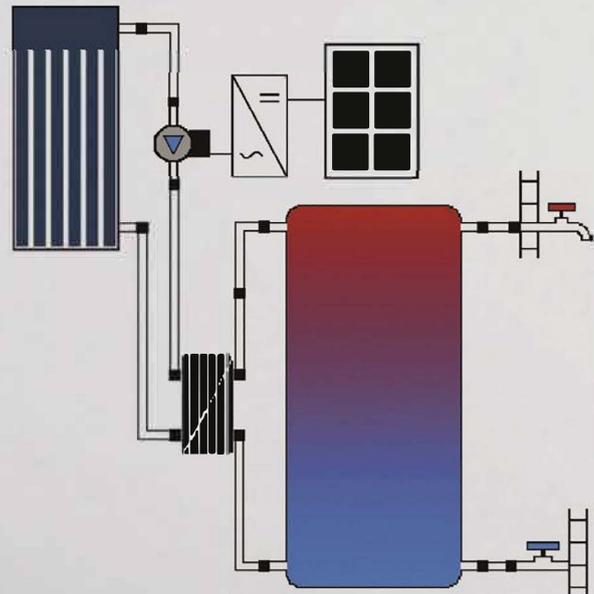


Institutsbericht 2019



Der Vergleich von Simulation und Experiment ist im Bereich der Forschung gut etabliert. Mit der dargestellten Anlage wird auch in der Ausbildung die Abweichung von numerischer Berechnung und Messung thematisiert. Studierende im Studiengang *Energie und Umwelt* analysieren anhand des Versuchsaufbaus (links) die Wärmeflüsse in einer Solaranlage. In den Simulationsübungen nutzen sie das Planungstool Polysun, um dieselbe Anlage im numerischen Modell nachzubilden (rechts).

Vorwort

Der vorliegende Institutsbericht führt die Tradition des ICP weiter, die Forschungsprojekte in einem jährlich erscheinenden Report zusammenzufassen. Neu werden zusätzlich zu den Aktivitäten in den Forschungsschwerpunkten des ICP auch Projekte aus der Lehre dargestellt.

Die *Digitalisierung* verändert nicht nur Forschung und industrielles Engineering, sondern auch den Unterricht an der Fachhochschule. Wir beobachten, wie unsere Studierenden mit leistungsfähigen und handlichen Mobilgeräten in die Vorlesung kommen. Einerseits kommt man damit dem papierlosen Studium einen wesentlichen Schritt näher. Ein schönes Wandtafelbild wird fotografiert und findet sich nahtlos in den digitalen Notizen neben Unterrichtsmaterialien, die auf Moodle bereitgestellt werden. Andererseits wird ein alter ICP-Traum wahr: Simulationen sind im Unterricht angekommen! Anhand von numerischen Experimenten können wir den Studierenden physikalische Vorgänge zugänglich machen, die aufgrund ihrer Dimension sonst nicht greifbar sind. Die grosse Sammlung an analogen Experimenten – viele davon aus einer Zeit als unsere Schule noch *Technikum Winterthur* genannt wurde – wird ergänzt durch *digitale Experimente*. Simulationen können auf den mobilen Geräten der Studierenden durchgeführt werden, aktivieren die Studierenden, wecken ihre Neugierde und helfen beim Darstellen komplexer Zusammenhänge. Es freut uns, wenn wir vonseiten des ICP mit unseren Computerexperimenten einen aktiven Beitrag zur Erweiterung der Physiksammlung leisten können. Es ist uns bewusst, dass die Nutzung der mobilen Endgeräte für diese Zwecke neben den offensichtlichen Chancen auch didaktische Herausforderungen mit sich bringt. Ein grosses drittmittelgefördertes Projekt der Internationalen Bodenseehochschule IBH befasst sich unter dem Didaktik-Schlagwort *Seamless Learning* genau mit diesem Thema; es wird in Kapitel 5.2 beschrieben.

Wir sind zuversichtlich, dass wir mit unseren Simulationen die Qualität des Grundlagenunterrichts steigern und bei den Studierenden auch das Interesse an der angewandten und industrienahen Forschung wecken. Die Resultate aus diesen Projekten sind in den ersten vier Kapiteln dieses Berichts dargestellt. Ein Dankeschön an alle Forschenden für ihr Engagement in der Wissenschaft und für die hochinteressanten Artikel, die ihre Aktivitäten zusammenfassen.

Andreas Witzig, Institutsleiter ICP, April 2019

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
1 Multiphysik-Modelle	1
1.1 Pulverspritzlackierung: simulationsbasierte Entwicklung des Prototyps einer neuartigen Generation von Beschichtungspistolen, basierend auf der zielgerichteten Anwendung koronaler elektrischer Felder	2
1.2 Entwicklung der Serienreife von neuartigen vollkeramischen Hochtemperatur-Heizelementen zur Heissluftherzeugung	3
1.3 Holzvergasung – vom ICP nach Melides (Portugal)	4
1.4 Verschmutzungseinfluss auf Resonator basierte Viskositätssensoren.....	5
1.5 Modell einer Dekantierzentrifuge zur Vorhersage des Ablagerungsverhaltens von Partikeln in fest-flüssigen Suspensionen	6
1.6 Analyse des thermischen Verhaltens des Geschwindigkeitssensors von Medyria, basierend auf einem in OpenFOAM entwickelten thermo-fluidischen CFD-Modell.....	7
1.7 Mehrskaliges Modell einer kristallinen Polymorphie	8
1.8 Pulverspritzlackierung: Ein Tool, um nach der Anwendung Daten zur Stärke der Pulverspritzlackierung zu analysieren.....	9
1.9 Prüfstand zum kontaktlosen Verschweissen von Kunststoffproben	10
1.10 Dynamische Delamination von sich anpassenden Rotorblättern und Flügeln.....	11
1.11 Spektrale Zusammensetzung der Faraday-Instabilität in kleinen Gefässen.....	12
1.12 PVT-Hybridkollektoren: Wärme und Strom aus der Sonne	13
2 Elektrochemische Zellen und Mikrostrukturen	14
2.1 Simulation des Ertrags von neuartigen Solarzellen	15
2.2 Analyse des dynamischen Verhaltens von Perowskit-Solarzellen	16
2.3 Fortgeschrittene Charakterisierung von Brennstoffzellen-Stapeln bei automobilen Anwendungen (ACTIF)	17
2.4 Experimentelle Parameter-Unsicherheit bei der Modellierung von Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen	18
2.5 Modellierung und Simulation einer organischen Redox-Flow-Batterie	19
2.6 Modellierung und Simulation einer Wasserstoff-Brom-Redox-Flow-Batterie	20
2.7 Evolution der Mikrostrukturen bei Hochtemperatur-Korrosion von metallischen Verbindungsleitungen (MIC) für Festoxid-Brennstoffzellen	21
2.8 Modell für den abnutzungsoptimierten Betrieb von Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Stapeln	22

3	Organische Elektronik und Photovoltaik	23
3.1	Aus dem Labor in die Fabrik: Hochskalieren von Perowskit-Solarzellen	24
3.2	Ultra-Breitband-THz-Photonik basierend auf organischen Kristallen.....	25
3.3	Farbstoffsolarzellen: Simulation der Impedanz, experimentelle Validierung und Parameterextraktion.....	26
3.4	Verbesserte Lichtausbeute in organischen Leuchtdioden dank einer neu entwickelten Streuschicht.....	27
3.5	Grenzen der Triplett-Ausbeute von fluoreszierenden organischen Leuchtdioden	28
4	Sensorik und Messsysteme	29
4.1	Skinobi – ein preiswerter Sensor zum Ermitteln des Zustandes und des Alters der Haut	30
4.2	3D-Thermografie für Medizinalanwendungen	31
4.3	Tragbares Gerät zur Frühdiagnose von Lymphödemen	32
4.4	DermaIR – Ausweitung der Möglichkeiten der Dermatoskopie durch Wärmebildsensoren.....	33
4.5	Modellierung von Erdregisterspeichern zur thermischen Analyse.....	34
4.6	Digitaler Zwilling: Building Information Modeling (BIM) nutzen für Simulation von gebäudeintegrierten Energiesystemen.....	35
4.7	Messen der thermischen Beschichtungsbeständigkeit von Turbinenschaufeln	36
4.8	Technologien zur Viskositätsregelung für die kontrollierte Applikation von Beschichtungsmaterialien.....	37
5	Lehre	38
5.1	Gamification in der Lehre	38
5.2	Seamless Learning: Projektcluster und Leitung des IBH-Labs	42
Anhang		45
A.1	Studierendenprojekte.....	45
A.2	Wissenschaftliche Publikationen	46
A.3	Buchkapitel	48
A.4	Zeitungsartikel	48
A.5	Konferenzen und Workshops	48
A.6	Vorlesungen	49
A.7	Spin-off-Firmen	51
A.8	ICP-Mitarbeitende.....	53
A.9	Standort	54

1 Multiphysik-Modelle

Multiphysik-Modelle sind sehr wirksame Werkzeuge, um eine grosse Bandbreite an Phänomenen zu erkunden, die Energieflüsse, Strukturen, elektromagnetische, thermodynamische, chemische und/oder akustische Effekte miteinander verbinden. Auf diesem Gebiet gab es in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte. Eine Google-Abfrage dieses Neologismus liefert über 11'600'000 Treffer. Die potenzielle Reichweite der Anwendungen wurde stetig ausgeweitet, zudem wurden numerische Methoden immer ausgefeilter und an die verfügbaren, wachsenden Rechnerkapazitäten angepasst. Heutzutage sind detaillierte physisch-chemische Modelle kombiniert mit belastbaren numerischen Lösungsmethoden beinahe zu einer Notwendigkeit für die Planung und Optimierung multifunktionaler technischer Apparate und Prozesse geworden.

Am ICP machen wir angewandte Forschung auf dem Gebiet der Multiphysik-Modelle und entwickeln Finite-Elemente- ebenso wie Finite-Volumen-Simulations-Software.

Unsere weitläufige Erfahrung in numerischer Analyse, Modellierung und Simulation umfasst nahezu alle Arten der Mikro-Makro-Apparate und eine grosse Bandbreite der dominierenden Gleichungen aus der klassischen Physik. Wir entwickeln auch Ein-Zweck-Werkzeuge, die auf die Bedürfnisse unserer Partner spezifisch zugeschnitten sind, und wir nutzen kommerzielle Software dort, wo sie besser geeignet ist.

Zu unseren Spezialitäten auf diesem Gebiet gehören die Anwendung, Erweiterung und Entwicklung gekoppelter Modelle mittels unseres FE-Inhouse Codes SESES, der CFD-Open-Source-Software openFoam und/oder kommerziell angebotener Produkte wie COMSOL Multiphysics.



Christoph Bader



Gernot Boiger



Marlon Boldrini



Daniel Brunner



Vincent Buff



Sandro Ehrat



Thomas Hocker



Lukas Keller



Viktor Lienhard



Philip Marmet



Yasser Safa



Bercan Siyahhan



Sebastian Spirig



Asier Zubiaga

1.1 Pulverspritzlackierung: simulationsbasierte Entwicklung des Prototyps einer neuartigen Generation von Beschichtungspistolen, basierend auf der zielgerichteten Anwendung koronaler elektrischer Felder

Ein zusätzliches elektrisches Feld nahe der Sprühdüsenöffnung nutzt die elektrische Ladung der Pulverpartikel, um ihre Flugbahnen umzuleiten, ohne die Beschichtungspistole selbst zu bewegen. Eine simulationsbasierte und experimentelle Machbarkeitsstudie wurde durchgeführt. Parameterstudien erfolgen derzeit und werden zu einem funktionsfähigen Prä-Prototyp führen.

Mitarbeiter: G. Boiger, M. Boldrini, V. Lienhard, B. Siyahhan, V. Buff, J. Gianotti

Partner: Wagner International AG

Finanzierung: Direkt

Dauer: 2018–2019

Dieses unabhängige Projekt baut auf frühere und noch laufende Innosuisse-Projekte mit Wagner auf. Es fokussiert sich darauf, eine Pulverwolke abzulenken und umzuleiten, ohne die Beschichtungspistole selbst zu bewegen. Im Rahmen der Innosuisse-Projekte wurde bereits eine massgeschneiderte Pulverspritz-Lackierungs-Simulation entwickelt, welche noch weiter ausgebaut wurde. Eine simulationsbasierte Vorhersage der Koronaform, welche die Geometrie der Pistole und andere Einflüsse berücksichtigt, erlaubt i) gezielte Modifikationen der Koronaformen, ii) die Einflussnahme auf die Flugbahnen der Partikel und iii) die Optimierung des Beschichtungsergebnisses. Das Projekt zielt darauf ab, das vorherrschende elektrische Feld zwischen der Beschichtungspistole und dem Substrat gezielt zu modifizieren, ausschliesslich durch konstruktive Modifikationen innerhalb oder an der Pistole. Dies erlaubt es, i) den Fokus der lokalen Beschichtungsintensität zu verändern, ohne die Pistole zu bewegen, ii) die Bereiche mit niedriger Beschichtungsqualität zu minimieren und iii) die Beschichtungseffizienz zu maximieren.

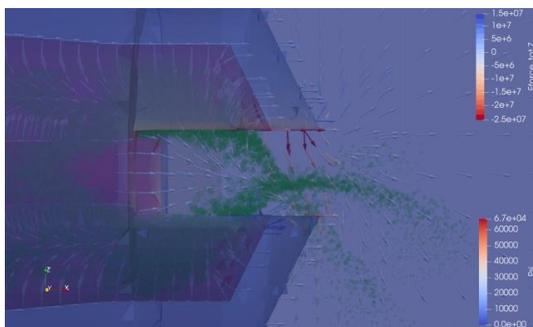


Abb. 1: Schematische Nahaufnahme der Sprühdüsenöffnung einer Beschichtungspistole. Konzept-Simulations-Darstellung der Partikelflugbahnen (grün) bei Applikation zusätzlicher elektrischer Spannung zwischen dem oberen und dem unteren Teil des Schlitzes, was in einer Abwärtsbeschleunigung der geladenen Partikel resultiert.

