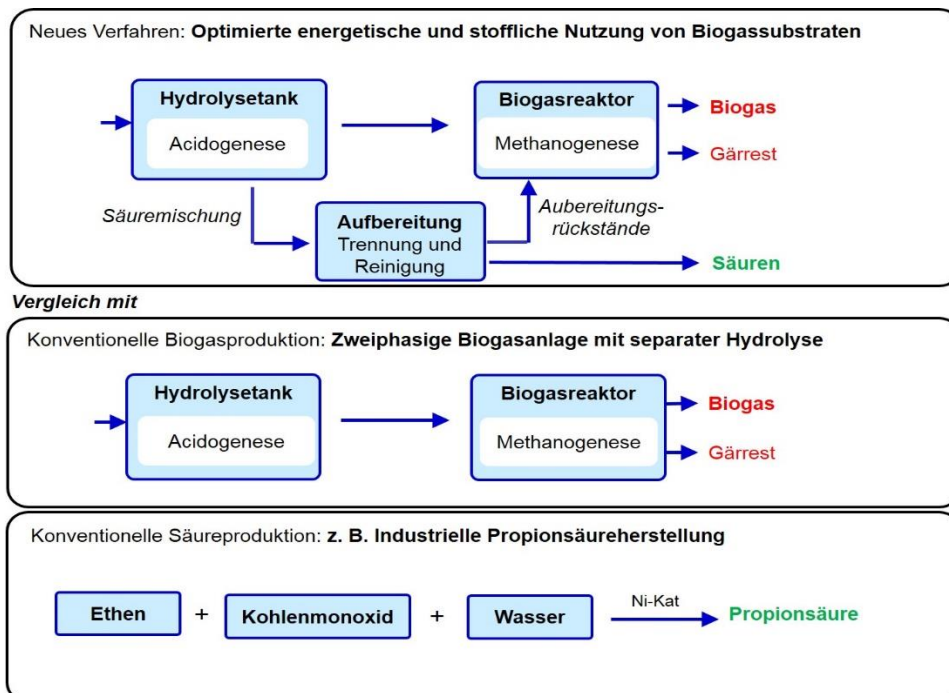


Abb. 2: Schema des Verfahrensvergleichs zur Umweltbewertung.

Projektstatus und Ausblick

In die Begleitforschung ist auch der Anlagenbauer Lipp System integriert, der beispielhafte Säurespektren von Biogasanlagen sowie Hydrolysatproben zur Kalibrierung und Eingrenzung der Laborversuchsplanung zur Verfügung gestellt hat. Weiterhin wird zusammen mit der Fa. Lipp das Upscaling und die Wirtschaftlichkeitsabschätzung des geeigneten Verfahrens auf Industriemaßstab durchgeführt.

Zur Erfassung der Daten im Projektverlauf sind die Einzelprozessschritte im Lebenszyklus des Verfahrens erfasst worden, um Angaben zu benötigten Gerätschaften / Substanzen sowie relevanten Messparameter in vergleichbaren Einheiten zusammen tragen zu können. Die Prozessschritte und Daten werden im Verlaufe des Projektes den Projekterkenntnissen der Partner angepasst.

Spatial multi-energy system model for the redevelopment of the Berlin Tegel airport

Xiubei Ge, Jean-Marie Bahu, Enrique Kremers, Andreas Koch, Diane Pétilion

European Institute for Energy Research

E-Mail: ge@eifer.org

Phone: +49 721 6105 1476

Introduction

Cities are today facing crucial urban and environmental challenges as they represent almost 40 % of the total GHG emissions. They are looking for better solutions for integrating energy issues into their urban planning at different levels. A large variety of tools exists but few of them combine spatial and multi-energy aspects at the early phases of an urban project.

With the opening of the Berlin Brandenburg Airport, the Berlin Tegel Airport will be redeveloped as an innovative hub for cutting-edge research and industry under the umbrella of ‘Berlin TXL – The Urban Tech Republic’ (UTR – see Figure 1). Together with Tegel Projekt GmbH, EDF, the TU Berlin and Drees&Sommer, EIFER developed an integrated simulation tool in order to connect urban and energy planning for the redevelopment of the TXL airport (BAHU et al., 2015).



Fig. 1: The Berlin Tegel UTR & the project research partners.

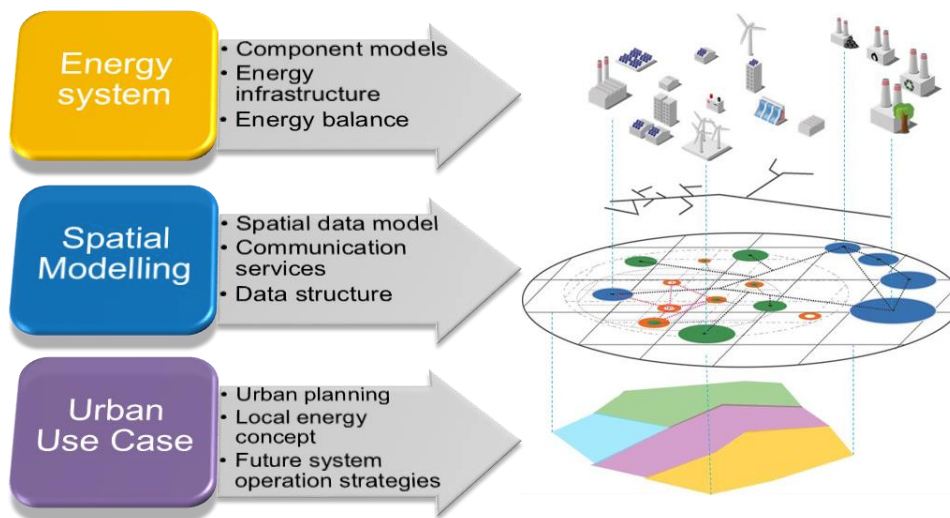


Fig. 2: Energy planning integrated in urban planning through spatial modelling.

Methodology

The implementation of new infrastructures requires the foresight to anticipate future needs and to assess the effectiveness of diverse actions. Therefore, EIFER developed an integrated spatial energy system model. For an existing energy concept, the model simulates the demand, generation, storage, network distribution and energy management of several energy carriers (e.g. electricity, heat and cooling) using the multi-method modelling environment Anylogic and based on the agent-based model library EnergyLogic (see Figure 3).

The demand side modelling is based on hourly load profiles which are specific to the land use repartition defined in the masterplan. It allows computing hourly energy demand on distributed and aggregated levels through construction phases.

The generation and storage technologies (e.g., CHP, PV and batteries) are modelled as individual agents and geographically located. They can be replicated and dimensioned according to the user scenario or the energy concept of the site. Three distribution networks were designed and modelled: a grid-integrated MV/LV electrical distribution network, a district heating network supplied by CHPs and gas boilers, and a low exergy network recovering waste heat from the industry.

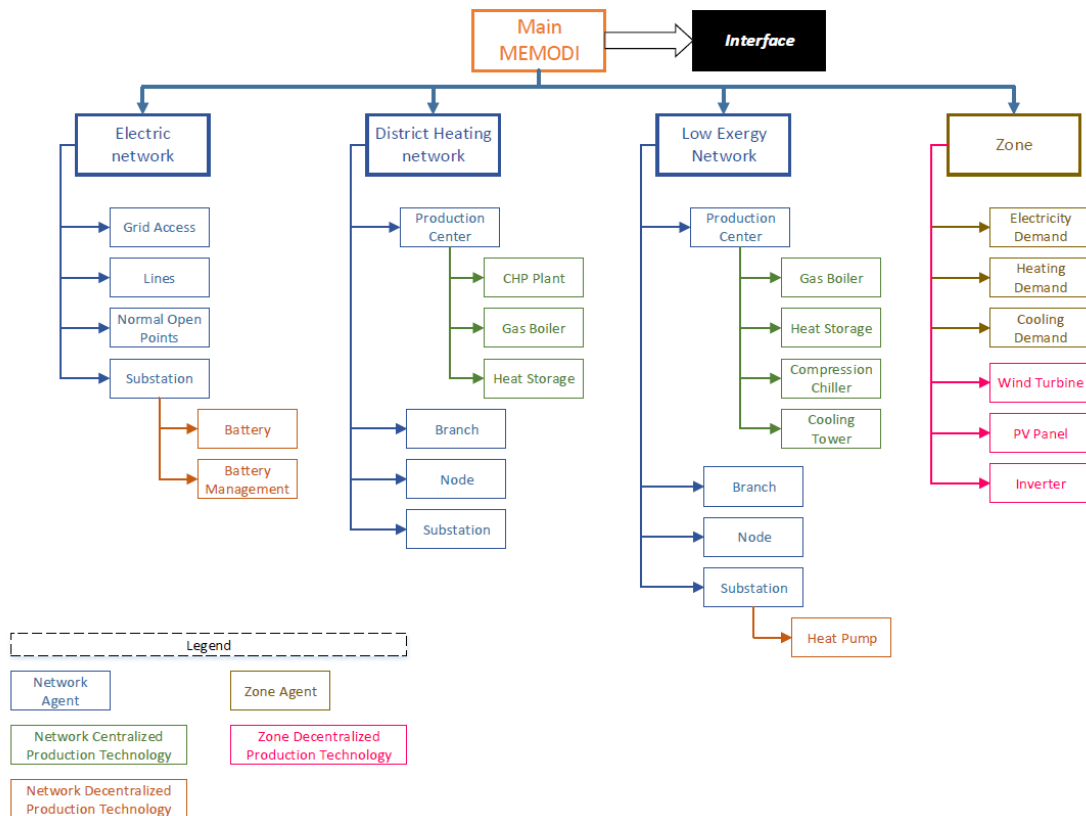


Fig. 3: The MES model structure for the redevelopment of Berlin Tegel airport.

Results

The model illustrates the system-wide effects of urban planning measures, infrastructure planning, choice and sizing of energy technologies, and energy management strategies. These effects are evaluated based on Key Performance Indicators (KPIs) (e.g. global final and primary energy use, GHG emissions or share of renewable energy sources in the mix – see Figure 4). The spatial simulation of thermal and electrical load curves displays site zoning and visualises the impacts of land use planning on the energy demand (see Figure 5). The simulation displays the systemic reactions (e.g. operations of generation technologies and distribution networks) in response to changes in energy system planning (see Figure 6).

Based on its modular structure, the integrated energy model applied on the Berlin Tegel UTR concept is intended to be replicated on other case studies.

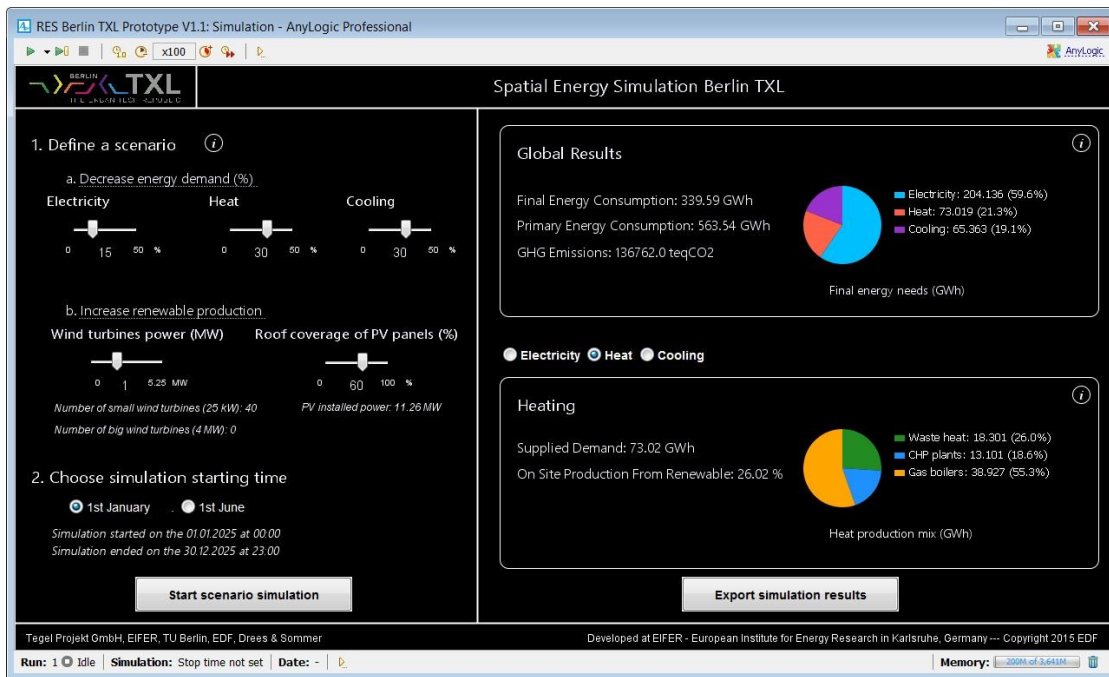


Fig. 4: User interface simulation: analysis of the simulation results based on KPIs.

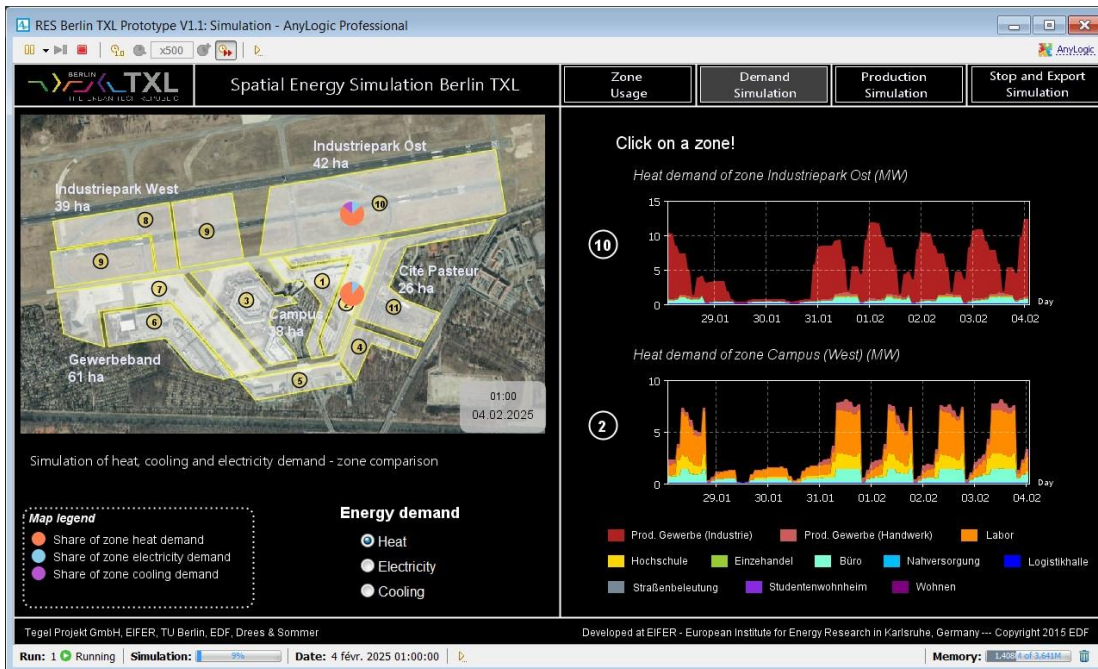


Fig. 5: User interface simulation: calculation of the hourly heat demand in selected construction zones.

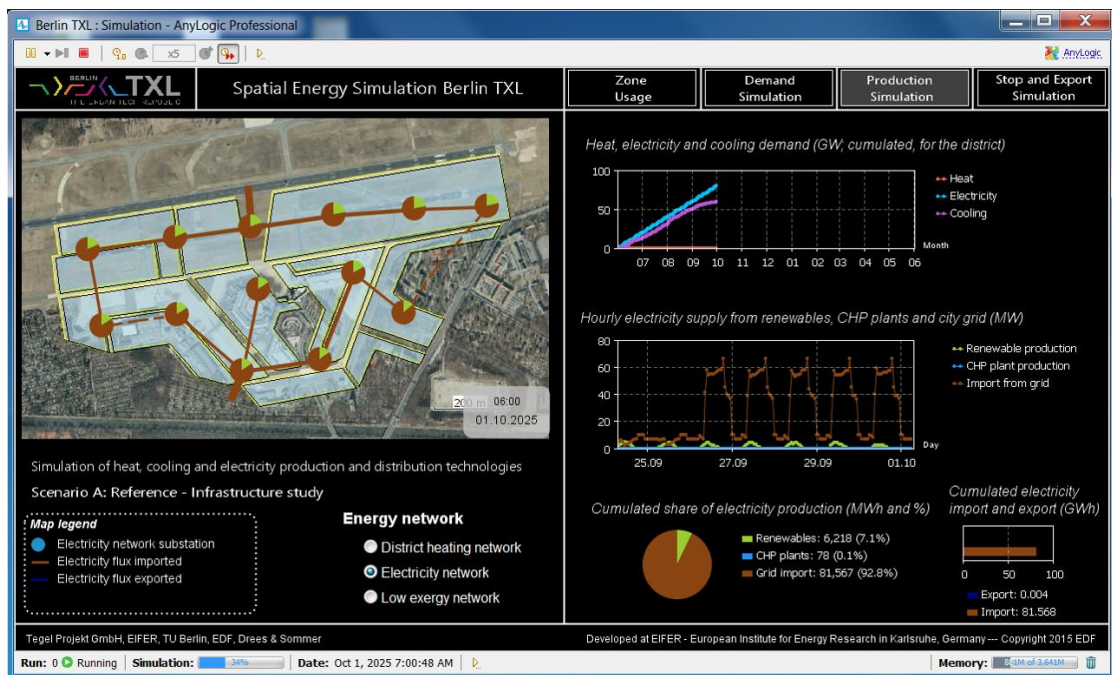


Fig 6: User interface simulation: the operation of distribution networks and generation technologies.

References

- [1] Bahu J.-M.* et al. (2015). *Integrated Urban Energy Planning for the Redevelopment of the Berlin-Tegel Airport, Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions*. Bolzano, Italy.

Innovative Downhole Tools for Cause Study and Maintenance in Deep Geothermal Energy

*Benedict Holbein, Stefan Dietze, Jörg Isele, Luigi Spatafora, Friedrich Wiegel,
Veit Hagenmeyer*

*Institute for Applied Computer Science (IAI), Karlsruhe Institute of Technology (KIT),
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen*

Abstract

The potential of geothermal energy is undoubted. While shallow geothermal energy can be used with minimal risk but with small energy production, deep geothermal energy has still some barriers to overcome. Among high drilling costs, production rates below the expected range make it hard to compete for deep geothermal energy with other energy sources. Additionally, the risks of induced seismic events or uncontrolled water leaks leading to ground lifting obstruct the acceptance and promotion of this technology.

With a long history in developing remote-handling tools e.g. for inspection and maintenance of pipes and sewers, the Institute for Applied Computer Science (IAI) started in 2010 with the work on specialized tools for deep geothermal boreholes. The overall target of this project is to provide suitable tools for studying geothermal boreholes, especially with regard to faults and their effects on efficiency and safety of geothermal projects as well as maintenance to recover geothermal boreholes showing respective defects. Since the constraints downhole are challenging, the technical solutions require a high grade of innovation and specialization and are therefore expensive. In order to realize solutions with high quality embodied in affordable tools, a system platform approach is pursued. This approach allows reusing and advancement of basic tool components for a wide range of different applications.

When discovering new spaces, it is a human and scientific desire to get visual impressions from the unknown environment. Therefore, following the example of pictures from the Mars, the first functional example of the system platform for downhole tools, is a video inspection system called GeoKam. Besides the obvious wish for a literal insight in deep geothermal boreholes, the video application provides several advantages. Since it is a complex operation to record, process and transfer live-videos from deep geothermal boreholes, the device shows the performance of the system platform regarding the main challenges of downhole operation: high temperatures, high pressures, small spaces and long distance tool handling and data transfer via wirelines. Beyond that, a live downhole video stream is a necessary precondition for maintenance operations as leakage repair.

Introduction

Headlines about earth quakes, houses damaging ground lifts and after-shocks caused by geothermal projects underline the rejection which geothermal energy faces [1][2][3]. And these lines are not unjustified, because there are many ‘bad’ examples of geothermal projects which cause a lot of damage. Not to mention the less spectacular cases, without huge economic damage for third parties, in which the energy production is strongly decreased or even stopped and therefore result in financial losses for investors and operators [4][5].

Experts in geothermal energy do not grow tired of proclaiming the large unused potential of geothermal energy, which can only be used when the major problems are overcome.

Based on the statements of stakeholders these are: high drilling costs, unprofessional drilling, technical and seismic risks as well as unexpected risks [6]. Besides the drilling costs, which require innovations and a steady learning curve in drilling technologies, the named risks could be strongly reduced with adequate methods for cause study and maintenance in geothermal boreholes – or in other words: with suitable tools for quality management including inspection and repair operations. Additionally, clear information about the causes of problematic incidents and trustable measures to fix them would also increase the public acceptance for geothermal energy.

System platform for downhole tools

Regarding the challenging constraints for operation in deep boreholes, it is advantageous if a stock of basic components is available, thus the developing effort can be focused on an innovative functional device e.g. measurement sensor or external actuator. Figure 1 illustrates the central idea of the system platform approach for downhole tools.

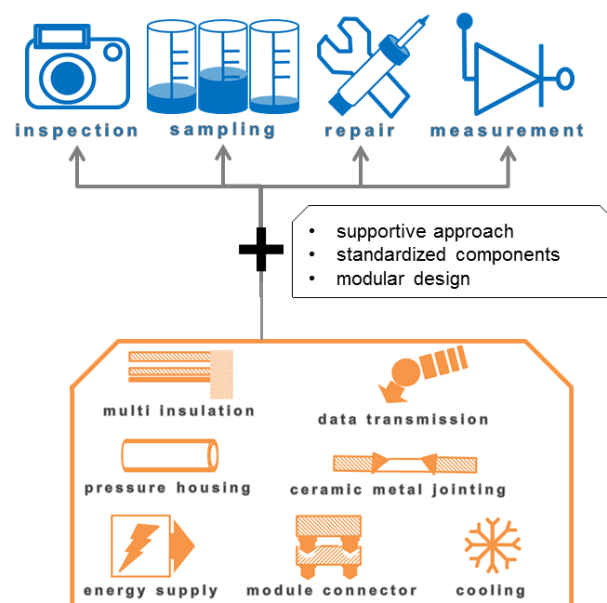


Fig. 1: Modular system platform scheme for downhole tools.

As indicated there are four basic operation categories which shall be targeted to provide a wide-spread investigation and interaction range in deep geothermal boreholes. The orange box shows an excerpt of components which are needed for every downhole operation and are therefore defined as basic components for the system platform [7].

Constraints for the design of components

Generally spoken, the constraints for operations inside deep geothermal boreholes are challenging in different ways. In operation depths of up to 5.000 m, the deepest casing diameter is usually not bigger than 7 inch, approximately 180 mm. At the same time, there is a high hydrostatic pressure of up to 600 bar for which sufficient housing wall thicknesses are required. Hence, the actual design space for functional devices is small. A second challenge is the surrounding fluid or thermal water which in most cases is highly saline and corrosive. The corrosion effect is even stronger with increased temperature. Therefore special non-corrosive alloys have to be used for external components which also provide a high strength to minimize the necessary wall thickness. Of course the high strength is a challenge for manufacturing.

Another constraint which is unavoidable, since it represents the target item of geothermal energy, is the temperature. Borehole temperatures of over 200 °C also appear in Germany, while some boreholes in Turkey, Iceland or Italy reach temperatures of over 350 °C. This causes high thermo-mechanical stresses for external components but most of all it is problematic for the usage of electronic components. Especially complex operations require a certain computational power, e.g. the downhole processing of pictures to improve the transfer rate to the surface via wirelines, which have limited data transfer capacities. In order to make a wide range of electronics usable, solutions for cooling and heat insulation have also to be provided by the system platform.

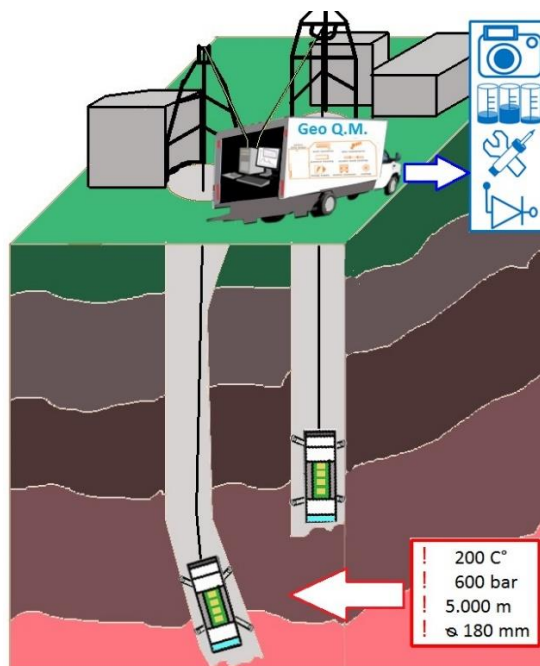


Fig. 2: Quality management with downhole tool operations in great depth

Applications in deep geothermal boreholes

As explained above, different operation categories are targeted to generate widespread information and provide widespread interaction possibilities. This covers monitoring of chemical and physical downhole parameters, long-term logging of slowly changing properties or induced tracers for flow tests, inspections e.g. using a camera system, sample recovery or repair operations.

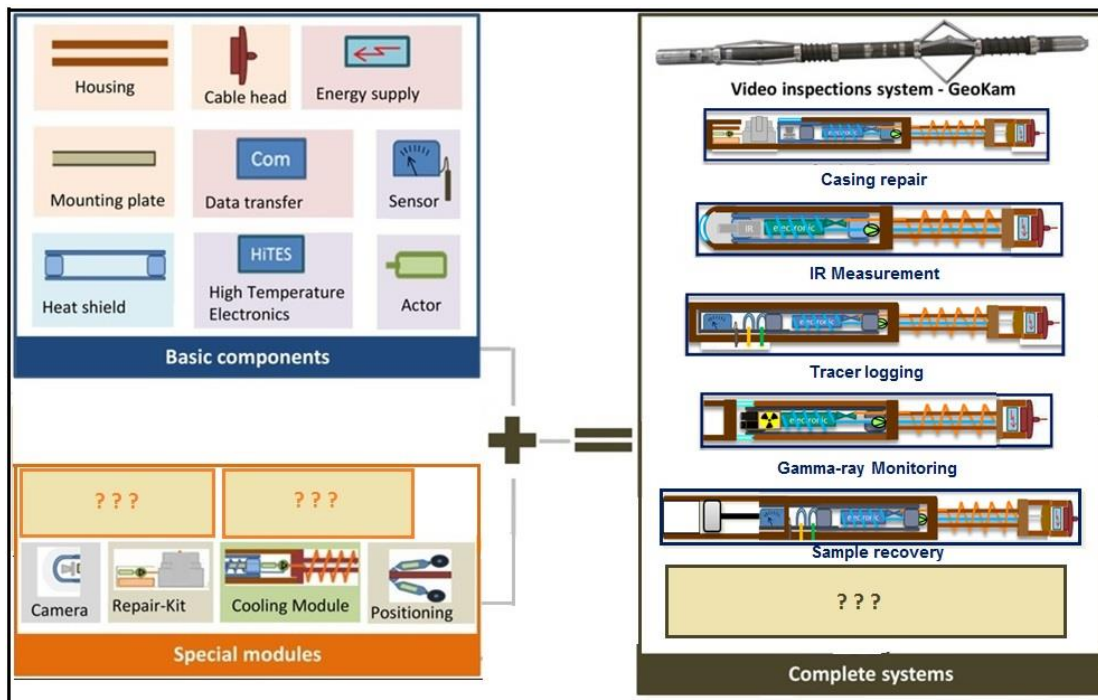


Fig. 3: Basic components and functional modules build complete systems for various applications.

Some examples for interesting downhole applications are shown in figure 3. It also points out how many components are repeatedly used with the system platform approach. By reducing the engineering effort for new tools to a small number of elements, the development of new tools is promoted.

Live video inspection system GeoKam

A live video stream from inside boreholes provides several possibilities. Firstly it gives a visual insight to detect pluggings and obstacles for other tools or to localize defects in boreholes casings as leakages which can be responsible for uncontrolled water outflows. Secondly it gives the opportunity to interact instantly with an adequate actuator. Additionally, a camera to identify, localize and focus defects in real-time is the necessary pre-condition for any repair or maintenance action.

GeoKam is developed within a joint project, funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy BMWi under the number 0325580. The project partners Karlsruhe Institute of Technology, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institute, Fraunhofer IKTS, the inspection service company brg and Stadtwerke München defined together the constraints for the GeoKam development:

- Housing outer diameter: 95 mm (~ 3 ¾ Inch)
- Suitable for open-hole diameter: 215 mm (~ 8 ½ Inch)
- High quality images: Light system, lenses
- Wide angle of view: 360°, axial & radial view
- Robust design: Materials, electronics, cooling system
- Max. hydrostatic external pressure: 48 MPa (~4 km depth)
- Max. ambient temperature: 165 °C (~ 2-3 hours operation time)

Video specifications and lighting

Since the data transfer rate via wirelines is limited, the GeoKam needs a downhole CPU to process the pictures and provide a sufficient frame rate of more than 10 frames per second with a resolution about 752x480 pixels. Currently 10 fps are reached reliably and the frame rate will be further increased. For a high depth of focus, apertures and focuses can be remotely controlled. Additionally GeoKam has a lighting system, consisting of different levels of robust high temperature LEDs which are separately controllable and dimmable. This provides sufficient conditions of illumination for sharp and clear pictures.



Fig. 4: GeoKam prototype test, in the geothermal test-hall at the IAI.

Modular mechanical structure and heat insulation

The modular principle of the system platform for borehole tools is realized with several radial layers. The outer layer is the pressure resistant housing, secondly a Dewar flask with Multi-Layer Insulation works as heat insulation and accommodates the cameras and electronics. The mounting body of the electronics is thermally connected to a Phase-Change-Material storage at the upper end of the tool via heat-pipes. This design protects the sensitive electronics – especially camera chips and controllers – from overheating during the operations.

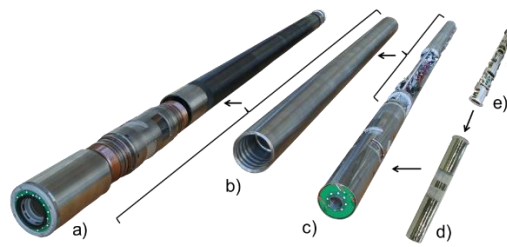


Fig. 5: a) pressure housing components, b) steel Dewar, c) internal components, d) camera unit and framed Glass Dewar.

In the area of the cameras for front and radial view transparent windows are required. Therefore the vacuum insulation is realized with a Glas Dewar and the housing section has ceramic windows. For the fabrication and connection of the magnesium spinel ceramics with the super-alloy Inconel 718, a special procedure is developed with the company Ceramtec. Especially the radial windows represent a challenge under the high pressure and temperature conditions.

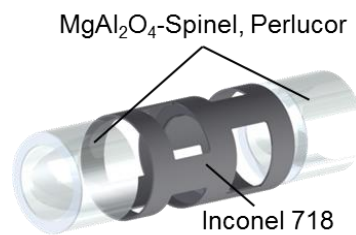


Fig. 6: Configuration of the housing segment with radial windows.

For a 360° view, under the restriction from video service operators that the picture does not rotate and regarding the rotation angular of cable harnesses, a mirror-camera configuration with 60° rotation and several radial windows was realized. By switching between the cameras every spot in 360° can be focused without having to rotate backwards (figure 7).

This feature is made possible by using Selective Laser Melting SLM for the fabrication of the camera unit frame components. The frame is also much lighter and the fabrication is faster and cheaper compared to a previous version manufactured by cutting. The SLM fabrication has also been used for other components where free-forms are advantageous, as e.g. the external lighting frames or heat exchanger [8].

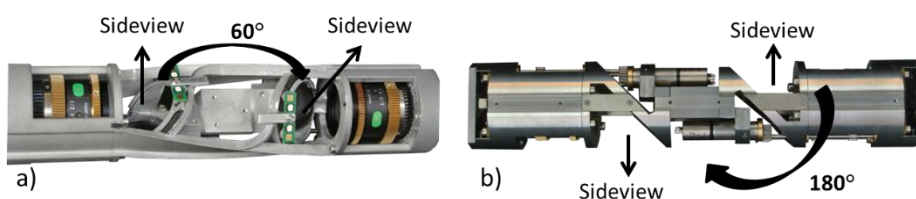


Fig. 7: camera unit fabricated using a) SLM and b) cutting.

Flexible High Temperature Embedded System

Hardware

The High Temperature Embedded System (HiTES) is developed for a permanent electrically supplied borehole tool for 165 °C (figure 8). The hardware of the HiTES board consists of a Spartan 6 FPGA as well as additional periphery as 4 MByte SRAM, 4 MByte EEPROM, 100 Mbit/s Ethernet Dual-Phy, DAC, ADC etc. For connecting cameras of the tool and various sensors and actuators, the system provides different interfaces as CAN, I²C, LVDS and Ethernet. An FPGA provides a maximum of flexibility, because through embedding respectively programming of further hardware modules (IP-Cores, intellectual property core) in the FPGA, additional interfaces for measurement devices in the cargo area are realizable.

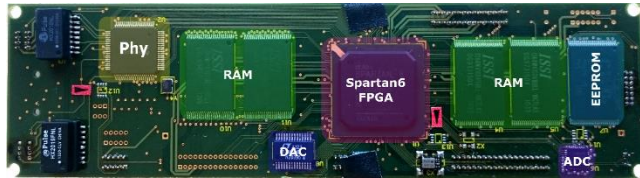


Fig. 8: Overview HiTES board.

The high data transfer of FPGAs allows the direct connection of digital cameras, the implementation of independent network ports and the bundling and transfer of contents to the surface.

Due to the high complexity of single IP-cores as image capturing and processing units, softcore Leon3 processor and the powerline modem, the strategy to split up the functionality into two HiTES boards is pursued at the moment (figure 9). The HiTES-Ctrl board is responsible for controlling the tool periphery and image capturing and provides all required functionalities for these tasks. The HiTES-modem board contains the OFDM powerline modem and takes care of the adjustment of data for the given transfer channel. The exchange of data between the two boards within the tool is done via 8-bit parallel port, whereby an Ethernet based communication is targeted. The schematic structure of the system within the borehole tool is illustrated in figure 9.

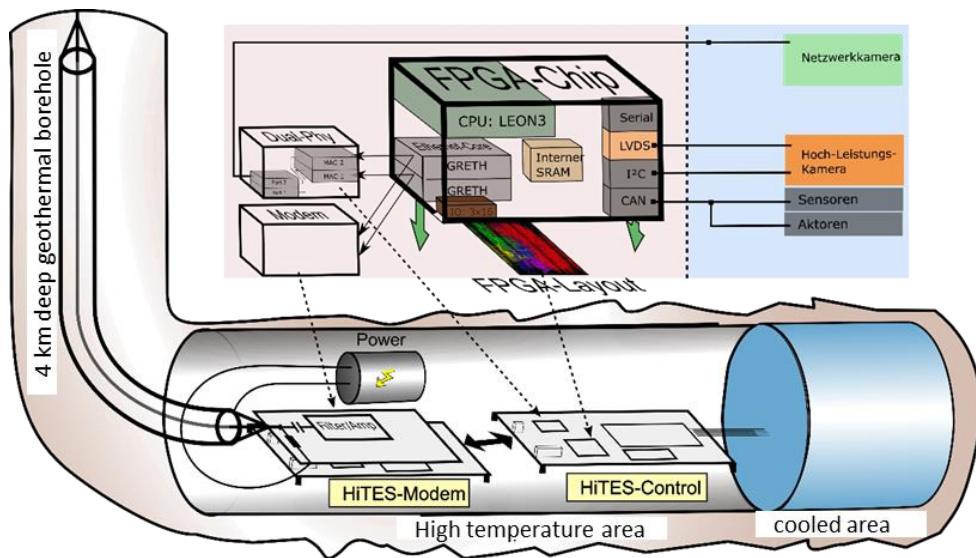


Fig. 9: Split up of high temperature tool area system.

Data transfer as well as high voltage supply of the tool is done via a robust coaxial cable (power-line) with 4.000 m length. The used OFDM modem was developed by Fraunhofer Heinrich Hertz Institute (HHI) within the GeoKam project and provides a gross data rate of 7.8 Mbit/s. As the winch cable shows a frequency dependent dumping, the available bandwidth is optimally used by the OFDM modulation in combination with water filling.

For increasing the failure tolerance of the transfer system the data is encoded with Reed-Solomon-Code. The used RS(156, 116, 41) code is a shortened code on $GF(2^8)$ and can correct up to 20 symbols or in the optimal case up to 160 Bit. The target was to shift the given SNR of 20 dB at the receiver from $5 \cdot 10E-4$ to under $1 \cdot 10E-10$ (figure 10). This could be reached with the integrated channel encoder. However the necessary measurement of the Bit failure rate on the real wireline is still lacking. The used channel encoder is developed as VHDL and realized as IP-core.

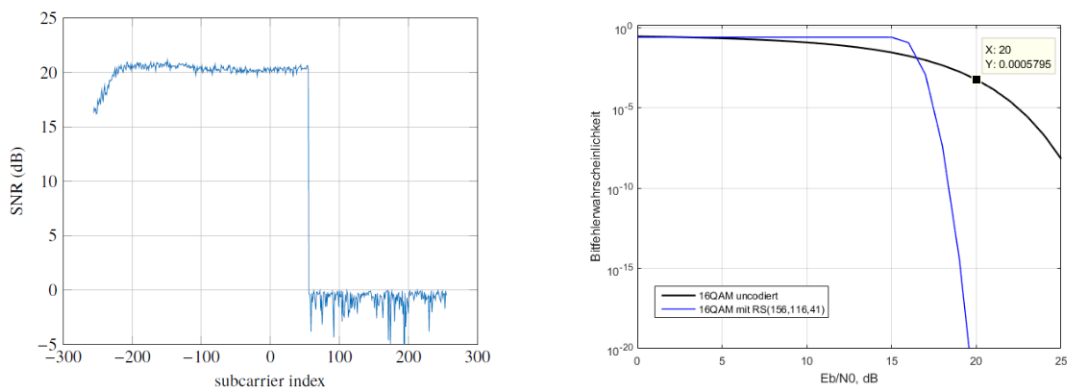


Fig. 10: SNR at the receiver and Bit failure probability with and without channel encoding.

Firmware and soft-cores

As processor system the open-source soft-core CPU Leon3 (32 Bit) from Aeroflex Gaisler is used, which contains many custom combinable soft-core standard components for the connection of SRAM, IO, I²C, Ethernet etc. The internal AMBA-Bus (32 Bit) allows the CPU the access on it. Own soft-core components as data transfer, color space conversion, JPEG compression, OFDM modulators and demodulators, channel encoder are equipped with an AMBA interface respectively.

As basis for the firmware of the different Embedded Systems the real-time operating system eCos is used for comfortably realizing different control and regulation tasks with multi-tasking.

GeoGUI

The demodulation at the Host is done by an Embedded System with the same structure. This one sends an image flow and measurement values as UDP messages to the PC and receives commands for the tool from it.

The PC software GeoGUI consists of an engine which assigns a time stamp to all incoming data and forwards it to the data base, respectively to the visual user interface (GUI). Commands of the user are written into the data base or send via UPD. GeoGUI allows also the parallel playing of image sequences and measurement sequences values during recording.

Conclusion

Geothermal energy has the potential to work as baseload supplier for electricity and heat in the energy system of the future and therefore support the overall target of the German energy transition. Unfortunately in its current state it is not competitive and faces strong antipathies due to technical risks and their consequences.

Suitable and most of all – for operators and science – available tools, which provide a high range of interaction and investigation possibilities within boreholes would be an essential progress towards an intensive usage of geothermal energy in the future.

An example for the cutting edge development of tools is the data transfer rate using long wirelines. The actual image refresh rate of the GeoKam is 10 images per second, while currently an improvement of the total system performance, minimizing of latencies as well as increasing of image refresh rates is worked out intensively. This is a unique feature for video inspections under the extreme surrounding conditions and will establish all new possibilities.

The presented system platform approach with its first functional tool for video inspection provides a promising approach towards a wider range of technical opportunities for cause study, efficiency improvement and maintenance – elements of a reliable quality management – in geothermal energy.

References

- [1] Deckert, Ralf: *Folge fataler Bohrungen – Stauferen gerät aus den Fugen* (Eng. *Staufen gets out of joint*), March 09, 2015, www.stuttgarter-nachrichten.de, last accessed: June 07, 2016.
- [2] Kulish, N., Glanz, J.: *German Geothermal Project Leads to Second Thoughts After the Earth Rumbles*, Sept. 10, 2009, <http://www.nytimes.com>, last accessed: June 13, 2016.
- [3] Künzle, Patrick: *Basler Geothermie-Projekt sorgt immer noch für Nachbeben* (Eng. *Geothermal project in Basel still causes aftershocks*), July 08, 2013, www.srf.ch, last accessed: June 07, 2016.
- [4] Smith, Ray: *Geothermal Energy Stuck in a Hole in Switzerland*, Aug. 05, 2013, <http://www.ipsnews.net>, last accessed: June 13, 2016.
- [5] Rothfels, Jasper: *Erdwärme in Landau: Seit einem Jahr herrscht Stillstand* (Eng. *Geothermal heat in Landau: Since one year there is stagnation*), March 25, 2015, www.rnz.de, last accessed: June 07, 2016.
- [6] Geothermie Nachrichten: *Studie zum Potential der Geothermie in Europa bis 2030* (Eng. *Study on potential of geothermal energy in Europe till 2030*), Sept. 22, 2010, www.geothermie-nachrichten.de, last accessed: June 07, 2016.
- [7] Holbein, B. et al: *System Platform Approach for the Effective Development of Borehole Tools Solving General Problems, proceedings, 3rd European Geothermal Workshop*, Karlsruhe, Germany, October 15-16, 2014.
- [8] Spatafora, L. et al: *The GeoKam – A Tool for Video Inspection in Hot Deep Geothermal Boreholes*, proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 22-24, 2016.

Investigation of the critical heat flux in a rod bundle configuration under low pressure conditions

Florian Kaiser¹, Stephan Gabriel², Giancarlo Albrecht², Thomas Wetzel¹

¹ Karlsruhe Institute of Technology – Institute of Thermal Process Engineering

² Karlsruhe Institute of Technology – Institute for Nuclear and Energy Technologies

Introduction

Diverse boiling phenomena occur during the operation of light-water reactors. Their understanding is necessary to guarantee a safe service and to avoid unstable operating modes. For example, the compartment of the coolant could either be subcooled boiling during normal operation or even critical boiling during the occurrence of a disturbance. Besides, boiling effects also appear on the secondary loop of the steam generator.

The boiling process allows significantly higher heat transfer rates compared to the single-phase convection. But this heat transport can be suddenly decreased when the limit of the critical heat flux (CHF) is reached. The occurrence of the boiling crisis leads generally to severe damage of the facility components and has to be avoided during reactor operation. Until today, there is no reliable method predicting this phenomenon based on universally valid correlations. A substantial benefit for the reactor safety research would be a prediction method which is based on the solution of the transport equations for the two-phase flow of water and steam.

There exist many correlations based on observations in experiments or theoretical reflections which try to explain the occurrence and the development of the critical heat flux. Unfortunately, they cannot be combined to one complete model as they are counter-predicting effects or are set up on different physical effects. For example, the ‘Near Wall Bubble Crowding Model’ [Kandlikar, S. G., 2011] postulates the decrease of the liquid flow to the wall due to turbulence with increasing heat flux as bubbles will concentrate near the wall. Whereas the ‘Interfacial Lift-Off Model’ [Galloway, J., Mudawar, I., 1993] predicts pseudo-periodic ‘wetting-fronts’ which cause the agglomeration of steam leading to the CHF as these zones lift off from the wall. Using the COSMOS-L test facility, IKET at KIT tries to contribute to analyzing the different existing theories and to examine specific phenomena like flow pattern or void distribution for flow boiling.

Test facility COSMOS-L

The test facility which is used for the measurements is called COSMOS-L which stands for ‘Critical Heat Flux On Smooth and Structured surfaces under Low pressure conditions’. It was built by C. Haas [Haas, C., 2011] who examined the occurrence of the critical heat flux on smooth zirconium alloy tubes as well as on tubes possessing microstructured surfaces.

The facility is a cycle which runs with deionized water under a pressure range from 1 to 4 bar. It provides in its actual configuration a mass flow between 0.01 kg/s and 0.1 kg/s. COSMOS-L possesses – beside the deionized water loop – a secondary loop which is used for cooling. A glycol mixture is used here and it is also cooled via two air fans. The primary loop itself consists of a gear pump providing the mass flow. The water quality is controlled using an O₂-sensor and a sensor to measure the conductivity. To be capable of using different subcooling temperatures to enter the test section, the water loop possesses a pre-heater allowing inlet temperatures between 45 °C and 120 °C. Directly in front of the test section, a throttle valve is positioned to allow a control of the pressure drop. The condenser is directly following the test section. It has to condense the content of vapor achieved through the heat input. Then, the liquid passes a pressurizer used to control the system pressure. Finally, a cooler is installed directly in front of the pump to guarantee subcooled liquid passing the pump and avoiding though cavitation.

The test sections

In previous investigations carried out by C. Haas [Haas, C., 2011] the test section consisted of a vertical internally heated annulus. The water was flowing upwards through the concentric gap. The inner tube of the annular gap was made out of Zircaloy-4 with an outer diameter of Ø9.5 mm and a wall thickness of 0.65 mm. It was directly electrically heated. The outer tube of the annulus was made out of glass to allow an observation of the flow pattern during the experiments. The inner diameter of the outer glass tube was either Ø13 or Ø18 mm. The water is carried to the test section from four different directions. The power was supplied electrically by a controllable transformer with a maximum power of 75 kW. The heated length of the annular gap was about 326 mm. The outlet of the test section was horizontally connected to the condenser allowing the gas and liquid phase to separate from each other. Beside smooth Zircalloy-4 tubes, modified surfaces with micro-channels, porous coatings and cracks have been investigated.

The experiments addressed the relationship between the critical heat flux and the change in gap size, as well as the changes in outlet pressure, pressure drop, void fraction, inlet subcooling and vapor mass quality for the smooth Zircaloy-4 tube. These experimental data points were compared to literature data and calculated values according to different theories. The best agreement was found with the model of Doerffer et al. [Doerffer, S., Groeneveld, D. C., Cheng, S., and Rudzinski, K., 1994]. After characterizing the tubes with structured surfaces regarding their wetting behavior, contact angle, wetting force and topographical structure, there were also investigations carried out concerning the occurrence of the critical heat flux. The comparison between the smooth tube experiments and those of the structured surface showed different values for the appearance of the critical heat flux. In some cases, the CHF performance could be increased up to almost 30 %.

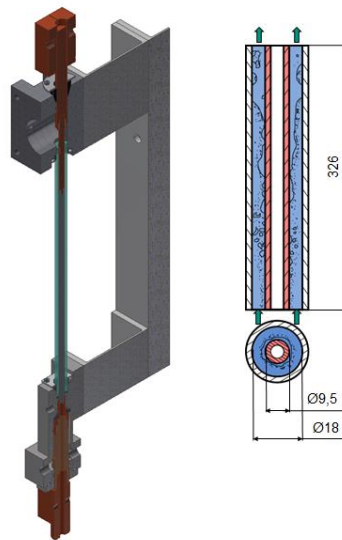


Fig. 1: Test section with annular gap (Haas, C.).

With a new test section design, currently being developed, the influence of the CHF performance will be analyzed in a reactor-typical design using a 3x3 rod-bundle configuration. This means that the inner tube is completely surrounded by other tubes. Despite of the heating of all tubes, the CHF will always appear at the center tube as it will be peaked in power. Therefore, a previous investigation was conducted by J. Eckel [Eckel, J.] to find out how the peaking has to be designed. For several data points, he estimated the deviation of the CHF appearance and introduced an additional safety coefficient for the peaking.

The geometry of the rod-bundle configuration is shown in figure 2. The tubes used are made out of Zircaloy-4 and possess a heated length of about 330 mm. The pitch between the tubes is 14.5 mm and the cross section has a value of 1360 mm². In order to investigate the new test section with similar mass fluxes as for the annular gap, a new pump will be installed delivering a mass flow of 0.8 kg/s. In order to visualize the flow pattern, the new flow channel will have a total number of sight windows of four. In each direction, one of the windows is arranged in order to get full optical access.

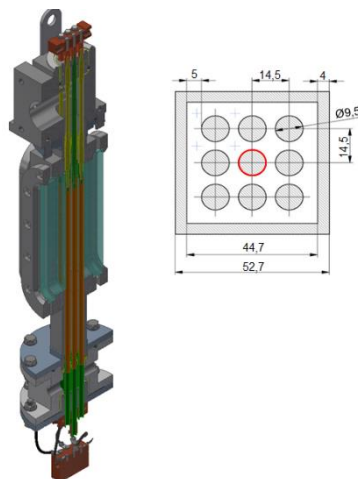


Fig. 2: Test section with 3x3-rod bundle design.

Measurement instrumentation

The instrumentation of the test section has already been applied in the previous work of Christoph Haas, but will be complemented with further sensors in order to get new information. It has a high time and spatial resolution which is completed by an optical access. The measurement data obtained in the test section will be extended by additional sensors of the test facility which give a detailed view on the boundary conditions. In the inlet area to the test section, a volume flow sensor is installed. Directly in front of and behind the test section, the pressure and the temperature of the flow are measured. Through the four sight windows an optical visualization will be possible and the flow pattern can be studied via high-speed cameras. In addition, the electrical power that is introduced into the cladding rods and the surface temperature of the rods in order to detect the CHF are measured. The measurement of the local steam void fraction is planned under use of an optical fiber sensor which has been implemented in cooperation with the Technical University of Munich [Bloch, G, 2013].). The measurements will be completed by laser-optical velocity measurements such as LDA or PIV.

Outlook

Additional investigations of the described annular gap equipped with additional measurement instrumentation such as the optical fiber sensor and laser-optical velocity measurements will be done in order to analyze which of the predicted effects of the different existing mechanistic boiling models can be proven. These measurements will be completed by investigations of a 3x3 rod-bundle configuration. A comparison of these investigations will show if the discoveries made in the annular gap also can be found in the reactor-typical geometry of the rod bundle.

References

- [1] Bloch, G. (2013). Setup and Fabrication of cost effective, robust Fiber Optical Needle Probes for Application in Multiphase. München.
- [2] Doerffer, S., Groeneveld, D. C., Cheng, S., and Rudzinski, K. (1994) *A comparison of critical heat flux in tubes and annuli*. Nuclear Engineering and Design.
- [3] Eckel, J. (2015). Konstruktion einer Stabbündelstrecke für Siederversuche an einem Thermohydraulikversuchsstand. Bachelorarbeit, Institut für Kern- und Energietechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Eggenstein-Leopoldshafen.
- [4] Galloway, J., Mudawar, I. (1993). *CHF Mechanism in Flow Boiling From A Short Heated Wall – I*. Examination of Near-Wall Conditions With the aid of Photomicrography and High Speed Video Imaging. Int. J Heat Mass Transfer.
- [5] Haas, C. (2012). *Critical Heat Flux for Flow Boiling of Water at Low Pressure on Smooth and Micro-Structured Zircaloy Tube Surfaces*. KIT Scientific Reports 7627.
- [6] Kandlikar, S. G. (2001). *Critical Heat Flux under Subcooled Boiling*. An Assessment of Current Understanding and Future Directions for Research. Multiphase Science and Technology.

Beweisbare Privatheitsgarantien durch den Einsatz wiederaufladbarer Energiespeicher

Fabian Laforet, Erik Buchmann, Klemens Böhm

Die globale Energiewende erfordert die Verfügbarkeit von Energieverbrauchsdaten mit einer hohen Auflösung. Intelligente Stromzähler, sogenannte Smart Meter, messen solche Daten in Echtzeit. Dies wiederum gefährdet den Datenschutz: Zeitreihen von Energieverbrauchsdaten enthalten unterschiedliche Arten privater Informationen. So lassen sich neben Tagesabläufen der Bewohner auch Rückschlüsse auf deren Beschäftigungsverhältnis ziehen und sogar die Identifizierung des geschauten Fernsehprogrammes ist möglich. Bedenklich sind solche Informationen beispielsweise, wenn Einbrecher herausfinden können, zu welchen Zeiten niemand zu Hause ist, oder wenn Versicherungen die Daten nutzen, um aufgrund ungesunder Lebensweisen die Beiträge erhöhen. Wir befassen uns mit diesen Problemen, indem wir einen Lösungsansatz [1] zur Störung der Verbräuche vorschlagen, der auf wiederaufladbaren Energiespeichern beruht. Die Energie, die ge- und entladen wird, verrauscht die Daten, die den aktuellen Verbrauch beschreiben. Sogenannte Ladestrategien spezifizieren das Ladeverhalten des Energiespeichers.

Das Hauptziel dieses Beitrages ist es, Privatheitsgarantien für solche Strategien geben zu können. Zu diesem Zweck beruhen die Strategien, die wir vorschlagen, auf einer Verallgemeinerung der Irwin-Hall Verteilung, die Analysen in geschlossener Form ermöglicht. Zunächst betrachten wir den Fall, in dem die Verbräuche mehrerer Haushalte zu Analysezwecken aggregiert werden. Hier können wir (ϵ, δ) -differential Privacy [2] Garantien geben. Für den Fall, dass die Verbräuche jedes Haushalts individuell vorliegen, schlagen wir ein neues Privatheitsmaß statistischer Natur vor, um das Risiko zu quantifizieren, dass Merkmale zu den Zeitreihen, aus denen heraus sie berechnet wurden, falsch zugewiesen werden. Im Anschluss entwerfen wir eine spezielle Ladestrategie, die die benötigten Eigenschaften, die für die zuvor vorgestellten beweisbaren Privatheitsgarantien notwendig sind, mit einer Trenderhaltung kombiniert, um gegen Filter-Angriff zu schützen. Insgesamt erhöht unsere Strategie die Wahrscheinlichkeit, dass Verfahren fehlschlagen, die private Informationen aus den Daten ableiten [3] [4].

Literaturverzeichnis

- [1] Laforet, E. Buchmann und K. Böhm, „Towards Provable Privacy Guarantees Using Rechargeable Energy-Storage Devices,“ in *ACM e-Energy*, 2016.
- [2] C. Dwork, K. Kenthapadi, F. McSherry, I. Mironov und M. Naor, „Our Data, Ourselves: Privacy Via Distributed Noise Generation,“ in *Advances in Cryptology (EUROCRYPT)*, 2006.
- [3] C. Beckel, L. Sadamori und S. Santini, „Automatic socio-economic classification of households using electricity consumption data,“ in *The Fourth International Conference on Future Energy Systems*, 2013.
- [4] E. Buchmann, K. Böhm, T. Burghardt und S. Kessler, „Re-identification of Smart Meter data,“ in *Personal and Ubiquitous Computing*, 2013.

Experimental Analysis of Thermal Runaway in 18650 Cylindrical Li-Ion Cells using an Accelerating Rate Calorimeter

B. Lei, W. Zhao, C. Ziebert, A. Melcher, M. Rohde, H. J. Seifert

Institute of Applied Materials - Applied Materials Physics, Karlsruhe Institute of Technology, Germany

Abstract

In this work commercial 18650 lithium-ion cells with LiMn_2O_4 cathode were exposed to external heating in an Accelerating Rate Calorimeter (es-ARC, THT Company) to investigate the thermal behavior under abuse conditions. New procedures for measuring external and internal pressure change of cells were developed. The external pressure was measured using a gas-tight cylinder inside the calorimeter chamber in order to detect venting of the cells. For internal pressure measurements, a pressure line connected to a pressure transducer was directly inserted into the cell. During the thermal runaway experiments, three stages (low rate, medium rate and high rate reaction) have been observed. Both pressure and temperature change indicated different stages of exothermic reactions, which produced gases or/and heat. The onset temperature of thermal runaway was estimated according to temperature and pressure changes.

Introduction

To get rid of the dependence of petroleum and to reduce the CO_2 emission, the best near-term solution for vehicles probably are electric (EV) and hybrid electric vehicles (HEV). However, for their extensive market penetration one of the most urgent requirements is to develop lithium-ion cells and batteries, which are safe and reliable even at higher temperatures. Several exothermic chemical reactions can occur inside a cell while the temperature rises. This may generate heat that accumulates inside the cell and accelerates the chemical reaction between the cell components, if the heat transfer to the surroundings is not sufficient. In this case, a thermal runaway can occur in consequence with leak, smoke, gas venting, flames etc., which leads to fire or explosion. To describe the thermal runaway one has to identify the main exothermic chemical reactions. According to (1-3) a thermal runaway can be described in four main steps:

- 1) At $T > T_1$ the solid-electrolyte interface (SEI) decomposes in an exothermic reaction.
- 2) At $T > T_2$ an exothermic reaction between the intercalated Li-ions and the electrolyte starts.
- 3) At $T > T_3$ an exothermic reaction between the positive material and the electrolyte takes place under the evolution of oxygen inside the cell.
- 4) At $T > T_4$ the electrolyte decomposes.

Jhu et al. (4, 5) studied thermal runaway characteristics (initial exothermic temperature, self-heating rate, pressure rise rate, maximum temperature and pressure) with vent sizing package 2, a commercially available accelerating rate calorimeter (ARC) manufactured by Fauske & Associates, LLC. This is a PC-controlled calorimeter with a pressure and temperature system that balances the internal and external pressure and temperature. The tested commercial batteries were considering two types of cathode materials, which were LiCoO_2 and $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ respectively. The maximum pressure P_{max} of LiCoO_2 was 1.86 MPa, while for $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ batteries it was only 1.13 MPa. With both cathode materials, high SOC levels aggravated the exothermic reactions. They also compared the self-heating behaviors of cells with different voltages by using the heat of reaction (ΔH), which was the product of mass of a cell, specific heat capacity of cells and the rise of temperature under adiabatic conditions (5). In addition, they built a model of self-heating rate of LIB from which the activation energy and frequency factor were determined and suggested that the self-heating rate increased exponentially with the temperature.

Golubkov et al. (6) made thermal runaway tests on batteries of LiFePO_4 (LFP), $\text{Li}(\text{Ni}_{0.45}\text{Mn}_{0.45}\text{Co}_{0.10})\text{O}_2$ (NMC) and LCO/NMC cathode materials by using a pressure-tight and airtight reactor, which was able to collect gases. CO , CO_2 and H_2 represented about 80 % of the produced gases, and the others were CH_4 and C_2H_4 . The onset temperatures and released gas amounts of LFP, NMC and LCO/NMC were 195 °C and 50 mmol, 170 °C and 150 mmol, 150 °C and 270 mmol, respectively.

In this work, three kinds of experimental methods have been used to measure the temperature on the surface of the tested commercial 18650 cells, the pressure change due to released gases and the pressure change in re-sealed cells. The correlation between pressure and temperature behavior of lithium ion cells can characterize the degree of violence of a thermal runaway (4), and is very helpful in defining the threshold and stages of thermal runaway and the different reactions during thermal runaway.

Experimental

For commercial 18650 lithium-ion cells with LiMn_2O_4 (LMO) cathode three different thermal runaway testing methods have been used in an accelerating rate calorimeter (es-ARC, THT Company, s. Figure 1). The calorimeter chamber with a diameter of 10 cm and a height of 10 cm has one heater and one thermocouple located in the lid and bottom, respectively and two heaters and thermocouples (all type N) in the sidewall. The cell under study is fixed on the lid of the calorimeter as shown in Figure 1. The calorimeter temperature is controlled by a main or so-called bomb thermocouple fixed onto the surface of the cell. The heaters adjust the required temperatures depending on the measurement conditions. A steel casing outside serves as a protection. In the first method, only temperature and temperature rate were recorded (Figure 1). The standard *Heat-Wait-Seek* (HWS) method was applied for all measurements. The procedure is shown in Figure 3. The HWS method starts at 25 °C in the *Heat* mode by heating up the cell in small temperature steps of 5 °C (see Figure 2). At the end of each temperature step the *Wait* Mode is activated for 15 min to reach thermal equilibrium. After reaching thermal equilibrium, the system enters *Seek* Mode, which seeks the temperature rate and ends with two possible modes — *Exotherm* Mode or

Heat Mode. The decision is related to the selected *Temperature Rate Sensitivity* of 0.02 °C/min. If the measured temperature rate is larger than this value, the system goes into *Exotherm Mode*.

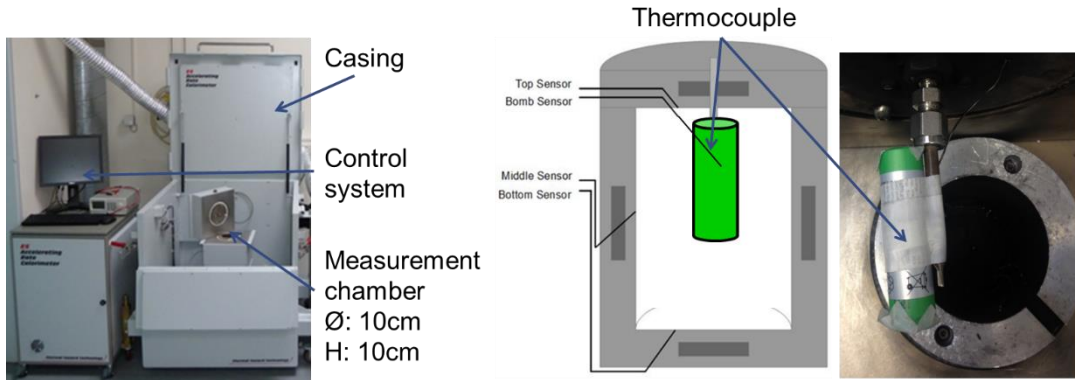


Fig. 1: Accelerating rate calorimeter (es-ARC) and setup of the cell in the ARC.

This mode provides an adiabatic environment, which means that no heat exchange between the sample and the surroundings is possible, so that the heat energy of reactions can be monitored by the measured temperature. On the other hand, if the temperature rate is smaller, the system goes back into *Heat Mode*. If the temperature exceeds the *End temperature* value of 250 °C, the ARC switches off the heaters and starts to cool down by introducing pressurized air to the calorimeter chamber.

The second method used an additional cylinder chamber for external pressure measurements (see Figure 3). The thermocouple was passed through a well-sealed hole and a pressure line connected with a pressure sensor was screwed on the cylinder chamber. It was very critical to screw every part of the cylinder chamber extremely tight to prevent for leaks. Similar to the adiabatic environment, the seal condition helped to monitor the external pressure change.

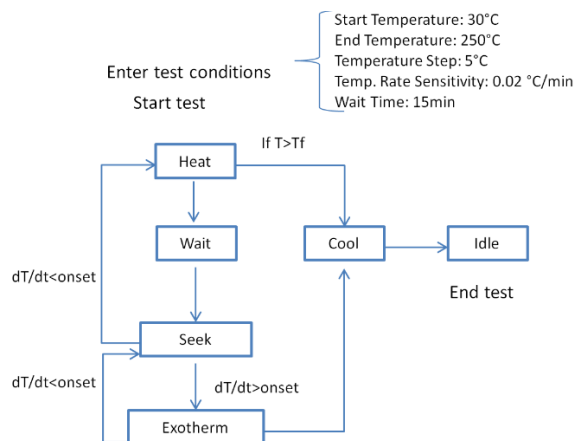


Fig. 2: Process of heat-wait-seek (HWS) method.

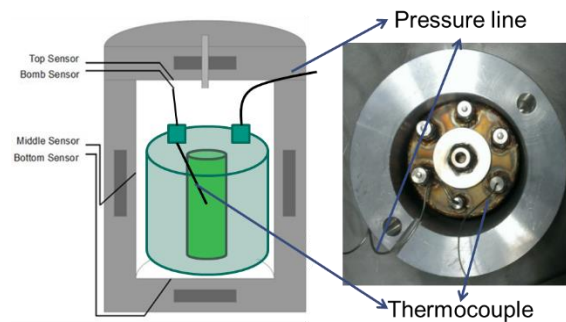


Fig. 3: External pressure measurement setup.

In contrast to the external pressure measurement, where the capillary leading to the pressure sensor was connected to the cylinder, in the third method this capillary was directly introduced into the functional cell for internal pressure measurements (Figure 4). Therefore, a suitable place had to be found by using images from X-ray tomography. X-ray tomography was conducted at the IAM X-Ray Imaging Laboratory at KIT. X-ray micro-tomography scans were performed on the cell using a Phoenix v/tome/x s system (Phoenix X-ray, GE Measurement and Control, Germany). The battery was rotated 360° about its long axis whilst 1600 projections were captured with the microfocus tube operating at 200 kV and 370(230) μA . The sample and detector were positioned in projection magnification providing an effective voxel size of 75(48) μm for the high resolution imaging. Tomography scans of the full cell were obtained, and subsequent 3D analysis of the reconstructed image data was performed using VG studio max software (Volume Graphics Company, Germany). Figure 4 shows as an example a 3D rendering of the tomographic data set for the 18650 cell with LMO cathode. The spirally wound internal structure of the cell and the hollow central section are clearly visible and on the top also the safety valve can be seen. It turned out that the best position for the pressure line is situated on the base of the cell, in the center of the hollow section, where a small hole was drilled and then a 1/16-inch diameter capillary was inserted. Then the cells have been resealed with epoxy resin. The described preparation procedure was performed in a Argon-filled glovebox, because the cell components are very sensitive to moisture.

Before the thermal runaway tests, the capacity of the cells was determined by three full cycles and finally they were fully charged to state of charge 100 % (SOC100), because this is the most critical condition for Li-ion cells according to (7). The method of charge was CC/CV. Which means that firstly the cell is charged at constant current at 1C rate (CC) up to the maximal voltage, and then it is charged at constant voltage (CV) with decreasing current until the current reaches 10 % of its starting value.

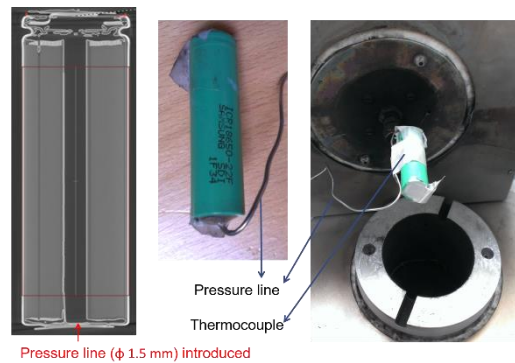


Fig. 4: Setup for internal pressure measurement.

Results and Discussion

In the following the three different test methods will be demonstrated for the cell with LMO cathode. Figure 5 compares the time evolution of the measured surface temperatures for the three different methods and three identical cells at SOC100. From this figure, it is easily to distinguish the *Heat-Wait-Seek* periods and the *Exotherm* periods. At temperatures below about 80 °C, the temperature curve increased with steps of 5 °C. Then a first exothermic reaction can be seen. Afterwards, the system went back to heat mode at 100 °C, and the HWS mode was active until 110 °C. Then the temperature went up continuously in *Exotherm* mode until thermal runaway happened.

So three stages were observed in the thermal runaway tests, which were assigned according to the literature (1-3) to:

- 1) At about 80 °C solid electrolyte interface (SEI) decomposed.
- 2) At about 110 °C an exothermic reaction between embedded Lithium ions and electrolyte started, which resulted in the reduction of electrolyte at the negative electrode.
- 3) At about 200 °C an exothermic reaction between active positive material and electrolyte at positive electrode took place.

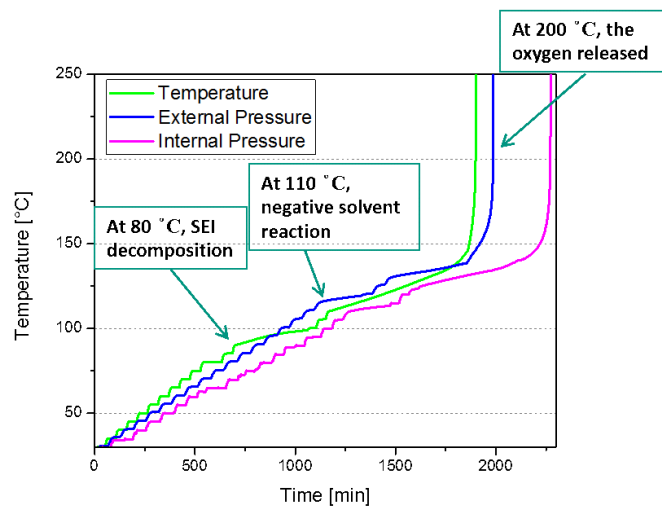
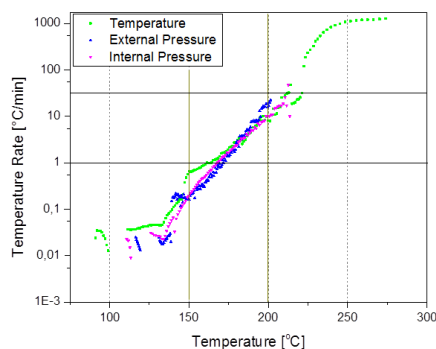


Fig. 5: Comparison of temperature curves vs. time measured by different methods.