Der Hauptansatz macht sich die elektrische Ladung der Partikel zunutze, indem die Flugbahnen durch

zusätzliche elektrische Felder umgelenkt werden. Das Ausmass der Umlenkung hängt von der Stärke und der Ausrichtung des zusätzlichen elektrischen Feldes ab. Zunächst wurden einige Konzeptstudien durchgeführt, um die Machbarkeit und die vorherrschenden Kräfte der relevanten Gebiete zu untersuchen (vgl. Abb. 1). Daraufhin wurde ein Kondensatormodell eingeführt, mit welchem variable elektrische Potentiale der oberen und der unteren Sprühdüsenöffnung der Pistole ermöglicht werden. Die Ablenkung der Flugbahn ist proportional zur Kondensatorfläche und umgekehrt proportional zur Entfernung der Kondensatorplatten. Vorstudien zeigen, dass Ablenkungen im Bereich zwischen 10 und 50 kV möglich sind, einem Spannungsbereich, der eindeutig innerhalb der Grössenordnungen der bei der Pulverspritzlackierung üblicherweise verwendeten Spannungen liegt.

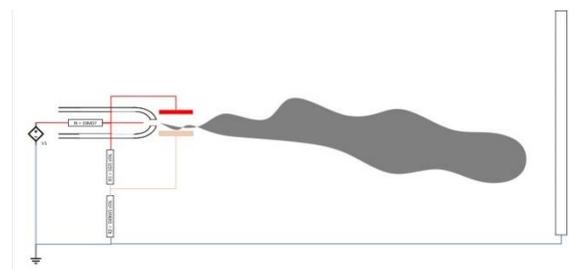


Abb. 2: Kondensator schafft zusätzliches Elektrofeld rechtwinklig zur Flugbahn der Partikel.

Die simulationsbasierte Machbarkeitsstudie führte zu einem sicheren Versuchsaufbau. An der Sprühdüsenöffnung ansteckbare, isolierte Kondensatorplatten wurden konstruiert (s. Abb. 2.) Der experimentelle Proof of Concept wurde in internen Experimenten bestätigt. Derzeit werden simulationsbasierte und experimentelle Parameterstudien durchgeführt, welche zu einem funktionierenden Prä-Prototyp führen werden.

1.2 Entwicklung der Serienreife von neuartigen vollkeramischen Hochtemperatur-Heizelementen zur Heissluftzerzeugung

Im Folgeprojekt zu Leister 1 wird das im vorgängigen Projekt entwickelte Heizelement zur Serienreife weiterentwickelt. Die Arbeiten umfassen die weitere Verbesserung der OpenFoam®-Modelle, den Abgleich mit verschiedenen Versuchs- und Messaufbauten bis hin zum serienreifen Prototyp mit klarem Herstellungskonzept.

Mitarbeiter: M. Boldrini, J. Gianotti, G. Boiger
 Partner: Leister Technologies AG
 Finanzierung: Innosuisse
 Dauer: 2015–2019

In diesem Entwicklungsprojekt mit Leister wird ein neuartiges Heizelement für industrielle Heissluftpistolen entwickelt. Die neuen Heizelemente sollen aus leitfähiger Keramik hergestellt werden. In Bezug auf Herstellungskosten und Zuverlässigkeit sollen die Keramikelemente den gegenwärtig gängigen Elementen, welche auf metallischen Heizdrähten basieren, überlegen sein. Die Entwicklung erfolgt als Zusammenarbeit zwischen dem IMPE und dem ICP. Hierbei fokussiert sich das IMPE auf die Entwicklung der Hochleistungskeramik. Das ICP entwickelt mehrere numerische Berechnungsmodelle, welche die Simulation und den Vergleich verschiedener Heizelement-Geometrievarianten ermöglichen. Dies führte bereits 2017 zur Entwicklung der Doppelhelix, was einem vollen Erfolg der ersten Projektphase gleichkam. In der nächsten Projektphase soll nun die Doppelhelix zur Serienreife geführt werden.



Illustration 1: Thermo-fluiddynamische Simulation des Heizelements in OpenFoam®.

Zur weiteren Entwicklung der Heizelemente wurde das ZPP als weiteres Kompetenzzentrum hinzugezogen. Das ZPP legt seinen Fokus auf die Entwicklung und Optimierung des Herstellungsprozesses. Das ICP verfolgt in der aktuellen Phase zwei Hauptaufgaben. Einerseits werden auf Basis eines OpenFOAM®- sowie eines SESES-Modells Geometrieanpassungen überprüft, um Schwachstellen erkennen und Optimierungen realisieren zu können. Andererseits werden auch Messaufbauten realisiert, welche es erlauben einen genauen Einblick in die bestehenden Randbedingungen zu erhalten. Als erstes wurde

hierzu ein Aufbau zur Messung des Volumenstroms umgesetzt. Hiermit können Anlagen- und Ventilatorkennlinien für verschiedene Geometrien ermittelt werden, welche zur genaueren Validierung und weiteren Verbesserung der Simulationsmodelle dienen.

In folgenden Schritten soll die Geometrie in Bezug auf Wärmeübergang, Druckverlust und Herstellbarkeit weiter verbessert werden, bis hin zum serienreifen Prototyp.



Illustration 2: Verschiedene Doppelhelix-Geometrie-Varianten.

1.3 Holzvergasung – vom ICP nach Melides (Portugal)

Das ICP ist gemeinsam mit der Aberta-Nova-Stiftung auf der Suche nach einer nachhaltigen Methode, die nicht einheimische Eukalyptus-Population in Melides, Portugal zu reduzieren. In diesem Zusammenhang entwickelten wir den Prototyp eines Holzvergasungsreaktors, der im Betrieb beinahe keinen Teer erzeugt. Das neuartige, wartungsarme Vergasungssystem soll vielseitig genug sein, um jede Art von Holzhackschnitzel in thermische Energie, brennbares Gas und Elektrizität umzuwandeln.

Mitarbeiter: G. Boiger, D. Neeser, A. Fassbind, P. Caels
 Partner: Aberta Nova
 Finanzierung: Aberta Nova, intern
 Dauer: seit 2016

Die Holzvergasung ist eine potenzielle Basistechnologie im Kontext der nachhaltigen, dezentralen Versorgung von Hauseigentümern sowie kleiner und mittlerer Unternehmen mit Wärme und Strom. Das ICP forscht seit Jahren auf diesem Gebiet.

Seit 2016 hat sich ein Team des ICP mit der portugiesischen Aberta-Nova-Stiftung zusammengetan, um in Melides einen Prototyp für einen 20kWel-Vergaser zu bauen. Jüngst kam ausserdem ein teer- sowie wartungsarmer 5kWel-Vergaser hinzu. Vom Start weg liefen die Aggregate einigermaßen problemlos mit Kiefernholz, doch Eukalyptusholz verursachte bis vor kurzem Schwierigkeiten im langlaufenden, stationären Betrieb. Zu den Hauptproblemen zählten (i) das grosse Ausmass der überschüssigen Hitze, welche durch die Vergasungsreaktion freigesetzt wurde und (ii) die ungewollte Kondensation von Teer in allen Systemen.



Abbildung 1: D. Neeser und G. Boiger (ICP) sowie P. Caels (Aberta Nova) arbeiten am Prototyp des Vergasers.

Ein ICP/ZPP-Team von Vergaserspezialisten bestehend aus D. Neeser, A. Fassbind und G. Boiger verbrachte mehrere Wochen am Standort von Aberta Nova beginnend im Sommer 2017. In dieser Zeit wurde das gesamte Holzvergasungssystem kartiert und modelliert [1], ein Gas-Luft-Wärmetauscher wurde entworfen, der Teerkondensationsprozess wurde beobachtet und ein neuartiges teearmes

System wurde entworfen. Basierend auf dieser Arbeit wurde nach sorgfältiger Planung und der Organisation der erforderlichen Materialien und Werkzeuge der Prototyp eines teer- und wartungsarmen 5kWel-Vergasers geschmiedet, zusammengebaut und in Betrieb genommen. Abbildung 1 zeigt das ICP-Team, das mit P. Caels auf dem Aberta-Nova-Gelände arbeitet, Abbildung 2 stellt die CAD-Zeichnung dem Endstadium unseres neuartigen Wärmetauschers gegenüber.



Abbildung 2: CAD-Zeichnung des Vergasers (links) und das tatsächliche Ergebnis unserer Bemühungen (rechts).

Gemeinsam mit unseren von P. Caels angeführten portugiesischen Partnern waren die Forscher des ICP so in der Lage, (i) die volle Funktionalität des neuartigen, wartungsarmen Vergasers sicherzustellen, (ii) in erfolgreichen Testläufen den stabilen Betrieb mit Eukalyptus zu zeigen, (iii) fast kein Teerkondensat in verschiedenen Testmodi festzustellen und (iv) die elektrische Ausgangsleistung zu steigern wegen der höheren Effizienz des Systems, die ihrerseits auf höheren Reaktortemperaturen und kühlerem Holzgas beruhte.

Literatur:[1] Boiger, G. (2014). [A thermo fluid dynamic model of wood particle gasification and combustion processes](#). IJM, Band 8, Nummer 2. S. 203-230. Wissenschaftlich überprüft.

1.4 Verschmutzungseinfluss auf Resonator basierte Viskositätssensoren

Diese Studie untersucht einen Online-Viskositätssensor, der in Prozessen mit Ablagerungen eingesetzt wird. Eine Schmutzschicht oder Ablagerung kann das Messergebnis beeinträchtigen und ist eine potenzielle Fehlerquelle. Der Effekt einer Schmutzschicht wurde numerisch und experimentell untersucht.

Mitarbeiter: D. Brunner, G. Boiger
 Partner: Rheonics GmbH
 Finanzierung: Innosuisse
 Dauer: 2018–2020

Die Überwachung der Viskosität in einem chemischen, biologischen oder andersartigen industriellen Prozess zu überwachen ist essenziell für die Aufrechterhaltung der Qualität des Prozesses. In vielen Prozessen gibt es einen starken Zusammenhang zwischen der Viskosität und der Zusammensetzung der Flüssigkeit, sodass die Viskosität verwendet werden kann, um Veränderungen zu entdecken und Gegenmassnahmen einzuleiten.

Heutzutage machen mechanische Resonatoren integrierte Viskositätsmessungen online möglich. Es gibt jedoch Schwierigkeiten, wenn sich Ablagerungen auf der Resonanzstruktur bilden. Verschmutzungen oder Ablagerungen auf dem Resonator stellen eine potenzielle Gefahr dar; sie können Messergebnisse kontaminieren und zu einer falschen Vorhersage führen.

In der vorgestellten Studie wurde ein Resonator mit Kupfer beschichtet. Hier handelt es sich um ein vereinfachtes, rein elastisches Ablagerungsmodell (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Resonator mit Verschmutzungsmodell (Kupferablagerung).

Der Resonator wurde durch ein Zwei-Massen-drei-Federn-System näherungsweise beschrieben. Die Fluidinteraktion mit der Kupferoberfläche wurde in COMSOL Multiphysics in 2-D berechnet. Ausgehend von einer glatten Oberfläche würde die gemessene

viskose Dämpfung (Γ) wegen der Massenbeladung durch die Schmutzschicht leicht zurückgehen. Stattdessen deuten die Experimente an, dass die Dämpfung bei tiefer Viskosität stärker zunimmt. Dies ist ein Trendbruch des typischen linearen Verhaltens solcher Resonatoren.

Diese Effekte könnten durch die Rauheit der Oberfläche erklärt werden. Die Schmutzschicht mag makroskopisch glatt erscheinen. Sie weist jedoch eine raue Oberfläche im Mikrometerbereich aus. Diese Rauheit ist in der Grössenordnung der charakteristischen Länge der Strömung und nimmt somit Einfluss. Die Rauheit wurde mit einer sinusförmigen Oberfläche abgebildet. Diese kann die Charakteristiken der Messungen erklären, siehe Abbildung 2.

Es sind weitere Untersuchungen der Oberflächenstruktur und 3D-Strömungssimulationen nötig, um das Phänomen vollständig zu verstehen und verlässliche Prognosen zu treffen. In weiteren Untersuchungen werden typische industrielle Ablagerungen wie Calciumcarbonat (CaCO_3) oder Paraffin untersucht.

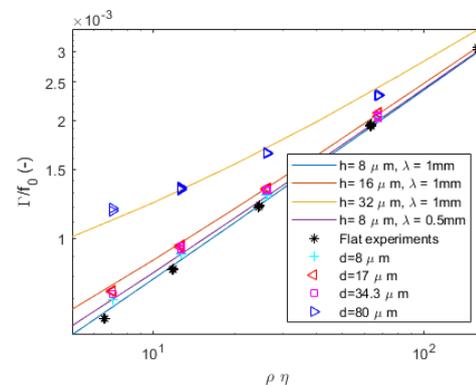


Abbildung 2: Vergleich der durch das Experiment gewonnenen Daten mit denen der numerischen Vorhersagen.

1.5 Modell einer Dekantierzentrifuge zur Vorhersage des Ablagerungsverhaltens von Partikeln in fest-flüssigen Suspensionen

Zentrifugen sind Maschinen, in denen eine hohe Drehgeschwindigkeit dazu eingesetzt wird, Komponenten unterschiedlicher Dichte voneinander zu trennen. Kürzlich haben Tilo Hühn und seine Kollegen von der ZHAW Wädenswil einen vollständig neuen Prozess für die Schokoladeherstellung entwickelt. Darin werden die Kakaobohnen gemahlen, in Wasser aufgelöst und dann in einer Dekantierzentrifuge in ihre Bestandteile getrennt. Um die Optimierung dieses Prozesses zu unterstützen, wurde ein einfaches, aber wirkungsvolles Modell entwickelt.