When comparing the three curves, the time until the thermal runaway is reached increased from the only temperature via the external up to the internal pressure measurements. The reason is that the system needs to heat up the cylinder for the external pressure tests and that some heat loss occurs via the pressure line during internal pressure tests. Even though the three curves do not perfectly overlap each other, however, the tendencies are the same. We can have a more specific view using Figure 6 a), which shows the temperature rate vs. the temperature. Here the three stages can be distinguished more easily and the measured temperature rates agree well with each other for all three test methods.

a)



b)

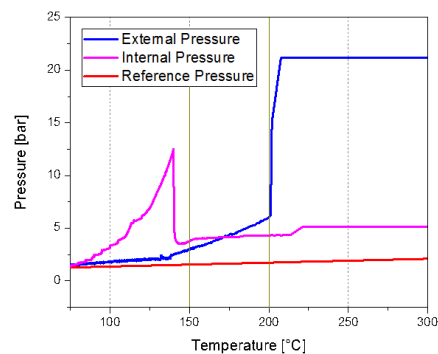


Fig. 6: a) Comparison of temperature rate vs. temperature curves measured by different methods.
b) Compare pressure vs. temperature by different methods.

In the temperature region 80 °C to 150 °C, the temperature rate is lower than 1 °C/min. From 150 °C to 200 °C, the energy was released with medium rate lower than 25 °C/min. Above 200 °C, the exothermic reactions happened in a violent way with a temperature rate over 1000 °C/min.

Finally, in order to correlate temperature and pressure measurements the pressure values taken from the external and the internal pressure tests are plotted vs. the temperature in Figure 6 b). The additional red line represents the expansion of the air with increasing temperature according to the ideal gas law. For the external pressure measurement, the difference between the measured blue line and the red line can be regarded as the amount of gases that come from the leaking cell. As the temperature increased, the difference became larger and larger, showing that more and more gases were produced. There was a gas leaking from 80 °C and produced gases were released into the cylinder, because of exceeding the threshold pressure of the safety valve. At 130 °C, the difference became larger. At 200 °C, which is also the start temperature point of stage 3, the difference was significant. For the internal pressure measurement, starting at 80 °C, the difference was increasing continuously, indicating the beginning of gas production and SEI layer decomposition. Between 130 °C and 140 °C, the valve of the battery opened and gases were released.

Following the procedure described by Golubkov et al. (6) the amount of produced gases was calculated from the measured external pressure. The cell with LMO cathode released 76.5 mmol gases during thermal runaway. Golubkov et al. reported that 18650 cells with LCO/NMC cathode material released gases of 265 mmol, and those with pure NMC 149 mmol. This comparison indicates a better exothermic stability of the LMO cathode.

Conclusions

Three stages have been observed in thermal runaway tests with 18650 Li-Ion cells with LMO cathode by correlating temperature and pressure curves. The first stage began with gases production at about 80 °C. The reaction in the first stage was likely to be the SEI layer decomposition. The onset temperature was about 113 °C, when the second stage started; from this temperature, the cells started self-heating until the thermal runaway. In future studies, it could be interesting to confirm all these stages exactly and analyze produced gases and material components after thermal runaway using post-mortem analysis by opening the cells after the experiment has been stopped at the different stages. The next step could be to use the derived thermokinetic parameters as input parameters for our coupled electrochemical thermal model (7), which encompasses a simple combustion model coming from reaction kinetics including various types of heat sources based on an Arrhenius law.

Acknowledgements

This R&D project is part of the project IKEBA which is funded by the Federal Ministry for Education and Research (BMBF) within the framework “IKT 2020 Research for Innovations” under the grant 16N12515 and is supervised by the Project Management Agency VDI | VDE | IT. The authors would like to express their gratitude to A. Maier, IAM-AWP, for recording the X-Ray tomography images.

References

- [1] E. P. Roth, D.H. Doughty, *J. Power Sources*, **128**, 308 (2004).
- [2] R. Spotnitz, J. Franklin, *J. Power Sources*, **113**, 81 (2003).
- [3] D. P. Abraham, E.P. Roth, R. Kostecki, K. McCarthy, S. MacLaren, D.H. Doughty, *J. Power Sources*, **161**, 648 (2006).
- [4] C.-Y. Jhu, Y.-W. Wang, C.-Y. Wen, C.-M. Shu, *Applied Energy*, **100**, 127 (2012).
- [5] C-Y. Jhu, Y.-W. Wang, C.-M. Shu, J.-C. Chang, H.-C. Wu, *Journal of Hazardous Materials*, **192**, 99 (2011).
- [6] A. W. Golubkov, D. Fuchs, J. Wagner, H. Wilsche, C. Stangl, G. Fauler, G. Voitic, A. Thaler, V. Hacker, *Journal of RSC Advances*, **4**, 3633 (2014).
- [7] A. Melcher, C. Ziebert, M. Rohde, B. Lei, H.J. Seifert, *Energies*, **9** 292 (2016), doi:10.3390/en9040292.

ECM Models for Li-Ion Batteries – A Short Mathematical Survey and Simulations

Andreas Melcher, Carlos Ziebert, Magnus Rohde, Boxia Lei, Hans Jürgen Seifert

Institute of Applied Materials - Applied Materials Physics (IAM-AWP), Karlsruhe Institute of Technology

Abstract

Accurate models and simulation results of advanced Li-ion batteries and cells are of vital interest in powertrain electrification demands, stationary storage applications as well as in the experimental quantification of Li-ion batteries. Various models with different complexities are possible. The range of such models varies from the fully coupled electrochemical thermal model describing the dynamics of the battery in terms of partial differential equations (PDE) over Reduced Order Models (ROM) as simplification of the PDE model up to Equivalent Circuit Models (ECM) which use a phenomenological description of the electrical behavior in terms of ordinary differential equations. This work presents a short overview of some ECMs followed by a first implementation of an extended ECM with a simplified thermal model in Matlab®/Simulink®/Simscape™¹. The identification problem of the structure and the parameters of an ECM is discussed in terms of the Current Interruption Technique (CIT). Several test cases are simulated with an example of an ECM.

Equivalent Circuit Models for Li-ion Batteries

Li-ion batteries are widely used in today's electric vehicles (EV), hybrid electric vehicles (HEV), cell phones and many other industrial applications. Very often it is necessary to control the battery or whole battery packs with a Battery Management System (BMS) to provide useful and important information about the battery system like the State of charge (SOC) to predict the range of an EV/ HEV or the temperature to avoid thermal runaway as the worst case scenario in battery applications. Therefore accurate models and simulations are of high importance. In the following a short overview of mathematical models for Li-ion batteries is given. This work is focused on Equivalent Circuits Models (ECM) which are the state of the art in modern BMS, but can also be used for the extraction of experimental data of Li-ion batteries.

For the description of the dynamical behavior of Li-ion batteries a large range of mathematical-physical models exists. Starting with the electrochemical-thermal model, see [1], [2] and the references therein, a spatio-temporal description of the concentration of the Li-ions and potentials in the electrodes as well as the temperature distribution of the battery is given in terms of a multi-scale, multiphysics system of elliptic and parabolic differential equations using homogenization methods. This model is able to capture almost all physical relevant phenomena at the expense of

¹ Matlab®/Simulink®/Simscape™ are registered trademarks of The Mathworks Inc.

corresponding complexity with respect to spatial and temporal resolution. As a consequence it cannot be applied in BMS today due to its high complexity.

A possible ansatz to reduce this complexity is the use of Reduced Order Models (ROM) which can be derived from the previous model using some simplification assumptions like the eigenfunction expansion method [3]. One possible candidate is the Single Particle Model (SPM) which is able to reproduce the dynamics of the original model in some ranges with good agreement and with less complexity. The corresponding partial differential equations can be converted into ordinary differential equations by the methods of lines (MOL) to reach less complexity. But these equations are also complex in comparison to the Equivalent Circuit Models (ECM).

An ECM model describes the pure electrical behavior of the battery in terms of voltages, currents, resistances and capacitances. Using the theory of passive electrical networks the resulting equations are a low dimensional system of ordinary differential equations which is in general nonlinear, since the system parameter depends on temperature T and state of charge SOC . Due to these dependencies an extended ECM model is used together with an additional differential equation for the SOC and a simplified temperature model in form of a linear inhomogeneous differential equation. These models are able to capture the essential electrical phenomena with good accuracy and less complexity. They consist only of passive electrical elements and are easy to embed in BMS for real time application to ensure safe and reliable operation conditions. An overview of ECMs can be found in [4, 5].

In general most of the ECMs can be described by the Thevenin-Model. The general structure of a Thevenin-ECM is shown in Figure 1. It contains two voltage sources. The first one describes the open circuit voltage of the battery; the second one describes parasitic voltages. Furthermore it contains several parallel resistors and capacitors which represent polarizations like electrochemical or concentration polarization mechanisms in the battery. The resistor R_0 describes the ohmic resistance of the battery and R_p describes additional parasitic effects. This can be used to model thermal runaway with an ECM, where R_p becomes of low impedance for rising temperatures, which can result in a short circuit in the battery. All parameter of this circuit depend on SOC and temperature T . So a simplified temperature model in form of an ordinary differential equation is used for the SOC.

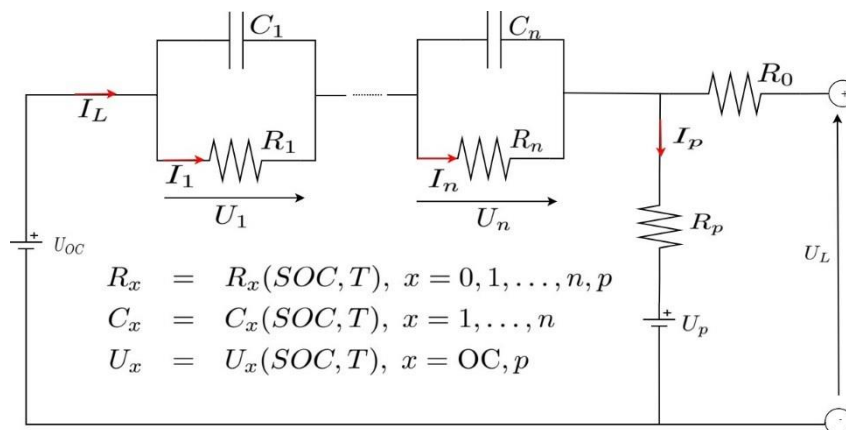


Fig. 1: General Thevenin model.

Mathematical Description and Implementation

Using the passive electrical network theory the general Thevenin model can be described as a system of $n + 2$ nonlinear ordinary differential equations and one algebraic equation:

$$\frac{dU_i}{dt} = \left(-\frac{1}{R_i C_i} + \left(\frac{1}{C_Q} \left(-\frac{1}{R_T C_T} (T - T_a) + \frac{1}{C_T} Q \right) \right) \right) U_i + \frac{1}{C_i} I_L, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{R_T C_T} (T - T_a) + \frac{1}{C_T} Q, \quad (2)$$

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{1}{C_Q} I_L, \quad (3)$$

$$U_L = U_{OC} - I_L R_0 - \sum_{i=1}^n U_i, \quad (4)$$

where $R_i, C_i, U_i, I_i, i = 1, \dots, n$ denote the corresponding resistors, capacitors, voltages and currents of each RC -branch. U_{OC} is the open circuit voltage, I_L the load current and U_L the terminal voltage, R_0 is the ohmic resistance of the battery and the current I_p , the voltage U_p and the resistor R_p describe parasitic effects in the battery. T, T_a are the temperature and the ambient temperature, R_T, C_T the convection resistance and the heat capacity respectively, Q the power dissipated inside the cell and SOC the state of charge and C_Q the total charge of the battery.

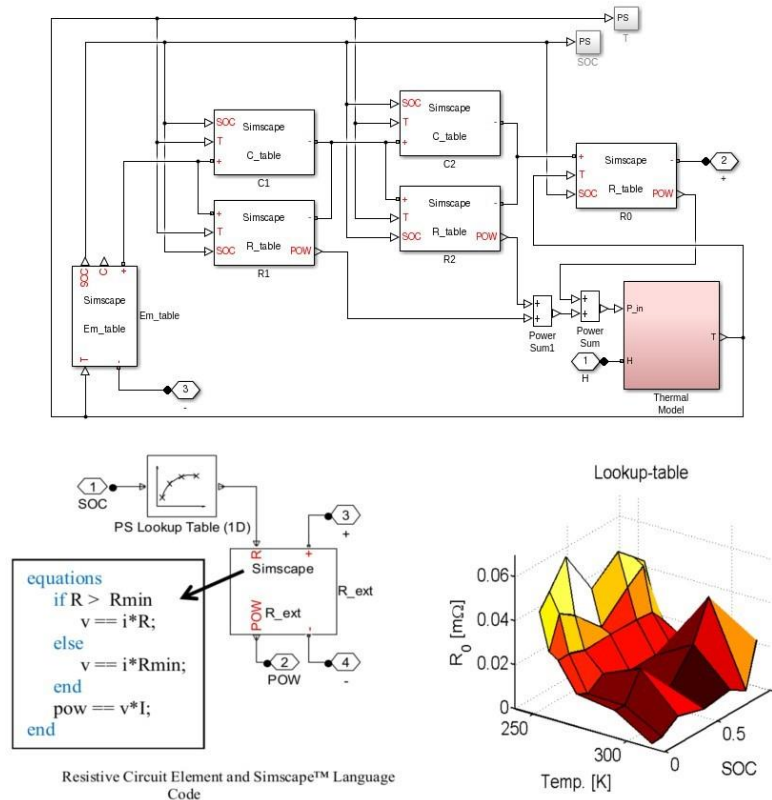


Fig. 2: The Simulink®/Simscape™ realization of the Thevenin model.

This system of equations can be rewritten in more general form using the state space approach:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (5)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (6)$$

with $\mathbf{f} : \Omega_x \times \Omega_u \times \Omega_p \mapsto \Omega_f \subset \mathbb{R}^{n+2}$ and $\mathbf{g} : \Omega_x \times \Omega_u \times \Omega_p \rightarrow \Omega_g \subset \mathbb{R}$, where the manifolds $\Omega_x \subset \mathbb{R}^{n+2}$, $\Omega_u \subset \mathbb{R}^3$, $\Omega_p \subset \mathbb{R}^{2n+2}$ are suitable chosen. Furthermore $\mathbf{u} = (I_L, T_a, Q)^T \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{x} = (U_L, \dots, U_n, SOC, T)^T \in \mathbb{R}^{n+2}$, $\mathbf{y} = U_L \in \mathbb{R}$ and $\mathbf{p} = (R_1, \dots, R_n, C_1, \dots, C_n, U_{OC})^T \in \mathbb{R}^{2n+2}$, $\mathbf{p} = \mathbf{p}(SOC, T)$ denotes the input, state-space, output and parameter vector respectively. In this description the parasitic effects are neglected, all other constants not mentioned in the parameter vector \mathbf{p} are assumed to be constant.

The Matlab[®]/Simulink[®]/Simscape[™] environment is an ideal tool to implement this system of differential and algebraic equations. For simulation purposes a Thevenin-model with two relaxation mechanisms is implemented. The corresponding electrical network in Simulink[®] can be seen in Figure 2. For the passive electrical elements a library is programmed using Simscape[™] and lookup-tables are used in approximation of the nonlinear functions \mathbf{f} and \mathbf{g} . The main difficulty is that the nonlinear functions \mathbf{f} and \mathbf{g} are in general not completely known due to the dependence of the passive electrical elements of the ECM on the SOC and the temperature T . This problem can be solved by using lookup-tables for the passive elements of the ECM. Lookup-tables are able to approximate these functions via interpolation and extrapolation in the simulation task. These tables can be filled via the experimental Current Interruption Technique (CIT), where for known SOC and temperature T charge and discharge curves of real batteries are measured and from these curves the polarization mechanism, relaxation times, numerical values for resistances and capacitances can be extracted. For more details see [6, 7, 8].

Simulation of a Pouch Cell

For the Simulink[®]/Simscape[™] implementation of the model first simulations of a pouch cell with the dimensions $0.0084 \times 0.215 \times 0.22 \text{ m}^3$ at ambient temperature $T_a = 25 \text{ °C}$ were performed for the driving profiles Artemis Road and Artemis Urban [9]. Corresponding simulation results are shown in Figure 3 and statistical values in Table 1. The simulated battery is first charged to $SOC = 1$ over charging time $t_L = 1200\text{s}$ and then the corresponding profile is applied in the simulation using the ode15s solver from Matlab[®] and the battery is completely discharged to $SOC = 0$.

Tab. 1: Mean value and standard deviation from simulation.

	T in [°C]	Std $_T$ in [°C]	SOC	Std $_C$	U_L in [V]	Std $_{U_L}$ in [V]	I_L in [A]	Std $_{I_L}$ in [A]
Road :	29.48	1.96	0.59	0.29	2.87	0.30	-13.52	17.05
Urban:	36.29	4.14	0.49	0.30	2.83	0.41	-16.97	41.36

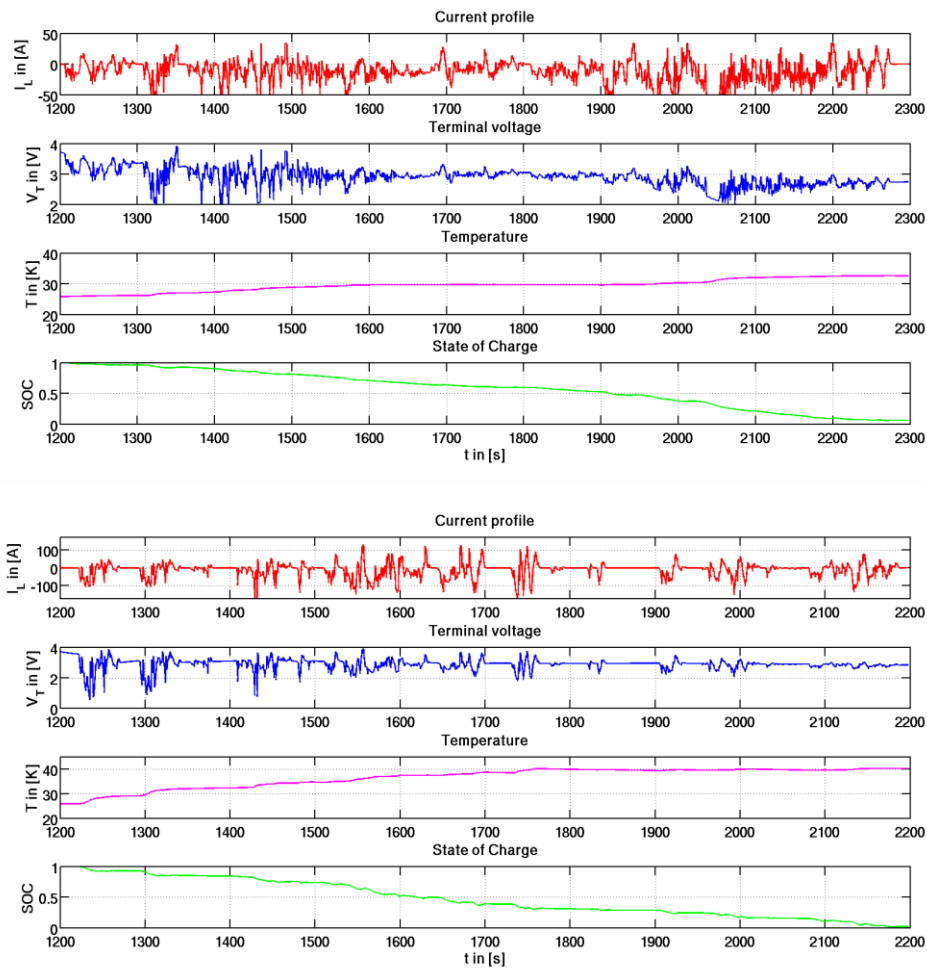


Fig. 3: Simulation of Artemis Road (upper graph) and Artemis Urban profile (lower graph).

Conclusion and Outlook

Using the Simulink[®]/Simscape[™] implementation of an ECM model offers a quick and easy possibility to simulate the electrical-thermal dynamical behavior of Li-ion batteries based on look-up tables coming from experimental measurements. It is planned to measure more look-up tables for different types of Li-ion batteries and to perform corresponding simulations. Also parasitic effects will be taken into account for simulations of thermal runaway with ECM models in the near future. Furthermore, it is planned to extend the Simulink[®]/Simscape[™] implementation for whole battery stacks and packs. Additionally, the Simulink[®]/Simscape[™] implementation will be extended in a way that an optimization of the model parameter in comparison to a specific experimental measurement with arbitrary load profile will be possible due to an Least Squares fit.

Acknowledgement

This R&D project is part of the project IKEBA which is funded by the Federal Ministry for Education and Research (BMBF) within the framework “IKT 2020 Research for Innovations” under the grant 16N12515 and is supervised by the Project Management Agency VDI | VDE | IT.

References

- [1] Gu, W.B., Wang, C.Y.. *Thermal-Electrochemical Modeling of Battery Systems*. Journal of The Electrochemical Society, 147 (8), 2910-2922, (2000).
- [2] Cai, L., White, R.E.. *Mathematical modeling of a lithium ion battery with thermal effects in COMSOL Inc. Multiphysics (MP) software*. Journal of Power Sources 196, 5985-5989, (2011).
- [3] Guo, M., Sikha, G., White, R.E.. *Single-Particle Model for a Lithium-Ion Cell: Thermal Behaviour*. Journal of The Electrochemical Society, 158 (2), A122-A132, (2011).
- [4] He, H., Xiong, R., Fan, J.. *Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach*. Energies 4, 582-596, (2011).
- [5] Hu, X., Li, S., Peng, H.. *A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries*. Journal of Power Sources, 198, 359-367, (2012).
- [6] Huria, T., Ceraolo, M., Gazzari, J., Jackey, R.. *High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells*. IEEE International Electric Vehicle Conference 2012, (2012).
- [7] Jackey, R., Saginaw, M., Sanghvi, P., Gazzarri, J.. *Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using Lithium Iron Phosphate Cell*, SAE Technical Paper 2013-01-1547, (2013).
- [8] Schuster, E., Ziebert, C., Melcher, A., Rohde, M., Seifert, H.J.. *Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40Ah lithium ion pouch cell*. Journal of Power Sources 268, 580-589, (2015).
- [9] Barlow, T.J., Latham, S., McCrae, I.S., Boulter, P.G.. *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*. TRL Limited Project Report PPR354, (2009).

Auswirkungen eines möglichen Kohleausstiegs im Vereinigten Königreich und in Deutschland auf den Strommix und die CO₂-Emissionen in Europa

*Hasan Ümitcan Yilmaz, Dr. Dogan Keles, Quentin Bchini, Rupert Hartel,
Prof. Dr. Wolf Fichtner*

Einleitung

Kohlekraft hat einen großen Anteil an der Stromproduktion in Deutschland und im Vereinigten Königreich. Im Jahr 2014 lag der Anteil der Stromproduktion aus Steinkohlekraftwerken im Vereinigten Königreich bei rund 30 % der gesamten Stromerzeugung und die ans Netz angeschlossene Leistung der Kohlekraftwerke betrug rund 20 GW. Trotz beträchtlicher Kapazitäten hat das Department of Energy and Climate Change (DECC) des Vereinigten Königreichs im November 2015 Pläne zur Stilllegung aller Kohlekraftwerke bis zum Jahr 2025 veröffentlicht [1].

In Deutschland wurde im Jahr 2015 rund 42 % der gesamten Stromproduktion durch Kohlekraftwerke erzeugt [2]. Laut des 4. Monitoringberichts [3] des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie wird Deutschland im Jahr 2020 sein Ziel für die Reduktion von Treibhausgasen nicht erreichen. Deswegen wird in Deutschland über die Stilllegung der Stein- oder zumindest eines Teiles der Braunkohlekapazitäten diskutiert. Es wurde bereits angekündigt, acht Braunkohlekraftwerke (insgesamt ca. 2,7 GW) in die sogenannte Klimareserve zu überführen und sie anschließend bis 2023 endgültig stillzulegen [4].

Das Ziel dieser Studie ist es, wirtschaftliche Auswirkungen eines vollständigen Ausstiegs aus der Kohlekraft in Deutschland und im Vereinigten Königreich zu analysieren und den zukünftigen Strommix der beiden Länder zu untersuchen. Hierbei stellt sich die Frage, auf welche Weise die europäische Marktintegration zum Ausgleich der fehlenden Stromerzeugung beiträgt und welche Auswirkungen diese nationalen Maßnahmen auf die Erreichung der Ziele bezüglich der Treibhausgasemissionsreduktion auf europäischer Ebene haben.

Um diese Forschungsfragen adäquat zu adressieren, wird zunächst der aktuelle Stand der Forschung bezüglich der Kohleausstiegsdiskussion beschrieben und dann werden mögliche Ausstiegsszenarien aufgezeigt. Anschließend werden die verwendete Methodik, das optimierende Energiesystemmodell Perseus-EU und die darin einfließenden Annahmen vorgestellt. Des Weiteren werden ausgewählte Ergebnisse zum zukünftigen Strommix in Deutschland, zu Kapazitäten im Vereinigten Königreich, zur Strompreisentwicklung und zu CO₂-Emissionen in verschiedenen Szenarien vorgestellt und diskutiert. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse sowie eine kritische Würdigung schließen die Arbeit ab.

Aktueller Stand der Forschung

Agora Energiewende veröffentlichte im Januar 2016 eine Studie [5], die ein Konzept zur Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors beinhaltet. Der vorgestellte Dekarbonisierungsprozess ermöglicht einen Kohleausstieg bis zum Jahr 2040. Unter anderem betont die Studie die Notwendigkeit eines Plans für die Stilllegung der bestehenden Kohlekraftwerke basierend auf ihren verbleibenden Lebensdauern und den Betriebskosten.

Im August 2015 veröffentlichte das Institut für Energie- und Klimaforschung am Forschungszentrum Jülich eine Studie [6] zum Kohleausstieg in Deutschland. Für die Anfertigung der Studie wurde auf ein Energiesystemmodell für Deutschland zurückgegriffen und auf drei verschiedene Szenarien angewendet. Im BAU-Szenario (Business-As-Usual) werden die Kraftwerke gemäß ihrer jeweiligen technischen Lebensdauer stillgelegt. Im Szenario COUT (Coal phase-OUT) werden Braunkohlekraftwerke bis 2030 und Steinkohlekraftwerke bis 2040 stillgelegt. Im dritten Szenario (CAP) werden die CO₂-Emissionen, die aus dem Szenario COUT hervorgehen, als Obergrenze für die CO₂-Emissionen verwendet, die Stilllegung der Kohlekraftwerke wird allerdings nicht erzwungen. Die modellbasierte Analyse ergibt, dass ein vorzeitiger Ausstieg aus der Kohle die CO₂-Emissionen zusätzlich reduzieren kann. Ein Vergleich der systemrelevanten Ausgaben in den beiden Szenarien COUT und CAP zeigt, dass das CAP-Szenario geringere Systemgesamtkosten aufweist. Eine zusätzliche Reduktion der CO₂-Emissionen im Szenario COUT erfolgt daher zu höheren Systemkosten verglichen mit dem CAP-Szenario. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass eine gleichmäßigere Verteilung der Reduktionsziele über alle Sektoren hinweg geringere Ausgaben zur Erreichung einer derartigen Reduktion zur Folge hat. Die auf diese Weise erreichte Reduktion ist jedoch nicht ausreichend, um die nationalen CO₂-Emissionsreduktionsziele Deutschlands einzuhalten.

Eine Studie [7] des Imperial College London hat die möglichen Auswirkungen der Erhaltung der Kohlekraftwerke in Großbritannien auf die CO₂-Reduktionsziele mit einem Zeithorizont bis 2030 analysiert. Hierfür wurde ein TIMES Modell des britischen Stromsektors verwendet. In keinem der untersuchten Szenarien werden die gesamten Kohlekapazitäten bis 2030 stillgelegt. Die Ergebnisse basieren auf zahlreichen Annahmen, wie beispielsweise Kapazitätzahlungen, keiner Windeinspeisung sowie 50 % freier Grenzkuppelkapazität in Spitzenlaststunden. Die resultierende Kohleintensität überschreitet sowohl das Ziel des Committee on Climate Change als auch die diesbezüglichen Prognosen des DECC. CO₂-Preise und andere Regulierungen in Bezug auf die CO₂-Emissionen reichen also nicht für einen vollständigen Ausstieg aus der Kohlekraft bis 2030 aus.

Zusammenfassend stellt sich heraus, dass keine der oben aufgeführten Studien das gesamte europäische Stromerzeugungssystem betrachtet. In der vorliegenden Studie wird der Untersuchungsgegenstand deshalb geographisch auf ganz Europa ausgeweitet und mithilfe eines langfristigen Optimierungsmodells analysiert. Unter anderem werden dabei die Auswirkungen eines deutschen und britischen Kohleausstiegs auf europäischer Ebene untersucht, um wesentliche Aspekte in die

Analyse miteinzubeziehen, wie beispielsweise die Rolle der europäischen Integration der Strommärkte sowie das mögliche „Carbon leakage“¹ in andere Länder als Konsequenz der nationalen Entscheidungen.

Annahmen und Methodik

Für die britischen Kohlekraftwerke ist ein detaillierter Zeitplan für die Stilllegung jedes einzelnen Blockes unter Berücksichtigung der aktuellen Ankündigungen der Kraftwerksbetreiber in die Modellierung integriert. Für Deutschland wurde ein derartiger Zeitplan noch nicht entwickelt, die große Anzahl an beteiligten Blöcken erschwert jedoch einen ähnlichen Ansatz beträchtlich. Deshalb werden mehrere Szenarien entwickelt, implementiert und mithilfe des Perseus-EU Modells analysiert [8].

Das Ausstiegsszenario betrachtet die vollständige Stilllegung aller bestehenden Kohlekraftwerke in Deutschland bis zum Jahr 2040, beginnend mit den ältesten Kraftwerken. Es wird angenommen, dass die ältesten Kraftwerke aufgrund geringerer Effizienz zuerst stillgelegt werden. Ein lineares Ausstiegsszenario mit einer festgelegten Stilllegung von jährlich 2,3 GW aus Braun- oder Steinkohle ist in das Modell integriert.

Neben dem Ausstiegsszenario wird ein Baseline-Szenario untersucht, in dem Investitionen in neue Braun- und Steinkohlekraftwerke zugelassen sind. Im dritten Szenario „Retrofit“ wird angenommen, dass die Lebensdauer der Kohlekraftwerke durch zusätzliche Investitionen um zehn Jahre verlängert werden kann. Die Option zur Verlängerung der Lebensdauer wird im Retrofitzenario endogen ausgewählt, wenn sie wirtschaftlich sinnvoll ist. Auch wenn sie nicht notwendigerweise realistisch sind, werden diese beiden Szenarien entwickelt, um die Auswirkungen des Kohleausstiegs komparativ ermitteln zu können.

Die Szenarien werden mithilfe des Perseus-EU Modells (Program package for Emission Reduction Strategies in Energy Use and Supply) untersucht. Das Perseus-EU Modell ist ein langfristiges Optimierungsmodell des europäischen Stromsektors, das einen Bottom-Up-Ansatz verfolgt. Das Ziel des Modells ist die optimale Planung von langfristigen Investitionen sowie des kurzfristigen Kraftwerkseinsatzes im Stromsektor. Das Modell basiert auf dem Ansatz der Minimierung der gesamten Systemausgaben unter Berücksichtigung von technischen, ökologischen und politischen Nebenbedingungen. Zu den wichtigsten Eingangsdaten zählen Investitionen in neue Erzeugungsblocke sowie betriebsabhängige Kosten für Energieträger, variable und fixe Betriebskosten der Kraftwerke und Laständerungskosten. Treibende Kraft für den Kapazitätsausbau und die Einsatzplanung ist die Deckung der exogen vorgegebenen Stromnachfrage.

Die geographische Auflösung des Modells umfasst den Stromsektor von 28 europäischen Ländern (EU28 ohne die Inseln Zypern und Malta, jedoch mit der Schweiz und Norwegen). Für die langfristige Kapazitätsausbauplanung wird der Analysehorizont von 2015 bis 2040 durch fünfjährige Perioden abgebildet. Unterjährig werden drei typische Tage (für die Jahreszeiten Winter und Sommer sowie für die Übergangsjahreszeiten) für die Beschreibung der Nachfrage

¹ Verlagerung von Treibhausgas emittierenden Tätigkeiten in Länder, die keinen oder nur geringen Klimaschutzauflagen unterliegen.

und die Optimierung des Kraftwerkseinsatzes verwendet. Jeder dieser Typtage weist eine stündliche Auflösung auf.

Neben diesen Annahmen beinhaltet der Modellrahmen Annahmen, welche die aktuelle Energiepolitik in Europa widerspiegeln. Dies betrifft z. B. den Ausbau von erneuerbaren Energien. Es wird angenommen, dass bis 2050 die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien einen Anteil von 80 % an der gesamten Stromproduktion Europas erreicht. Den erneuerbaren Erzeugungstechnologien werden je Land mehrere Ausbaupotentiale mit unterschiedlichen Kosten zugewiesen [9]. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass erneuerbare Energiequellen dort erschlossen werden, wo es wirtschaftlich am sinnvollsten ist. Somit kann unabhängig von nationalen Zielen ein gesamteuropäisches Ziel erreicht werden. Das politische Instrument des EU ETS wird nicht explizit über den Cap-and-Trade-Mechanismus im Modell abgebildet, jedoch fließt ein CO₂-Zertifikatspreis exogen in das Modell ein². Die Entwicklung des CO₂-Zertifikatspreises ist den Referenzszenarien der Europäischen Union [10] entnommen (10 €/t im Jahr 2020, 35 €/t im Jahr 2030, 79 €/t im Jahr 2040 und 100 €/t im Jahr 2050).

Die Brennstoffpreise fließen ebenfalls exogen in das Modell ein. Die Entwicklung ist den jüngsten Prognosen des Department of Energy and Climate Change [11] entnommen. CCS wird in dieser Studie nicht als Investitionsoption in Betracht gezogen.