Mitarbeiter: T. Hocker, D. Wyss
 Partner: T. Hühn, ZHAW Inhaltsstoff- und Getränkeforschung
 Finanzierung: Vorläufige Studie
 Dauer: 2018–2019

Die einzelnen Phasen von Suspensionen mittels Zentrifugen zu trennen ist ein in vielen Industrien häufig anzutreffender Prozess. Oft werden feste Stoffe und Flüssigkeiten zuerst miteinander vermischt, um eine Art von Extraktion durchzuführen, also beispielsweise um bestimmte Bestandteile aus dem Feststoff in die flüssige Phase zu überführen. Allerdings müssen in weiteren Verarbeitungsschritten diese Phasen wieder voneinander getrennt werden. Um diesen Separationsprozess kontinuierlich durchzuführen, sind Dekantierzentrifugen besonders geeignet. Hier wird ein Schneckenantrieb dazu genutzt, die gesammelten Feststoffe kontinuierlich auszustossen. Abb. 1 zeigt den Hauptbestandteil einer solchen Zentrifuge skizzenhaft.

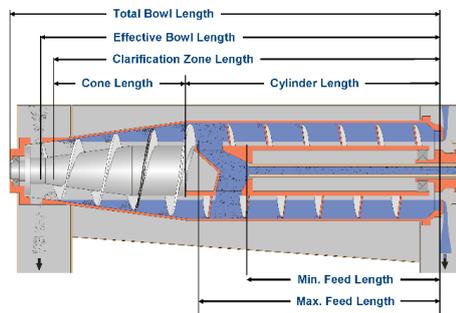


Abb. 1: Skizze einer Dekantierzentrifuge, die zur Trennung von flüssigen und festen Stoffen benutzt wird, indem ihre unterschiedlichen Dichten ausgenutzt werden.

Um eine möglichst gründliche Trennung sicherzustellen, werden Trommelgeschwindigkeiten bis zu 5'000 UpM genutzt. Solche Zentrifugen unter Beharrungszuständen zu betreiben kann herausfordernd sein, vor allem, wenn die eingebrachte Suspension ihre physischen Eigenschaften wie Viskosität oder Dichte ändert. Deshalb ist es sinnvoll, mittels physischer Modelle ein besseres Verständnis des Ablagerungsprozesses der festen Partikel einer Suspension zu gewinnen und wie dies mit den Eigenschaften der Suspension und mit der Geometrie und den Betriebsbedingungen der benutzten Zentrifuge zusammenhängt [1]. Abb. 2 zeigt eine Skizze der vereinfachten Geometrie, auf welcher unser Modell basiert. Darin erfolgt die Zuführung der Suspension von rechts. Wegen der höheren Dichte der enthaltenen Feststoffe setzen sie sich an der inneren

Wand der Trommel ab – wenn die Fließgeschwindigkeit nicht zu hoch und die Partikel nicht zu klein sind.

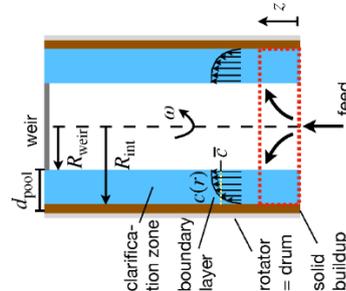


Abb. 2: Vereinfachte Geometrie für die das Dekantiermodell entwickelt wurde.

Ausgehend von der bekannten Ablagerungstheorie nach Stokes waren wir in der Lage, ein einfaches, aber wirkungsvolles Modell zu entwickeln, um das Ablagerungsverhalten, die Anhäufung von Feststoffen und den folgenden Ausstoss vorherzusagen. Abb. 3 zeigt typische Ergebnisse der Modellberechnung zu einem bestimmten Zeitpunkt. Hier wurde von einer Suspension mit sechs verschiedenen Partikelgrößen ausgegangen. Das Modell zeigt neben den Ablagerungspfaden auch die Ansammlung von Feststoffen an der Trommelwand, hier als graue Fläche gezeigt.

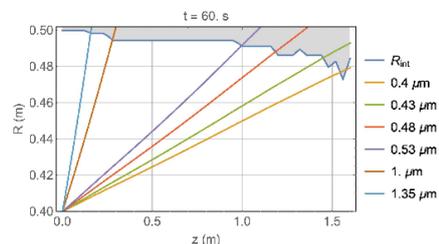


Abb. 3: Ablagerungspfade der Partikel und Aufbau von Feststoffen wie vorhergesagt durch ein Modell für eine Suspension mit sechs verschiedenen Partikelgrößen.

Literatur:

[1] M. Gleiss, S. Hammerich, M. Kespe, H. Nirschl, Chemical Engineering Science, 163, pp. 167–178 (2017).

1.6 Analyse des thermischen Verhaltens des Geschwindigkeitssensors von Medyria, basierend auf einem in OpenFOAM entwickelten thermo-fluidischen CFD-Modell

Der von der Medyria AG aus Winterthur entwickelte *TrackCath*-Katheter verfügt über einen integrierten Sensor, um die Fließgeschwindigkeit und -richtung in den Blutgefässen zu messen. Dabei wurde beobachtet, dass Katheter identischer Bauart signifikante Abweichungen in ihren Kalibrierungs-Kurven aufweisen können. Um diese Abweichungen besser zu verstehen, wurde ein thermo-fluidisches CFD-Modell in *OpenFOAM* entwickelt. Das Ziel war es, eine verbesserte Modellanordnung zu schaffen, um den Einfluss der Sensoreigenschaften und die Dimensionen des thermischen Verhaltens besser bestimmen zu können.

Mitarbeiter: L. Ruckstuhl; Berater: T. Hocker
 Partner: Medyria AG, Winterthur, M. M. Sette, A. Di Iasio
 Finanzierung: Masterarbeit
 Dauer: 2018–2019

Der Sensor arbeitet nach dem Prinzip der konstanten thermischen Anemometrie (constant temperature anemometry, CTA). Um eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen, wird jeder Sensor einzeln kalibriert. Dies erfolgt, indem der Sensor einem Wasserfluss mit einer festgelegten Geschwindigkeit ausgesetzt und gemessen wird, wie viel elektrische Leistung nötig ist, um die Temperatur des Sensors konstant zu halten. Im Rahmen eines studentischen Vorläuferprojekts wurde entdeckt, dass die gesetzte Temperatur des Sensors und die tatsächliche Temperatur an seiner Oberfläche nicht identisch waren. Die Oberflächentemperatur hängt hochgradig von der Fließgeschwindigkeit und der Isolierschicht ab, die den erhitzten Bereich des Sensors bedeckt. Nach Angaben des Sensorherstellers kann in einer Produktions-Charge des Sensors eine Abweichung der Dicke der Isolierschicht von 10 % (oder 0,5 μm) erwartet werden. Wie in Abb. 1 dargestellt können solche Abweichungen zu einer Veränderung der Oberflächentemperatur um bis zu 6 % bei 2 m/s führen.

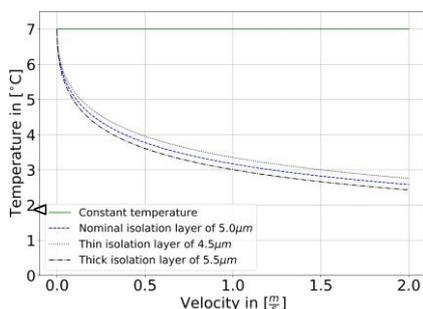


Abb. 1: Das thermische Verhalten der Sensoroberfläche bei unterschiedlichen Dicken der Isolierungsschicht und Fließgeschwindigkeiten wird dargestellt.

Im vorläufigen Modell war diese Oberflächentemperatur eine Rahmenbedingung, sodass für jede Simulation zunächst die auftretende Temperatur kalkuliert werden musste. Das ist nachteilig bei der Verwendung dieses Modells für Vorhersagen, weil die Geschwindigkeit über dem Heizelement unbekannt sein könnte oder sich das erhitzte Gebiet ebenso wie die Temperatur verändert. Um

dies zu verbessern, wurde ein 2D-CFD-Modell entwickelt, das neben der Flüssigkeit auch die feste Region des Sensors beinhaltet. Eine flache Oberfläche zu wählen hat diese Vorteile: Erstens ist die Korrelation der Oberflächentemperatur leichter für flache Oberflächen, zweitens kann die Validierung des Fließprofils über eine flache Oberfläche mittels Literatur erfolgen und letztens wird die Erstellung eines Gitters vereinfacht. In einem späteren Schritt kann eine 2D-modellmässige Darstellung des Sensors auf einer zylindrischen Oberfläche bei Bedarf ergänzt werden. Abb. 2 zeigt einen Vergleich zwischen der berechneten durchschnittlichen Oberflächentemperatur und den Simulationsergebnissen für zwei verschiedene Fließgeschwindigkeiten. Das erhitzte Sensorgebiet wird durch die vertikalen roten Linien begrenzt. Die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen zeigen eine gute Korrelation mit den Simulationsergebnissen.

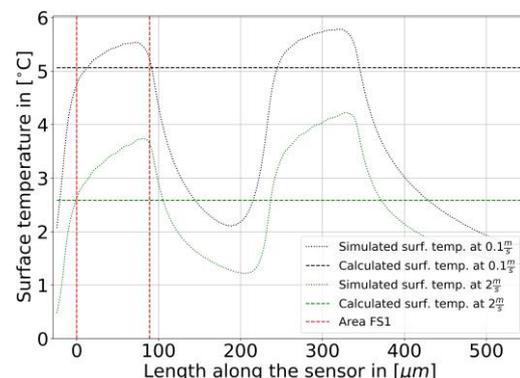


Abb. 2: Ein Vergleich zwischen der errechneten durchschnittlichen Oberflächentemperatur und den Simulationsergebnissen für zwei Geschwindigkeiten wird dargestellt.

Dies stützt die Hypothese, dass die Abweichungen von Kathetern identischer Bauart überwiegend auf ihre Unterschiede mit Blick auf die Isolierschicht über den erhitzten Elementen zurückzuführen sind. Als nächste Schritte werden die Abweichungen der Dicke dieser Isolierschicht mikroskopisch weiteruntersucht und die daraus resultierenden T-Profile thermografisch begutachtet.

1.7 Mehrskaliges Modell einer kristallinen Polymorphie

Im Giessprozess bilden Kristalle einen Nukleus, wachsen in vielerlei Formen und wirken sich so auf die thermophysischen Eigenschaften der Materialien aus. Im Rahmen einer gross-skaligen Beobachtung wird die Qualität des Festkörpers sowohl durch die thermodynamischen als auch durch die massenkinetischen Effekte während der Kristallisierung beeinflusst. Allerdings sind einige statische und kinetische Effekte solche kleinen Massstabs, sie beeinflussen das Material durch eine Abkehr vom örtlichen thermodynamischen Equilibrium und verursachen Unterkühlungsphänomene. Ein neuer Vorhersageansatz basiert jetzt auf der gekoppelten Lösung des gross-skaligen Hitze-Massentransfer-Problems und des klein-skaligen Problems der Kernerstarrung in unterkühlter Schmelze. Das neue Modell zeigt die Einflüsse der örtlichen Abkühlgeschwindigkeit und der Oberflächenkrümmung der sich bildenden Kristallkerne und -nuklei auf die Temperatur des Grundmaterials. Mit diesem neuen Ansatz wird die Post-Rekaleszenz-Erstarrung im Einklang mit den Werten aus Messungen in Experimenten rechnergestützt nachgebildet.

Mitarbeiter: Y. Safa, T. Hocker

Partner: IFNH ETH Zürich, und Partner aus der Schweizer Schokoladenherstellungs-Industrie

Finanzierung: Innosuisse

Dauer: 2016–2018

Die Bildung polykristalliner Materialien aus einer Schmelzphase bei einer hohen Abkühlungsgeschwindigkeit fördert die Kernbildung und das Wachstum instabiler Kristallformen mit einer begrenzten latenten Wärmeabgabe. Im Gegensatz dazu befördert eine niedrige Abkühlgeschwindigkeit das Wachstum stabiler Kristallformen, die von einer grossen latenten Wärmeabgabe begleitet werden. Gegenseitige Umwandlungen zwischen verschiedenen Kristall-Polymorphen und zwischen Schmelze und Kristall finden statt. Die Analyse dieses Problems kann dadurch vereinfacht werden, dass ein gross-skaliges Modell der Gleichungen des Hitze-Masseübergangssystems übernommen wird, um die Zeit-Ort-Verteilung der Temperatur und der Kristalle zu erhalten. In einem solchen simplifizierten gross-skaligen Modell wird die wechselseitige Umwandlung zwischen verschiedenen Kristall-Polymorphen dargestellt als Reaktionsgleichung mit kinetischen Parametern (also Reaktionskonstanten) in Abhängigkeit von den Übergangstemperaturen zwischen den Phasen in der Schmelz-Kristall-Mischung. Diese vereinfachte Analyse geht jedoch auf Kosten einer realistischen Darstellung der Rolle der Abkühlungsrate, namentlich, wie sie die hergestellten Materialien während des Ausformungsprozesses beeinflusst. Tatsächlich wird eine hohe Abkühlungsrate von einer Unterkühlung der flüssigen Phase unterhalb des Schmelzpunktes begleitet. Diese Unterkühlung bedeutet eine Abkehr vom örtlichen thermodynamischen Equilibrium und beeinflusst die Kristallbildung. Unterschiedliche Szenarien der Unterkühlung von Phasenübergangsstellen wurden analysiert, darunter die Mitnehmer-Kinetik und das Einfangen gelöster Substanzen an der Phasenübergangsstelle. Dabei stellte sich nur die Unterkühlung der Krümmung als einschlägig für das Problem der Festwerdung von Schokolade heraus, was auf die kleinen Grössenwerte der Nuklei und Kerne bei gegebener Oberflächenspannung zurückzuführen ist. Unterkühlung kann ein Phasenübergangsphänomen sein, das an der Oberfläche sich bildender Kristall-Mikro-Kerne und Nuklei stattfindet, die sich in einem gekühlten oder stark gekühlten Schmelz bilden. Das oben dargestellte vereinfachte gross-skalige Modell des Hitze-Masse-Übergangs kann nicht ausreichend sein, um eine

solche Phasenübergangsunterkühlung zwischen Mikro-Kern und dem ihn umgebenden Schmelz abzubilden. Vielmehr braucht es die Beschränkung auf ein klein-skaliges Modell, um die Effekte der Phasenübergangsunterkühlung einzufangen. Ein solches Mikro-Modell wird mittels des Stefan-Problems in einem Schmelz-Mikro-Umfeld formuliert, das einen sphärischen Kern beinhaltet und wo die Wärmespeicherung sich sowohl in festen wie in flüssigen Teilen ausdrückt. Die Stefan-Bedingung des Fortschreitens der Verfestigung wird auf die Oberfläche des Kerns und die Unterkühlung der Krümmung angewendet (Gibbs-Thomson-Beziehung); sie wird auch eingeführt als Bedingung für den Phasenübergang.