Ausgewählte Ergebnisse

In allen Szenarien wird in Deutschland die sinkende fossile Erzeugung im Laufe der Zeit mehr und mehr durch erneuerbare Energien und durch höhere Importe kompensiert (siehe Abb. 1). Höhere Importe sind ein konsistentes Resultat in Anbetracht der hohen umwelttechnischen Einschränkungen in allen Szenarien (zum Beispiel durch hohe CO₂-Zertifikatspreise sowie Zielvorgaben für erneuerbare Energien). Ferner muss festgehalten werden, dass es im Modellierungsansatz nur ein europäisches, technologieneutrales Ziel für erneuerbare Energien und keine spezifischen Ziele für jedes Land gibt. Während der Ausbau der Windkraft in Deutschland die bevorzugte Option ist, wird in Ländern mit höherer Solarstrahlung verstärkt Photovoltaik ausgebaut. Mit spezifischen Investitionsvorgaben für Photovoltaik in Deutschland könnte sich das Resultat, dass Deutschland langfristig zum Importland wird, ändern.

² Bei Berücksichtigung der CO₂-Obergrenze des EU-ETS führen nationale Minderungsziele in der Regel nicht zu einer zusätzlichen europäischen Emissionsminderung.

Die CO₂-Emissionsreduktionsziele für Deutschland sehen vor, die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2020 um 40 % im Vergleich zu den CO₂-Emissionen aus dem Jahr 1990 zu reduzieren. Da sich die Transition zu erneuerbaren Energien am ehesten im Elektrizitätssektor gestalten lässt, wird erwartet, dass dieser überdurchschnittlich zur Emissionsreduktion beitragen kann. Der deutsche Stromsektor erreicht aber in allen betrachteten Szenarien dieses Reduktionsziel nicht (siehe Abb. 2). Ein Vergleich der CO₂-Emissionsmengen der drei Szenarien zeigt, dass die Emissionsreduktion auf lange Sicht im Ausstiegsszenario deutlich höher ist. Zudem ist zu beachten, dass die Reduktion der CO₂-Emissionen durch den forcierten Ausbau der erneuerbaren Energien und den angewendeten CO₂-Preis beeinflusst wird. Bei Annahme eines höheren CO₂-Zertifikatspreises könnten die Reduktionsziele eingehalten werden.

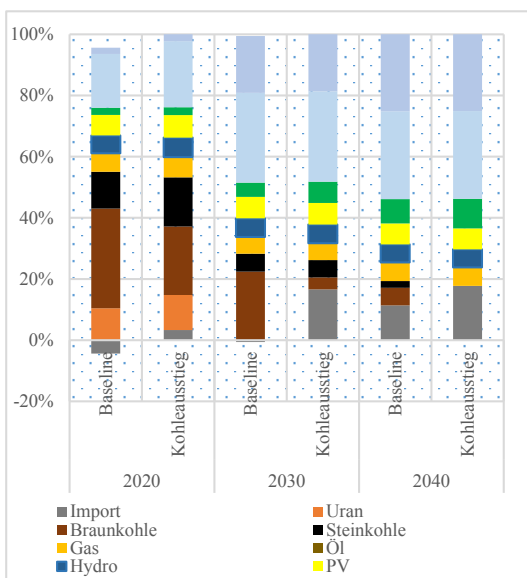


Abb. 1: Stromerzeugung in Deutschland.

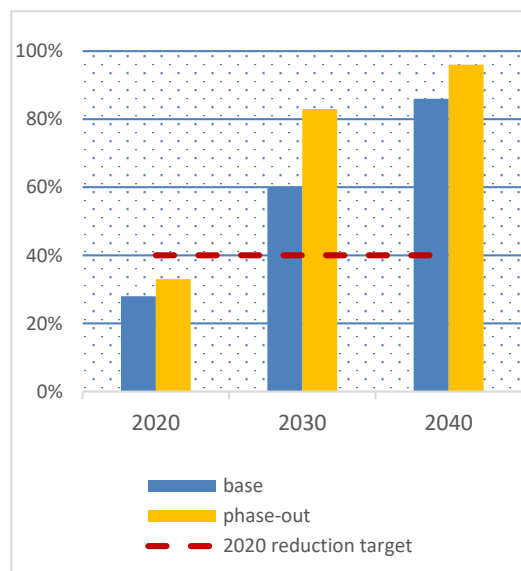


Abb. 2: CO₂-Emissionsreduktion im deutschen Stromsektor (im Vergleich zu 1990)

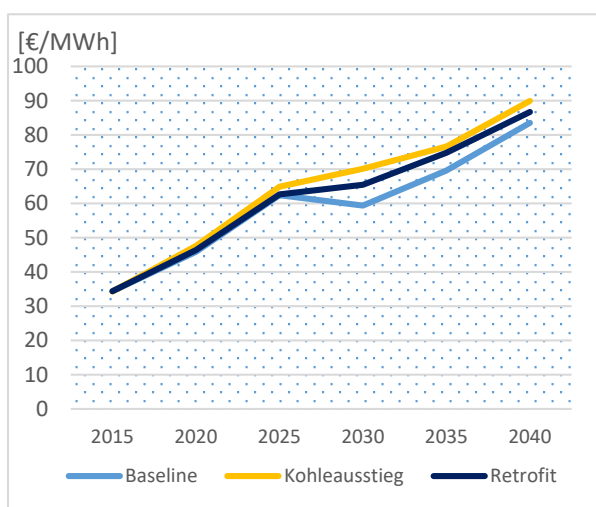


Abb. 3: Großhandelsstrompreise in Deutschland.

Die Großhandelsstrompreise in Deutschland steigen im Verlauf des Betrachtungshorizonts in allen Szenarien an (siehe Abb. 3). Dies ist hauptsächlich auf die angenommenen höheren Brennstoff- und CO₂-Zertifikatspreise zurückzuführen. Im Kohleausstiegsszenario ist der Anstieg etwas stärker, insbesondere ab 2025. Im Retrofitszenario werden Investitionen für eine Laufzeitverlängerung der Kraftwerke nur zu Beginn des Betrachtungshorizonts (etwa bis 2030) durchgeführt. Danach verhindern hohe CO₂-Preise Investitionen in Stein- oder Braunkohlekraftwerke. Im Basisszenario sind die resultierenden Strompreise niedriger, da auch in späteren Jahren in neue Steinkohle- und Braunkohlekapazitäten investiert werden kann, die geringere Grenzkosten als z. B. Gaskraftwerke aufweisen.

Die Auswirkungen eines Kohleausstiegs im Vereinigten Königreich haben ein deutlich geringeres Ausmaß als in Deutschland. Die installierten Kapazitäten betragen lediglich 20 GW im Vergleich zu 57 GW in Deutschland und die bestehenden Kohlekraftwerke sind im Schnitt älter. Im Vereinigten Königreich werden im Retrofitszenario u.a. aufgrund hoher Brennstoff- und CO₂-Zertifikatspreise keine Kohlekraftwerke durch Retrofitmaßnahmen nachgerüstet. Kohlekraftwerke werden hauptsächlich durch Windkraft ersetzt (siehe Abb 4), während Gaskraftwerke als Backup-Kapazität genutzt werden. Unter den gewählten Rahmenbedingungen und Modellannahmen werden auch vereinzelt Kernkraftwerke in beiden Szenarien in Betrieb genommen. Im Allgemeinen sind Unterschiede zwischen den Szenarien im Vereinigten Königreich kaum vorhanden. Die Entwicklung der Strompreise ist sehr ähnlich und auch die CO₂-Emissionen sind annähernd identisch.

Im Ausstiegsszenario gibt es lediglich eine geringe zusätzliche Reduktion der gesamteuropäischen CO₂-Emissionen (siehe Abb 5). Das Absinken der CO₂-Emissionen in Deutschland wird zum Teil durch erhöhte CO₂-Emissionen anderer Länder kompensiert. Demnach werden 50 % bis 70 % der zwischen 2020 und 2040 aufgrund des Kohleausstiegs zusätzlich reduzierten CO₂-Emissionen durch höhere Emissionen in anderen Ländern ersetzt.

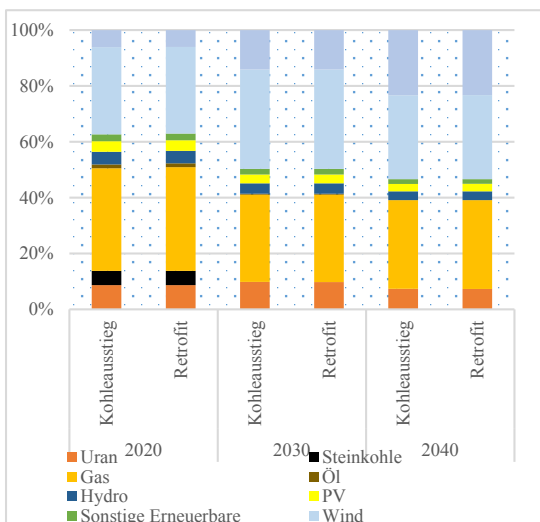


Abb. 4: Kapazitätsmix im Vereinigten Königreich.

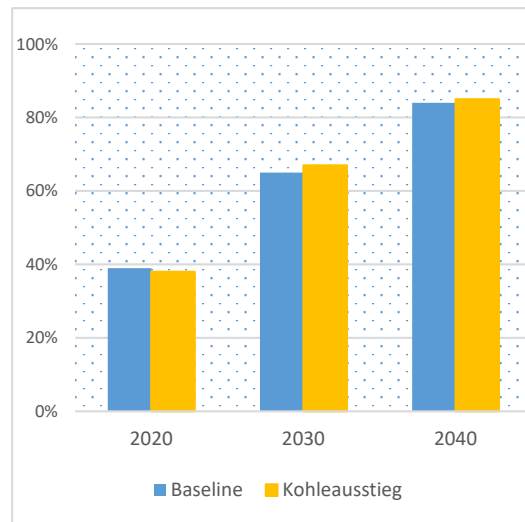


Abb. 5: CO₂-Emissionsreduktion im europäischen Stromsektor (im Vergleich zu 1990).

Fazit und kritische Würdigung

Die Modellanalyse verdeutlicht, dass in Deutschland die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen stark ansteigt und diese ab 2030 den höchsten Anteil an der Stromproduktion in allen Szenarien erreicht. Da die konventionelle Erzeugung aufgrund höherer CO₂- und Brennstoffpreise teurer wird, steigen die Großhandelsstrompreise im betrachteten Modellzeithorizont an. Ein früherer Stein- und Braunkohleausstieg führt zu höheren Produktionskosten und damit zu höheren Großhandelsstrompreisen. Ebenso führt der Kohleausstieg zu höheren Stromimporten. Trotz des Kohleausstiegs können im Ausstiegsszenario die CO₂-Reduktionsziele für 2020 unter den getroffenen Annahmen nicht erreicht werden. Dennoch weist dieses Szenario langfristig die höchste CO₂-Emissionsreduktion in Deutschland auf. Daher kann schlussgefolgert werden, dass ein Ausstieg aus der Kohlekraft in Deutschland auf lange Sicht eine Auswirkung auf die nationalen CO₂-Emissionen haben wird.

Des Weiteren kann festgehalten werden, dass in einem energiepolitischen und -wirtschaftlichen Rahmen, der bereits durch hohe CO₂-Preise und erneuerbare Ziele gekennzeichnet ist, ein vollständiger Kohleausstieg in Deutschland und im Vereinigten Königreich nur eine geringe zusätzliche Auswirkung auf die gesamteuropäischen CO₂-Emissionen hat. Ein Kohleausstieg in diesen beiden Ländern kann zu einem „Carbon leakage“ innerhalb Europas führen. Um eine zusätzliche Reduktion der Gesamtemissionen zu gewährleisten, sollte eine koordinierte CO₂- bzw. Kohlepolitik auf europäischer Ebene verfolgt werden.

Unter den getroffenen Annahmen zeigt die Modellanalyse, dass im Vereinigten Königreich ein Kohleausstieg im jeweiligen Szenario einen geringeren Einfluss auf den Stromgroßhandelspreis hat. Kohlekraftwerke werden durch eine höhere Winderzeugung sowie durch Gaskraftwerke als Backup-Kapazität ersetzt. Unter den gewählten Rahmenbedingungen werden auch vereinzelt Kernkraftwerke neu in Betrieb genommen. Bezüglich der Inbetriebnahme von Kernkraftwerken ist festzuhalten, dass in der vorliegenden Analyse keine Investitionsoptionen für CCS-Kraftwerke enthalten sind, die im Vereinigten Königreich durchaus eine Investitionsalternative darstellen.

Die wichtigsten Rahmenbedingungen dieser Studie sind zum einen die hohen CO₂-Preise und zum anderen ein technologieneutrales und europaweites Ausbauziel für erneuerbare Energien. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit sind daher unter diesen Kernannahmen zu betrachten. Des Weiteren ist diese Studie begrenzt auf eine kleine Anzahl an Szenarien. In folgenden Studien müssen unsichere Parameter wie CO₂- und Energieträgerpreise sowie Fluktuationen der Produktion aus erneuerbaren Energien noch detaillierter betrachtet werden. Die länderspezifischen Ausbauziele für erneuerbare Energien wurden bislang nicht abgebildet. Die Auswirkungen dieser Ziele auf die Ergebnisse sollten in zukünftigen Studien ebenfalls analysiert werden.

Das entwickelte Modellkonzept verfolgt einen „Perfect-Foresight“-Ansatz und eine zentrale Planungssicht. Die Marktineffizienzen und das strategische Verhalten der Marktteilnehmer werden nicht modelliert. Die vorgestellten Ergebnisse stellen eine wirtschaftliche Betrachtung mit dem Ziel der Minimierung der Systemausgaben dar. Es sind auch andere Modellierungsansätze, wie beispielsweise die Maximierung der Wohlfahrt, denkbar.

Darüber hinaus deckt das Modell nur den Stromsektor ab. Wechselwirkungen des Stromsektors mit anderen Energiesektoren stellen eine zusätzliche Notwendigkeit weiterer Forschung dar. Als ein Beispiel sind die Auswirkungen des Kohleausstiegs auf den Wärmesektor zu nennen, die aufgrund der Abschaltung von Kohle-KWK-Anlagen entstehen können.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Komplexität des Modells die Verwendung einer höheren zeitlichen Auflösung kaum zulässt. Aus diesem Grund sollten die Ergebnisse bezüglich des zukünftigen Kraftwerksparks, welcher zum Teil einen sehr hohen Anteil an erneuerbaren Energien besitzt, hinsichtlich der wetterbedingten Fluktuationen der Produktion validiert werden. Hierzu soll ein Einsatzplanungsmodell mit stündlicher Auflösung in zukünftigen Arbeiten entwickelt und mit dem jetzigen Modell gekoppelt werden, um den resultierenden Kraftwerkspark detaillierter zu analysieren. Mit dem Einsatzplanungsmodell sollen unter anderem die Fluktuationen der erneuerbaren Erzeugung und der Nachfrage sowie technische Restriktionen des Kraftwerkseinsatzes detaillierter modelliert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Department of Energy and Climate Change, Digest of United Kingdom Energy Statistics, London: National Statistics publication, 2015.
- [2] AG Energiebilanzen, Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern, Januar 2016.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende, November 2015.
- [4] Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung des Strommarktes (Strommarktgesetz), Drucksache 18/7317.
- [5] Agora Energiewende, Elf Eckpunkte für einen Kohlekonsens – Konzept zur schrittweisen Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors, Berlin, Januar 2016.
- [6] H. U. Heinrichs und P. Markewitz, A Coal Phase-out in Germany – Clean, Efficient and Affordable?, Energy Procedia 75, August 2015, pp. 2541-2547.
- [7] R. Gross, J. Speirs, A. Hawkes, S. Skillings und P. Heptonstall, Could retaining old coal lead to a policy own goal?, London: Centre for Energy Policy and Technology, Imperial College London, October 2014.
- [8] H. U. Heinrichs, Analyse der langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Energiesystem im europäischen Energieverbund, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2014.
- [9] Y. Scholz, Potenziale zusätzlicher erneuerbarer Elektrizität für einen Ausbau der Elektromobilität in Deutschland - Endbericht, Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2011.
- [10] Europäische Kommission, EU Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050 – Reference scenario 2013, December 2013.
- [11] Department of Energy and Climate Change, DECC 2015 Fossil Fuel Price Assumptions, London, November 2015.

Vergleichbarkeit des Energiebedarfs der Intralogistik in Distributionszentren

Wie kann der Energiebedarf von Distributionszentren vergleichbar ermittelt werden?

Dr.-Ing. Meike Braun

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL),

Gotthard-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-mail: Meike.Braun@kit.edu

Telefon: +49(0)721/608-48638

Zusammenfassung

Energieeffiziente Systeme nehmen in der heutigen Zeit einen immer größer werdenden Stellenwert ein. So werden z. B. neu entwickelte Produkte in Marketingkampagnen in der Intralogistikbranche im Vergleich zu Vorgänger- oder Konkurrenzprodukten immer häufiger mit verbesserter oder steigender Energieeffizienz beworben. [1] Die Berechnung und Angaben dieser Marketingwerte sind heutzutage aber individuell für bestimmte Einzelfälle erstellt. Damit können die angegebenen Vergleiche teilweise zu irreführenden Aussagen führen. Auch bei ersten Analysen und Gesprächen bei Industrieunternehmen wurde deutlich, dass zur Ermittlung und Vorhersage des Energiebedarfs von automatisierten Anlagen die aktuellen Energiebedarfe kaum bis gar nicht bekannt sind. Damit wird deutlich, dass in diesem Themenfeld noch Forschungsbedarf besteht.

In diesem Beitrag werden die Grundlagen zur Ermittlung des Energiebedarfs fördertechnischer Systeme mit Hilfe einer innovativen Methode aufgezeigt. Die entwickelte Vorgehensweise ermöglicht eine einfache und nachvollziehbare Durchführung mit zuverlässigen Ergebnissen in der Planungs-, Umsetzungs- und Modernisierungsphase. Kleine und mittelständige Unternehmen (KMUs) haben mit den Ergebnissen nun erstmalig die Möglichkeit, energieeffiziente Neuerungen für ihre Kunden transparent zu gestalten und damit CO₂-arme und ressourcenschonendere technische Anlagen zur Warenverteilung anzubieten. Die Ergebnisse bilden außerdem die Basis des FEM Leitfadens *Energy consumption – determination methods*. Der Leitfaden wird bis 2018 über die *European materials handling federation (FEM) international* veröffentlicht werden. Er liefert der Industrie eine einheitliche Vorgehensweise, um realistische und aussagekräftige Angaben des Energiebedarfs von Gesamt- oder Einzelsystemen beim Endkunden zu gewährleisten.

Stichworte: Energiebedarf, Leistung, Anschlussleistung, Distributionszentrum, Intralogistik, Leitfaden, Evaluation

Einleitung

Angesichts steigender Energiepreise, Ressourcenknappheit, verschärfter Umweltrichtlinien und einem zunehmenden Nachhaltigkeitsbewusstsein der Gesellschaft gewinnt das Thema Energieeffizienz in Industrie und Handel an Bedeutung. Als Bestandteil der Wirtschaft ist die Logistikbranche ebenfalls von diesem Umdenkprozess betroffen. Ihren wachsenden Stellenwert in der Handelswelt verdankt die Logistikbranche dem während der letzten Jahre angestiegenen Volumen von Güterströmen. Gesteigerte Anforderungen wie bspw. erhöhte Flexibilität, Dynamik, Schnelligkeit, ökologische Nachhaltigkeit und Energieeffizienz an das Logistiknetzwerk resultieren aus diesen Entwicklungen. Durch die Gestaltung umweltgerechter, ressourcen- und energieeffizienter Systemkomponenten trägt die „Grüne Logistik“ dazu bei, diesen gegenwärtigen Ansprüchen zu genügen. Der Einsatz energieeffizienter Systeme besitzt während der Entwicklung, Planung und Realisierung von Projekten einen immer höheren Stellenwert. [2]

Zur Prognose des Energiebedarfs automatisierter, intralogistischer Systeme existieren derzeit differierende Ansätze. Diese sind jedoch nicht branchenweit einheitlich abgestimmt, wodurch Firmen der Intralogistik eigene, undurchsichtige Werkzeuge zur Ermittlung des Energiebedarfs ihrer Lösungen verwenden. Insgesamt sind dadurch keine fundierten Vergleiche zwischen unterschiedlichen Lösungen möglich und Diskussionen vorprogrammiert.

Ausgangssituation

Die Ausgangssituation in der Ausschreibungsphase, z. B. von neuen Distributionszentren, sieht heutzutage folgendermaßen aus: Im Ausschreibungstext definiert der Kunde die wichtigen Anforderungen seines Projektes, z.B. die örtliche Lage des Wareneingangs oder Warenausgangs sowie die Durchsatzkapazität, d. h. wie viele Güter im Gesamtsystem verarbeitet, gelagert oder transportiert werden sollen. Danach erstellen Systemlieferanten ihre individuellen Lösungen, die sich im Systemlayout sowie in der technischen und strategischen Gestaltung unterscheiden, jedoch den Anforderungen des Angebots genügen. Die wichtigsten Kennzahlen dieser Angebote sind die realisierbare Durchsatzkapazität und die Investitionskosten der Gesamtlösung.

Aufgrund der Zunahme des Einsatzes energieeffizienter Systeme und der Steigerung des Nachhaltigkeitsgedankens nutzen einige Lieferanten bereits heute eine weitere Kennzahl in ihren Angeboten – der erwartete Energiebedarf. Dieser Energiebedarf wird jedoch nicht anhand eines Einheitsspiels berechnet, sondern je nach Anbieter, Lösung und Layout mit Hilfe des firmeneigenen Werkzeugs ermittelt. Damit können diese Größen nicht einheitlich von mehreren Angeboten verglichen werden.

Die Definition eines allgemeinen, standardisierten und damit vergleichbaren Zyklus zur Ermittlung des Energiebedarfs von Gesamtsystemen ist nicht trivial, da jedes Distributionszentrum sein spezifisches Layout besitzt. Je nach Kundenanforderung werden unterschiedliche Ladegüter oder verschiedene Massen transportiert. Es existieren andere Durchsatz- und Verweilzeiten oder variierende Flächen der verschiedenen Bereiche, z. B. des Lagers, Sorters. Die Vielfalt der För-

dertechnik des innerbetrieblichen Materialflusses nimmt auf Grund neuer Steuerungs- und Regelungstechniken kontinuierlich zu, sodass dadurch kaum noch Grenzen in den Realisierungsmöglichkeiten zu erkennen sind.

Zwar können Distributionszentren anhand immer wiederkehrender Prozesse charakterisiert werden, doch ist die technische Realisierung nie identisch. Dies soll am Beispiel des *Lager- und Kommissioniervorgangs* verdeutlicht werden. Die Prozessschritte sehen wie folgt aus: „Transport der Waren von der Bereitstellung des vorhergehenden Prozesses, die Einlagerung, die Lagerung und die Entnahme der Waren sowie die Entsorgung von Ladungsträgern bzw. Verpackungsmaterial. Beendet wird das Lagern und Kommissionieren mit der Bereitstellung der fertig entnommenen Ware. Eventuell erfolgt eine Umlagerung der Waren in einen anderen Lager- und Kommissionierbereich, der wiederum durch die Tätigkeiten Transport, Einlagerung, Lagerung und Entnahme durchgeführt wird.“ [3]

Die Aufgabe soll anhand des folgenden Fallbeispiels dargestellt werden: Eine Palette (1 to) mit vielen kleinen Ladungsträgern (25 Stück à 40 kg) wird am Wareneingang angeliefert. Sie soll im Hochregallager einige Zeit verweilen und abschließend den Warenausgang vereinzelt verpackt verlassen (siehe Abbildung 1).

Fall 1: Die Palette wird unverändert vom Wareneingang ins Hochregallager transportiert und dort mit einem Paletten-Regalbediengerät eingelagert. Nach einer Verweilzeit wird die gesamte Palette zum Kommissionierplatz gefahren, um dort vereinzelt zu werden. Dabei wird jeweils ein Ladegut von der Palette entnommen und danach wird die Palette wieder eingelagert. Dies geschieht so lange bis die Palette vollständig geleert ist und alle Ladegüter vereinzelt verpackt am Warenausgang liegen.

Fall 2: Die Palette wird am Wareneingang bereits vereinzelt und jeweils als einzelnes Ladegut von einem Behälter-Regalbediengerät eingelagert. Nach einer Verweilzeit werden die einzelnen Ladegüter direkt an den Kommissionierplatz gefahren und können dort direkt verpackt und zum Warenausgang weitergeleitet werden.

Fall 3: Die Palette wird am Wareneingang vereinzelt und als einzelnes Ladegut von einem Shuttle-System eingelagert. Auch hier erfolgt nach einer Verweilzeit die Fahrt der Ladegüter an den Kommissionierplatz und die Weiterleitung an den Warenausgang.

Für alle Fälle kann nun für ein exemplarisches Systemlayout der Energiebedarf ermittelt werden. Während bei Fall 1 ein schweres Paletten-Regalbediengerät mit einer Gesamtmasse von ca. 20 to bewegt werden muss, ist es in Fall 2 ein ca. 3-5 to schweres Regalbediengerät und in Fall 3 nur noch ein ca. 200 kg schweres Shuttle-Fahrzeug. Dementsprechend kann für Fall 1 ein Energiebedarf von ca. 13 kWh, für Fall 2 ca. 3 kWh und für Fall 3 von ca. 1 kWh berechnet werden (siehe Abbildung 1). Es wird deutlich, dass bei gleicher Prozessaufgabe der Einsatz der Technik einen erheblichen Unterschied mit sich bringt.

Mit diesem Beispiel soll deutlich werden, dass die Definition eines allgemeinen Zyklus, wie z. B. bei TV-Geräten oder PKWs, keinen Vorteil gegenüber der heutigen Situation bringt. Damit wäre

es dem Kunden ebenfalls nicht möglich für seine Lösung einen individuellen Energiebedarfswert zu erhalten und anhand der Kennzahl eine bessere Auswahl des Systemlieferanten zu treffen.

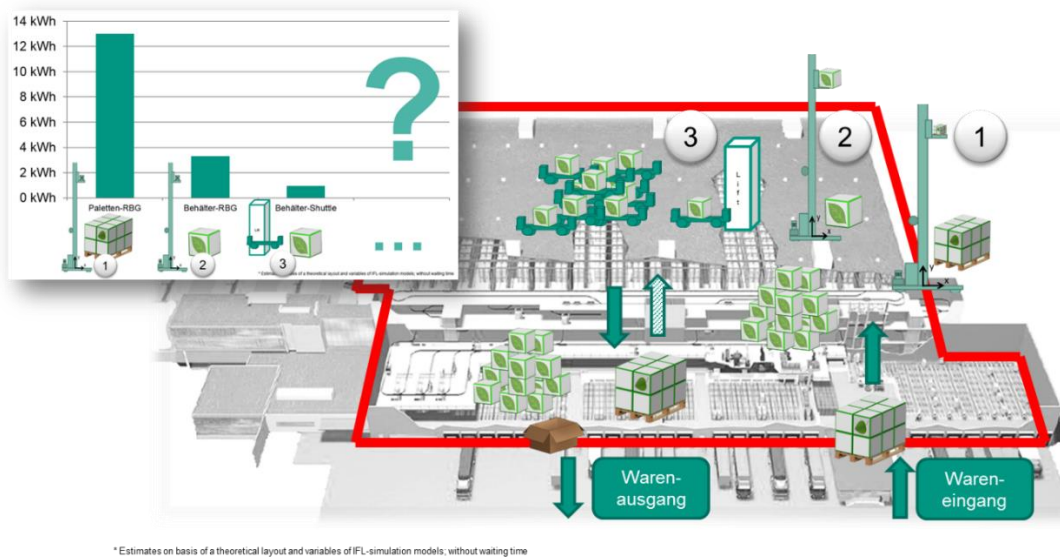


Abb. 1: Darstellung der Transportaufgabe von Fall 1, Fall 2 und Fall 3 mit den jeweils berechneten Energiebedarfen für ein theoretisches Layout.

Außerdem würden mit der Definition eines Standardzyklus energieeffiziente Produkte und Gesamtenergiekonzepte weiterhin nicht für den Kunden sichtbar sein. Wenn beispielsweise die häufigste Transportaufgabe des Kunden lautet: 1 to über eine Strecke von 500 m zu fahren, so benötigt er ein Förderzeug, das dafür den geeignetsten Energiebedarf bei entsprechenden Investitionskosten und unter Berücksichtigung des Gesamtsystems liefert.

Wenn nun ein Standardzyklus definiert wäre über die Aufgaben „Fahren“, „Heben“, „Senken“, „Neigen“ und „Lenken“, so beinhaltet diese Zahl bzw. die Energieeffizienzklasse mehr als die reine Transportfahrt. Wählt nun ein Kunde das Fördermittel ausschließlich aufgrund der entsprechenden Energieeffizienzklasse, z. B. „grün“ für Energieeffizienzklasse 1, anstelle der „rot“ für Energieeffizienzklasse 2, so kann es sein, dass bei der Durchführung seiner spezifischen Transportaufgabe das Förderzeug einen bedeutend schlechteren Wirkungsgrad und damit Energiebedarf hat als angegeben. Ist es nun also besser „grüne“ Fördermittel einzusetzen, die dann „rot“ betrieben werden, oder ab wie vielen „roten“ Fördermitteln, die aber energieeffizient betrieben werden, ist ein Gesamtsystem „schlecht“? Zur Vermeidung derartiger Fragestellung und zur Erhöhung der Sichtbarkeit energieeffizienter Produkte, die über den Gesamtlebenszyklus Energie einsparen, muss ein dem Kunden individuell entwickelter Zyklus je nach Angebot entwickelt werden.

Der Leitfaden „Energy consumption – determination methods“

Diese Fragestellung beschäftigt sich das Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) bereits seit einigen Jahren. Durch Forschungsarbeiten, wie z. B. [4], konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Energiebedarfsmodelle für Fördermodule, wie z. B. das Regalbediengerät, aufzustellen, mit realen Messdaten zu evaluieren und damit hinreichend genaue Ergebnisse zu bekommen. Diese Ergebnisse wurden in der Forschungsgemeinschaft und den Fachausschüssen der Branche vorgestellt und fanden großes Interesse.

Daraufhin beauftragte die *European materials handling federation* (kurz: FEM) der Produktgruppe Intralogistik das IFL einen Leitfaden gemeinsam mit den marktführenden Industrieunternehmen zu entwickeln, um damit ein branchenweites gemeinsames Verständnis zu erarbeiten.

Der Leitfaden *Energy consumption – determination methods* basiert primär auf dem Bottom-up Ansatz, d. h. über eine Detailbetrachtung einzelner Fördermodule können die jeweiligen Energiebedarfe berechnet und zu Sub- bzw. Gesamtsystemen zusammengesetzt werden. Der Leitfaden ist in Form von 19 Kapiteln aufgebaut. Nach Einleitung und Ziel folgt das Kernkapitel *Determination process*. Der Ablaufplan zur Ermittlung und ggf. Evaluation des Energiebedarfs des kundenindividuellen Szenarios, dem „EcoDeMISE (kurz für **E**nergy **c**onsumption – **D**etermination **M**ethods of Intralogistics **S**ystems and **E**quipment)“-Szenario, ist in Abbildung 2 zu sehen.

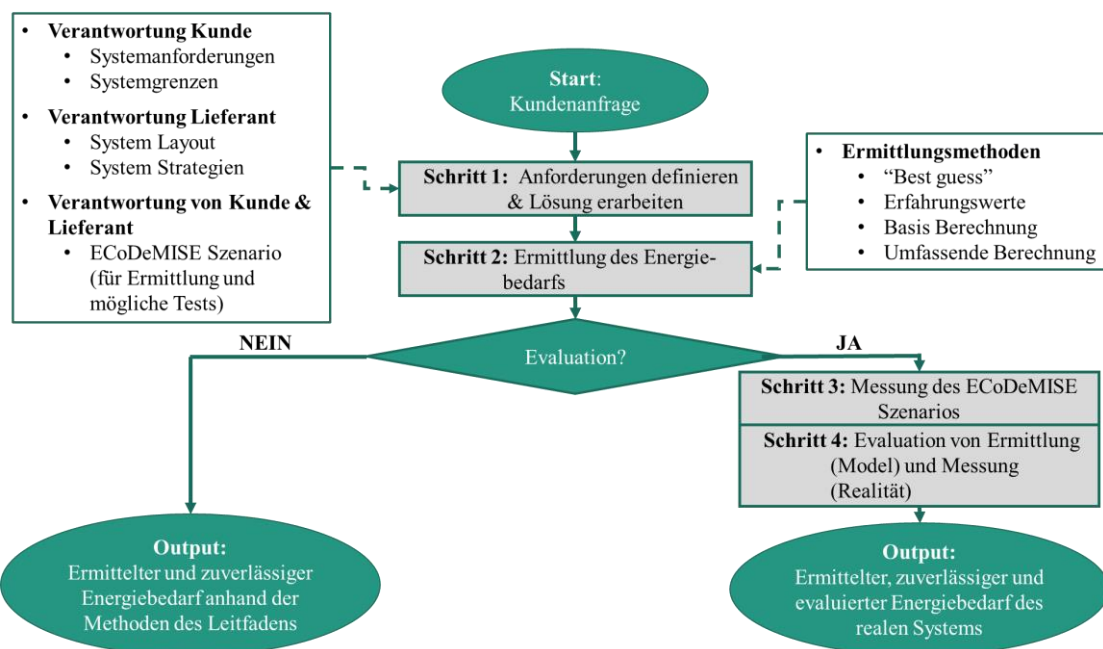


Abb. 2: Ablaufplan zur Ermittlung und Evaluation des Energiebedarfs im Leitfaden *Energy consumption – determination methods*.

Nach der Kundenanfrage werden im ersten Schritt die jeweiligen Anforderungen definiert, d. h. was soll das System können, wie sieht die Systemgrenze aus. Danach kann der Lieferant eine Lösung entwickeln, die aus einem technischen Layout sowie den strategischen Betriebsszenarien besteht. Gemeinsam definieren Kunde und Lieferant daraufhin den *EcoDeMISE* Zyklus, für den der Lieferant den Energiewert ermitteln kann.

Zur Ermittlung stehen vier Methoden zur Auswahl:

- *Best Guess*: Damit ermittelt der Lieferant den Energiewert ausschließlich aufgrund seiner Erfahrung.
- *Erfahrungswerte*: Der Lieferant hat bereits einige Messungen durchgeführt und schließt daraufhin auf den Energiewert des abgestimmten Zyklus.
- *Basis Berechnung*: Im Leitfaden sind dem Lieferanten Formeln angegeben, die mit einer geringen Parameteranzahl einen Energiewert liefern.
- *Umfassende Berechnung*: Mit diesen Formeln ist eine ausführliche und detaillierte Berechnung möglich, die das höchste Maß an Genauigkeit liefert.