In dieser Forschungsarbeit haben wir den phasenwechselkoppelnden Energietransfer untersucht und die Massenumwandlung zwischen verschiedenen Phasen. Auf der einen Seite erlaubt die Verwendung des entwickelten numerischen Ansatzes die Vorhersage der Kinetik kristalliner Polymorphie bei festem Material, das einem thermischen Prozess wie dem kalten Ausformen, dem Härten und der Körnerbildung unterworfen wird, sowie die Ableitung von Beziehungen die beim Prozess-Design helfen können. Auf der anderen Seite wird die Unterkühlung, die durch die Kernkrümmung verursacht wird, auf einer klein-skaligen Ebene analysiert, um sie in einem neuen gekoppelten Modell zu berücksichtigen, das die Wechselwirkung zwischen den Makro- und den Mikro-Effekten beschreibt. Es ist beachtlich, dass der derart entwickelte Ansatz eine anwendbare Vorhersagemethode für viele industrielle Anwendungen ist, etwa für die Bearbeitung von Polymeren, die Herstellung von Zement, die Bearbeitung von Nahrungsmitteln (Schokolade) und die pharmazeutische Industrie.

Patent: Y. Safa, *Une turbine éolienne bionique plus légère que l'air.*, Bern Switzerland. PAdmin Cr/00168/17.

1.8 Pulverspritzlackierung: Ein Tool, um nach der Anwendung Daten zur Stärke der Pulverspritzlackierung zu analysieren

Pulverspritzlackierung ist eine umweltfreundliche Alternative zu anderen Methoden der Oberflächenbearbeitung. Eine grosse Herausforderung stellt dabei die nichtinvasive Bestimmung der Qualität einer Beschichtung dar. Um sich diesem Problem zu widmen wurde, die Coatmaster 3D-Technologie [1] entwickelt, die auf fortgeschrittenen thermal-optischen Verfahren basiert, um Informationen zur Stärke der Lackierung von lackierten Trägerwerkstoffen zu sammeln. Darauf aufsetzend wurde ein Tool entwickelt, um nach der Anwendung die Daten mit Blick auf die Lackierleistung auszuwerten, die im Rahmen dieses Projekts auch anfielen.

Mitarbeiter: Bercan Siyahhan, Marlon Boldrini, Gernot Boiger
 Partner: Winterthur Instruments, Wagner International AG
 Finanzierung: Innosuisse
 Dauer: 2016–2019

Ein Nach-Anwendungs-Tool wurde mittels Python und seinem TkInter GUI-Paket entwickelt. Es verfügt auch über einen Link zu Paraview, um dessen Möglichkeiten der Visualisierung von Daten zu nutzen. Das Tool besteht im Wesentlichen aus Datenfilter- und statistischen Analyse-Modellen. Die Datenfilter-Prozeduren beinhalten: (i) Eliminierung von Ausreißern bei geometrischen und gemessenen Werten, (ii) Ausschluss vorgegebener geometrischer Bereiche und (iii) automatische Elimination von Verzerrungen mittels einer Median-Filterbasierten Abdeckungsprozedur. Die statistischen Operationen führen direkt zu den Qualitätsparametern der Oberflächenbehandlungsprozesse. Der erste Qualitätsparameter ist die durchschnittliche Lackierstärke (average coating thickness, ACT):

$$ACT = i = 1NunfilterDiNunfilter$$

ACT ist ein direkter Indikator der Lackiereffizienz. Wenn zwei verschiedene Lackierverfahren mit derselben Pulvermenge verwendet werden, wird das Verfahren mit dem höheren ACT einen grösseren Teil des Pulvers auf den Trägerwerkstoff aufgebracht haben, also eine höhere Effizienz haben. Der zweite Qualitäts-Parameter ist ein Massstab, (In) wie inhomogen die Beschichtung des Trägerwerkstoffs ist:

$$\begin{aligned} In &= 1Nbin - 1i \\ &= 1Nbin(Di \\ &\quad - Dmax)2NiNmaxDmax \end{aligned}$$

Dabei ist In im Prinzip eine gewichtete, vereinheitlichte Standardabweichung der Stärke ausgehend von dem am häufigsten gemessenen Wert auf der diskreten Häufigkeitsverteilung, wie sie in Abb. 1 dargestellt ist.

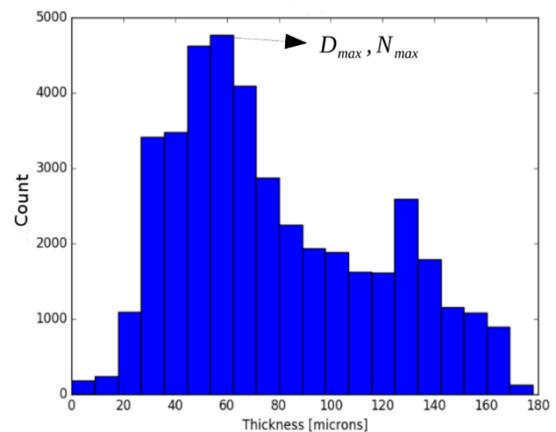


Abb. 1: Stärkemessdaten als diskrete Verteilung.

In den meisten Fällen wird eine möglichst homogene Lackierung angestrebt, weshalb einem Verfahren mit einem niedrigen In-Wert der Vorzug gegeben werden dürfte.

Das Tool ist in der Lage, die dargestellten Prozeduren automatisch auf grosse Datenmengen anzuwenden, um so die Basis für die Optimierung von Parametern bei Beschichtungsprozessen und numerischen Simulationsvergleichen [2] zu legen.

Literatur:

[1] A. Bariska, N. Reinke, Berührungslose thermische Schichtprüfung, ZHAW Winterthur, Switzerland. Swiss Engineering STZ, 2011.

[2] G. Boiger, Euler-Lagrangian Model of Particle Motion and Deposition Effects in Electro-Static Fields Based on OpenFoam, The International Journal of Multiphysics, 2016.

1.9 Prüfstand zum kontaktlosen Verschweissen von Kunststoffproben

Das Infrarot-Schweissverfahren ist in der Technik eine weitverbreitete Methode zum Verbinden von Kunststoffrohren. Die zu verbindenden Bauteile werden in einem bestimmten Abstand zum Heizspiegel gebracht, aufgewärmt und mit einer vordefinierten Kraft gefügt. Durch den Abstand zwischen Heizspiegel und den Rohrenden werden die Bauteile primär über Wärmestrahlung erwärmt. Dies führt zu einer konkaven Schmelzfront, welche die Qualität der Schweissnaht negativ beeinflussen kann. Auf einem Prüfstand soll die beste Heizsystemlösung im Hinblick auf eine optimale Schweissnahtqualität evaluiert werden.

Mitarbeiter: N. Jenal, M. Gorbar, S. Spirig, T. Hocker, C. Brändli

Partner: Institute of Materials and Process Engineering (IMPE), Georg Fischer Piping Systems

Finanzierung: Innosuisse

Dauer : 2018–2021

Beim Infrarot-Schweissverfahren werden die zu verbindenden Rohre in einem bestimmten Abstand zum Heizspiegel platziert. Durch den Abstand zwischen Heizspiegel und Rohr kann der Eintrag von Verunreinigungen in die Schweissnaht sehr gering gehalten werden. Dieses Verfahren wird dementsprechend häufig in technischen Bereichen verwendet, in denen ein hohes Mass an Reinheit vorausgesetzt wird. Es wird beispielsweise für die Fertigung von Rohrleitungen in Renräumen angewendet.

Die Enden werden in erster Linie über Wärmestrahlung aufgeschmolzen, siehe Fig. 1. Dieses Aufheizverfahren führt zu einer konkaven Form der Schmelzfront, welche die Schweissnahtqualität negativ beeinflussen kann.

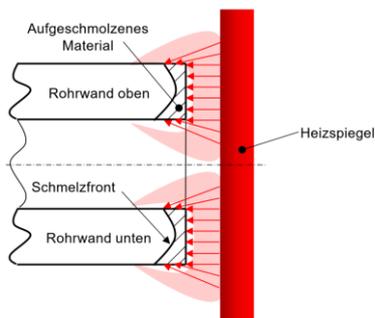


Fig. 1: Schematische Darstellung des Infrarot-Schweissprozesses.

Mit einem Prüfstand soll u. a. evaluiert werden, welche Einflüsse die Dynamik des Aufheizprozesses und die Fügekraft auf die Schweissnahtqualität haben. Damit unterschiedliche Heizelementdicken auf dem Prüfstand montiert werden können, werden die Elemente über eine Klemmvorrichtung auf dem Schwenkarm befestigt, siehe Fig. 2. Über Flügelmuttern kann das Heizelement manuell in vertikaler sowie horizontaler Richtung präzise platziert werden. Die Fügekraft wird über eine Druckfeder aufgebracht. Die Federkraft kann über eine Sechskantmutter variabel eingestellt werden. Ein zusätzlich

eingebauter Kraftsensor dient zur Überprüfung der Federkraft.

Weiterhin soll der Prüfstand zur Validierung dienen, sobald mittels CFD-Untersuchungen ein Optimum für den Abstand Probe/Heizelement gefunden wurde.

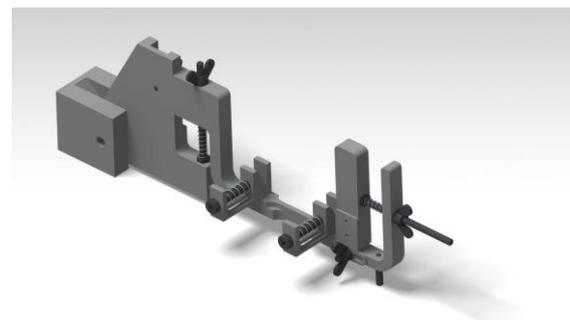


Fig. 2: Schwenkarm zur Aufnahme verschiedener Heizsysteme inklusive Mechanismen zur Feinjustierung.

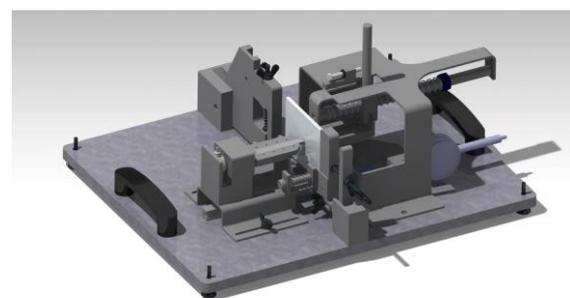


Fig. 3: Aktuelles Design des Prüfstands zum kontaktlosen Verschweissen von Kunststoffproben.

1.10 Dynamische Delamination von sich anpassenden Rotorblättern und Flügeln

Ein numerisches Modell für die Untersuchung der Delamination von zusammengesetzten, sich anpassenden Rotorblättern und Flügeln wird eingeführt unter Zuhilfenahme der eXtended Finite-Elemente-Methode (XFEM) und nichtörtlicher Kontinuumsmechanik (Peridynamik [PD]), um Brüche in den Versteifungen zu untersuchen, die für das Rotorblatt verwendet werden. Bei den zusammengesetzten sich anpassenden Rotorblättern werden kohäsive Elemente benutzt, um die interlaminare Schwachstelle darzustellen und die Delamination wurde unter dynamischen Pulsbelastungen untersucht. Schäden innerhalb einer Schicht werden dabei mittels der Peridynamik untersucht, was es ermöglicht, dem Problem adäquat und mit dem nötigen Vollkommenheitsgrad zu begegnen. Allein durch das Ausnutzen der Frakturenergie kann das nichtörtliche Modell intra- und interlaminare Frakturen abbilden. Das vorgeschlagene Modell kann so eine grosse Auswirkung auf Design-Anwendungen haben, bei denen die Einwirkung dynamischer Puls- und Aufprallbelastungen aller Arten (Unfälle, Wartung etc.) berücksichtigt werden müssen, sodass es für das Design leichtgewichtiger, sich anpassender Rotorblätter und Flügel verwendet werden kann.

Mitarbeiter: A. S. Fallah, M. Ghajari, Y. Safa
 Finanzierung: Schweizerischer Nationalfonds
 Dauer: 2018

Fortschritte auf dem Gebiet der aerodynamischen Strukturen haben zu einer stetigen Weiterentwicklung neuartiger Designs von Rotorblättern mit verbesserten Tragflächenquerschnitten geführt und zu Flügeln mit kontinuierlicher Formanpassung. Das ermöglicht es, diesen flexiblen Strukturen ihre Formen kontinuierlich an die aerodynamischen Bedingungen und die auf sie einwirkenden Belastungen anzupassen. Wenn sich jedoch dynamische Pulsbelastungen auswirken, können Frakturen in den Versteifungen auftreten (vgl. Abb. 1).

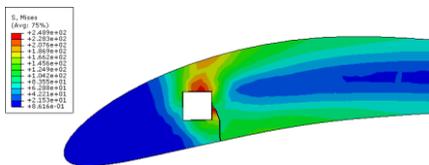


Abb. 1: XFEM-Bruch in der Versteifung und seine Verbreitung in Richtung der Grenzen.

Bei einem sich anpassenden Rotorblatt wäre das Muster der Fraktur unterschiedlich, in Abhängigkeit von der Pulsbelastung (impulsiv, dynamisch, quasi-statisch). Eine Interlaminarfraktur kann mit kohäsiven Elementen akkurat abgebildet werden (Abb. 2 und 3), aber für Frakturen innerhalb einer Schicht wurden Peridynamik benutzt (Abb. 4).

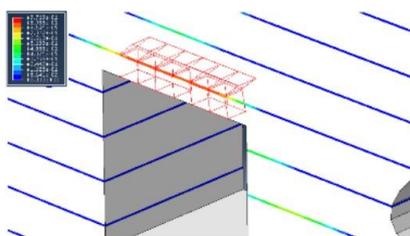


Abb. 2: Exzessive Scherverzerrung.

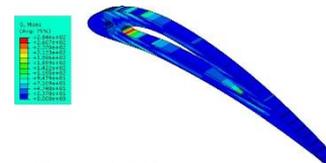


Abb. 3: Stressverteilung und Ungleichgewicht.

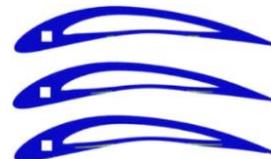


Abb. 4: Simulation unter impulsiver Belastungsfraktur mittels PD.

Die Unterschiede und Ähnlichkeiten zwischen den Delaminationsmustern bei impulsiven, dynamischen und quasi-statischen Belastungen werden in detaillierten Analysen der Delaminationsmuster berücksichtigt. Es wird angenommen, dass im Fall eines Impulses höhere Schwingungsformen ausgelöst werden und die Delamination im gesamten Rotorblatt an verschiedenen Orten nacheinander oder gleichzeitig auftritt. Bei einer quasi-statischen Belastung ist das Frakturmuster eher eine Verlängerung, die von einem einzelnen Ort ausgeht bis zur vollständigen Trennung und folgende Brüche sind meistens geometrisch, also Folgen der grossen Deformationen und der Veränderung der ursprünglichen Konfiguration. Bei einem dynamischen Puls kann eine Mischung beider Phänomene beobachtet werden, in Abhängigkeit davon, ob der Puls einer impulsiven oder einer quasi-statischen Belastung ähnlicher ist. Es wird gezeigt, dass das vorgeschlagene Modell in der Lage ist, alle wesentlichen Eigenschaften der dynamischen Delamination in zusammengesetzten, sich verändernden Rotorblättern durch ein genaues, konsistentes Schema eines Rechenmodells zu erfassen.

Paper: A. Fallah, M. Ghajari, Y. Safa, *A computational framework for the study of dynamic delamination in morphing composite blades and wings*, Submitted to Journal Engineering Structures.

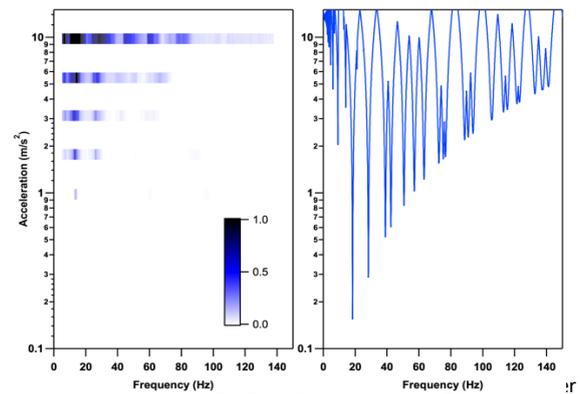
1.11 Spektrale Zusammensetzung der Faraday-Instabilität in kleinen Gefässen

Die Bewegung von Flüssigkeiten innerhalb von Gefässen kann ein Problem für biologische oder pharmazeutische flüssige Lösungen sein. Ein wichtiger Aspekt beim Verständnis der Bewegung wässriger Lösungen ist die Stabilitätsschwelle oberhalb derer die freie Oberfläche normale Wellentypen zeigt. Die parametrische Instabilität bei vertikaler Vibration wurde ausführlich untersucht, theoretisch sowie experimentell.

Mitarbeiter: A. Zubiaga, G. Boiger, D. Brunner, F. Sager, M. Clemens, E. Koepf
 Partner: F. Hoffmann-La Roche Ltd. Basel
 Finanzierung: F. Hoffmann-La Roche Ltd. Basel
 Dauer: 2018–2019

Mechanischer Stress, etwa Erschütterungen während des Versandes, können Denaturation oder Aggregation von Biomolekülen zur Folge haben, was die Stabilität der Produkte beeinträchtigt. Dabei hängt die Denaturation während des Transports mit den Scherspannungen zusammen, denen die bewegte Flüssigkeit ausgesetzt ist.

Wenn Flüssigkeiten vertikalen Vibrationen ausgesetzt sind, zeigen sie Faraday-Instabilitäten, sobald die Beschleunigung eine Schwelle übersteigt. Diese Wellentypen sind gleichbleibend und können gross werden, was deutliche Scherspannungen in der Lösung zur Folge hat. Die Form des Gefässes, seine Ausmasse und die Eigenschaften der Flüssigkeit (Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung) beeinflussen die Bildung der Instabilität. Die parametrische Instabilität vertikaler Vibration wurde von Kumar & Tuckerman [1] mittels einer Floquet-Analyse für viskose Flüssigkeiten umfassend untersucht. Für diese Arbeit wurden sowohl theoretische als auch experimentelle Studien kleiner Gefässe durchgeführt [2]. Die Wellentypkomponenten der Faraday-Instabilität wurden mittels einer Floquet-Analyse innerhalb eines breiten Frequenz-Spektrums von 5 Hz bis 150 Hz berechnet. Die errechnete Faraday-Instabilitätsschwelle wurde dabei experimentell validiert, indem Wasser in kleinen Phiolen vertikalen Vibrationen ausgesetzt wurde (Abb. 1). Eine qualitative Übereinstimmung mit der Theorie konnte dabei festgestellt werden, und die Abweichung bei der Position der Instabilitäten können durch die nicht linearen viskosen Effekte gut erklärt werden.



Frequenz bei Experimenten (linker Graph) und in der Stabilitätsanalyse (rechter Graph).

Die untere k-Momentumsbegrenzung schützt die Flüssigkeit gegen niedrig-frequente Instabilitäten. Bei Frequenzen von über 20 Hz steigt die Instabilitätsschwelle erheblich an, was an der intrinsischen Reaktion der Flüssigkeit auf hohe Frequenzen liegt. Die Existenz einer niedrigen Stabilitätsregion zwischen 10 und 70 Hz wurde durch die Experimente bestätigt. Zukünftige Untersuchungen werden sich mit dem Einfluss der Flüssigkeitseigenschaften auf die Position der Stabilitätsschwelle befassen sowie die daraus resultierenden höheren Scherspannungen.

Literatur:

- [1] Kumar K, Tuckerman LS. Parametric instability of the interface between two fluids. *J Fluid Mech.*, 1994, 279, 49–68.
- [2] A. Zubiaga, D. Brunner, F. Sager, M. Clemens, E. Koepf, G. Boiger. Faraday instability in small vessels under vertical vibration. *Int. J. Multiph.*, 2019, submitted.

1.12 PVT-Hybridkollektoren: Wärme und Strom aus der Sonne

Die Kopplung von Photovoltaik und Solarthermie verspricht mit PVT-Hybridmodulen einen Zusatznutzen gegenüber der herkömmlichen Solarenergienutzung. Sowohl beim Bau dieser Module als auch in der Systemeinbindung liefert das ICP mit hochstehenden Computersimulationen einen wichtigen Beitrag.

Mitarbeiter: T. Frei, D. Schaltegger, A. Witzig

Partner: Ponzio Solar SA, Institut für Energietechnik und Fluidengineering (IEFE)

Finanzierung: Innosuisse

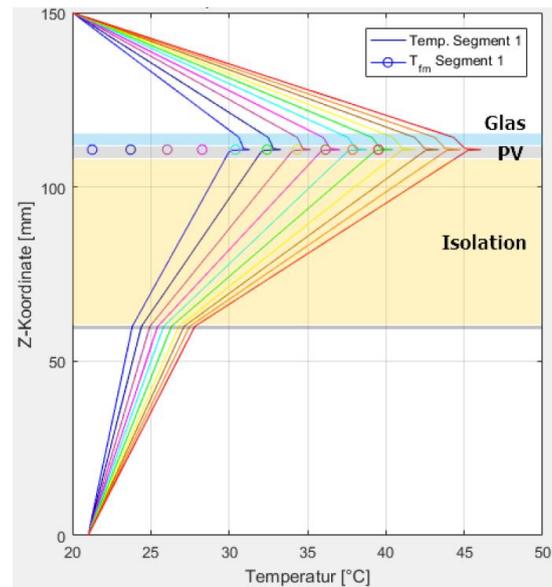
Dauer: 2017–2019

Die Dachfläche für Solarenergienutzung wird knapp. Dies ist die grosse Chance der PVT-Hybridkollektoren: Auf jedem Quadratmeter wird gleichzeitig Solarstrom produziert und Energie in Form von Wärme geerntet.

PVT-Hybridkollektoren haben verschiedene Einsatzgebiete:

- Bei der Verwendung der Wärme für die Aufbereitung von Trinkwarmwasser wird das Temperaturniveau hochgehalten. Die Wärme über einen Wärmetauscher an den Warmwasserspeicher abgegeben. Im Vergleich zu anderen PVT-Systemen verspricht diese Konfiguration einen guten Kompromiss zwischen Effizienz und Energiekosten.
- Kombination mit Wärmepumpe und Erdsonden oder Eisspeicher: In dieser Situation kann sehr viel Energie geerntet werden. Nicht nur bei direktem Sonnenlicht, sondern auch bei Diffuslicht und hohen Aussentemperaturen bringt die Wärmenutzung noch hohe Erträge.
- Kombination mit Wärmepumpe als Ersatz für die Erdreichanbindung: Diese Konfiguration verspricht eine kostengünstige Lösung, da die teure Energiespeicherung im Erdreich wegfällt [2]. Der PVT-Hybridkollektor wird als Wärmetauscher gegenüber der Aussenluft betrieben. Eine sorgfältige Auslegung anhand von Simulationen ist jedoch Voraussetzung, da bei einer falschen Dimensionierung die nötige Wärmeleistung nicht bezogen werden kann.

Die Modellierungskompetenzen am ICP werden zur Unterstützung der Systemoptimierung und zur Erweiterung der Simulationsmodelle eingesetzt. Dafür wird einerseits die kommerziell erhältliche Software Polysun eingesetzt und erweitert [3], andererseits werden neue Computermodelle entwickelt und anhand von Messungen verifiziert [4, 5].



Figur: Simulation des PVT-Hybridkollektors. Temperaturverlauf an 10 Stellen entlang des mäanderförmigen Wärmetauscher-Rohrsystems.

Referenzen:

- [2] Ch. Schmidt et. al. (Fraunhofer ISE): Quellseitig in Wärmepumpen-Heizsystem integrierte PVT-Kollektoren. Symposium Solarthermie, Bad Staffelstein, Juni 2018.
- [3] www.polysunsoftware.com
- [4] T. Frei: Herstellung und thermische Simulation von neuartigem Hybridkollektor. Studentenarbeit ICP-ZHAW, Februar 2017.
- [5] T. Frei: Simulation eines Hybridkollektors im instationären Betrieb. Studentenarbeit ICP-ZHAW, September 2017

2 Elektrochemische Zellen und Mikrostrukturen

Brennstoffzellen sind ein herausragendes Beispiel für elektrochemische Zellen. Sie verwandeln Treibstoffe wie Wasserstoff, Erdgas oder Methanol in elektrische Energie und Hitze. Brennstoffzellen können an Stelle von Batterien in Elektrogeräten verwendet werden, zur kombinierten Erzeugung von Hitze und Elektrizität in Haushalten und als Energiequelle in elektrischen Fahrzeugen. Wegen ihres flachen Designs können Brennstoffzellen leicht skaliert werden, indem sie zu Serien in der Form von Stapeln zusammengefasst werden. Elektrische Wirkungsgrade von über 60 % sind möglich, was deutlich über denen anderer dezentralisierter Energieerzeugungstechnologien liegt. Redox-Flow-Batterien gelten als vielversprechende Energiespeichertechnologie. Diese Batterien sind hocheffizient und bieten eine Energiespeicherlösung für fluktuierende Energie aus Windkraftanlagen und Photovoltaikzellen.

Das ICP unterstützt den Fortschritt bei der Entwicklung von elektrochemischen Zellen durch die Entwicklung von Multiphysik-Computermodellen. Grundsätzlich kann uns das Modellieren dabei helfen, die Kopplung von chemischen, thermischen, elektrischen, mechanischen und strömungstechnischen Prozessen besser zu verstehen mit dem Ziel, Schwächen des Systems zu erkennen und Design-Verbesserungen anzubieten. Häufig basieren diese Modelle auf detaillierten Informationen über die Mikrostrukturen der untersuchten Materialien. Deshalb ist beispielsweise die Charakterisierung von Gas-Diffusionsschichten und der Elektrolyt-Mikrostruktur in 2D oder 3D ein integraler Bestandteil unserer Modellierungsarbeiten.

Neben Brennstoffzellen und Redox-Flow-Batterien arbeiten wir auch an der Modellierung von Perowskit-Solarzellen und photoelektrochemischen Zellen (PECs), welche die Sonnenenergie zur Spaltung von Wasser und so zur Herstellung von Wasserstoff als Treibstoff verwenden.