Nach der Ermittlung kann der Wert mit realen Messdaten evaluiert werden. Hierzu sind im Leitfaden Erläuterungen und Vorgehensweisen zusammengefasst.

Ausblick

Der Leitfaden wird bis 2018 über die FEM international veröffentlicht werden. Damit kann der heutigen Herausforderung bzgl. Energiekosten und -bedarfe in der Ausschreibungsphase begegnet werden und energieeffiziente und neuartige Technik wertvoller gemacht werden.

Zur Umsetzung und Anwendung der Richtlinie werden bereits Schulungskonzepte sowie praktische Anwendungsfälle und Demonstratoren entwickelt. Diese werden nach Veröffentlichung des Leitfadens entsprechend angeboten. Interessierte wenden sich direkt an Frau Dr.-Ing. Braun.

Danksagung

Das IFL bedankt sich für die Möglichkeit der Entwicklung der Richtlinie bei der FEM und dem VDMA und ganz herzlich bei allen beteiligten Industriepartnern für die großartige Zusammenarbeit während der Erstellung.

Literaturverzeichnis

- [1] DENA - Deutsche Energieagentur: Ratgeber Fördertechnik für Industrie und Gewerbe. In: Initiative EnergieEffizienz (2010).
- [2] VDI 3633-1; Verein Deutscher Ingenieure. (Hrsg.): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Grundlagen Blatt 1. Beuth Verlag, Düsseldorf, 2010.
- [3] Wisser, Jens: Der Prozess Lagern und Kommissionieren im Rahmen des Distribution Center Reference Model (DCRM), Technische Universität Karlsruhe, Dissertation, 2009.
- [4] Braun, Meike Sophie Anna: Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2016.

Numerische Simulation der Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion bei Flugtriebwerken mit hohem Nebenstromverhältnis: Stand der Forschung

Marc C. Keller, Corina Schwitzke, Hans-Jörg Bauer

*Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Karlsruher Institut für Technologie, 76131 Karlsruhe, Deutschland
E-mail: marc.keller@kit.edu
Telefon: +49(0)721/608-43242*

Zusammenfassung

Anforderungen aus der Flugtriebwerksentwicklung erfordern eine noch effizientere Gestaltung des Ölsystems zur Kühlung und Schmierung von schnelllaufenden Untersetzungsgetrieben. Deshalb unternehmen Wissenschaftler weltweit Anstrengungen, um die bei hohen Drehzahlen angewandte Ölstrahlschmierung und -kühlung zu erforschen. Fortschritte bei den CFD Methoden und gestiegene Rechenkapazitäten führen zu einem gesteigerten Einsatz numerischer Methoden zur Untersuchung der Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion, wobei hauptsächlich die Volume-of-Fluid und die Smoothed Particle Hydrodynamics Methode eingesetzt werden. In diesem Übersichtsartikel wird der Stand der Forschung in diesem Bereich dargestellt und die Vor- und Nachteile der eingesetzten Methoden skizziert.

Stichworte: Turbinen-Luftstrahl-Triebwerke, Getriebefan, Ölsystem, Ölstrahlschmierung und -kühlung, Zweiphasenströmung, Smoothed Particle Hydrodynamics, Volume-of-Fluid, CFD

Einleitung

Marktprognosen sagen der zivilen Luftfahrt ein starkes Wachstum vorher. Im Vergleich zu 2015 soll sich das Passagierzahlaufkommen bis 2035 von 3,8 auf 7,2 Milliarden nahezu verdoppeln [1]. Dies geht einher mit der Erneuerung und Erweiterung der Flugzeugflotten aller Airlines. So sollen im selben Zeitraum ca. 34.000 neue Flugzeuge ausgeliefert werden, was einem Triebwerksbedarf von etwa 85.000 produzierten Triebwerken entspricht. Unter diesen ökonomischen, ökologischen und politischen Rahmenbedingungen definierte die ACARE¹ die Vision Flightpath 2050, durch welche eine verbindliche Reduzierung der Emissionen durch den Flugverkehr vorgeschrieben wird. Die ambitionierten Ziele sehen bis 2050 eine Reduzierung im Vergleich zum Jahr 2000 der CO₂-Emissionen um 75 %, der NO_x-Emissionen um 90 % und der Lärmemissionen

¹ Advisory Council for Aeronautics Research in Europe

um 65 % vor. Auf Triebwerksherstellern lastet deshalb der Druck durch technologische Neuerung die Emissionen, den Treibstoffverbrauch und die Lärmentwicklung neuer Triebwerke drastisch zu senken.

Aus technologischer Sicht zeichnen sich im Wesentlichen zwei Hauptentwicklungstendenzen ab: Zum einen die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades η_{th} durch das Erreichen höherer Turbineneintrittstemperaturen und höherer Gesamtdruckverhältnisse und zum anderen die Verbesserung des Vortriebswirkungsgrades η_v durch größere Nebenstromverhältnisse (engl.: bypass ratio (BPR)). Wie in Abb. 1 illustriert, definiert das Nebenstromverhältnis

$$BPR = \frac{\dot{m}_{Nebenstrom}}{\dot{m}_{Primärstrom}} \quad (1)$$

die Relation zwischen dem am Kerntriebwerk vorbei geleiteten Nebenstrom zum am thermodynamischen Prozess teilnehmenden Luftmassenstrom (Primärstrom).

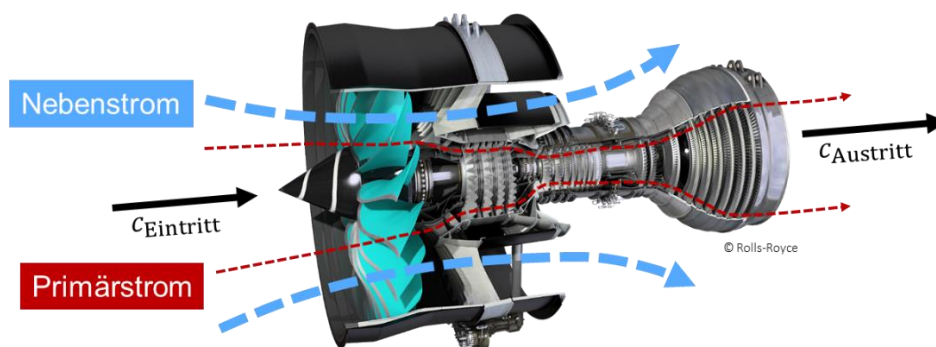


Abb. 1: Triebwerksschnitt mit Illustrierung des Nebenstromverhältnisses.

Eine BPR-Erhöhung wirkt sich positiv auf den Gesamtwirkungsgrad ($\eta = \eta_{th} \times \eta_v$) aus, da die mittlere Austrittsgeschwindigkeit $c_{Austritt}$ verringert und somit die Verlustleistung in Form von Strahlleistung reduziert wird. Aktuelle Triebwerke besitzen ein BPR bis ca. 10. Eine weitere Erhöhung, welche mit einer Durchmesserzunahme der Fanstufe (türkis in Abb. 1) verbunden ist, ist durch die Umfangsgeschwindigkeit der Fanschaufeln limitiert. Treten an den Schaufelspitzen hohe Überschallgeschwindigkeiten auf, nehmen Verluste und Lärmemissionen stark zu. Um dieses Problem zu umgehen, wurde der sogenannte Getriebefan konzipiert. Durch eine konzeptionelle Änderung, der Integration eines Untersetzungsgetriebes, kann die Drehzahl des Fans und der Niederdruckwelle entkoppelt werden. Dies ermöglicht eine weitere Erhöhung des BPR bis ca. 15 und gleichzeitig den Betrieb des Kerntriebwerks bei optimierten Drehzahlen. Das Konzept ist attraktiv, da es eine Treibstoffeinsparung von bis zu 20-30 % verspricht und gleichzeitig die Lärmemissionen drastisch verringert [2].

Als neue Systemkomponente stellt das Getriebe jedoch neue Herausforderungen an die Entwickler. Insbesondere die Kühlung und Schmierung des Getriebes stellt eine Kernproblematik dar.

Diese erfolgt bei den schnelllaufenden Getrieben durch Ölstrahlen, welche in Zahnradnähe eingebracht werden. Die Interaktion der Ölstrahlen mit den Zahnradoberflächen beeinflusst die Kühlwirkung, die Schmierung und die weitere Ölausbreitung im Getriebe entscheidend. In der Literatur ist diese Wechselwirkung jedoch nur wenig erforscht. Die Anforderungen aus der Luftfahrt haben hier in den letzten Jahren vermehrt Forschungsaktivitäten hervorgerufen. Da die Vorgänge beim Aufprall der Ölstrahlen in sehr kurzen Zeitskalen stattfinden, sind experimentelle Untersuchungen schwierig. „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) bietet hier die Möglichkeit die Vorgänge detailliert zu erfassen, jedoch ist die Berechnung der Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion extrem aufwändig. Erst in den letzten Jahren sind die numerischen Methoden und die verfügbaren Rechenleistungen soweit verbessert worden, dass erste Simulationen in der Forschung durchgeführt wurden. Die wichtigsten Erkenntnisse und eingesetzten Methoden werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit präsentiert.

Öl-Zahnrad-Interaktion (ÖZI)

Die Anordnungsmöglichkeiten der Öldüsen sind in der Abb. 2 schematisch dargestellt. So kann generell zwischen einer Einspritzung vor (into-mesh) und nach (out-of-mesh) dem Zahnradeingriff unterschieden werden. Je nach räumlicher Ausrichtung kann zudem unterschieden werden, ob die Ölstrahlen in den Zahnradeingriff ($M_{im/oom}$) oder etwas entfernter davon ($R_{im/oom}$) eingedüst werden. Bei allen Anordnungen ist die Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion (ÖZI) maßgeblich für den weiteren Strömungsweg des Öls verantwortlich, weshalb intensive Bestrebungen existieren die Strömungsphänomene genauer zu charakterisieren.

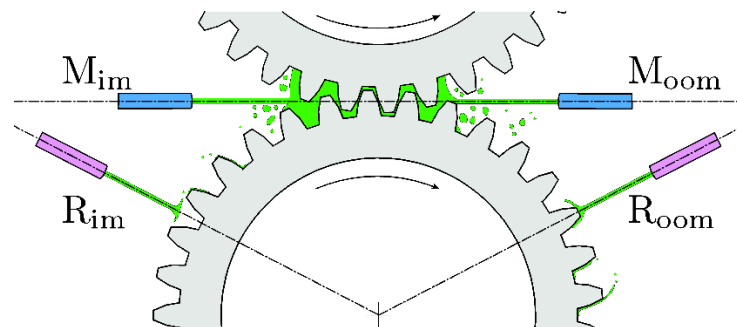


Abb. 2: Varianten der Ölstrahleinspritzung. Links vor dem Zahnradeingriff (into-mesh) und rechts nach dem Zahnradeingriff (out-of-mesh).

Die für den Entwickler wichtigsten Fragestellungen zur ÖZI können dabei unterteilt werden in

- Verlustentstehung und -anteil durch ÖZI,
- Ölfilmqualität zur Sicherstellung ausreichender Schmierung,
- Kühlwirkung durch Ölstrahleinspritzung und thermisches Verhalten der Zahnräder und
- Verteilung des Öls während und nach dem Aufprall und im Zahnradeingriff.

Durch den Erkenntnisgewinn kann das System optimiert werden, d.h. beispielsweise kann durch eine geschickte Anordnung und Ausrichtung der Düsen die Kühlleistung erhöht, das eingesetzte Ölvolumen reduziert und Verluste minimiert werden. Dies wirkt sich direkt positiv auf den Gesamtwirkungsgrad aus. Zur Analyse der dafür relevanten Strömungsprozesse ist die Erfassung der detaillierten Strömungsstrukturen im Nahbereich der Zahnradoberfläche notwendig. Dies gilt insbesondere für Untersuchungen der Kühlwirkung, da benetzte Flächen, Filmdicken und Ölgeschwindigkeiten sich direkt auf den Wärmeübergangskoeffizienten auf den Zahnflanken auswirken.

Aus numerischer Sicht ist die detaillierte Modellierung der ÖZI herausfordernd. Dies liegt unter anderem an der komplexen Zweiphasenströmung (vgl. Abb. 2), bei der das Öl durch die Interaktion mit dem schnell drehenden Zahnrad einem hohen Impulsaustausch ausgesetzt ist und es zu starken Deformationen der freien Oberfläche kommt. Zudem ist das Dichteverhältnis der Fluide mit $\rho_{\text{Öl}}/\rho_{\text{Luft}} \geq 900$ hoch und die charakteristischen Längenskalen befinden sich zwischen mehreren mm (Zahnhöhe) und wenigen μm (Filmdicke und Spalt im Zahnradeingriff). Eine besondere Herausforderung ist die Modellierung der Zahnradbewegung, sprich allgemein von deformierenden Rechengebieten. Die in der Literatur verwendeten Modelle um diese Herausforderungen zu bewältigen werden im Weiteren vorgestellt.

Einsatz von CFD zur Simulation der ÖZI

Strömungen können durch die Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichung beschrieben werden. Der Satz partieller Differentialgleichungen wird durch eine Zustandsgleichung geschlossen. Um die im vorigen Abschnitt beschriebenen ÖZI numerisch zu berechnen, werden in der Literatur im Wesentlichen zwei unterschiedliche CFD Ansätze verfolgt. Zum einen wird die gitterbasierte Finite Volumen Methode (FVM) mit dem Volume-of-Fluid (VoF) Ansatz und zum anderen die partikelbasierte Smoothed-Particle-Hydrodynamics (SPH) Methode zur numerischen Lösung der Erhaltungsgleichungen und der Modellierung der Zweiphasenströmung eingesetzt. Die Unterschiede sollen hier kurz erläutert und im Anschluss die durchgeführten Simulationen vorgestellt werden.

Bei der **FVM** wird die Euler'sche Betrachtungsweise der Strömungsmechanik angewandt und im Raum feste Diskretisierungspunkte verwendet, welche das Rechengitter bilden. Durch Bilanzierung an den Gitterzellwänden kann das Strömungsfeld bestimmt werden. Der VoF Ansatz [3] dient zur Modellierung von Mehrphasenströmungen. Wie in Abb. 3 dargestellt, wird jeder Gitterzelle eine Farbfunktion $C \in [0,1]$ zugewiesen und neben den Grundgleichungen zeitlich advectiert. Da die Zellen im Allgemeinen nicht entlang der Phasengrenzfläche ausgerichtet sind, kommt es zu unerwünschten Diffusionseffekten an der Phasengrenzfläche. Die Größe der Diffusion hängt stark von der Gittergröße an der Grenzfläche ab, weshalb oft eine adaptive Netzverfeinerung (AMR) an der Grenzfläche eingesetzt wird, um somit die Genauigkeit der notwendigen Grenzflächenrekonstruktion zu erhöhen. Durch die Knüpfung an das starre Rechengitter, ist die Realisierung von deformierenden Rechengebieten aufwändig, kann aber z. B. durch Glättung oder Neuvernetzung des Netzes in bestimmten Zeitintervallen oder die Kopplung zweier Gebiete durch

ein „sliding interface“ erreicht werden. Eine andere Möglichkeit bietet die Chimera („overset grid“) Methode, bei der die Lösungsvariablen zwischen mehreren überlappenden Netzen interpoliert werden. Die Methodik ist in kommerziellen und quelloffenen Softwarepaketen verfügbar und findet breite Anwendung.

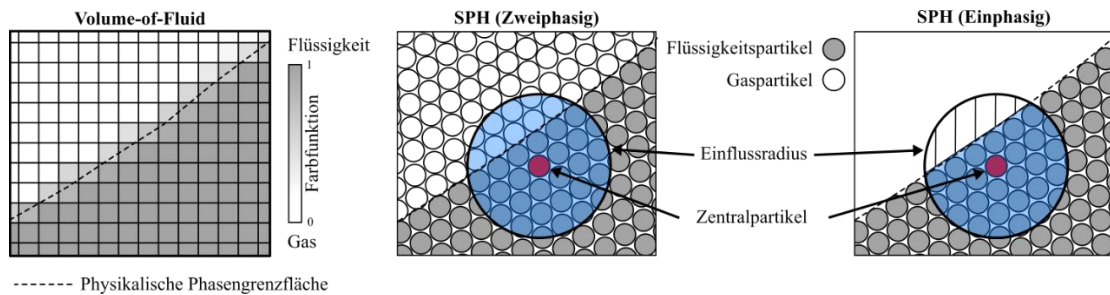


Abb. 3: Veranschaulichung der räumlichen Diskretisierung an einer Phasengrenzfläche für die FVM/FoV Methode (links), die zweiphasige SPH Methode (Mitte) und die einphasige SPH Methode (rechts).

Die **SPH** Methode hat ihre Ursprünge in der Astrophysik und basiert auf einer Lagrange'schen Beschreibung der Strömung [4]. Dabei sind die Stützpunkte (Partikel) im Raum nicht fest, sondern bewegen sich mit der jeweiligen Geschwindigkeit mit der Strömung mit. Zur Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen werden die Strömungsgrößen an einem Partikel durch eine Interpolation über die innerhalb eines Einflussradius befindlichen Nachbarpartikel bestimmt (siehe Abb. 3 (Mitte)), wobei nahe Partikel durch eine glockenförmige Gewichtungsfunktion (Kernel) stärker gewertet werden. Zur Simulation von Strömungen mit freien Oberflächen ist die Methodik attraktiv, da sich die Phasengrenzfläche inhärent durch die Partikelbewegung einstellt und keine Diffusion auftritt. Außerdem können deformierende Rechengebiete durch die beweglichen Partikel effizient realisiert werden. Um Rechenzeit einzusparen, kann eine einphasige SPH Variante (vgl. Abb. 3 (rechts)) eingesetzt werden. Dabei wird die Gasphase vernachlässigt, Oberflächenspannungen können aber weiterhin abgebildet werden.

Numerische Untersuchungen der ÖZI betrachten meist die Interaktion eines einzelnen Ölstrahls mit einem einzelnen rotierenden Zahnrad. Dies ist bedingt durch den geringeren Rechenaufwand für diese Konfiguration, allerdings bietet diese auch eine bessere Trennung der Effekte.

Yazdani und Soteriou [5] untersuchten einen entgegen und einen entlang der Zahnradbewegung ausgerichteten Ölstrahl unter Verwendung der VoF Methodik (ANSYS Fluent®). Das Rechenetz wird dabei nach jedem Zeitschritt entsprechend der Zahnradbewegung durch eine Laplace'sche Glättung angepasst. Der Fall dient den Autoren als Testfall eines entwickelten Modells zur Simulation des thermofluidodynamischen Verhaltens von Getrieben. In Abb. 4a ist zu sehen, dass durch eine einstufige adaptive Netzverfeinerung (unten) deutlich mehr Ölstrukturen aufgelöst werden.

Fondelli et al. [6, 7] verwendeten ebenfalls die VoF Methodik (ANSYS Fluent®) für die Simulation der ÖZI eines einzelnen radial ausgerichteten Ölstrahls und einem Zahnrad. Fokus der Arbeit

ist die Verifizierung der eingesetzten AMR Verfahren anhand der resultierenden Widerstandsmomente. Zudem wird der Einfluss des Anstellwinkels des Ölstrahls auf das Widerstandsmoment für zwei Winkel untersucht. Die Modellierung der Zahnradrotation erfolgt über ein „sliding interface“, bei welchem eine innere rotierende Gitterzone (Annulus) an einer äußeren statischen Zone abgeleitet. Dieses kann eingesetzt werden, da die Grenzfläche über den Simulationsverlauf bestehen bleibt.

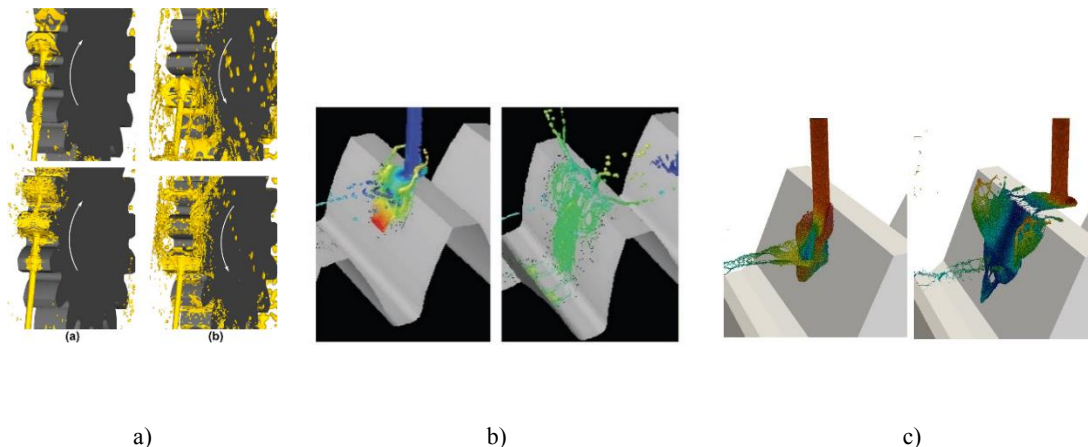


Abb. 4: Auszug der Simulationsergebnisse von a) Yazdani und Soteriou [5] (VoF), b) Fondelli et al. [6] (VoF) und c) Keller et al. [8] (SPH).

Keller et al. [9, 8] verfolgen Untersuchungen mit der SPH Methode. In [9] wird die zweiphasige SPH Variante zur Simulation eines radial auf ein Zahnrad ausgerichteten Ölstrahls eingesetzt. Um den Detaillierungsgrad im interessierenden Bereich (Aufprall) zu erhöhen wird das Rechengebiet durch Verwendung von rotationsperiodischen Randbedingungen zu einem Zahnradsegment reduziert. Die Zahnradbewegung wird direkt den Wandpartikeln aufgeprägt. In einem 2D Vergleich zu äquivalenten VoF Simulationen werden übereinstimmende Strömungsstrukturen und Geschwindigkeiten bei geringerem Rechenaufwand festgestellt. Die einphasige SPH Variante wird in [8] für die Simulation der ÖZI eingeführt. In einem Vergleich zu Ergebnissen der VoF und zweiphasigen SPH Methodik wurde die Anwendbarkeit für den Anwendungsfall gezeigt. Wie in Abb. 4c zu sehen, wird zudem der Aufprallvorgang des Ölstrahls analysiert und charakteristische Phänomene identifiziert. Eine Variation des Ölstrahlwinkels zeigt den Einfluss auf die Ölverteilung auf den Zahnflanken.

Die Simulation der ÖZI unter Berücksichtigung des Zahnradeingriffs ist zum Entstehungszeitpunkt dieses Artikels nicht bekannt. Von den vorgestellten Arbeiten ist nur die Methodik von Yazdani und Soteriou [5] und von Keller et al. [9, 8] prinzipiell anwendbar, da das „sliding interface“ nicht kompatibel mit dem Eingriff ist. Die Verwendung von VoF mit Gitterglättungs- und Neuvernetzungsalgorithmen (ähnlich zu [10]) oder dem Chimera („overset grid“) Ansatz stellt eine Modellierungsmöglichkeit für zukünftige Arbeiten mit gitterbasierten Methoden dar. Da die partikelbasierte SPH Methodik jedoch eine deutlich effizientere Modellierung erlaubt, ist diese sehr attraktiv für den Anwendungsfall und potentiell vielversprechender.

Zusammenfassung

Die Notwendigkeit zum weiteren Verständnisaufbau der ÖZI wurde durch die Entwicklungstendenzen bei zivilen Turbinen-Luftstrahl-Triebwerken und der Einführung des Getriebefankonzeptes dargelegt. Es wurden die Schwierigkeiten und Zielsetzungen numerischer Arbeiten zur ÖZI skizziert und die eingesetzten Methoden vorgestellt. Die etablierte, gitterbasierte VoF Methode findet bei zwei Forschungsgruppen Verwendung [5, 6, 7], während die Partikelmethode SPH in [9, 8] eingeführt wird. Der Wärmeübergang wird nur in [5] erfasst. Alle Untersuchungen beschränken sich auf die Simulation eines Ölstrahls, der mit einem einzelnen Zahnrad interagiert. Für zukünftige Arbeiten mit Zahnradeingriff stellt die SPH Methode den attraktivsten Ansatz dar. Die VoF Methode kann mit Netzanpassungsalgorithmen oder dem Chimera Ansatz unter vermutlich höherem Rechenaufwand eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] (JADC) Japan Aircraft Development Corporation, „Worldwide Market Forecast 2016 – 2035,“ 05 2017. [Online]. Available: <http://www.jadc.jp/en/data/forecast/> .
- [2] J. Kurzke, „Fundamental Differences Between Conventional and Geared Turbofans,“ in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air*, 2009.
- [3] C. W. Hirt und B. D. Nichols, „Volume of Fluid (VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries,“ *Journal of Computational Physics*, Bd. 39, pp. 201-205, 1981.
- [4] J. J. Monaghan, „Simulating Free Surface Flows with SPH,“ *Journal of Computational Physics*, Bd. 110, pp. 399-406, 2 1994.
- [5] M. Yazdani und M. C. Soteriou, „A novel approach for modeling the multiscale thermo-fluids of geared systems,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 72, pp. 517-530, 2014.
- [6] T. Fondelli, A. Andreini, R. Da Soghe, B. Facchini und L. Cipolla, „Volume of fluid (VOF) analysis of oil-jet lubrication for high-speed spur gears using an adaptive meshing approach,“ in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*, 2015.
- [7] T. Fondelli, A. Andreini, R. Da Soghe, B. Facchini und L. Cipolla, „Numerical Simulation of Oil Jet Lubrication for High Speed Gears,“ *International Journal of Aerospace Engineering*, 2015.
- [8] M. C. Keller, S. Braun, L. Wieth, G. Chaussonnet, T. F. Dauch, R. Koch, C. Schwitzke und H.-J. Bauer, „Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation of Oil-jet Gear Interaction,“ in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (Accepted)*, 2017.
- [9] M. C. Keller, S. Braun, L. Wieth, G. Chaussonnet, T. Dauch, R. Koch, C. Höfler und H.-J. Bauer, „Numerical Modeling of Oil-Jet Lubrication for Spur Gears using Smoothed Particle Hydrodynamics,“ in *Proceedings of the 11th International SPHERIC Workshop*, 2016.

- [10] M. Yazdani, M. C. Soteriou, F. Sun und Z. Chaudhry, „Prediction of the thermo-fluids of gearbox systems,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 81, pp. 337-346, 2015.

Untersuchungen zum Energieeinsparpotenzial von feuchtespeichernden Innenputzen

Michael Kleber

Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-mail: michael.kleber@kit.edu

Telefon: +49(0)721/608-46441

Zusammenfassung

Gegenstand der Untersuchungen ist der Nutzerkomfort bei feuchtwarmen Innenraumbedingungen und die Fragestellung, inwieweit ein Innenputz mit verbesserten Feuchtespeichereigenschaften diesen beeinflussen kann. Für die Festlegung von Komfortkriterien werden eigene Probandenversuche durchgeführt und ausgewertet. Es wird gezeigt, dass in Hinblick auf sommerliche Obergrenzen der Luftfeuchte der Komfortbereich aus der Normung sinnvoll erweitert werden kann. Anhand von Gebäudesimulationen wird untersucht, welche Energieeinsparung verbesserte Putze in Hinblick auf die Entfeuchtung erreichen können. Bisherige Ergebnisse zeigen, dass theoretisch Einsparungen möglich sind, sich diese jedoch in einem kleinen Rahmen bewegen. Die Verwendung eines mit größerem Aufwand hergestellten – und damit auch teureren – Putzes scheint daher aus Gründen der Energieeinsparung allein nicht begründbar zu sein.

Stichworte: Klimawandel, Gebäude, Thermischer Komfort, Innenraum, feuchteregulierend, Innenputz

Einleitung

Im Rahmen des Projektes „raum/klima/putz“ [1], das von der Baden-Württemberg Stiftung finanziert wird, forschen drei Institutionen des KIT an der Fragestellung, inwieweit sich der Klimawandel in Baden-Württemberg auf das sommerliche Innenraumklima und somit den Komfort des Menschen auswirkt und in welcher Weise ein Innenputz durch seine Feuchtespeichereigenschaften einen positiven Einfluss darauf haben kann. Beteiligt sind das Institut für Meteorologie- und Klimaforschung (IMK, Süddeutsches Klimabüro) sowie das Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB, Materialprüfanstalt).

Am Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau (fbta) werden Gebäudesimulationen durchgeführt, die als Eingangsparameter simulierte Wetterdaten verwenden und die Feuchtespeicherung im Bauteil sehr detailliert abbilden. Um die resultierenden Zustände im Gebäudeinneren sinnvoll bewerten zu können, werden aus der Normung abgeleitete Komfortkriterien auf Basis eigens durchgeführter Probandenversuche modifiziert und schließlich angewendet. Nicht nur die

Verbesserung des Komforts, sondern auch eine mögliche Energieeinsparung durch den Einsatz feuchtereregulierender Putze wird untersucht.

Probandenversuche

Methodik

Um das Be- und Empfinden von Menschen bei feuchtwarmen Innenraumbedingungen zu untersuchen, werden im Raumklima-Teststand des fbta umfangreiche Probandenversuche durchgeführt [2]. Das LOBSTER (Laboratory for Occupant Behaviour, Satisfaction, Thermal Comfort and Environmental Research) besitzt zwei nahezu identische Büroräume, deren thermische Bedingungen sehr exakt kontrolliert werden können. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Luftbefeuchtungsfunktion über Verdunstungsbefeuchter nachgerüstet. In den Versuchen werden die Teilnehmer zunächst in einem, dann im anderen Büro für jeweils 60 Minuten einem von neun Zuständen ausgesetzt. Vorgeschaltet ist eine halbe Stunde im Vorraum zur Akklimatisierung, zur Anbringung von Sensorik am Körper und zur Beantwortung eines ersten Fragebogens.

Die neun Zustände sind so gewählt, dass sie eine Matrix aus 26, 28 und 30 °C operativer Temperatur und 50, 65 und 80 % relativer Luftfeuchte darstellen und somit einen Bereich von 10 bis 21 g/kg Mischungsverhältnis umspannen. Die operative Temperatur ist ein Mittelwert aus Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der umliegenden Flächen. Das Mischungsverhältnis ist ein Maß für die absolute Luftfeuchte und gibt an, wieviel g Wasserdampf in 1 kg trockener Luft gespeichert sind. Da im nationalen Anhang zur Norm DIN EN 15251 [3] für klimatisierte und mechanisch belüftete Räume eine Obergrenze von 11,5 g/kg für den sommerlichen Komfort angegeben ist, wird insbesondere der Frage nachgegangen, ob eine solche Grenze nachvollzogen werden kann. Während der Stunde Aufenthalt in einem Büro werden kontinuierlich Raumparameter wie Lufttemperatur, operative Temperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und CO₂-Gehalt aufgezeichnet. Am Ende der Stunde füllen die Teilnehmer einen umfangreicheren Fragebogen aus.

In der statistischen Auswertung werden anhand von linearer Regression und unter Einbeziehung mehrerer unabhängiger Variablen Modelle gebildet, welche die Bewertungen der Teilnehmer im Mittel möglichst exakt voraussagen können. Insbesondere wird ein Modell abgeleitet, das die Akzeptanz von feuchtwarmen Raumzuständen darstellt.

Ergebnisse

Nach Vorversuchen im Herbst 2015 wurden im Sommer 2016 Versuche mit insgesamt 136 Teilnehmern durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die prozentuale Verteilung der Antworten auf die Frage „Wie empfinden Sie die aktuelle Raumtemperatur?“ gruppiert nach den neun Zuständen. Die Raumtemperatur wird als Ausdruck der thermischen Behaglichkeit betrachtet, da eine erhöhte Luftfeuchte zu einer reduzierten Wärmeabgabe und somit zu einer größeren Unzufriedenheit mit der Temperatur führt. Deutlich erkennbar nimmt die Akzeptanz sowohl mit steigender Temperatur als auch mit zunehmender Luftfeuchte ab. Fasst man die zwei Antworten im akzeptablen

Bereich zusammen und erstellt daraus für den Prozentsatz Zufriedener anhand der operativen Temperatur und des Mischungsverhältnisses ein lineares Regressionsmodell, erhält man ein Bestimmtheitsmaß von 0,87. Setzt man den zu erzielenden Prozentsatz Zufriedener auf 90 % fest, ergibt sich daraus eine Kennlinie, die in Abhängigkeit der operativen Temperatur (T_{op}) das zulässige Mischungsverhältnis (MV) angibt und umgekehrt (Abbildung 2, durchgezogene grüne Linie). Die Formel für diese Komfortgrenze ist in Gleichung 1 dargestellt.

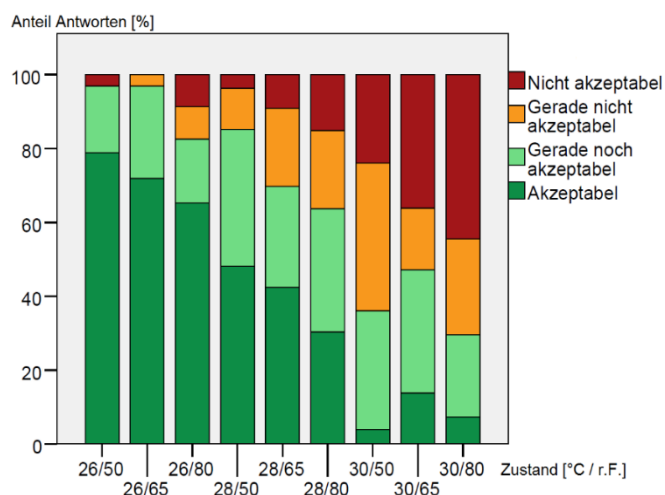


Abb. 1: Anteil der Antworten aller Teilnehmer auf die Frage: „Wie empfinden Sie die aktuelle Raumtemperatur?“, gruppiert nach neun Zuständen, jeweils nur Antworten nach 60 Minuten Aufenthalt ausgewertet.

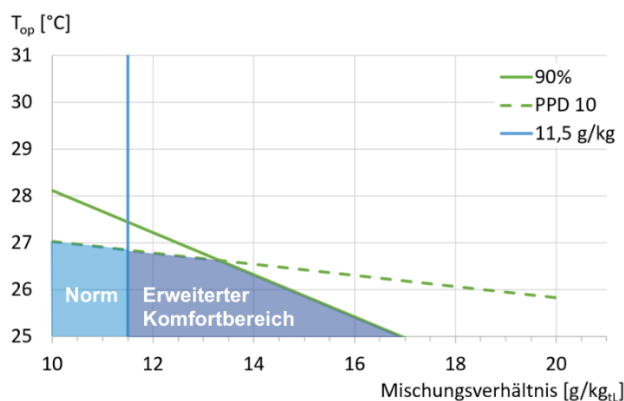


Abb. 2: Komfortbereich gemäß PPD 10 % nach Fanger (0,5 clo; 0,1 m/s Luftgeschwindigkeit, 1,1 met) und Begrenzung auf 11,5 g/kg (hellblaue Fläche) sowie erweiterter Komfortbereich aus PPD 10 % kombiniert mit Ergebnis aus den Probandenversuchen.

$$T_{op} = -0,45 \cdot MV + 32,6 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

Gemäß der Norm wurde analog die Kennlinie für einen PPD-Wert (percentage of persons dissatisfied) nach Fanger [4] von 10 % berechnet (Abbildung 2, gestrichelte grüne Linie). Allerdings wird in der Norm die Feuchte auf 11,5 g/kg begrenzt, sodass sich der hellblaue Komfortbereich

ergibt. Gemäß PPD 10 % wären bei entsprechend niedrigeren Temperaturen Luftfeuchte-Werte weit jenseits der 11,5 g/kg gestattet. Setzt man hier das strengere Kriterium an, welches aus den Versuchen ermittelt wurde (durchgezogene grüne Linie), so erhält man den erweiterten Komfortbereich (dunkelblaue Fläche), der im weiteren Verlauf zur Bewertung der simulierten sommerlichen Zustände im Innenraum herangezogen wird.

Gebäudesimulation

Methodik

Mittels numerischer Simulationen kann das bauphysikalische Verhalten von Räumen bzw. Gebäuden mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden. Eines der etablierten Programme ist EnergyPlus, das mit Mitteln des Amerikanischen Departments für Energie (DOE) entwickelt wurde und im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Zusätzlich zu einem vereinfachten Feuchtemodell ist in EnergyPlus das HAMT-Modell (heat and moisture transfer finite) integriert, das eine detaillierte Betrachtung der Feuchteaufnahme und -abgabe sowie des Feuchtedurchgangs durch die einzelnen Bauteilschichten ermöglicht. In diesem Modell muss jede einzelne Schicht mit verschiedenen Parametern beschrieben werden, die in Tabelle 1 benannt und mit konkreten Werten für vier betrachtete Simulationsvarianten dargestellt sind. Die Sorptionsisotherme ist eine für das Feuchteverhalten entscheidende Größe und daher separat in Abbildung 3 abgebildet. Ähnliche Kennlinien müssen für den Flüssigkeitstransport hinterlegt werden. Da dieser jedoch eine untergeordnete Rolle spielt, wird hier auf eine detaillierte Abbildung verzichtet.

Tab. 1: Die in EnergyPlus für die Verwendung des HAMT-Modells benötigten Materialeigenschaften und die angewendeten Werte für die vier Simulationsvarianten.

Materialeigenschaft	Versiegelte Oberfläche	Gipsputz	Klimaputz	Hypothetischer Klimaputz
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	0,170	0,200	0,247	0,247
Spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	1500	850	850	850
Rohdichte [kg/m ³]	1000	850	1291	1291
Porosität [m ³ /m ³]	0,20	0,65	0,51	0,51
Flüssigkeitstransport (Saugen/Weiterverteilung)	Kennlinien	Kennlinien	Kennlinien	Kennlinien
Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl [-]	58	8	18	18
Sorptionsisotherme	s. Abb. 3	s. Abb. 3	s. Abb. 3	s. Abb. 3

Für verschiedenste Parameterstudien wird ein Raum modelliert, der 4,00 m breit, 6,00 m tief und 2,70 m hoch ist (Innenmaße), dessen schmale Seite ein Fenster von 1,50 m Breite und 1,00 m Höhe hat und der nach Westen ausgerichtet ist. Nur diese Westfassade ist eine Außenwand, alle übrigen Wände sowie Boden und Decke sind adiabatisch (auf beiden Seiten herrschen gleiche Bedingungen, die selbst keine Übergänge von Wärme oder Feuchte induzieren). Fünf Innenseiten des Raumes (4 Wände und die Decke) werden jeweils mit unterschiedlichen Materialien belegt, die darunterliegende Konstruktion ist immer dieselbe. So wird der Einfluss sowohl auf den Komfort

als auch den Energieverbrauch zum Entfeuchten untersucht. Der erzielte Komfort wird anhand von Überschreitungsstunden des in Abschnitt 2 beschriebenen Komfortbereichs bewertet.

Für die Ermittlung einer Energieeinsparung durch die Verwendung verschiedener Innenputze wurde der Ansatz gewählt, den eigentlich natürlich belüfteten und gekühlten Raum mit einer Klimaanlage zu modellieren und während der Monate Mai bis September den nötigen latenten Kühlbedarf (Entfeuchtung) zu vergleichen.

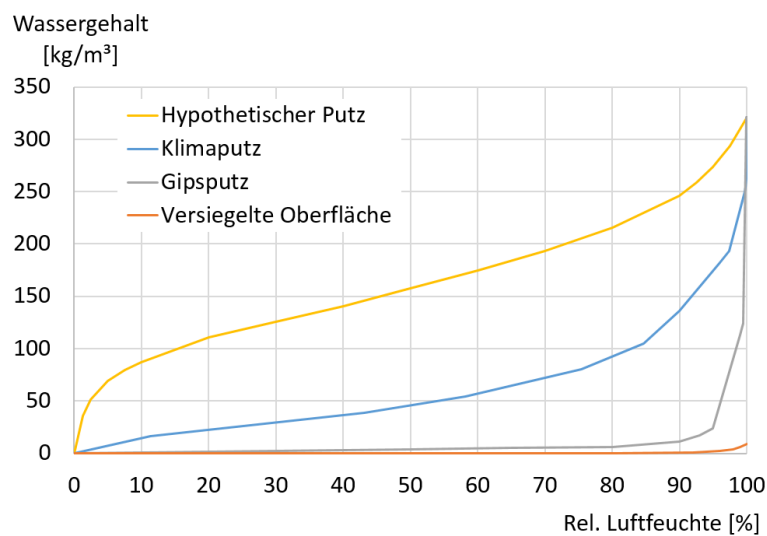


Abb. 3: Sorptionsisotherme der unterschiedlichen Materialien, die in den Simulationsvarianten für die Innenoberfläche von vier Wänden und der Decke verwendet werden.

Ergebnisse

Als Ausgangspunkt wird ein herkömmlicher Gipsputz verwendet, der mit einer wenig Feuchte durchlassenden Beschichtung (0,5 mm) versehen ist. Dieser Gipsputz wird außerdem ohne Beschichtung betrachtet. Als dritte Variante wird ein Klimaputz verwendet, wie er in einer Materialdatenbank (WUFI®) beschrieben ist. Schließlich wird von diesem Klimaputz die Sorptionsisotherme so angepasst, dass im unteren Luftfeuchtebereich extrem viel Feuchte aufgenommen werden kann, während die maximale Wasseraufnahme gleichbleibt. Dies ist ein hypothetischer Ansatz und kann momentan nicht mit einem realen Putz abgebildet werden. Die Putzschichten sind jeweils 15 mm stark. Mit den Klimadaten des Jahres 2010 (Standort Karlsruhe) ergeben sich gemäß den oben dargestellten Norm-Kriterien (bzw. des angepassten Komfortbereichs) für den versiegelten Gipsputz 1113 (284) Überschreitungsstunden, für den Gipsputz 959 (275), für den Klimaputz 871 (201) und für den angepassten Klimaputz 774 (160). Deutlich zu erkennen ist die Auswirkung der unterschiedlich strengen Kriterien einerseits und der Einfluss der veränderten Putzeigenschaften andererseits. Im besten Falle wird eine Reduktion der Überschreitungsstunden um 43 Prozent erzielt. In Abbildung 4 wird für die vier Varianten der Energiebedarf für die Entfeuchtung verglichen. Dabei wird unterschieden zwischen einer maximal zulässigen relativen Luftfeuchte im Raum von 65 % und 55 %. Auch hier ist erkennbar, dass der

Putz mit verbesserter Feuchtaufnahme einen positiven Einfluss hat. Bei der geringeren Anforderung reduziert der hypothetische Klimaputz den Energiebedarf um 24 % verglichen mit der versiegelten Oberfläche. Bei der verschärften Anforderung ist der absolute Energiebedarf wie erwartet höher, die prozentuale Einsparung beträgt jedoch nur 8 %. Die maximale absolute Einsparung, die in diesen Simulationen erzielt werden konnte, lag bei 22 kWh für den betrachteten Raum. Selbst wenn man diesen Wert für eine ganze Wohnung vervierfacht, liegt die Einsparung nur im Bereich weniger Euro. Die Verwendung eines mit größerem Aufwand hergestellten – und damit auch teureren – Putzes scheint daher aus Gründen der Kostenreduktion durch die Energieeinsparung allein nicht gerechtfertigt. Vielmehr müsste man zusätzlich auch den Komfortgewinn monetär bewerten.

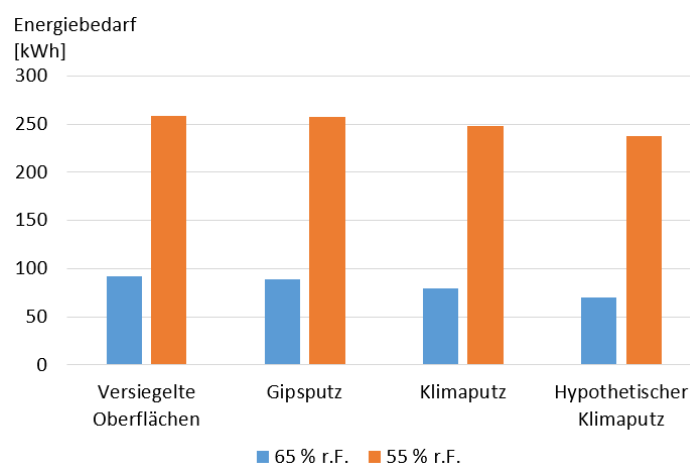


Abb. 4: Simulierter Energiebedarf für die Entfeuchtung (latente Kühlung) mit Sollwert 65 % bzw. 55 % relative Luftfeuchte während der Monate Mai bis September.

Fazit und Ausblick

Die vorgestellten Probandenversuche haben zu einer differenzierten Systematik bei der Bewertung sommerlicher feuchtwarmer Innenraumzustände geführt. Diese weist einen größeren Akzeptanzbereich hinsichtlich erhöhter Luftfeuchte als die Norm auf – in Abhängigkeit von der Temperatur. Weitere Versuche im Sommer 2017 werden genutzt, um die Stichprobe zu vergrößern und weitere Auswertungen durchzuführen. Anhand von Simulationen konnte aufgezeigt werden, dass modifizierte Innenputze einen deutlichen Einfluss auf die Anzahl der Stunden oberhalb einer bestimmten Komfortgrenze haben können. Es wurde ebenso gezeigt, dass Putze mit optimiertem Feuchtespeicherverhalten ein theoretisches Potenzial zur Energieeinsparung bei der Entfeuchtung haben. Erste Analysen haben gezeigt, dass dieses Potenzial jedoch sehr gering ist. Ziel für die weiteren Simulationen ist es, die Sollwerte für die Entfeuchtung als Mischungsverhältnis anzugeben, um analog zu den Komfortkriterien zu verfahren. Aus programmieretechnischen Gründen war dies bisher nicht möglich. Außerdem soll für weitere Simulationen im Austausch mit dem IMB oder einem Putzhersteller geprüft werden, welche Putzeigenschaften (insbesondere der Verlauf der Sorptionsisotherme) realistisch umsetzbar sein können.

Literaturverzeichnis

- [1] Umminger, M.; Kleber, M.; Schipper, H.; Haist, M.; Vogel, M.; Brecht, B.; Wagner, A.; Müller, H.S.; Leistungskriterien für wohnumfortgerechte Wandbaustoffe unter Einfluss des Klimawandels in Baden-Württemberg; Mauerwerk-Kalender 2016; S. 547-551.
- [2] Kleber, M.: Schwülegrenze in Innenräumen aus der Perspektive des Nutzerkomforts. HLH Bd. 67 (2016), Nr. 11, November.
- [3] DIN EN 15251, Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [4] P. O. Fanger: Thermal Comfort. Danish Technical Press, 1970.

First results from stimulation assessment and monitoring of the 426°C geothermal well RN-15/IDDP-2 (H2020-DEEPEGS project)

R. Köpke¹, N. Haaf², F. Limberger¹, J. Wang¹, M. Peters¹, E. Gaucher¹, E. Schill², T. Kohl¹

¹ *Karlsruher Institut für Technologie, Institut of Applied Geosciences (AGW), 76131 Karlsruhe, Deutschland*

² *Karlsruher Institut für Technologie, Institut for Nuclear Waste Disposal (INE), 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland*

E-mail: rike.koepke@kit.edu

Telefon: +49(0)721/608-45047

Abstract

The RN-15/IDDP-2 deep geothermal well of the DEEPEGS EU project on the Mid-Atlantic ridge at Reykjanes, Iceland, is a unique site for geothermal research. With a bottom hole temperature of approximately 426°C, it is one of the hottest geothermal wells ever drilled aiming for fluids at supercritical condition. Consequently, down-hole measurements are reliable to a depth of about 3.5 km, only. Pressure and temperature condition in the reservoir can be inferred using the newly developed wellbore simulator WellboreKit.

Due to complete fluid loss, the well has been drilled at flow rates that reach hydraulic stimulation condition. After the drilling, the well was stimulated further by applying different concepts ranging from high flow rate hydraulic stimulation to long-term but low flow rate hydraulic stimulation to increase the reservoir performance at around 4.6 km depth. Thermo-hydro-mechanically coupled numerical modelling was performed to predict the performance response and thus, develop a well stimulation schedule. Processes related to drilling and stimulation are monitored using seismic and magnetotelluric methods to characterize and understand the processes ongoing during injection.

Keywords: DEEPEGS, Reykjanes, Enhanced Geothermal Systems, Monitoring, Stimulation, Numerical Simulation, EU-H2020 Project

Introduction

The DEEPEGS project is a European H2020 demonstration project with the overall goal to increase the use of Enhanced Geothermal Systems (EGS) in Europe. The concrete objectives of the project are to test stimulating technologies in deep wells in order to deliver new innovative solutions and models for wider deployments of EGS reservoirs, to demonstrate the feasibility of EGS for delivering energy from renewable resources in Europe and to make deep geothermal

resources a competitive energy alternative for commercial use. Three different demonstration sites: Reykjanes (Iceland), Valence and Vistrenque/Riom (France) which are representative of different locations and geological formations in Europe have been selected to drill deep geothermal wells and stimulate them. [1]

A large number of wells down to < 3,000 m (Fig. 1) exploit the Reykjanes geothermal field that is located on the seismically active Mid-Atlantic Ridge. The concept of using a deep EGS well at Reykjanes comprises injection of fluid underneath the conventional geothermal field to support production. Therefore, the 2,500 m deep RN-15 production well was deepened to 4,659 m depth in the framework of the Icelandic Deep Drilling Program IDDP-2. The drilling operation IDDP-2 was completed after 168 days on January 25th, 2017. Complete loss of circulation fluid occurred below 3,200 m. Temperature and pressure measurements at the well bottom suggest P/T condition of 340 bars and 426°C and thus, supercritical condition of the fluid. Well logging highlights a large permeable zone above 3,400 m and smaller feed zones at 4,450 m and 4,500 m. A number of 13 sections at different depths were cored [2].

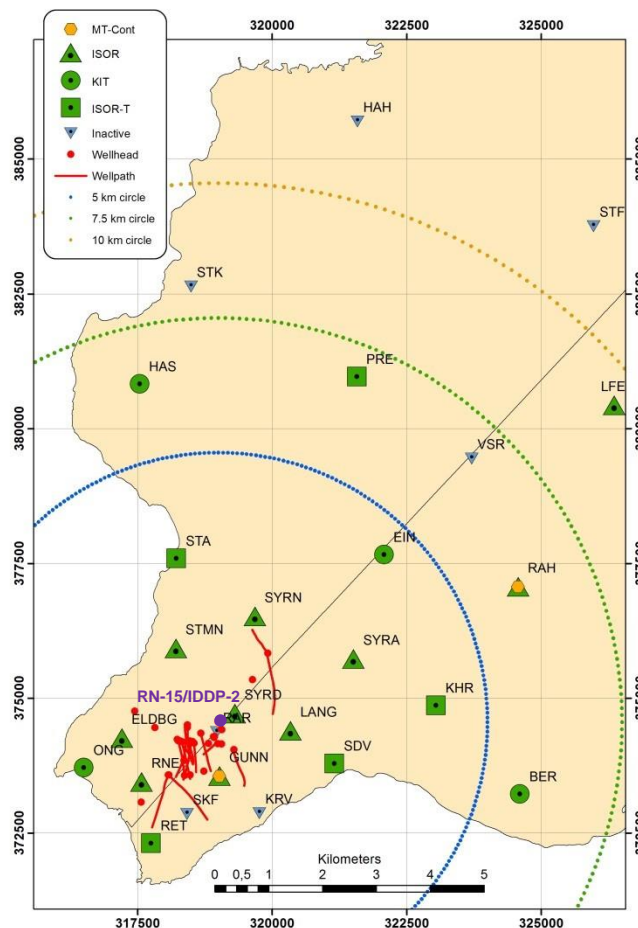


Fig. 1: Distribution of continuous monitoring stations and wells in the conventional geothermal field at the Reykjanes site (Iceland). A total of 19 seismic and two magnetotelluric stations were deployed in a 10 km radius from the RN-15/IDDP-2 well.

The conditions that are inferred from temperature and pressure measurements and analyses of the cores point to the assumption that besides brittle also ductile, i.e. slow and aseismic deformation occurs during reservoir engineering. In this study, we present for the first time results from hydraulic stimulation assessment and monitoring in such extreme condition.

Seismic and Electromagnetic Monitoring

The existing permanent seismic network at Reykjanes was supplemented by nine temporary stations, five from HS-Orka/ISOR and four from KIT in September 2016. For this purpose, the existing infrastructure of a former project could be used, hence the possible positions of the temporary stations were already known. Among all of them, the best locations were chosen to provide an optimal azimuthal and inclination coverage of the zone of interest by the final network. As a result, the seismic network during drilling and stimulation consists in a total of 19 active stations within a 10 km radius from the well (Fig. 1). The main objectives of the seismic monitoring are i) the reservoir characterization with insight on the fractures created or reactivated during drilling and stimulation, ii) the investigation of changes in the physical processes induced by drilling and stimulation, e.g. seismic slip vs. aseismic creep, iii) the characterization of the local stress field with the help of focal mechanisms, and iv) possibly the identification of the brittle-ductile transition zone in the reservoir. Preliminary analyses show that induced seismicity occurred during the drilling of the well in a zone that was formerly identified as aseismic. Further detailed analyses are currently on-going to better localize the seismicity and hence gain detailed spatial and temporal information.

Magnetotelluric monitoring is carried out at RAH and GUNN stations (Fig. 1) since December 2017, each equipped with two electric dipoles in N-S and E-W direction, as well as three magnetic sensors oriented in N, E and vertical direction. Magnetotelluric monitoring during massive hydraulic stimulation may reveal information on the directional development of the reservoir and the evolution of preferential hydraulic connectivity. First results from the late drilling phase have been processed. Figure 2 shows two representative examples of electric resistivity as a function of the period measured at the GUNN station and acquired between January 13th and 17th, 2017, when a core section was drilled between 4,634 m and 4,642.8 m depth. Note that the period can be related to depth following the concept of skin depth of the electromagnetic signal; therefore, the resistivity-period distribution is a function of the resistivity distribution with depth. Low resistivity in conventional geothermal reservoirs indicates either a clay cap layer that seals the reservoir at its top or the reservoir itself (e.g. Uchida, 2005) [4]. The results are decomposed into to XY and YX components that represent different directional components of the electric and magnetic fields. They show rather homogenous resistivity of about 10 Ωm down to periods of about $2 \cdot 10^{-1}$ s. Below resistivity drops by up to 1 order of magnitude with preference in the YX component. While in the example 13-14/01, two minima at $5 \cdot 10^{-1}$ s and 5 s are observed, the second one disappears on 16-17/01. From 10 seconds on, resistivity increases with depth. The periods between 10^{-1} and 10 s corresponds to the reservoir depth.

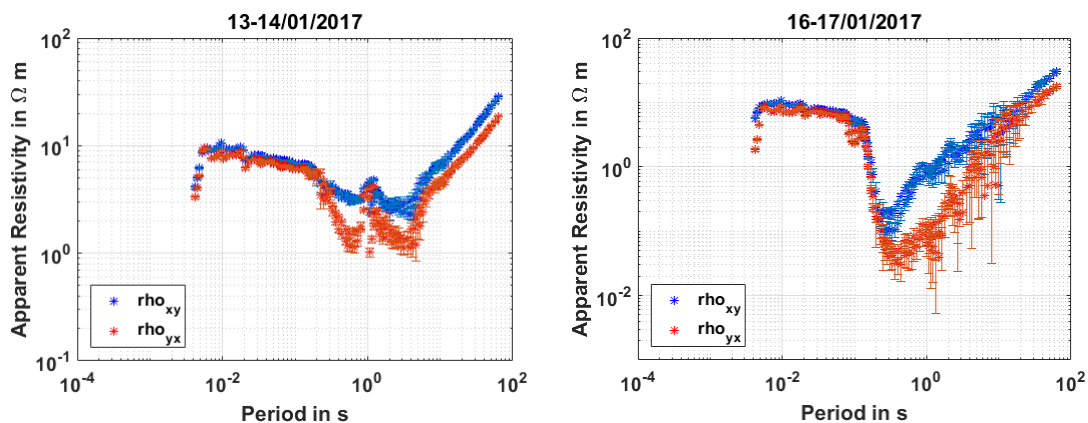


Fig. 2: Electric resistivity versus period from the magnetotelluric monitoring of January 2017 at station GUNN. Blue curves show the XY-component, the red curves the YX-component.

THMC Numerical Simulation of Stimulation

The finite element software REDBACK [3] allows the implementation of the dynamic evolution of damage, permeability and coupling effects between thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes that are incorporated into the constitutive relationship of a creeping material. Special attention is paid to the introduction of the multi-physics and multi-scale processes that operate at the scale of single grains at the borehole wall up to the entire reservoir. For such highly non-linear applications, a parallel high-performance computing infrastructure is needed. Here, we numerically study the borehole breakout pattern along ductile shear bands emerging from the borehole wall upon fluid injection.

To predict and understand the processes during the stimulation of RN-15/IDDP-2, the objectives are the THMC numerical modeling of fluid injection in the well, finite element simulations of the near wellbore region using creep damage mechanics, extended analyses of mixed brittle-ductile rheologies and nearby fault zones and upscaled fully-coupled reservoir-scale simulations based on the structural model. These investigations will result in a proposal for a stimulation protocol. Further objectives are the analyses of well logs for ambient stress field determination and micro-structural analyses of deep core samples. The major scientific challenge is the identification of evidences of the brittle-ductile rheological transition zone at depth.

Wellbore Simulation with WellboreKIT

WellboreKit is a new simulator for multiphase thermo-hydro-chemical coupled processes along geothermal boreholes. It is unique in its capability for geothermal fields and is applied to RN-15/IDDP-2. WellboreKit will be open source and consists of modules linked to the solver ELMER [5].

Challenges for the application are the highly saline water in Reykjanes geothermal field, super-critical conditions under high pressure and temperature and the small database for the calibration

of the numerical model due to total loss of circulation fluid during drilling. One main objective is to study heat and pressure propagation in the wellbore, and validate them with real data from RN-15/IDDP-2. Another main objective is to predict chemical deposition along the wellbore casing to minimize negative impact on the efficiency of the well. Thus, long-term behaviour of the well operation and efficiency will be studied with WellboreKit.

As first results, the temperature and pressure logs of RN-15 production well are validated successfully. The effects of a two-phase flowing fluid on pressure drop and heat transfer between rock and fluid are observed. As there are no measurement data about scale formation process at the site, investigation into the impacts of different factors on chemical deposition within the borehole is carried out only qualitatively at the current stage. Such factors include different mixture components in the aqueous and non-aqueous geothermal fluids, electrolyte concentration, wall fraction, operation parameters such as mass flow rate during production/injection and injection temperature. The present results confirm the effects of the above-mentioned factors on the pressure-temperature profile, the amount and the position of mineral deposition along the borehole.

Conclusion

The RN-15/IDDP-2 deep geothermal well in the Reykjanes field is unique in many regards and the outcome of this EGS project could imply major redistribution of the geothermal energy in the European energy mix. The extreme pressure and temperature conditions in the well requires the application and the development of non-invasive techniques to describe and exploit as best as possible the geothermal reservoir. This strongly multi-disciplinary work reaches the limits of the current state of the art and thus promotes highly collaborated research. The first results obtained from a couple of monitoring techniques deployed at the surface as well as from thermo-hydro-mechanical-chemical modelling tools at or around the well are promising and support further work.

Acknowledgements

We want to thank the project coordinator HS ORKA for providing data gained during the operations at RN-15/IDDP-2. Furthermore, we thank ISOR for supporting us with the installation of our monitoring stations, the maintenance of these stations and the cooperation in the evaluation of the induced seismicity. The DEEPEGS consortium is industry driven with five energy companies, which are highly experienced in energy production. It also involves research institutes with recognized expertise in geothermal research. The partners are BRGM, ENEL Green Power, FONROCHE Géothermie, GEORG, Herrenknecht Vertical, HS ORKA, ISOR, KIT, Landsvirkjun and Statoil. The DEEPEGS project has received funding from the European Union's HORIZON 2020 research and innovation program under grant agreement No 690771.

References

- [1] Friðleifsson et al. (2016): Deployment of deep enhanced geothermal systems for sustainable energy business, EGC 2016
- [2] Friðleifsson et al. (2017): The drilling of the Iceland Deep Drilling Project geothermal well at Reykjanes has been successfully completed, ed. IDDP-2 and DEEPEGS, <http://deepegs.eu/wp-content/uploads/2017/02/IDDP-2-Completion-websites-IDDP-DEEPEGS.pdf> .
- [3] Poulet & Veveakis (2016): A viscoplastic approach for pore collapse in saturated soft rocks using REDBACK: an open-source parallel simulator for Rock mEchanics with Dissipative feedBACKs, *Computers and Geotechnics*, v. 74, pp. 211 - 221, 1873-7633 (ISSN).
- [4] Uchida, Toshihiro. "Three-dimensional magnetotelluric investigation in geothermal fields in Japan and Indonesia." proceedings world geothermal congress, Antalya, Turkey. 2005.
- [5] Nusiaputra (2017): Coupled Hydraulic, Thermal and Chemical Simulations for Geothermal Installations, Ph.D. Thesis (KIT).

‘Low-invasive’ measures for improving the indoor climate in school buildings, particularly with consideration of warmer summers due to climate change

Doctoral Researcher: S. Carolina C. Montano

Doctorate Supervisor: Prof. Andreas Wagner

Karlsruher Institut für Technologie

Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau (fbta)

76131 Karlsruhe, Deutschland

E-mail: carolina.montano@partner.kit.edu

Abstract

The drive for adapting school buildings to future weather conditions and better indoor environments is spreading around the world. Many mid-size European cities, like Karlsruhe in Germany, count with a significant building stock that date back either to the late XIX Century, or the mid XX Century, as a result of the necessity of a rapid reconstruction of the cities in the post-war decades. These buildings will be the focus of refurbishments in the next few years to improve their sustainability performance, and, although energy consumption is the primarily concern, awareness about the synergy between climate change, user satisfaction and cognitive performance is rising amongst the building authorities. Thereby, the retrofit strategies require innovative solutions that guarantee Indoor Environmental Quality while maintaining energy efficiency. This research project aims to find low-invasive measures for school buildings that take into account these mentioned aspects in combination.

The first stage of this study analysed the school building stock of the city in order to find a relation between the building properties and their energy performance and through that, define the sample to simulate. The second, and current phase, uses Dynamic Thermal Simulations to establish their base case scenario, study their potential to improve the indoor environment, and test possible refurbishment measures to adapt to climate change.

Keywords: Building energy efficiency, summer thermal comfort, energy efficient schools, building refurbishments.

Background and objective

School buildings pose considerable challenges to meet demanding and interrelated design requirements in terms of high occupant densities, indoor air quality, energy performance, and future climate conditions. Ensuring a good Indoor Environmental Quality delivery is essential

for children, as it can impact the long-term health and cognitive performance of this vulnerable group ^[1, 2, 3].

The city of Karlsruhe is one of the warmest in Germany and the temperatures will increase around 1.5 °C in the near future and 3 °C in the far future, with double climatological event days (hot days and tropical nights) ^[4].

The city authorities are then, engaged with these two conditions and expect to find new solutions without implementing air conditioning units. This research project aims to evaluate and find better options for the design and development of building refurbishments for the schools in the city, to ensure energy efficiency, and health and wellbeing of all the occupants. It is expected that the solutions can be used in the Action Plans of the city.

Building selection

To establish a suitable sample of buildings to study, the building stock of the city was analysed, creating a matrix with the following information:

- Generalities: building category (primary school, high school, etc.), location, year of construction, main façade materials.
- Geometrical properties: orientation, areas, number of floors, form, classrooms heights, window to wall ratio (estimated), surface area to volume ratio (estimated).
- Energy: heating and electricity consumption (2013 – 2015), heating and electricity savings (2015 vs. 2013), related CO₂ emissions.
- Equipment: HVAC, windows types.

The point of interest was the analysis of the energy performance. Nevertheless, the relation between the energy consumption and properties such as year of construction, orientation, window to wall ratio (WWR) or surface area to volume ratio (SAV) was not conclusive. It is considered that this behaviour could be attributed to the users and the building management, due to the fact that there are no automated lighting or ventilation, or the fact that some of these properties were estimated. Thus, to select the sample, the buildings with the major energy consumption were chosen, mixing with central urban and suburbs buildings from different epochs. Eight school buildings were selected.

Model validation

Even though the database of the city is quite large, not all the information required to create the models was available. Consequently, some assumptions were required. For instance, the building constructions were selected matching the information from questionnaires made to architects related to buildings, site visits, typical construction types according to the literature, and building layouts. The final selection was validated by architects, experts on the field.

Temperatures measures are also made during the summer of 2017 to get a clearer view of the indoor temperatures in the classrooms and the window opening practices. Additionally, the energy consumption predictions of the models are compared with the actual data of energy consumption. Although this information is available, in this study it cannot be taken as a direct validation method, since the data of heating and electricity consumption corresponds to school totals and in many cases a school has more than one building. Nevertheless, the comparison between the model calculations and the reality gives an overview of the assumptions made and the actual performance of the building. The data is also compared with the benchmarks of the region.

Further plausibility checks are made personally. Once the inputs are double checked, I plotted several graphs to guarantee that the model is representing the conditions as desired. For example, I revised that the rooms are heated just during the winter months, and that the airflow corresponds to the assumed profile (i.e. during the day or night, etc). Additional checks made, included the internal gains, which do not vary during the year but are off during weekends and school breaks, as it was previously established.

Initial results

As the focus of the study is the Indoor Environmental Quality of the classrooms in the summer, the initial analysis is made at the warmest days. According to the Test Reference Year for the region, the current warmest month is August, however, schools are on break during this month. Therefore, the initial analysis is made for a week in July where the warmest day achieves almost 33 °C. It is worth mentioning that the simulations are run for the entire year, to take into account the storage capacity of the thermal mass of the building, and also for the entire school building, to take into account the effect of the partitions.

During the school visits, it was found that it is common that the windows in the classrooms remain closed or a just tilted to ensure children's safety and, in some cases, avoid external noise. Therefore, this practice was taken for the base case scenario. The models predict that in this case, temperatures above 28 °C are easily reached from 11:00. A complete window opening, especially during the early morning, helps reducing the indoor temperature around 1 °C, while the night ventilation could help reducing this temperatures up to 3 °C, depending on the school conditions. Additionally, only night ventilation allows that the classrooms get indoor temperatures below 20 °C at the beginning of the day.¹

Further and more specific results will be available as the study goes on. For questions please contact me at: Carolina.montano@partner.kit.edu

¹ These are preliminary results. Therefore, the data is susceptible to change while the models are calibrated and validated.

References

- [1] De Gids W.F., Van Oel C.J., Phaff J.C., Kalkman A. (2007) The effect of ventilation on the cognitive performance of students at an elementary school. TNO report 2006-D- 1078/B. (in Dutch).
- [2] Lee M.C., Mui K.W., Wong L.T., Chan W.Y., Lee E.W.M., Cheung C.T. (2012) Student learning performance and indoor environmental quality (IEQ) in air-conditioned university teaching rooms. *Building and Environment* 49, 238-244.
- [3] Chatzidiakou L., Mumovic D., Dockrell J. (2014) The Effects of Thermal Conditions and Indoor Air Quality on Health, Comfort and Cognitive Performance of Students. The Bartlett, UCL Faculty of the Built Environment UCL Institute for Environmental Design and Engineering. London, Built Offsite.
- [4] Stadt Karlsruhe, Umwelt- und Arbeitsschutz (2013) Anpassung an den Klimawandel – Bestandsaufnahme und Strategie für die Stadt Karlsruhe (Adaptation to climate change - Review and strategy for urban Karlsruhe). Karlsruhe.

Experimentelle Untersuchung von Anstreifvorgängen in Turbomaschinen

Oliver Munz¹, Corina Schwitzke¹, Sarah Welzenbach², Tim Fischer², Sonun Ulan Kzyz³, Hans-Jörg Bauer¹

¹ Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, 76131 Karlsruhe
E-mail: oliver.munz@kit.edu

² Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik, Technische Universität München, 85747 Garching

³ Lehrstuhl Metallische Werkstoffe, Universität Bayreuth, 95447 Bayreuth

Stichworte: Labyrinthdichtungen, Honigwaben, Anstreifen, Prüfstand, Gasturbine

Einleitung

Die europäische Kommission hat in einem Strategiepapier für das Jahr 2050 dem weltweiten Flugverkehr ein erhebliches Wachstum von 4-5 % jährlich prognostiziert [1]. Die damit steigende Verantwortung für umweltfreundliche und nachhaltige Mobilität wurde in der Formulierung von Zielen für die Reduktion von CO₂-, NO_x- und Lärmemissionen von 65-90 % festgelegt. Eine der wichtigsten Maßnahmen, diesen Anforderungen gerecht zu werden, stellt die Effizienzsteigerung der Triebwerke dar. Um den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen und den Kraftstoffverbrauch zu senken, werden Triebwerke aufgrund des steigenden Nebenstromverhältnisses immer größer und die Turbineneintrittstemperatur sowie das Druckverhältnis nehmen zu. Hieraus ergibt sich ein erhebliches Potential, die Komponentenwirkungsgrade und somit den Gesamtwirkungsgrad durch kostengünstige Entwicklungen deutlich zu steigern.