David Bernhardsgrütter



Robert Herrendörfer



Gaël Mourouga



Jürgen Schumacher



Jakub Włodarczyk

2.1 Simulation des Ertrags von neuartigen Solarzellen

Derzeit entwickelte Photovoltaik-Technologien der dritten Generation werden unter standardisierten Bedingungen in Laboren untersucht, wobei jedoch unklar ist, wie sie sich unter realen Bedingungen in Freiluftinstallationen verhalten würden. Wir haben ein Modell entwickelt, das den Ertrag von PV-Modulen in Abhängigkeit von der geographischen Position, dem Wetter vor Ort und den Eigenschaften der Anlage simuliert. Wir verwenden das Tool dazu, den Leistungsverlust von monolithisch verbundenen Tandem-Solarzellen, der durch die Rot/Blau-Veränderung des Sonnenspektrums verursacht wird, zu analysieren. Für die vielversprechende Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzelle wurde ein Mismatch-Verlust von 1,27 % der integrierten jährlichen Leistung ermittelt.

Mitarbeiter: D. Bernhardsgrütter, M. Schmid
 Partner: EPFL-LPI, EPFL PV-Lab, EMPA-TFPV
 Finanzierung: Schweizerischer Nationalfonds
 Dauer: 2015–2018

Wir haben ein Tool zur Simulation des Energieertrags der dritten Photovoltaik-Technologie-Generation entwickelt, zu der die vielversprechenden Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzelle (SHJ-PSC) gehört. Damit können wir den Leistungsverlust von Tandem-Solarzellen unter tatsächlichen Outdoor-Bedingungen im Vergleich zu Standardtestbedingungen (STC) untersuchen. Zusätzlich liefert der simulierte Energieertrag notwendige Daten für die Analyse des Einflusses neuartiger PV-Technologien auf das Stromnetz.

Das Modell berücksichtigt die geographische Position, das örtliche Wetter, die Ausrichtung und Eigenschaften der Solarzelle, nämlich die externe Quanteneffizienz (EQE), die Strom-Spannungs-Kennlinie (IV) und Temperaturkoeffizienten. Um die Energieproduktion von Outdoor-Installationen abzuschätzen, wurden künstliche Clear-Sky-Spektren generiert, wobei die atmosphärische Absorption und die Rot/Blau-Veränderung des Spektrums berücksichtigt wurde. Zusätzlich wurden Wetterdaten bestehend aus der integrierten Einstrahlung, Temperatur, Wind und Luftdruck verwendet, um die simulierten Spektren hinsichtlich der gemessenen Einstrahlung neu zu skalieren und um die Modultemperatur zu schätzen. EQE- und IV-Daten sowie die Temperaturkoeffizienten wurden dann verwendet, um die Leistung der Module vorherzusagen. Um das Modell zu validieren, haben wir die Vorhersagen unseres Tools mit einer Simulation verglichen, die vom kommerziell erhältlichen Programm PVsyst errechnet wurde. Dieser Vergleich wurde für ein typisches Silizium-Modul und Wetterdaten aus dem Jahr 2017 durchgeführt. Die jährlichen Abweichungen lagen bei unter 5 %, vgl. Abb. 1.

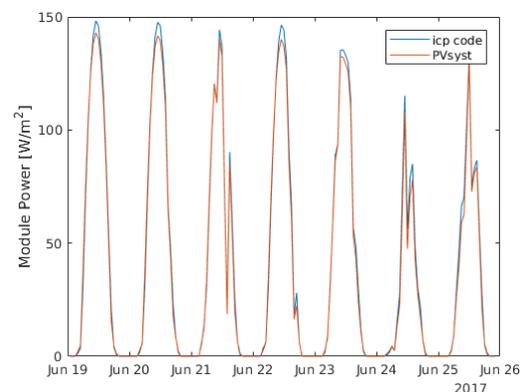


Abb. 1: Simulierte Stromerzeugung des Moduls TSM-290DD05A.08(II), berechnet mit unserem Modell und mit PVsyst.

Wir haben das derart validierte Modell dazu verwendet, die Mismatch-Verluste monolithischer Zwei-Terminal (2T)-Tandems, die durch die Blau/Rot-Veränderung des Sonnenspektrums verursacht werden, zu quantifizieren. Wir verwendeten die Simulations-Software SETFOS, um EQE- und IV einer leistungsgleichen SHJ-PSC zu generieren. Die Mismatch-Verluste wurden geschätzt, indem der Energieertrag des 2T-Tandems mit der Summe der Leistungen der unabhängig betriebenen Unterzelle verglichen wurde. Wir errechneten einen Mismatch-Verlust von 1,27 % auf die integrierte jährliche Leistung des Moduls.

Keine Mismatch-Verluste entstehen bei mechanisch gestapelten Vier-Terminal (4T)-Tandems, allerdings ist dafür eine zusätzliche, transparente Elektrode nötig, was zu grösseren optischen Verlusten führt. Wir haben somit die obere Grenze dieser Absorptionsverluste berechnet, sodass das 4T-Tandem effizienter als sein 2T-Gegenstück ist.

2.2 Analyse des dynamischen Verhaltens von Perowskit-Solarzellen

Innerhalb von weniger als einem Jahrzehnt haben Perowskit-Solarzellen (PSC) einen Wirkungsgrad erreicht, der siliziumbasierten Zellen ebenbürtig ist. Numerische Simulationen bieten Einblicke in die physikalischen Prozesse innerhalb dieser neuartigen Zellen und ermöglichen so die weitere Optimierung der Technologie. Wenn PSC intensitätsmoduliertem Licht mit schwankender Frequenz ausgesetzt werden, zeigen sie eine Niederfrequenz-Antwort, die charakteristisch für diese Zellen ist. Wir nutzten ein Drift-Diffusionsmodell, um diese besondere Eigenschaft der PSC mit mobilen Ionen innerhalb der Zelle in Verbindung zu bringen.

Mitarbeiter: D. Bernhardsgrütter, M. Schmid
 Partner: EPFL-LPI, EPFL PV-Lab, EMPA-TFPV
 Finanzierung: SNF
 Dauer: 2015–2018

Perowskit-Solarzellen haben in der Photovoltaik-Szene ein enormes Interesse ausgelöst. Die Technologie gilt als vielversprechender Kandidat, um in naher Zukunft mit Silizium-Solarzellen zu konkurrieren. Die exzellenten optischen wie elektrischen Eigenschaften der Perowskit-Materialien haben den Wirkungsgrad nach weniger als zehn Jahren Forschung auf über 20 % gehoben. Keine andere Technologie hat vergleichbare Ergebnisse in so kurzer Zeit aufzuweisen. Perowskit-Zellen haben zusätzlich den Vorzug, dass es sich potenziell um eine kostengünstige Technologie handelt, weil sie bei niedrigen Temperaturen hergestellt werden können. Schliesslich machen sie ihre Absorptionseigenschaften zu einem idealen Kandidaten als obere Zelle in Kombination mit einer darunterliegenden Silizium-Zelle, um eine noch effizientere Tandem-Solarzelle zu schaffen.

Intensitätsmodulierte Photostromspektroskopie (IMPS) und intensitätsmodulierte Photospannungsspektroskopie (IMVS) sind wichtige Techniken, um Solarzellen zu charakterisieren. Die Zellen werden sinusförmig moduliertem Licht ausgesetzt, dabei wird entweder die erzeugte Stromstärke (IMPS) oder Spannung (IMVS) gemessen. Diese Techniken werden angewendet, um den Transport und die Rekombination von Ladungen innerhalb der Zelle zu untersuchen. Da eine grosse Bandbreite von Frequenzen gemessen wird, lassen sich verschiedene Prozesse in unterschiedlichen Zeitskalen aufzeigen.

Perowskit-Solarzellen weisen eine spezielle Antwort bei niedriger Frequenz (< 10 Hz) auf. Wir haben numerische

Simulationen verwendet, um die Hypothese zu testen, dass mobile Ionen dafür verantwortlich sind. Unser Modell besteht aus eindimensionalen Drift-Diffusionsgleichungen gekoppelt mit dem Ionen-Transport. Zwei komplementäre Methoden wurden verwendet, um die Kleinsignalantworten zu berechnen. Die sinusförmige stationäre Analyse (S3A) basiert auf der Linearisierung der Modellgleichungen um den stationären Arbeitspunkt. Typische Ergebnisse der S3A-Methode werden in Abbildung 1a) und b) gezeigt. Im Gegensatz dazu basiert die Fourierzerlegung (Fourier decomposition, FD) auf der Berechnung der Fourier-Transformation der transienten Zellantwort auf einen Lichtintensitätssprung, s. Abbildung 1c). Die S3A-Methode ist zwar effizienter und genauer, aber die FD-Methode ermöglicht zusätzliche Interpretationen der IMPS- und IMVS-Ergebnisse, weil sie Zeit- und Frequenzraum miteinander in Verbindung bringt.

Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Antwort von PSC auf niedrige Frequenzen durch die Ionen-Migration erklärbar ist. Da angenommen wird, dass die Ionen eine niedrige Mobilität haben, antworten sie auf Anregungen zu unterschiedlichen Zeitskalen als Elektronen und Löcher. Simulierte IMPS- und IMVS-Antworten weisen deshalb zwei separate Zeitkonstanten auf, s. Abbildung 1b). Der Ursprung der Antwort bei hoher Frequenz liegt im Transport und der Rekombination der Elektronen und Löcher, während die Niederfrequenz-Antwort mit mobilen Ionen in Verbindung gebracht wird.

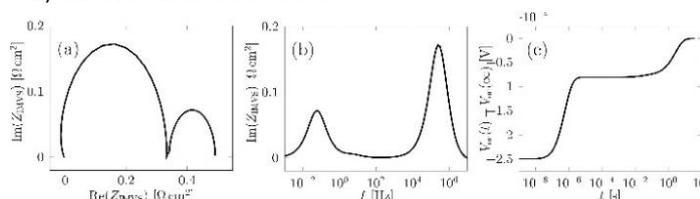


Abb. 1: Simulierte IMVS-Antwort einer Perowskit-Solarzelle. Teil a) zeigt das Nyquist-Diagramm und Teil b) den vorgestellten Teil der IMVS-Transferfunktion. Die simulierte Photospannung einer PSC, die einer kleinen Lichtintensität ausgesetzt ist, wird in Teil c) gezeigt.

2.3 Fortgeschrittene Charakterisierung von Brennstoffzellen-Stapeln bei automobilen Anwendungen (ACTIF)

Das ACTIF-Projekt zielt darauf ab, operative Strategien für Brennstoffzellensysteme mit Blick auf die drei Hauptaspekte Effizienz, Lebensdauer und Kosten auf Stapel Ebene zu optimieren. Dies wird durch ein wachsendes Verständnis von Brennstoffzell-Stapeln aufgrund von fortgeschrittenen zeit-aufgelösten Charakterisierungstechniken und mathematischen Modellen möglich.

Mitarbeiter: J. O. Schumacher, R. Herrendörfer
 Partner: GreenGT
 Finanzierung: Bundesamt für Energie der Schweiz (BFE)
 Dauer: 2018–2021

In der ersten Phase dieses Projektes (Oktober bis Dezember 2018) haben wir ein zeitabhängiges Modell für eine Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC) erstellt. Aufbauend auf einem voll parametrisierten, eindimensionalen und stationären Zwei-Phasen-Modell, das bereits zuvor am ICP entwickelt worden war, haben wir zusätzlich die Zeitabhängigkeit der Transportgleichungen für Elektronen, Protonen, Wärme, gelöstes Wasser, Gas und flüssiges Wasser berücksichtigt. Die Implementierung in COMSOL Multiphysics lässt die genaue räumlich-zeitliche numerische Auflösung und flexible Modell-aufbauten zu.

Das zeitabhängige Modell haben wir u.a. durch numerische Experimente getestet. Hierzu haben wir Sprungexperimente simuliert, während derer die Randbedingungen abrupt verändert werden. Hiermit können die Zeitkonstanten der einzelnen Transportprozesse bestimmt werden. In Übereinstimmung mit den theoretischen Werten ist dabei die charakteristische Zeitkonstante für die Membranbefeuchtung am längsten und am kürzesten für das Auf- und Entladen der elektrischen Doppelschicht. Wir konnten so zeigen, dass die Membranbefeuchtung für den Hysterese-Effekt verantwortlich ist, der bei Zykl voltammetrie-Experimenten beobachtet wird (Abbildung 1). Zusätzlich konnten wir die numerische Stabilität unseres Ansatzes nachweisen, d.h. der Lösungsalgorithmus konvergiert mit zunehmender räumlich-zeitlicher Auflösung.

Die nächsten Schritte für dieses Projekt sind die Ausweitung dieses zeitabhängigen Modells auf die Stapel Ebene, Modellordnungsreduktion und die Implementierung von Degradationsprozessen in das Brennstoffzellenmodell. Wir werden das Modell anwenden, um die dynamische Antwort eines Brennstoffzellensystems des Schweizer Unternehmens

GreenGT zu simulieren und mit den deutschen Partnern Fraunhofer ISE und DLR zusammenarbeiten. Diese Kooperation hat zum Ziel, unser Modell mit experimentellen Messdaten zu validieren. Dies ist für die modellbasierte Charakterisierung und Optimierung von Brennstoffzellensystemen in Bezug auf Leistung und Haltbarkeit wichtig.

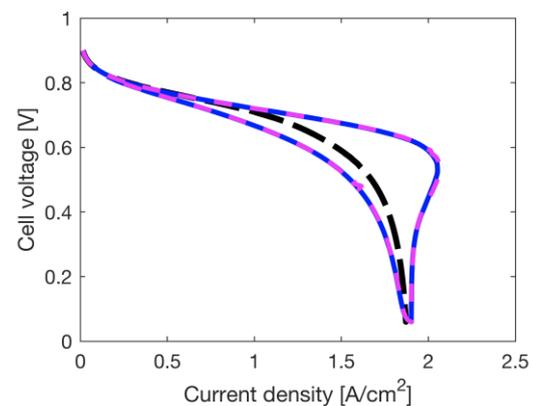


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt die Polarisationsskurve als Ergebnis der Simulation eines Zykl voltammetrie-Experiments. Die magentafarbene Linie stellt die Lösung dar, die allein unter Berücksichtigung des Akkumulationsterms in der Erhaltungsgleichung von gelöstem Wasser ermittelt wurde (d. h. dem Membran-Wassergehalt). Die zeitunabhängige Lösung für Wasser (schwarze Kurve) wird zu Vergleichszwecken abgebildet.