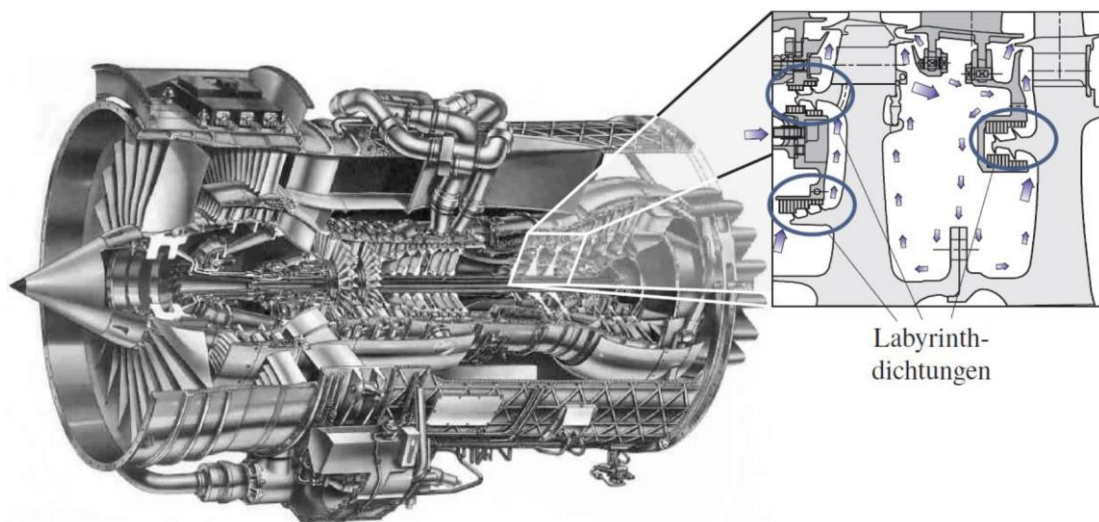


Abb. 1: Eingesetzte Labyrinthdichtungen im Kühlluftsystem des Rolls-Royce Triebwerks BR715, aus [2].

Der in Abbildung 3 dargestellte Prüfstand besteht aus einem Rotor, der von einem Elektromotor angetrieben wird. Auf den Rotor sind drei verschiedene Dichtspitzen-Geometrien gefertigt. Mit einer axial sowie radial beweglichen Traverse und einem Linearaktuator ist es möglich, Metallbleche der Abmessungen 20 mm x 12 mm und variabler Dicke, mit einer konstanten Geschwindigkeit und einer definierten Eindringtiefe auf den Rotor zuzustellen. Durch Konstruktion einer Hochgeschwindigkeits-Lagerung sowie der Auslegung der Rotorgeometrie und des Containers können Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/s und Zustellraten von 1,5 mm/s realisiert werden. Die einstellbaren Parameter sind somit die Relativgeschwindigkeit, die Zustellrate, die Dichtspitzengeometrie, die Blechdicke, die Anstreifkonfiguration und die Materialpaarung. Eine effiziente und kontrollierte Variation der Eingangsparameter wird mithilfe der statistischen Versuchsplanung realisiert.

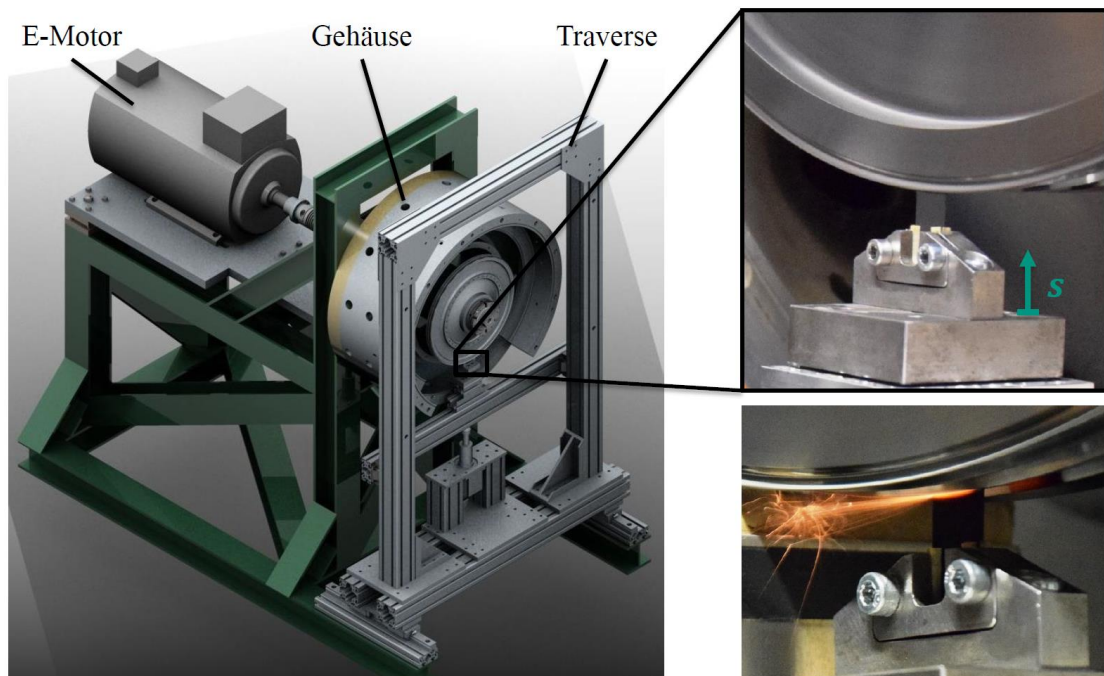


Abb. 3: Überblick über den Anstreibprüfstand am ITS, Funkenschlag während eines Anstreibversuchs.

Der Prüfstand ist mit einer berührungslosen Temperaturmesstechnik ausgestattet, mit der die Temperaturen der Dichtspitze und des Blechs erfasst werden können. Die Oberflächentemperatur der schnell rotierenden Dichtspitze wird mit zwei Hochgeschwindigkeitspyrometern für verschiedene Temperaturbereiche aufgenommen. Mithilfe einer Infrarotkamera können örtlich sehr hoch aufgelöste Temperaturprofile des stationären Blechs aufgenommen werden. Die resultierenden Reibleistungen und die Kontaktdrücke können anhand der Daten eines piezoelektrischen Kraftsensors und einer Drehmomentmesswelle berechnet werden. Alle Messwerte werden von einer simultanen Datenerfassung aufgezeichnet.

Wie am Funkenflug in Abbildung 3 zu erkennen, wird während eines Anstreichvorgangs Reibenergie frei, die das Material des Einlaufbelags bis nahe an den Schmelzpunkt der eingesetzten Werkstoffe erhitzt. Aufgrund ihres Widerstands gegenüber thermischen Belastungen und Korrosion werden hierfür hauptsächlich Nickelbasislegierungen wie Haynes 214 und Hastelloy X eingesetzt. Werkstoffdaten nahe am Schmelzbereich sind kaum in der Literatur erhältlich. Da das Werkstoffverhalten bei diesen Temperaturen einen wesentlichen Einfluss auf den Anstreichvorgang hat, werden parallel zu den Anstreichversuchen am KIT an der Universität Bayreuth physikalische und mechanische Werkstoffkennwerte bis nahe an den Schmelzpunkt ermittelt.

Simulation

An der Technischen Universität München wird ein mehrskaliges Finite Elemente (FE) Modell entwickelt und mithilfe der experimentell erfassten Temperaturen und Kontaktdrücke validiert. In das thermomechanische FE-Modell werden zusätzliche Formulierungen eingebracht, die die Mikrostruktur sowie den Verschleiß der Dichtspitze und des Blechs wiedergeben können. In Abbildung 4 ist die Ausgangsgeometrie des numerischen Modells des Blechs und der Dichtspitze dargestellt. Unmittelbar während des Anstreichens kommt es zu einer starken Erwärmung des Materials. Dies führt zu einem starken plastischen Verschleiß, erkennbar anhand einer sogenannten Aufpflanzung des Blechs in Abbildung 4.

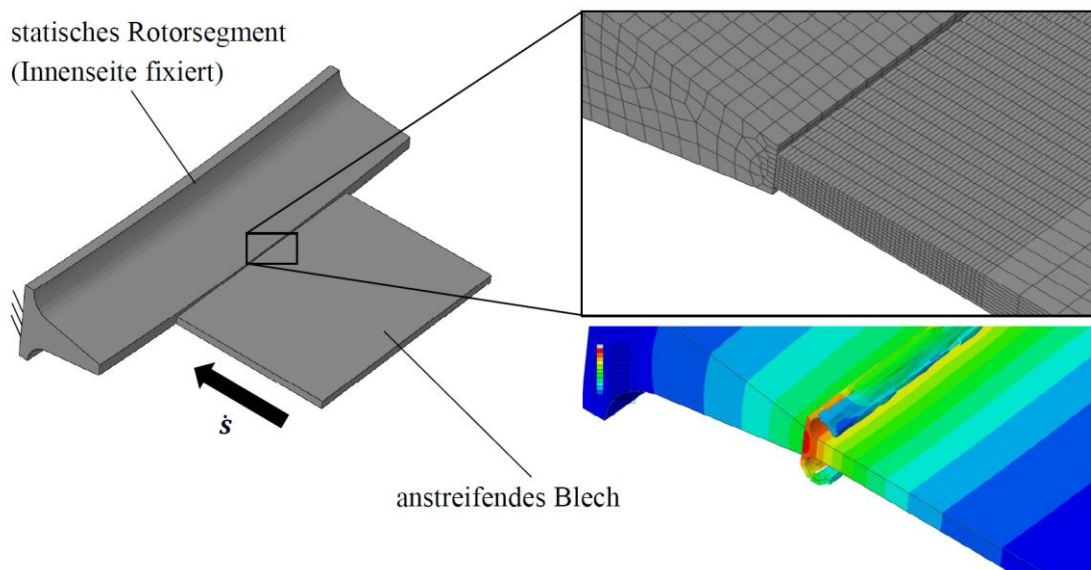


Abb. 4: Geometrie des FE-Modells vor dem Anstreifen und plastische Verformung sowie Temperaturentwicklung während eines Anstreichvorgangs.

Die Kenntnis und Modellierung der zugrundeliegenden Verschleißmechanismen und die sehr genaue Bestimmung der Werkstoffkennwerte ist für zuverlässige Aussagen über die Temperaturen im Rotor und Stator sowie die Ausprägung des Verschleißverhaltens während des Anstreichvorgangs essentiell.

Ausblick

Durch die einfachen Kontaktgeometrien des entwickelten Prüfstands wurde gezielt das grundlegende physikalische Verständnis von Anstreifvorgängen in Turbomaschinen verbessert. Um das Verhalten anderer Materialpaarungen zu verstehen werden weiterhin Anstreifversuche mit Blechen aus Nickelbasislegierungen durchgeführt. Darauf aufbauend wird in Zukunft die Halterung des Prüfstands so modifiziert, dass auch Segmente von Honigwabeneinlaufbelägen getestet werden können. Somit kann das stark vereinfachte Ersatzmodell der anstreifenden Metallbleche zu einem Modellierungsansatz ganzer Honigwabeneinlaufbeläge erweitert werden. Die Validierung mit experimentellen Ergebnissen des Anstreifprüfstands ermöglicht eine kostengünstige Entwicklung neuer Geometrien und Materialpaarungen. Der Auslegungsprozess von Labyrinthdichtungen kann hiermit erheblich verbessert und der Gesamtwirkungsgrad von Triebwerken weiter gesteigert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] „Europe’s vision for aviation. Maintaining global leadership and serving society's needs”, Luxembourg: EUR-OP, 2011.
- [2] Denecke, J.: „Rotierende Labyrinthdichtungen mit Honigwabenanstreifbelägen – Untersuchung der Wechselwirkung von Durchflussverhalten, Drallverlauf und Totaltemperaturänderung”, Dissertation Universität Karlsruhe, ISBN 978-3-8325-1850-9, 2007.
- [3] Chupp, R. E., Hendricks, R., Lattime, S., Steinetz, B.: „Sealing in Turbomachinery“, Journal of Propulsion and Power Vol.22 No. 2, March-April, 2006.
- [4] Pychynski, T., Höfler, C., Bauer, H.-J.: „Experimental Study on the Friction Contact Between a Labyrinth Seal Fin and a Honeycomb Stator“, J. Eng. Gas Turbines Power. 2015, GTP-15-1382, 2015.
- [5] Herrmann, N., Dullenkopf, K., Bauer, H.-J.: “Flexible Seal Strip Design for Advanced Labyrinth Seals in Turbines”, Proceedings of ASME Turbo Expo 2013, GT2013-95424, 2013.

Synthese von Oxymethylenether (OME)

Dorian Oestreich, Philipp Haltenort, Kathrin Hackbarth, Ulrich Arnold, Jörg Sauer

*Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Katalysatorforschung und -technologie,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland
E-mail: dorian.oestreich@kit.edu
Telefon: +49(0)721/608-23877*

Zusammenfassung

Es wird eine Syntheseroute zur Herstellung von Oxymethylenethern (OME, $\text{CH}_3[\text{OCH}_2]_n\text{OCH}_3$) aus Methanol (MeOH) und Formaldehyd (FA) vorgestellt. Der aktivste untersuchte Katalysator (Dowex50Wx2) erreicht eine Wechselzahl (TOF) von 8.8 s^{-1} bei einem FA / MeOH-Verhältnis von 1.5 g/g und einer Reaktionstemperatur von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ bei geringer Bildung von Nebenprodukten. Grundlegende Untersuchungen zur Beschreibung von Film- und Porendiffusionsvorgängen wurden durchgeführt, um im Folgenden die intrinsische Kinetik bestimmen zu können. Die Reaktionsgeschwindigkeiten der katalysierten Reaktionen können über einen hyperbolischen Geschwindigkeitsansatz beschrieben werden. Dabei spielt das Reaktionsmilieu eine entscheidende Rolle, auch im Hinblick auf die Katalysatoraktivität. Das Reaktionsmodell wurde sowohl durch Batch-Experimente in Autoklaven als auch mit Hilfe einer kontinuierlich betriebenen Versuchsanlage validiert.

Stichworte: Dieseldieselkraftstoff, Kraftstoffadditive, Rußminderung, Oxymethylenether, Gleichgewichte, Kinetik, Ionenaustauscher

Einleitung

Die strikten und sich stetig verschärfenden Regularien zur Reduzierung von Emissionen im Transportsektor führen zu einem wachsenden Interesse zur Lösung dieser Fragestellung. Eine Alternative zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der Abgasnachbehandlung stellt die Verwendung eines innovativen Kraftstoffes dar, welcher bereits innermotorisch die Bildung von Ruß unterbindet und parallel Stickoxide reduzieren kann.

Dieseldieselkraftstoffadditive, mit Sauerstoff in der molekularen Struktur und ohne direkte Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen, führen zu einer signifikanten Reduktion der Rußbildung [1, 2]. Neueste Untersuchungen zeigten, dass Dimethoxymethan (DMM) und oligomere Oxymethylenether (OME, $\text{CH}_3[\text{OCH}_2]_n\text{OCH}_3$) hervorragende Dieseldieseladditive zur Emissionsminderung darstellen [3-7]. OME können aus Methanol und seinem Oxidationsprodukt Formaldehyd hergestellt werden (Abb.1) [8-11]. Werden die Einsatzstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen, kann hierdurch eine Brücke von der Stickoxid- bzw. Partikelemissionsminderung zur Senkung der CO_2 -Emissionen im Sinne einer ganzheitlichen Lösung geschlagen werden. Die

Produktion von OME aus sauerstoffhaltigen Rohstoffen ist besonders effizient, da Sauerstoff im Produkt verbleiben kann und auf eine Abtrennung verzichtet werden kann. Dies führt zu einer hohen Atom- und Energieeffizienz im Herstellungsprozess. Zusätzliche Vorteile sind ihre unbegrenzte Mischbarkeit mit Diesel, geringe Korrosivität, vernachlässigbare Toxizität und physikalische sowie chemische ähnliche Eigenschaften wie die des Diesels [12-14]. Es bedarf somit keiner oder nur einer geringen Modifikation an bestehenden Motoren oder der Infrastruktur. Darüber hinaus besitzen OME höhere Cetanzahlen (CN) als konventioneller Diesel [12, 14], was zu einer höheren Effizienz des Dieselmotors führen kann.

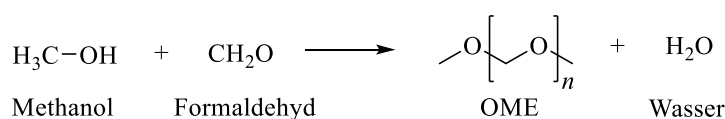


Abb. 1: Synthese von OME aus Methanol und Formaldehyd.

Material und Methoden

Die Synthese von OME wurde in einem Edelstahlreaktor mit einem Fassungsvermögen von 180 ml durchgeführt. Druck und Temperatur wurden über ein analoges Manometer (Genauigkeit: 0.05 bar) bzw. über ein NiCr-Ni Thermoelement (Genauigkeit: 1 K) gemessen. Ein Ventil am Boden des Batchautoklavens wurde zur Probenentnahme von Flüssigkeiten genutzt. Proben wurden mit Hilfe einer Spritze entnommen, mit einem PTFE-Filter (Porenweite: 0.2 μm) filtriert und in Tetrahydrofuran gequenchet.

Als Reaktor für die kontinuierlich betriebene Anlage wurde ein Rohrreaktor mit integrierten Zapfstellen angefertigt (Abb. 2). Das Rohr ($d_i = 6 \text{ mm}$, $d_a = 30 \text{ mm}$, $l = 240 \text{ mm}$) wurde mit drei zweiseitigen Aluminiumblöcken beheizt, welche wiederum mit je drei Heizpatronen (Fa. Horst) bestückt waren. Die Aluminiumheizblöcke wurden durch 2 mm dicke Teflonscheiben in drei Zonen unterteilt, welche somit unabhängig beheizbar waren, um eine isotherme Fahrweise zu ermöglichen. Am Reaktoreingang und -ausgang sind Metallfilter (Porengröße: 10 μm , Fa. Macherey-Nagel) gefolgt von Glaswolle angebracht, um einen Austrag des Katalysators zu verhindern. Die seitlich angebrachten Zapfstellen erlauben eine kontinuierliche Probenentnahme entlang des Reaktors bei zeitgleicher Messung der Temperatur in der Katalysatorschüttung. Alle Zapfstellen waren mit Metallfiltern bestückt (Porengröße: 10 μm), um einen Katalysatoraustrag zu verhindern.

Die Reaktanten der OME-Synthese sind Methanol (Merck EMSURE[®]) und para-Formaldehyde (Merck). Nitrobenzol (Sigma-Aldrich) wurde als interner Standard verwendet.

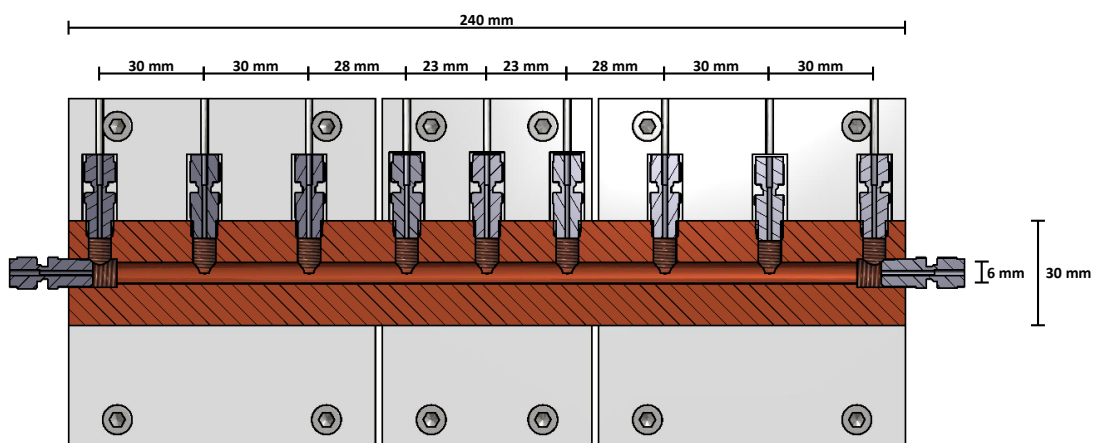


Abb. 2: Zapfstellenreaktor der kontinuierlich operierenden Versuchsanlage in Schnittdarstellung [15].

Ergebnisse und Diskussion

Katalysatorscreening

Ein ausführliches Katalysatorscreening zeigt, dass alle sauren Feststoffsäuren mit Brønsted-Zentren die Reaktion katalysieren können. Bei den getesteten aktiven Katalysatorsystemen (Zeolithe, Ionenaustauscherharze sowie modifizierte Alumosilikate) wird bei allen das gleiche Gleichgewicht, bestehend aus den Ausgangsstoffen Methanol und Formaldehyd sowie den Produkten OME, Halbacetale und Glykole, erreicht. Unterschiede sind lediglich bei der Aktivität zu erkennen (Tab. 1). Der saure Ionenaustauscher (Dowex50Wx2) erreicht die derzeit höchste Wechselzahl (TOF) von 8.8 s^{-1} bei einer Reaktionstemperatur von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ und einem Paraformaldehyd / Methanol-Verhältnis von 1.5 g/g . Das führt dazu, dass 90 % des Gleichgewichtsumsatzes nach etwa 10 min erreicht werden bei einem Katalysatorgehalt von 1 w%. Eine Prozessführung bei $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ist ebenfalls möglich, wobei hierbei nach einer Stunde 90 % des Gleichgewichtsumsatzes erzielt werden können (Paraformaldehyd / Methanol = 1.5 g/g , Katalysator = 1 w%).

Tab. 1: Vergleich der katalytischen Aktivität verschiedener Katalysatoren. ¹

Katalysator	99% GGW ² [min]
Dowex50Wx2	6.8
Dowex50Wx4	7.0
Dowex50Wx8	8.5
H-BEA 25	20.0
H-MFI 90	23.4
Amberlyst 36	29.5
IR 120	55.4

¹ Reaktionsbedingungen: $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, Katalysatormasse = 1 w%.

² Reaktionszeit bis zum Erreichen von 99% des Gleichgewichtsumsatzes.

Thermodynamik und Reaktionskinetik

Zur Ermittlung der Reaktionskinetik wurden Autoklaven (Batchbetrieb) und eine kontinuierlich betreibbare Laboranlage verwendet (siehe Kapitel 0). Die Autoklaven eignen sich für ein schnelles Screening von Katalysatoren und Prozessparametern. Die Anlage diente sowohl zur Ermittlung makroskopischer Einflüsse auf die Reaktionskinetik, wie Film- und Porendiffusionsvorgänge, als auch zur Untersuchung des Langzeitstabilitätsverhaltens der Katalysatoren. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Simulationsmodell erstellt und an die experimentell erhaltenen Daten angepasst bzw. validiert (Abb. 3 und Abb. 4). Die Ergebnisse aus den satzweise betriebenen Autoklaven und der kontinuierlichen Anlage sind analog.

Film- und Porendiffusion sind für Strömungsgeschwindigkeiten von > 0.33 ml/min im Rohrreaktor und bei der Verwendung einer Katalysatorpartikelgröße ≤ 149 μm , bei einer Reaktionstemperatur von 60 $^{\circ}\text{C}$, vernachlässigbar [8].

Das stöchiometrische Verhältnis von Methanol zu Formaldehyd hat direkten Einfluss auf die OME-Kettenlängenverteilung. Hohe Anteile an Formaldehyd führen zu langkettigen OME. Ein erhöhter Wassergehalt wirkt sich im Allgemeinen negativ auf die OME-Ausbeute aus. Die Nebenprodukte Halbacetale und Glykole entstehen bei Anwesenheit von Wasser und konkurrieren um den, für die OME-Bildung ebenfalls erforderlichen, Formaldehyd [8].

Die Geschwindigkeiten der sauer katalysierten Reaktionen können über einen hyperbolischen Ansatz beschrieben werden [8]. Die Bildung der OME erfolgt über zwei parallel verlaufende Reaktionen. Zum einen werden die sich aus Methanol und Formaldehyd schnell bildenden Halbacetale mit Methanol verethert, wobei die OME hierbei durch Wasserabspaltung erhalten werden [8]. Zum anderen erfolgt die Bildung über Transacetalisierungsreaktionen der OME untereinander [7].

Eine hohe Katalysatorstandzeit kann die Wirtschaftlichkeit einer Produktionsanlage steigern. Der Katalysator (Dowex50Wx2), welcher für die Entwicklung des kinetischen Modells herangezogen wurde, zeigt selbst nach 17 Tagen noch 90 % seiner ursprünglichen Aktivität. Durch die geringe Abhängigkeit der OME-Selektivität von der Temperatur kann die anfängliche Reaktionsgeschwindigkeit durch eine Temperaturerhöhung wieder erreicht werden, ohne Abstriche bei der OME-Ausbeute in Kauf nehmen zu müssen.

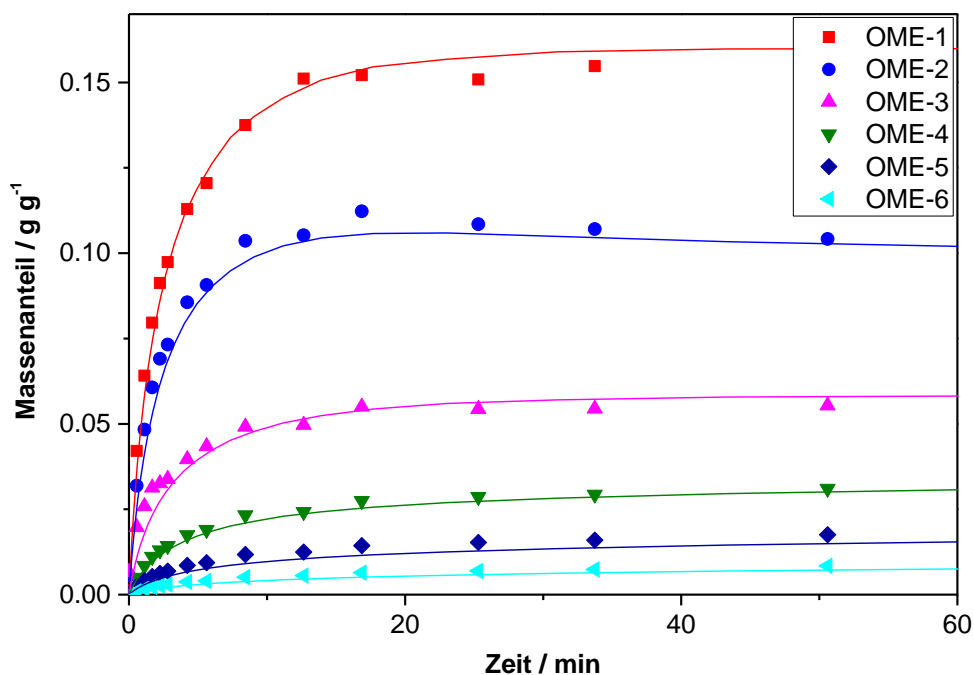


Abb. 3: Massenanteile von OME_1-6 in Abhängigkeit von der Zeit. Punkte repräsentieren die experimentellen Daten, Linien das kinetische Modell. Reaktionsbedingungen: $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, MeOH = 40.7 g, *p*-FA = 59.3 g, Katalysator = 1 g Dowex50Wx2.

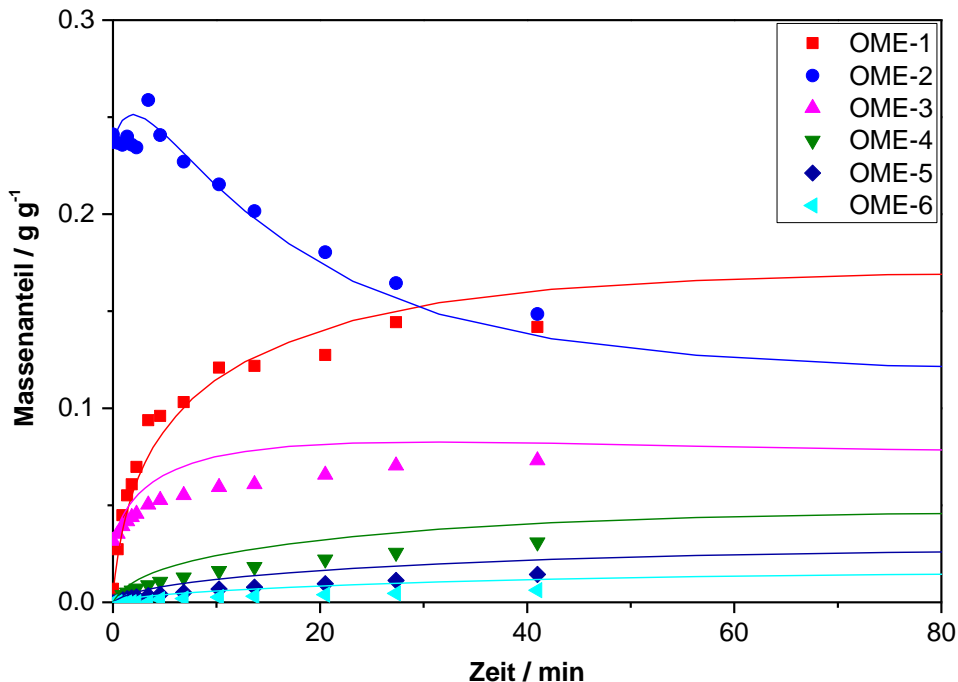


Abb. 4: Massenanteile von OME_1-6 in Abhängigkeit von der Zeit. Punkte repräsentieren die experimentellen Daten, Linien das kinetische Modell. Reaktionsbedingungen: $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, MeOH = 26.5 g, *p*-FA = 45 g, OME-2 = 23.5 g, OME-3 = 3 g, Katalysator = 1 g Dowex50Wx2.

Schlussfolgerung

Alle untersuchten sauren Katalysatoren sind in der Lage OME aus Methanol und Formaldehyd zu produzieren. Optimierungspotentiale ergeben sich rein auf Basis der katalytischen Aktivität. Da die Reaktion von OME einer Gleichgewichtsreaktion unterliegt, ist eine Ausbeutesteigerung für ein Verfahren denkbar, bei dem die OME selektiv aus der Reaktionsphase entfernt werden. Hierfür können Extraktionsmittel [16] oder auch eine Reaktivdestillation Anwendung finden. Das vorgestellte Verfahren ist bei milden Reaktionsbedingungen durchführbar, ohne dabei große Mengen des einzigen irreversibel gebildeten Nebenprodukts Methylformiat (< 1 w%) zu bilden. Alle weiteren Produkte, mit der Ausnahme von Wasser, können rezykliert und erneut zu OME umgesetzt werden. Dieser „grüne“ Prozess stellt, zusammen mit der Möglichkeit die Ausgangsprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen zu erzeugen, bei gleichzeitiger Reduzierung der Emissionen, ein innovatives und umweltfreundliches Verfahren dar, um auch in Zukunft auf flüssige Kraftstoffe mit hoher Energiedichte zurückgreifen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Lahaye, G. Prado, North Atlantic Treaty Organization. Scientific Affairs Division., "Soot in combustion systems and its toxic properties", *Published in cooperation with NATO Scientific Affairs Division by Plenum Press*, New York, 1983.
- [2] Y. Ren, Z. Huang, H. Miao, Y. Di, D. Jiang, K. Zeng, B. Liu, X. Wang, "Combustion and emissions of a DI diesel engine fuelled with diesel-oxygenate blends", *Fuel*, vol. 87, no. 12, pp. 2691-2697, 2008.
- [3] K. D. Vertin, J. M. Ohi, D. W. Naegeli, K. H. Childress, G. P. Hagen, C. I. McCarthy, A. S. Cheng, R. W. Dibble, "Methylal and methylal-diesel blended fuels for use in compression-ignition engines", *Society of Automotive Engineers*, vol. SP-1458, pp. 29-41, 1999.
- [4] M. Härtl, P. Seidenspinner, E. Jacob, G. Wachtmeister, "Oxygenate screening on a heavy-duty diesel engine and emission characteristics of highly oxygenated oxymethylene ether fuel OME1", *Fuel*, vol. 153, pp. 328-335, 2015.
- [5] M. Härtl, P. Seidenspinner, G. Wachtmeister, E. Jacob, "Synthetischer Dieselkraftstoff OME1-Loesungsansatz fuer den Zielkonflikt NOx-/Partikel-Emission", *Motortechnische Zeitschrift*, pp. 68-73, 2014.
- [6] M. Härtl, K. Gaukel, D. Pélerin, G. Wachtmeister, "Oxymethylenether als potenziell CO2-neutraler Kraftstoff für saubere Dieselmotoren Teil 1: Motorenuntersuchungen", *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 78, no. 2, pp. 52-59, 2017.
- [7] L. Lautenschütz, D. Oestreich, P. Haltenort, U. Arnold, E. Dinjus, J. Sauer, "Efficient synthesis of oxymethylene dimethyl ethers (OME) from dimethoxymethane and trioxane over zeolites", *Fuel Processing Technology*, vol. 165, pp. 27-33, 2017.
- [8] D. Oestreich, L. Lautenschütz, U. Arnold, J. Sauer, "Reaction kinetics and equilibrium parameters for the production of oxymethylene dimethyl ethers (OME) from methanol and formaldehyde", *Chemical Engineering Science*, vol. 163, pp. 92-104, 2017.