2.4 Experimentelle Parameter-Unsicherheit bei der Modellierung von Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen

Dieses Projekt zielt darauf ab, die Transportparameter von Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (PEFC) zu bestimmen. Der erste Teil dieser Arbeit zielt auf die Streuung in der Materialparametrierung und ihre Auswirkung auf die simulierten Polarisationskurven. Der zweite Teil analysiert die Sensitivität der Ergebnisse des Modells mit Blick auf Unsicherheiten, indem das Konzept der Konditionszahl für die Modellierung von Brennstoffzellen benutzt wird.

Mitarbeiter: R. Vetter, R. Herrendörfer, J. O. Schumacher

Partner: Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER): Efficient technologies and systems for mobility (SCCER Mobility)

Finanzierung: Innosuisse

Dauer: 2014–2020

Die Vorhersagekraft von Brennstoffzellenmodellen wird bislang durch signifikante Unsicherheiten bei der Parametrierung von Materialeigenschaften beeinträchtigt. Im Rahmen dieses Projekts wurden die kritischsten Transportparameter bestimmt, für die eine genauere experimentelle Charakterisierung erforderlich ist, um verlässliche Vorhersagen der Leistung von Brennstoffzellen durchführen zu können.

Im ersten Teil wurde eine umfassende Menge an Materialparametrierungen aus der Literatur in das jüngst am ICP entwickelte makro-homogene Zwei-Phasen-Modell einer PEFC-Brennstoffzelle integriert. Dieses numerische Modell machte die grosse Streuung bei der Vorhersage von Kennlinien, die aus den veröffentlichten Daten über Materialeigenschaften resultiert, deutlich. Unterschiedliche veröffentlichte Membrantransport-Eigenschaften führen dabei zur grössten Varianz in der simulierten Brennstoffzellen-Kennlinie: das Diffusionsvermögen von gelöstem Wasser, die protonische Leitfähigkeit und der elektroosmotische Koeffizient [2]. Um die Sensitivität des Modell-Outputs mit Blick auf Unsicherheiten beim Modell-Input auf eine robuste Art und Weise zu testen, wurden in einem zweiten Teil umfangreiche Vorwärts-Unsicherheits-Ausbreitungsanalysen für 26 Eingangsparameter (Betriebsbedingungen und Materialparameter) und für 12 Ausgangsparameter (Charakteristika der Polarisationskurve und Zustand der Brennstoffzelle) vorgenommen [3]. Durch die Einführung des Konzepts der relativen Zustandsnummer in die Modellierung von Brennstoffzellen wurde die Ausbreitung der Unsicherheit durch das Modell explizit gemessen. Neben einer örtlichen Sensitivitätsanalyse wurde eine globale Sensitivitätsanalyse vorgenommen, die eine grosse Bandbreite an Betriebsbedingungen und Materialeigenschaften umfasst.

Zu den kritischsten Modellparametern zählen die Membrantransporteigenschaften (Abbildung 1):

Membran-Befeuchtungs-Isotherme, der elektroosmotische Koeffizient, die Dicke der Membran und die Diffusionskonstante von gelöstem Wasser im Ionomer. Wie im ersten Teil gezeigt wurde, sind diese Parameter von der grössten Varianz bei in den verfügbaren experimentellen Daten betroffen. Folglich ist eine bessere Charakterisierung der Membraneigenschaften von Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen wichtig.

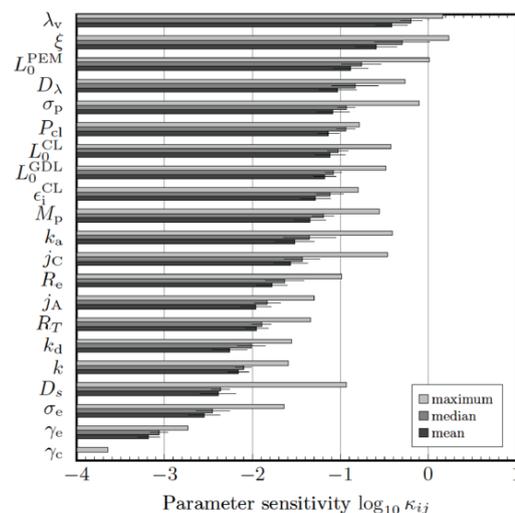


Abbildung 1: Globale Modell-Sensitivität mit Blick auf Parameter- Ungenauigkeit. Material-Parametrierungen sind gemäss ihrer Bedeutung absteigend sortiert.

Literatur:

- [1] R. Vetter und Jürgen O. Schumacher, Computer Physics Communication, 234, 223–234, 2019
- [2] R. Vetter und Jürgen O. Schumacher, 2019 arXiv:1811.10091
- [3] R. Vetter und Jürgen O. Schumacher, 2019 arXiv:1811.10093

2.5 Modellierung und Simulation einer organischen Redox-Flow-Batterie

Organische Redox-Flow-Batterien sind vielversprechend als kostengünstige nachhaltige Energiespeicher. Es handelt sich um eine noch sehr junge Technologie und es ist noch viel Arbeit mit Blick auf die Optimierung der Materialien und Komponenten erforderlich. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein makro-homogenes Modell der organischen Zellen zu entwickeln, um abschätzen zu können, welches der beste Kompromiss zwischen Leistung und Lebensdauer ist und letztlich, um Einblicke in verschiedene Parameter der Zellen zu geben. Sie ist Teil des Projektes FlowCamp, einem Forschungs- und Trainings-Projekt, das von dem Marie-Sklodowska-Curie-Programm der Europäischen Union finanziert wird. FlowCamp umfasst 11 Partnerorganisationen aus acht verschiedenen Ländern. Die Forschung des FlowCamp-Projektes zielt darauf ab, die Werkstoffe für Hochleistungs-Redox-Flow-Batterien zu niedrigen Preisen zu verbessern.

Mitarbeiter: G. Mourouga, J. O. Schumacher

Partner: ETH Zürich, Ungarische Akademie der Wissenschaften, Université Grenoble-Alpes, JenaBatteries

Finanzierung: Europäische Kommission, Horizon 2020, Marie Skłodowska-Curie Training Networks

Dauer: 2018–2021

Das FlowCamp-Projekt untersucht zurzeit zwei organische Chemien: Chinone und Polymere. Die erste besteht aus Chinonen – billige, natürliche Ladungsträger, wie sie beispielsweise in Prozessen der Photosynthese auftauchen – gelöst in einem wässrigen Schwefelsäureelektrolyt. Die zweite besteht aus synthetisierten langkettigen Polymeren gelöst in Natriumchlorid. Die Gleichungen der Modelle sind zwar für beide Chemien gültig, dennoch haben wir unser Augenmerk derzeit auf die Chinon-Chemie gerichtet, weil hierfür eine grössere Zahl an Daten verfügbar ist.

Die Redox-aktiven Moleküle für dieses System sind 1,2-Dihydrobenzochinon-3,5-disulfonsäure auf der positiven Seite und Anthrachinon-2-disulfonsäure auf der negativen Seite (linker bzw. rechter Tank, vgl. untenstehende Abbildung).

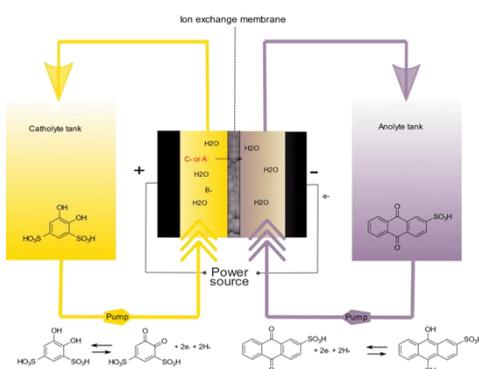
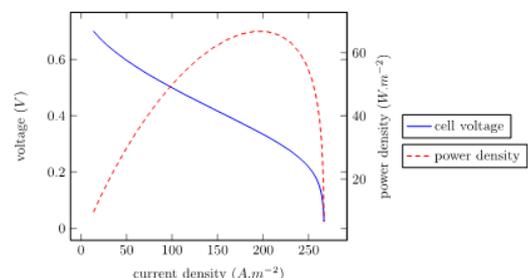


Abbildung 2: Darstellung einer nur-Chinon-organischen Redox-Flow-Zelle.

Diese Moleküle erzeugen einen schnellen Protonen-gekoppelten Elektronen-Transferprozess, und die Abwesenheit von Katalysatoren aus Edelmetall macht die Chinon-Chemie zu einem interessanten Kandidaten für umweltverträgliche Energiespeicher zu geringen Kosten [1].

Der Nachteil besteht darin, dass diese Chemie verglichen mit anderen Chemien nur eine relativ geringe Energiedichte erreicht, und dass Lösungen, dieses Problem zu bewältigen, darin resultieren könnten, dass mehr Benzochinone zur negativen Elektrode migrieren könnten, was wiederum die erwartete Lebensdauer der Batterie reduzieren könnte [1].



Das Ziel unserer Arbeit im FlowCamp-Projekt ist es, ein verlässliches Modell der Zellen zu schaffen, das es uns erlaubt, Eigenschaften wie Elektrolyt-Zusammensetzung und Viskosität, Membran-Eigenschaften und organische Zellarchitektur einzustellen [2]. Das 1D-makrohomogene Modell der Zelle beinhaltet Ladungs- und Massentransport-Phänomene in den Elektroden und der Membran. Wir arbeiten an einem Multi-Komponenten-Diffusionsmodell, um die Transport-Phänomene in den Ionen-Austausch-Membranen besser modellieren zu können, weil diese ein kritischer Bestandteil derartiger Zellen ist.

Literatur:

- [1] B. Yang, L. Hooper-Burkhardt et al., Journal of The Electrochemical Society, vol. 161, no. 9, 2014.
- [2] <https://www.flowcamp-project.eu/>

2.6 Modellierung und Simulation einer Wasserstoff-Brom-Redox-Flow-Batterie

Das Hauptproblem bei neuen Technologien zur Speicherung erneuerbarer Energien sind die Kosten. Sie können dadurch gemildert werden, dass billige und reichlich vorhandene Reagenzien wie Wasserstoff und Brom verwendet werden. Diese Studie beschreibt einen makrohomogenen Modellierungsansatz des Wasserstoff-Brom-Redox-Flow-Batteriesystems ebenso wie Fallstudien, deren Ziel es ist, die Auswirkungen wichtiger Betriebsbedingungen auf die Gesamtleistung der Zelle zu untersuchen. Die Studie ist Teil des FlowCamp-Projekts [1], ein Forschungs- und Trainingsprojekt, das durch das Marie-Sklodowska-Curie-Programm der Europäischen Union finanziert wird. FlowCamp umfasst 11 Partnerorganisationen aus acht verschiedenen Ländern. Die Forschung des FlowCamp-Projektes zielt darauf ab, die Werkstoffe für Hochleistungs-Redox-Flow-Batterien zu niedrigen Preisen zu verbessern.

Mitarbeiter: J. Włodarczyk, J. O. Schumacher

Partner: Elestor B.V., Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, Universität Stuttgart

Finanzierung: Europäische Kommission, Horizon 2020, Maria Skłodowska-Curie Training Networks

Dauer: 2018–2021

Eines der Flow-Batteriesysteme, das reichlich vorhandene Chemikalien als Elektrolyten benutzt, die durch eine hohe Energiedichte charakterisiert sind, ist die Wasserstoff-Brom-Redox-Flow-Batterie (HBRFB).

Ein typischer Aufbau eines HBRFB-Systems besteht aus einem Elektrolytbehälter und einem unter Druck gesetztem Wasserstoffgasbehälter, einer Elektrolytzirkulationspumpe und einem Zellenstapel, der sich zusammensetzt aus Stromabnehmern, Bipolarplatten, porösen Elektroden (kohlenstoffhaltige Materialien für die Br₂-Seite und Platinlegierungen für die H₂-Seite) und einer Ionen-selektiven Membran.

Bei der Entladung an der negativen Elektrode diffundiert gelöster Wasserstoff an die Oberfläche des Katalysators und wird zu Protonen oxidiert. Gleichzeitig diffundiert an der positiven Elektrode das gelöste Brom an die Oberfläche des Katalysators und wird zu Brom-Anionen reduziert. Beim Laden der Batterie werden beide Reaktionen umgekehrt. Dies geschieht mit einer relativ hohen Effizienz von bis zu 80 % [1] wegen der schnellen Elektrokinetik.

Im Rahmen der Aktivitäten, die das FlowCamp-Projekt umfasst, entwickeln wir auch ein mathematisches Kontinuumsmodell einer Wasserstoff-Brom-Redox-Flow-Batterie. Es besteht aus den relevantesten Transportprozessen durch die Membran und elektrochemischen Phänomenen für den Betrieb der HBRFB, also den Transport von Ladung, Wasser, Wasserstoff, Protonen, Brom und Bromid.

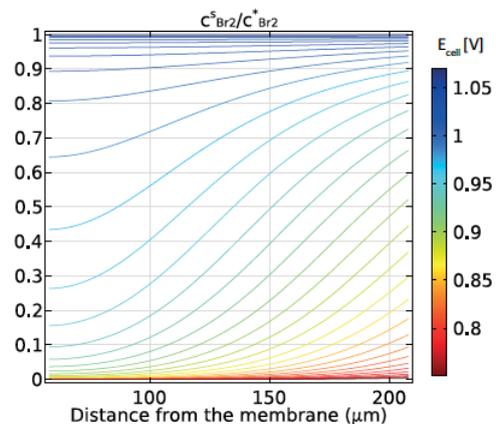


Abb. 1: Verteilung der Oberflächen-Konzentration von Brom zur Brom-Massenkonzentration in der Kohlefilzelektrode bei der Entladung.