- [9] N. Schmitz, F. Homberg, J. Berje, J. Burger, H. Hasse, "Chemical equilibrium of the synthesis of poly(oxymethylene) dimethyl ethers from formaldehyde and methanol in aqueous solutions", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 54, no. 25, pp. 6409-6417, 2015.
- [10] N. Schmitz, J. Burger, H. Hasse, "Reaction Kinetics of the Formation of Poly(oxymethylene) Dimethyl Ethers from Formaldehyde and Methanol in Aqueous Solutions", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 54, no. 50, pp. 12553-12560, 2015.
- [11] U. Arnold, L. Lautenschütz, D. Oestreich, J. Sauer, "Production of Oxygenate Fuels from Biomass-derived Synthesis Gas", *DGMK-Tagungsbericht 2015-2*, pp. 127-136, 2015.
- [12] L. Lautenschütz, D. Oestreich, P. Seidenspinner, U. Arnold, E. Dinjus, J. Sauer, "Physico-chemical properties and fuel characteristics of oxymethylene dialkyl ethers", *Fuel*, vol. 173, pp. 129-137, 2016.
- [13] B. Lump, D. Rothe, C. Pastötter, R. Lämmermann, E. Jacob, "Oxymethylene ethers as diesel fuel additives of the future", *MTZ worldwide eMagazine*, vol. 72, no. 3, pp. 34-38, 2011.
- [14] D. Deutsch, D. Oestreich, L. Lautenschütz, P. Haltenort, U. Arnold, J. Sauer, "High Purity Oligomeric Oxymethylene Ethers as Diesel Fuels", *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 89, no. 4, pp. 486-489, 2017.
- [15] D. Oestreich, "Prozessentwicklung zur Gewinnung von Oxymethylenethern (OME) aus Methanol und Formaldehyd", Dissertation, Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2017.
- [16] U. Arnold, L. Lautenschütz, D. Oestreich, J. Sauer, "Verfahren zur Herstellung von Oxymethylenalkylethern und deren Verwendung", EP2987781 A1, 2016.

Preliminary Approaches for improving the Smart Grid Cyber Security

Kathrin Reibelt, Ghada El Bez, Oliver Schneider, Jörg Matthes, Hubert B. Keller

Institut für Angewandte Informatik (IAI), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-mails: kathrin.reibelt@kit.edu, ghada.elbez@kit.edu

Phone: +49(0)721 608-23973/ 28429

Abstract

The progressive digitization of the energy infrastructure in the course of the energy evolution requires reliable cybersecurity equipment that does not solely rely on access restrictions any more. For powerplants even frequently supplying fixes for vulnerabilities is not sufficient. One approach to repel attacks is the analysis of semantical and syntactical properties data of the communicated. For a fast detection of successful attacks the relations between parameters of control circuits can be evaluated. To ensure the security of our future energy system, the purpose of our work is to develop and establish independent, suitable monitoring systems within all components.

Keywords: cybersecurity, smartgrids, vulnerabilities, communication, control circuits

Introduction

For the energy evolution in Germany, the entire energy infrastructure is being rebuilt with power plants using renewable energy sources. A large number of small, decentralized power stations are replacing the large central power stations step by step. The fluctuating availability of renewable energy sources, as well as the increased energy demand due to mobility applications and the resulting higher fluctuations in demand, result in the need for much higher degrees of freedom in the network infrastructure. The large number of components requires intelligent remote control from a central position. The information network for control of those new plants, controllable transformers, prosumers etc. is called smart grid as it consists of smart devices. [3] Due to the high number of components interconnected in the smart grid and their spatial distribution, extensive protection against hacker attacks is required for such a control. In classical power plants, security is ensured primarily through the restriction of physical access or access rights. For high voltage transformers there is a dedicated optical fiber network. However, many examples from the past show that for smaller systems, far too often even the simplest access restrictions, e.g. password protection, are missing. But even if the usual protective measures have been taken, targeted attacks can rarely be repelled.

A current approach based on the concept of physical access restriction uses the so-called ‘power-line’ network in which the communication is transmitted directly via the power line. Although

this network is not directly connected to the Internet, the power lines are accessible in every household by smart devices. Due to the large number of systems that would have to be integrated, however, threads from network vulnerabilities also encounters any possible independent, dedicated network.

Another approach based on informational access restriction uses cryptographic methods. A perfect implementation would lead to a huge increase of security in communication, as all connected devices can be identified and the data cannot be manipulated. Unfortunately there are always vulnerabilities caused by implementation faults and it does not protect from an attack that duplicates valid data or delays it in time.

It is therefore necessary to establish mechanisms which ensure the security of the system, regardless of access restrictions.

About Smart Grids

The main difference between conventional and smart grids is that the latter ones include cyber devices based on software functionality. The quick development of different technologies in the industrial field as well as in the home area increases the electricity requirement dramatically. Thus, use of various sources of energy, especially renewable ones is becoming a necessity considering new legislation and increasing energy consumption. Several factors allowed the development of smart grids over conventional energy systems. The main reasons of the advent of smart grids are described below.

- Providing a low-cost energy source thanks to the adjustment ability of a dynamic pricing system based on the consumption information,
- Respecting the imposed environmental regulations and standards,
- Renovating the aging infrastructures in traditional power grids,
- Resistance to disturbances and quick recovery from them [7].

In a nutshell, the main promise of smart grids is to provide a low-cost and an outage-free source of energy for the future [14].

Vulnerabilities in Smart Grids

The use of Information and Communication Technology (ICT) in smart grids (SG) allows the interaction between the different parties and stations involved in energy generation, transmission and distribution processes. Communication networks used in the modern SG may however raise different security concerns.

Smart grids are considered as critical infrastructures which makes ensuring security one of the major concerns. The presence of different vulnerabilities inherent in the structure of a smart grid make ensuring its security even more challenging. Some of the main weaknesses encountered while ensuring the security and the safety of the SG are summarized in the following points.

- The use of a massive number of devices including intelligent ones in the SG may result in the increase of the possible vulnerable points. Smart meters for instance can be maliciously used to indirectly influence the whole power plant.
- The coexistence of short-lived IT systems and legacy devices may result in incompatibilities and raise security concerns.
- An implicit trust is adopted for device-to-device communication also called machine to machine (M2M). This can affect the control system and make it vulnerable mainly to data spoofing as the state of one device alters the functionality of another [1].
- The growth of the number of stakeholders in modern smart grids leads to new threats such as insider attacks.
- The adaption of network protocols found in general computer systems to power plants implies the same threats encountered in the former systems.
- Almost all usual software contains weaks or faults in the implementation that lead to significant vulnerabilities [6].

Countermeasures against Smart Grids Cyber Threats

Traditional solutions against cyber-attacks in smart grids were adapted from the ICT field such as access restrictions. However, those methods are not adequate for application to the smart grid due to its specificities. In fact, in a critical infrastructure such as a smart grid, availability, integrity and certain levels of confidentiality are required in this order of priority [9].

To harden the cybersecurity of the modern energy systems against attacks several techniques ranging from firewalls to intrusion detection and prevention tools are used. Industrial protocols used in smart grids such as Modbus TCP or DNP3, for the most do not have integrated network security solutions. Attacks such as DoS or DDoS, MIM (Man-in-the-middle) can have disastrous consequences as shown by the reported accidents in the few last years.

Consistent work on developing intrusion detection systems has been done. High rates of intrusion detection with low rates of false positive were reached. Jyothi et al. in [5] claim reaching a detection rate of DDoS attacks of 99.8 % and a false alarm rate of 0 % using BRAIN, a behaviour based intrusion detection tool that uses an algorithm that combines low-level hardware events, network statistics and application parameters. Many researchers claim reaching such high rate of detection, however they rarely consider latency detection [10]. In fact, time is a decisive factor in the case of a cyber-attack affecting a critical infrastructure such as a SG. If an intrusion detection system has a high detection latency, the target could be damaged before the intrusion is detected.

An approach that enables the detection of intrusions within a reasonable time in a first stage and their prevention in a second one is highly needed to secure the network communication in smart grids. The semantic and syntactic checking of the data transmitted within the network of the smart grid is a promising approach to protect this critical infrastructure mainly against availability attacks. Further work will focus on developing solutions to reach this goal.

Cybersecurity of energy systems, a model-based approach

The detection of attacks requires in most cases prior knowledge of the weak points of the computer system or knowledge of the behavior of the malicious software. In the current systems new vulnerabilities are constantly being discovered, for which the signatures for the detection and the necessary fixes are provided in the form of updates. However, for energy infrastructure as a critical infrastructure, these updates are often applied only after years, because every change to the system has to be validated by extensive tests [4].

In order to recognize a successful attack regardless of its signature knowledge about the inter-operation of the components in the affected system is necessary.

The plants are equipped with a standard system that detects states which could cause damage to the plant and trigger an emergency shutdown. The usual protection systems, as they are used in most facilities, define independent expectation intervals for all measured values. If a value exceeds such an interval, the system is switched off. The exact deviation, i.e. direction and magnitude, enables conclusions in case of a known malfunction but lacks information to classify an unknown malfunction [8, 13]. Protection against artificial attacks is rarely possible because the independence of the intervals provides sufficient margins for manipulations that will not be detected. Even without an attack some plants were damaged in the past despite those protection systems [12]. For the detection, the preprocessed data from smart sensors are used, so the sensors themselves can be manipulated. Manipulations which do not lead to a damage, such as the reduction of the requested power, are not recognized by these systems at all.

In addition, these security systems enable new possibilities of attack. In order to take the plant off the grid, only a prohibited operating state has to be emulated or physically reached by the attacker. Also this is no problem for a single plant, it is risky for the power system as all components are connected and accessible with standardized communication. Thus a specific manipulation could apply to multiple plants and therefore take entire groups of plants off the grid.

The idea considered in the following is to introduce an independent monitoring system, which checks the control circuits for invalid behaviour and in future systems validates the measured system states with a minimum number of additional, reliable measurements. The correlations between the different control and measured variables as well as their derivatives can be condensed from the existing models of the plants.

For a quick fix of the malfunction, additional information about the component which is most likely the tampered one, is helpful. In addition to the fast recommissioning of the affected plant function, this knowledge could also be used to test identical components in other systems. Therefore the aim is a classification of the malfunctions, which is independent from the knowledge of the signature of the specific malfunction.

The following methods are investigated on the Simulink model of a wind turbine [2]. The actuating variable is the requested power from which the control calculates a set point for the pitch angle depending on the measured supplied power. The wind is then the mediating parameter, and

changes of the wind can be considered a disturbance that affects the system. The requested power is 3 MW in the unmanipulated case.

A method presently used in industrial plants is the simulation during runtime with the measured conditions. The values calculated by the simulation can either be compared directly to the measured ones or individual features can be compared. Since the behavior of the systems is described much more precisely here, this approach is more suitable for the detection of an attack than in the comparison with intervals. As for the intervals the deviations between measurements and simulated values provide information on the causes of the malfunction, in case of a known pattern. A major issue is that the simulation can take very long if the system behavior is mapped accurately. Thus, for a real-time application simplifications may be necessary [8, 13].

In the example (Fig. 1), the pitch angle is manipulated to 0° , implying the maximum energy transfer. The measured curve can be seen in red. The figure shows the output values by the pitch control (not the manipulated true pitch value of 0°). The wind speed is increasing continuously. In order to reduce the measured power, the control attempts to increase the pitch more and more. As the true pitch remains at 0° the generator speed increases. The efficiency of the generator depends on the speed as it feeds to a grid with rotating current of a certain frequency. So the reached speed finally leads to decreasing power and the protection system interrupts the operation after 6.6 s because of low Voltage, the trace ends prematurely. In parallel, the expected behavior of the unmanipulated system is simulated with a model, shown in blue. Here the power is regulated at 3 MW by increasing the pitch angle as long as the wind exceeds the minimum speed required for nominal power.

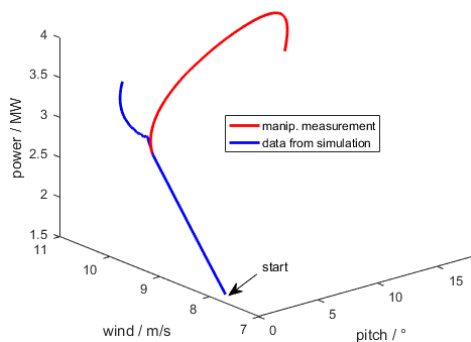


Fig. 1: Trace from Simulink simulation of a wind turbine and trace of parallel simulation during runtime. Manipulation: pitchangle kept at 0° .

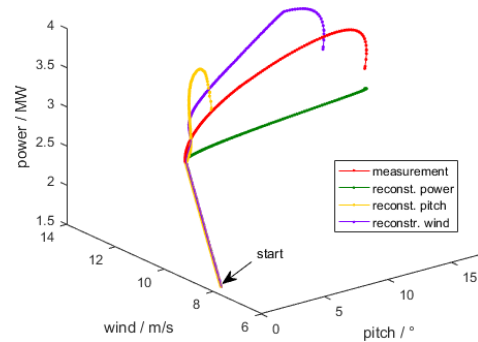


Fig. 2: Trace from Simulink simulation of a wind turbine and statical reconstructions of any parameter on the others. Manipulation: pitchangle kept at 0° .

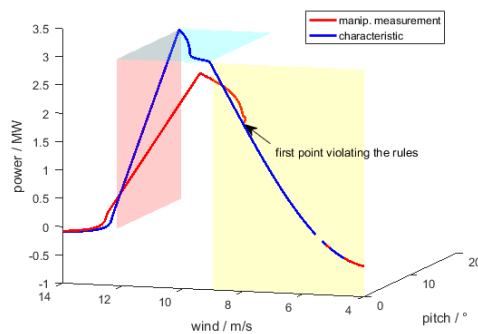


Fig. 3: Static characteristics (usual characteristic and one manipulated) from Simulink simulation of a wind turbine and regions with similar behavior. Manipulation: reduced power request.

To improve the speed of the analysis, the static interrelationship of observables involved in one control loop can be used as simplification. Such possible redundancies in the system can be identified by the model [11]. For a group of observables that have interrelationships, each variable is reconstructed from the others. If the reconstructions differ significantly from the measurement this indicates a manipulation, in case of almost bijective dependencies. In the next example (Fig. 2), the pitch angle is manipulated to 0° , as in the first example. All reconstructed traces differ obviously from the measured one. A manipulation is suggested. A helpful supplement to identify the manipulated parameter would be the safe, secure and independent measurement of the most meaningful parameters.

Another possibility to detect manipulations is to simplify the system by dividing it into regions with similar behavior. Rules are defined describing the behavior in each of these regions. The information which rules are broken allows conclusions on possible causes. Dependencies between the rules are identified. For example, the break of a certain rule results in the breaking of a second rule, whereas it does not result from the second rule. So the additional information which regions were entered is required. If this method shows an anomaly, it can be evaluated, if the suspicious section of trace matches the rules of the next region.

The third example (Fig.3) shows an unmanipulated characteristic in blue, which lies in the planes. The different planes mark regions of common rules. In the yellow region, the pitch angle, as well as its derivative, must be at 0, the wind speed is between 5 m/s and 9 m/s, and a positive derivative of the wind is associated with a positive derivative of the power. Correspondingly, a negative derivative of the wind is accompanied by a negative derivative of the power and a constant wind speed with a constant power. For the recording of the red line, the pitch control uses a requested power manipulated to a lower value. Both curves are static characteristics. For dynamic traces, slight deviations from the characteristic curves occur which, however, have no influence on the fulfillment of the rules. It can be seen that the curves in the yellow region agrees with the rules for the most part. Only in the upper range a deviation occurs at power and pitch angle. In the blue and red regions, deviations occur with pitch angle and power.

In order to get additional information, the curve from the first point that violates the rules in the yellow region is shifted so that it lies on the transition to the blue region. The shifted curve now fulfills the rules of the blue range. This leads to the conclusion that the wind turbine behaves normally, it only depends on a wrong target power. The displacement of the curve in the direction

of a lower wind speed is a logical consequence of the displacement to a lower power and therefore only confirms the conclusion. A wrong measurement of the wind force would only require a shift on the wind scale.

Conclusion

The methods introduced are meant to ensure the integrity of communication and control loops in the energy system of the future. On such methods a diagnostic system has to be developed that should be realized as an embedded system with very limited communication possibilities, in order to ensure the future protection of power plants and automated industrial plants.

References

- [1] Aloul, Fadi and Al-Ali, AR and Al-Dalky, Rami and Al-Mardini, Mamoun and El-Hajj, Wassim. "Smart grid security: Threats, vulnerabilities and solutions." *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* 2012: 1-6.
- [2] Gagnon, Richard (2004): „Wind Farm (IG)“, https://de.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_wind_ig-wind-farm-ig (2017-2-21).
- [3] Hagenmeyer, Veit; Cakmak, Hüseyin Kemal; Döpmeier, Clemens; Faulwasser, Timm; Isele, Jörg; Keller, Hubert B.; Kohlhepp, Peter; Kühnapfel, Uwe; Stucky, Uwe; Waczowicz, Simon; Mikut, Ralf: "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*, Vol. 4, pp. 145-162, ISSN 2194-4288/2194-4288, DOI 10.1002/ente.201500304, 2016.
- [4] International Atomic Energy Agency Vienna (2011): "Computer security at nuclear facilities", IAEA Nuclear Security Series No. 17, Technical Guidance Reference Manual, ISBN 978-92-0-120110-2.
- [5] Jyothi, Vinayaka and Wang, Xueyang and Addepalli, Sateesh K and Karri, Ramesh. "Brain: Behavior based adaptive intrusion detection in networks: Using hardware performance counters to detect DDoS attacks." *VLSI Design and 2016 15th International Conference on Embedded Systems (VLSID), 2016 29th International Conference on*. IEEE, 2016. 587-588.
- [6] Keller, H. B.; Schneider, O.; Matthes, J.; Hagenmeyer, V.: Zuverlässige und sichere Software offener Automatisierungssysteme der Zukunft – Herausforderungen und Lösungswege. *at – Automatisierungstechnik* 2016; 64(12), S. 930–947.
- [7] Kush, Nishchal and Foo, Ernest and Ahmed, Ejaz and Ahmed, Irfan and Clark, Andrew. "Gap analysis of intrusion detection in smart grids." *Proceedings of the 2nd International Cyber Resilience Conference*. 2011. 38-46.
- [8] Lichtenberg, G. (2011): „Methoden der modellbasierten Fehlerdiagnose“, http://www.modqs.de/fileadmin/user_upload/Workshops/Vortraege_2011/ModQS-Workshop-2011-Lichtenberg.pdf (2016-10-19).

- [9] Liu, Jing and Xiao, Yang and Li, Shuhui and Liang, Wei and Chen, CL Philip. "Cyber security and privacy issues in smart grids." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (2012): 981-997.
- [10] Mitchell, Robert and Chen, Ing-Ray. "A survey of intrusion detection techniques for cyber-physical systems." *ACM Computing Surveys (CSUR)* (2014): 55.
- [11] North Carolina State University, University of Ottawa (2003): „Introduction to Data Reconciliation“, http://www.polymtl.ca/namp/docweb/Modules_Web/M11_Tier1_Chap1-3.pdf (2016-10-18).
- [12] Schultz, Stefan (2017): „Das Geheimnis der umgeknickten Windräder“, <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/windkraft-traege-rotorregler-fuehrten-laut-analyse-zu-mysterioeser-havarie-serie-a-1137530.html> (2017-3-10).
- [13] Schwenken, U. (2006): „Eine Methode zur Fehlerbewertung und zur adaptiven Motorleistungsbegrenzung auf der Basis einer modellbasierten Diagnose am Beispiel eines PKW-Kühlsystems“, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.
- [14] Sorebo, Gilbert N and Echols, Michael C. *Smart grid security: an end-to-end view of security in the new electrical grid*. CRC Press, 2011.

Development of the Renewable Energy Sector in Europe

An Institutional Perspective

Mariya Trifonova

European Institute for Energy Research, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-mail: mgtrifonova@gmail.com

Abstract

In the background of the threats imposed by the climate change and all complex issues linked to it, the European Union (EU) has been following for almost ten years a common energy policy aiming at transition of the national energy sectors from fossil fuels toward renewable energies (RE) and higher efficiency. Despite of common Energy Union strategy, European-wide coordination of regulatory frameworks, supportive funding schemes as well as comparable level of technology access, RE policy implementation in the various European countries leads to different outcomes and emerging of economic sectors with different structural parameters. The technical and market integration of volatile clean energy sources into socio-technical systems inherited from the past created many inconsistencies to the energy market functioning and established practices. This paper argues that the institutional set-up plays an important role in favoring or hindering the development of the RE industry in a given country. Not only the institutional infrastructure in the national energy sectors deserve more attention when analyzing the processes of energy transition, but harmonization of the national institutional set-up should be considered for the facilitation of the transitional process. The work contributes to the development of a conceptual framework for the study of the role of the institutions for shaping the RE sectors and identifies the most important types of them.

Keywords: Renewable energy industry, European energy policy, Institutions, Policy coordination, Energy transition, Multi-level perspective, Common European Energy Union

Introduction

The paper begins with introduction of the theoretical concepts, which explain the emergence and historical development of the renewable power sectors of the EU countries as a fraction of broader ‘managed’ socio-technical transition accompanying the long-term process of change in the national energy systems of all member states. In order to bring more clarity on the term of socio-technical transition, in particular the energy transition and its relation to institutional theories, section 2 introduces briefly the multi-level perspective by Rip and further developed by Geels. It

is argued, that technological development enables, but it is not a main driver of the transition to national energy sectors based on RE sources. On the other hand, studying specific regulatory content or policy assessment is not sufficient in order to explain differences between the national RE sectors. The institutional infrastructure is essential for the success of any transition including the energy transition. The importance of institutions for governing economic exchange is acknowledged in the economic literature. However, a closer look on the concept of the institutions in section 3 shows that the dominant economic models and theories are not sufficient to explain how the difference in institutions across countries implies the adoption of RE, and consequently the speed and scope of the energy transition. Based on the described theories section 4 identifies five types of institutions, their organizational forms and role for the development of the RE sector. The paper focuses on wind and solar PV as most widespread technologies for green power generation. In less than a decade, both turned from expensive and far from economic maturity into common and cost-competitive non-fossil sources of energy. Other RE sources either have already reached their saturation point or have not been deployed on a large-scale yet, which is why they are not considered in the scope of the paper.

Energy Transition and Renewable Energy Technologies

Energy systems can be defined as socio-technical regimes [1] or configurations of multiple, interconnected areas interacting in practice across and between an exogenous structural context, the so-called socio-technical landscape and niche level, where radical technological innovations are believed to take place. In this multi-level perspective stemming from the Evolutionary economics and Sociology of technology, technology is understood to have potential impact on social behavior. Societies can make choices concerning technology, therefore a co-evolution of technology and society can be observed [2]. Path-dependency is important feature of the regime due to its complex nature and interlinks, thus putting constrains on it to change [3].

The transition of energy system is explained primarily through the emergence of new technologies such as optimized solar cells, massive offshore wind turbines or power storage technologies at the niche level. Niches represent areas where technology innovations can develop protected from the ‘mainstream market selection’[4] until they reach such technological maturity and cost-efficiency which enable them to compete with existing technological products. Technological innovations lead to new social practices which oppose the existing regimes of energy production and consumption and put it on pressure to change [5]. A series of interconnected changes leads to a system transitions, respectively to the emergence and growth of new areas of the system, for instance the development of the RE sector with increasing importance for the whole energy industry. The concept points out the significance of the appropriate governance for the transitional process.

The renewable energy technologies have some intrinsic characteristics which deserve a special attention when analyzing the transitional process described above. First of all, it should be taken into consideration that interest in energy technology based on renewable sources corresponds in many EU countries with social green movements (in most cases anti-nuclear movements).

Historically, the initial drivers of socio-technical transitions in the energy domain were changes in the way of energy end-use[6] that initiated a process of search and acceptance of new technological solutions. The alteration of demand patterns itself is driven by change of beliefs, values or cognitive routines, which are considered to be matter of institutional alignment [7].

Before the actual industry uptake, the formation of the niche RE market required intensive research and development activities. Networks consisting of academic / research and industry actors emerged to explore and test the new technologies and accordingly to create an academic and industrial knowledge base nationwide. The establishment of powerful industry organization facilitates interaction among the industry representatives. The efforts of industry associations lead to technology and market knowledge dissemination and increase the legitimacy of the renewables in the society [8].

At the next level of integration to the existing energy systems, renewables are characterized as being structurally ‘disruptive’ to conventional generation technologies[9] and meet serious system and institutional resistance. Because of their variability and uncertainty the new decentralized technologies cause technical and operational frictions. The required increase of system flexibility and infrastructural alteration are difficult to be achieved considering the existing path-dependencies. Furthermore, the introduction of new power generation technologies to the market questions the effectiveness of the energy market rules which were in place. Since the source of renewable electricity were initially not ready for the market, national energy policies aiming at optimal support schemes design were implemented in order to insure sufficient return to the investors. However, in most countries the support offered contradicted the price signals at the market. The existing market framework was not suited to accommodate the new technologies with zero marginal cost and highly variable generation. All these frictions pose both from the market and technology transition perspective fundamental challenges for the current political, economic and legal institutions at national and European level [10].

The Concept of Institutions

According to the multi-level concept, regimes are embedded in institutions [2]. The role of the institutions is increasingly being emphasized in the social science research on energy transitions [1]. However, methodological differences and existence of various interpretations of the institutional concept across the separate schools of thoughts increase complexity of the task to analyze their functions. The neoclassical economics (NCE) has rather limited perspective on the role of the institutions. Putting the rational, socially independent und utility maximizing homo economicus in the center of the economic world, the neoclassical theories explain the economic choices as a function of relative prices and volumes ignoring the psychic and social factors. Transactions resulting from the interplay between supply and demand are analyzed without further deepening into the rules of the economic exchange. The only forms of institutions existent in the mainstream analytical approach are the competitive markets, property rights and contract laws.

Strongly influenced by the neoclassical economic theory, Douglas North, believed to be the founder of the New institutionalism, includes a historical perspective into the economic analysis and defines the concept more precisely. According to North institutions are those formal (constitutions, laws, property rights) and informal rules (beliefs, behavior patterns, codes of conduct) which constrain economic and political behavior in the society as well as the organizations, bodies and communities through which the rules are implemented [11]. The market is classified as an important institution of the modern capitalism. The above mentioned definition is fruitful for the identification of the institutions in the RE sector, but since the new institutional theory follows the same methodology as NCE, the role of institutions is minimized to economic-efficiency-enhancing rules. They are considered to reduce transaction cost of the economic actors still aiming at utility function's maximization under the constraint of scarce resources and bounded rationality. The theory explains isolated economic forces in an abstract, modeled world with micro orientation to the individual actor.

In reality, pure markets do not exist, so market forces are not the mere determinants of RES development and they cannot explain current shifts in the energy systems. Technology, which the neoclassical model considers as exogenous variable explaining changes in economic performance, is nowadays shared worldwide. Empirical evidences show that the resource scarcity/availability is also not a determining factor, because there are many examples of countries in Europe with less favorable climate resources and higher rates of RET implementation [12]. Thus, I prefer an inductive approach of recognizing empirical trends in the stages of historical emergence and development of renewable energy industry in order to better understand the interaction between technology, markets, policies and institutional factors as well as, how this interaction induces the future transformations in the energy systems. In doing so, I propose an explicit terminological distinction between institutions, organizations / bodies and markets. While the first one are broadly recognized and accepted rules as well as established behavioral patterns in the economy and society, the organizations are the concrete, with purpose created structures, which implement, in some cases even create institutions (for instance the regulatory bodies).¹ In a similar way, I see the markets not equal to institutions, but moreover, supported by the rules facilitating and organizing exchange. However, for the purpose of an empirical observation, those three concepts are combined in order to examine their nature and impacts on RE industry development.

Types of Institutions and Their Impact in the Renewable Energy Sector

Taking a closer look on the meso-level of the socio-technical regimes, the characteristics of institutional actors, who set and influence the rules of the game in the regime, are elaborated. Five types of 'institutional bodies' are distinguished and their impact on the emergence and evolution of the RE sector on a national level is outlined.

¹ [13] describe extensively, how the concepts of institutions, organizations and markets are formulated and interpreted in the economic literature. Regarding a methodological exposition of the economical and sociological approach to institutions see [14].

Tab. 1: Types of institutions identified in the renewable energy sector.

Formal institutions			Informal institutions	
Supranational institutions	Political institutions	Regulatory institutions	Civil institutions	Embedded institutions
1) EU and its bodies 2) Worldbank, International Monetary Fund	National governments Political Parties	National Regulatory Agencies Courts	National industry associations & unions Environmental organizations Think-Tank Research institutions / Universities Communities of practice	Promoting vision for the future (i.e. vision of 100 % renewables) Expression of the value base Ideals Beliefs
1) Creation of Common Energy Union, Setting and monitoring RES targets, assessment of state-aid compliance, support of science and research 2) Monitoring of structural reforms in the energy market as a whole and recommendations	'Supply' of legislation Policy-making Setting national targets and programs Enabling access to resources	Market organization and integration of RES Supervision over existing laws Balancing economic and social interest of all actors in the market	Building organizational networks in support/opposition of renewables Creation of non-market forces Technology dissemination Distribution of sector specific knowledge and competence (informational companies, legal statements) Lobbying	Public perception of renewables Sensitivity to the environmental problems Legitimacy of new technology Knowledge formation Value base influencing demand patterns

The idea of using renewables as sources of energy is not new. Grubler's studies on historical energy system transitions in Europe illustrate a shift from the preindustrial biomass and renewables to coal-related technology across European countries lasting from 1736 to 1949 [6]. Nowadays, reorientation of European countries from fossil-based energy technology to renewables follows different tempo. Many of the modern RE technologies were available in an early form after several decades of experimentation until 1980s. The technological take off period of solar PV (photovoltaics) and wind for example is considered to be between 1990 and 2002, but their impact on the energy system was marginal until challenging indicative national targets to increase the share of RES-E (electricity from renewable energy sources) were set by Directive 2001/77/EC of the EU [7]. Supranational institutions such as the EU and its bodies as well as the Worldbank and International Monetary Fund (IMF) influence the meso-level imposing common obligations and drivers for energy transition on international level such as liberalization, privatization and Europeanisation (creation of common European Energy Union) and shifts to low-carbon production and consumption.

The supranational institutions influence the behavior of those bodies which set the legal rules at national level and particularly the acting of the political institutions such as law- and policy makers. It is assumed that the political institutions can have greater impact on transitional

processes if they share long-term and consistent strategies, ensure continuity and predictability of the rules set.

Regulatory institutions are those that monitor compliance with the legal norms and take care of balancing all actor's interests and gains in the regime. Independent regulatory institutions taking their decisions based on the principles of consistency and transparency inspire investor's confidence. The economic behavior in the sector is positively affected if the regulatory bodies fulfil accurately their responsibility of accounting for changes in technology costs and properly chose the timing for investment incentives' introduction. Another important feature is the administrative capacity which enable them to act proactively and competent.

The fourth class represents the interests, practices and attitudes of social and/or business groups and can be placed inbetween the formal and informal context. It is claimed that civil institutions or all non-governmental institutions, industrial unions, think-tanks as well as research institutes have crucial role for the enforcement of the RE sector. In most cases they are connected in organizational a network, which enables them to perform lobbying activities, to introduce and to support new business practices or to influence public attitudes through distribution of information about new technologies at national as well as international level.

The fifth type encompasses informal, embedded institutions such as culture, social attitudes and public acceptance. Although extremely difficult to measure, it is believed that no socio-technical change could be expected without a change in the cultural values or evolution of the cognitive routines of the single actors. All five institutional classes are interlinked and complementary to each other. For instance, if actors do not have interpersonal trust, a stronger judicial system would be required.

Conclusion

Policies, regulatory regimes and legal frameworks shape the national RE sectors, but single copying of successful models would not guarantee successful outcomes, because the institutional foundations in every single country are different and due to path-dependencies not easily adoptable to new realities. The understanding how institutions work and the identification of key institutional actors and their interdependencies is essential for the coping with future challenges in industries that imply socio-technologic transition such as the emergence and development of the RE sector. Therefore, this paper calls for deeper analysis of the institutional environment as well as taking into consideration the historical development of more countries. The work puts the foundations for the development of a theoretical framework which is used for the empirical study on the energy transitions of five European countries with a specific comparison of their institutional features, which affected the development of the observed national RE sectors.

References

- [1] Andrews-Speed, P. (2015): Applying Institutional Theory to the Low-Carbon Energy Transition, in *Energy Research and Social Science* Vol. 13, P. 216-225, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.011>.
- [2] Rip, A. and Kemp, R. (1998): Technological Change, in Rayner, S. and Malone, E. L., *Human Choice and Climate Change*. Columbus, Ohio.
- [3] Kuzemko, C., et al. (2016): Governing for Sustainable Energy System Change- Politics, Contexts and Contingency, in *Energy Research and Social Science* Vol. 12, P. 96-105, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.022>.
- [4] Verbong, G. and Geels, F. (2007): The Ongoing Energy Transition: Lessons from a Socio-Technical, Multi-Level Analysis of the Dutch Electricity System (1960–2004), in *Energy Policy* Vol. 35 (2), P. 1025-1037, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.02.010>.
- [5] Greels, F. (2002): Technological Transitions as Evolutionary Reconfiguration Processes: A Multi-Level Perspective and a Case-Study, in *Research Policy* Vol. 31 (8-9), P. 1257-1274, available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8).
- [6] Grubler, A. (2012): Energy Transitions Research: Insights and Cautionary Tales, in *Energy Policy* Vol. 50, P. 8-16, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.070>
- [7] Jacobsson, S. and Lauber, V. (2006): The Politics and Policy of Energy System Transformation – Explaining the German Diffusion of Renewable Energy Technology, in *Energy Policy* Vol. 34 (3), P. 256–276, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2004.08.029>.
- [8] Watson, J. (2008): Setting Priorities in Energy Innovation Policy: Lessons for the UK, Discussion Paper 2008-07. Cambridge, Mass.: Belfer Center for Science and International Affairs.
- [9] Foxon, T.J., et al. (2005): Uk Innovation Systems for New and Renewable Energy Technologies: Drivers, Barriers and Systems Failures, in *Energy Policy* Vol. 33 (16), P. 2123-2137, available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.04.011>.
- [10] Verzijlbergha, R.A., et al. (2017): Institutional Challenges Caused by the Integration of Renewable Energy Sources in the European Electricity Sector, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 75 (660–667), P. available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.039>.
- [11] North, D. (1991): Institutions, in *The Journal of Economic Perspectives* Vol. 5 (1), P. 97-112, available at, <http://www.jstor.org/stable/1942704>.
- [12] Bernard, M., et al. (2011): The Role of Institutions in the Implementation of Wind Energy, in *Cross-Sector Leadership for the Green Economy*. Palgrave Macmillan US.
- [13] Edquist, C. and Björn, J. (2000): Institutions and Organizations in Systems of Innovation, in Edquist, C. and McKelvey, M., *Systems of Innovation: Growth, Competitiveness and Employment*. Cheltenham, UK Edward Elgar Publishing.

- [14] Keizer, P. (2007): The Concept of Institution in Economics and Sociology, a Methodological Exposition, Utrecht School of Economics Tjalling C. Koopmans Research Institute.



ISSN 1869-9669
ISBN 978-3-7315-0753-6