Zusätzlich berücksichtigen wir im Modell Phänomene wie Nernstsche Verluste aufgrund von Schwankungen in der lokalen Oberflächenkonzentration, das Donnan-Potenzial auf der Schnittstelle der HBr/Br₂-Membran und die Gas-Adsorption im Ionomer auf der gasförmigen Wasserstoff-Seite gemäss dem Henry-Gesetz.

Das FlowCamp-Projekt fördert die intensive Zusammenarbeit zwischen den Teilnehmenden und schafft so eine Kombination von empirischen und Modellierungsstudien. Dieser Ansatz ermöglicht eine Vielzahl an Möglichkeiten für die experimentelle Validierung der Computersimulationen. Damit können Design-Richtlinien erarbeitet werden, die von Experimentatoren umgesetzt werden.

Quellen:

[1] FlowCamp-Projekt-Webseite verfügbar unter: www.flow-camp-project.eu

2.7 Evolution der Mikrostrukturen bei Hochtemperatur-Korrosion von metallischen Verbindungsleitungen (MIC) für Festoxid-Brennstoffzellen

Die Oxidation metallischer Verbindungsleitungen (MIC) ist ein Hauptgrund für den Leistungsabfall, der die Lebensdauer von Festoxid-Brennstoffzellen (SOFCs) beschränkt. Die Oxidationsrate und der damit zusammenhängende Kontaktwiderstand kann durch die Auswahl passender Verbindungsmaterialien und -beschichtungen beeinflusst werden. In diesem Projekt wurde die Evolution von Oxid-Skalen für zwei ferritische Stähle mit und ohne Beschichtung untersucht. Die detaillierte Charakterisierung der Mikrostruktur stellt die Basis für ein grundlegendes Verständnis des zugrundeliegenden Mechanismus dar, die für eine sinnvolle Verbesserung der verwendeten Materialien notwendig ist.

Mitarbeiter: L. Holzer, L. Keller, T. Hocker, D. Burnat, A. Heel, F. Fleischauer, J. Grolig, A. Mai
 Partner: Hexis, ScopeM/ETHZ
 Finanzierung: Bundesamt für Energie der Schweiz
 Dauer: 2015–2018

Die Oxidation bei hohen Temperaturen wurde für zwei ferritische Stähle (Crofer22APU und 1.4509) untersucht. Muster mit unterschiedlichen Beschichtungen (Co, MnCoFe) wurden bei 850°C in der Luft oxidiert. Die Evolution der Mikrostruktur wurde mittels Zeitraffermikroskopie für vorgegebene Zeitschritte von bis zu 5'400 Stunden charakterisiert. Die Charakterisierung der Mikrostrukturen an der ETHZ (ScopeM) umfasste dabei Ionenbreitstrahlen (BIB), SEM- und (S)TEM-EDX.

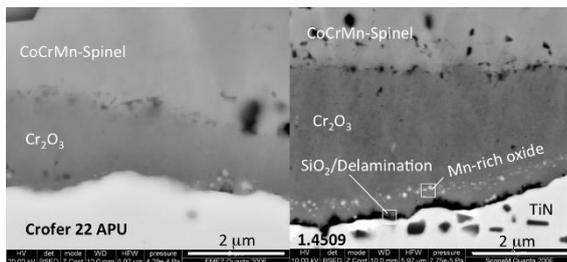


Abb. 1: Beispiel für eine skalierte Mikrostruktur nach Oxidation für 500 Stunden bei 850°C in der Luft. Links: Crofer 22 APU mit Co-Beschichtung, rechts 1.4509 mit Co-Beschichtung. Beachten Sie den Unterschied an der MIC-Schuppen-Schnittstelle.

Auf beiden ferritischen Mustern, die nicht beschichtet waren, bildete sich eine Doppelschuppe, die aus Cr₂O₃ besteht mit einem darüber liegenden MnCr-Spinell. Für Crofer ist die Schnittstelle zwischen MIC und Schuppe perfekt. Im Gegensatz dazu zeigt 1.4509 eine hohe Porosität und eine starke Delamination an der MIC-Schuppen-Schnittstelle. Subtile Veränderungen der MIC-Zusammensetzung haben deutliche Unterschiede in der Mikrostruktur zur Folge. Im Einzelnen führt ein etwas höherer Si-Gehalt bei 1.4509 zur Bildung von Si-Oxiden (Nadeln von 10-20 nm) an der MIC-Schuppen-Schnittstelle, was für die beobachtete Delamination verantwortlich ist. Bei 1.4509 mit Spinell-Beschichtung kann die Delamination in den frühen Stufen der Oxidation unterdrückt werden. Bei fortgesetzter Oxidation ist die Delamination dann jedoch noch komplexer, dann können verschiedene Delaminations-Horizonte an der Schnittstelle zwischen MIC und

Schuppe und innerhalb der Oxid-Schichten nachgewiesen werden.

Bei laufender Oxidierung verändert sich die Zusammensetzung der Spinell-Beschichtung wegen der Interdiffusion (d. h. der Anreicherung mit Cr, Mn). Diese Veränderungen der Zusammensetzung können zu einem Verlust der Leitfähigkeit und zu einem Anstieg des Kontaktwiderstandes führen. Um diese negativen Folgen solch einer Interdiffusion zu kompensieren, muss die Dicke der Beschichtung erhöht werden.

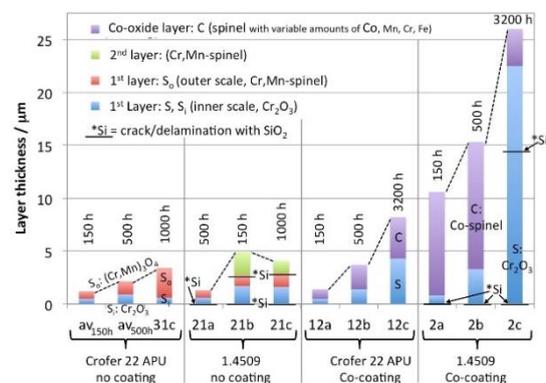


Abb. 2: Dicke der Oxidschichten für vier Materialien.

Die Untersuchungen schlossen auch die Quantifizierung von Oxidations-Raten und der damit zusammenhängenden Kontaktwiderstände ein. Delamination und Spinell-Zusammensetzungen sind dabei kritischer als die Dicken der Schichten. Die Ergebnisse sind vielversprechend in dem Sinn, dass relativ preiswerte ferritische Materialien in Verbindung mit Beschichtungen verwendet werden können, die in der Lage sind, die Delamination und die Cr-Verflüchtigung zu unterbinden.

2.8 Modell für den abnutzungsoptimierten Betrieb von Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Stapeln

Auch wenn die Entwickler von Brennstoffzellen-Stapeln schon grosse Fortschritte bei der Reduzierung von Abnutzungen, die im Zeitablauf zu Leistungsverlusten führen, gemacht haben, wird ein gewisser Alterungseffekt noch immer als unvermeidbar betrachtet. Es macht deshalb Sinn zu erforschen, ob eine intelligente Strategie für den Betrieb von Brennstoffzellen-Stapeln dazu genutzt werden könnte, Leistungsverluste zu minimieren. Wir stellen hier die ersten Ergebnisse vor, die zeigen, wie unterschiedliche Betriebstemperaturen von Stapeln die Abnutzung dieser Stapel beeinflussen.

Mitarbeiter: T. Hocker
 Partner: Hexis AG, Winterthur, J. Grolig, F. Vandercruysse
 Finanzierung: Bundesamt für Energie
 Dauer: 2018–2019

Den Leistungsverlust in Brennstoffzell-Systemen zu ermitteln, zu verstehen und zu reduzieren ist eine Aufgabe, die über viele Jahre sowohl experimentell [1] als auch theoretisch [2] angegangen wurde. Auch wenn dabei viele Fortschritte gemacht wurden, und die ersten Brennstoffzell-Systeme auch kommerziell erhältlich sind, wird ein gewisser Abnutzungsgrad als unvermeidbar betrachtet. Weil der Alterungsprozess von Brennstoffzellen – wie Batterien – davon abhängt, wie sie betrieben werden, wäre es sehr wünschenswert, eine intelligente Betriebsstrategie zu entwickeln, die dazu beiträgt, Leistungsverluste zu reduzieren. In diesem Projekt haben wir analysiert, wie Veränderungen in der Betriebstemperatur der Stapel ihre Abnutzung beeinflussen. Hierzu nutzen wir einen ebenso einfachen wie wirkungsvollen Ansatz um den internen Widerstand der Wiederholungseinheit für Brennstoffzellenstapel ASR_{RU} in $m\Omega\text{ cm}^2$ als eine Funktion der Zeit und der Temperatur auszudrücken. Dieser Ansatz basiert auf dem kompletten Differential von ASR_{RU} , das in seiner integrierten Form dargestellt wird als

$$ASR_{RU}(t, T) = ASR_{RU}(t_0, T_0) + \int_{t_0}^t \left. \frac{\partial ASR_{RU}}{\partial t} \right|_T dt + \int_{T_0}^T \left. \frac{\partial ASR_{RU}}{\partial T} \right|_t dT$$

Ausgehend von Gleichung 1 können die Stapel-Abnutzungsdaten wie die synthetischen Daten, die in Abb. 1 gezeigt werden, sofort verwendet werden, um die zeitabhängige Abnutzung für willkürliche T-Profile zu bestimmen.

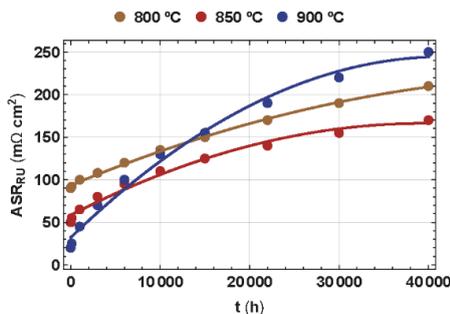


Abb. 1: Synthetische Daten für den zeit- und temperaturabhängigen internen Widerstand der Wiederholungseinheit für Brennstoffzellenstapel.

Die Ergebnisse dieser Analyse werden in Abb. 2 und 3 gezeigt. Es stellt sich heraus, dass die Erhöhung der Betriebstemperatur des Stapels von 800°C auf 900°C nach 20'000 Stunden den Leistungsverlust zurückgehen lässt, verglichen mit einem Betrieb bei konstant 800°C oder 900°C.

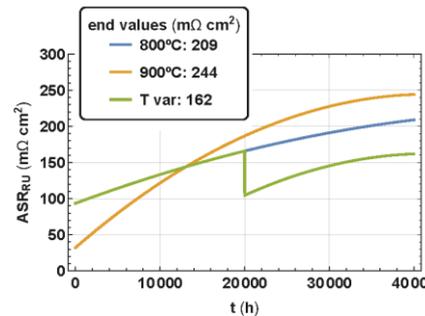


Abb. 2: Entwicklung des internen Widerstandes einer Wiederholungseinheit eines Brennstoffzellenstapels für: T = 800°C T = 900°C und T-Anstieg von 800°C auf 900°C nach 20'000 h.

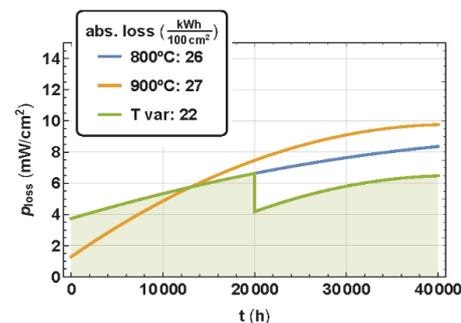


Abb. 3: Leistungsverluste für die Wiederholungseinheit eines Brennstoffzellenstapels für die drei verschiedenen Betriebs-Modi, die in Abb. 2 gezeigt werden.

Literatur:

- [1] A. Mai, B. Iwanschitz, J. A. Schuler, R. Denzler, V. Nerlich, A. Schuler, ECS Transactions, 57, pp. 73–80 (2013).
- [2] C. Meier, D. Meier, F. Vandercruysse, T. Hocker, *The International Journal of Multiphysics*, Vol. 12, 393–411 (2018).

3 Organische Elektronik und Photovoltaik

Organische Halbleiter erfreuen sich grosser Aufmerksamkeit seit 1987, als organische Leuchtdioden (OLED) von führenden Wissenschaftlern bei Kodak in den USA erfunden wurden. Nach 30 Jahren Forschung und Entwicklung und weltweiten Anstrengungen bei der Kommerzialisierung dieser Technik sind wir nun Zeugen einer grossen Bandbreite an OLED-Displays in Alltagsprodukten, die von Mobiltelefonen bis zu 77-Zoll-Fernsehern reichen. Die besonderen Vorteile der OLED-Technik liegt in ihrer dünnen Bauweise, dem grossen Betrachtungswinkel, der Farbskala und hohen Effizienz bei der Energieumwandlung. OLED bestehen aus einer Sequenz von dünnen organischen Halbleiter-Schichten, die zwischen zwei metallischen Elektroden angebracht werden. Organische Halbleiter finden auch Beachtung als starke Lichtabsorber und Ladungstransportmaterialien in organischen Solarzellen, mit denen flexible PV-Module gebaut werden können. In den letzten Jahren waren organische Halbleiter auch der Schlüssel für die bahnbrechende Perowskit-Solarzelle, eine organisch-anorganische Hybrid-Technologie, die die bedeutendste in Entwicklung befindliche Photovoltaik-Technologie ist und auch ein grosses Potenzial bei LED-Anwendungen hat. Tiefer in der unsichtbaren Bandbreite der elektromagnetischen Wellen ist die Terahertz-Photonik ein wachsendes technisches Feld für nicht-invasive Diagnose-Anwendungen. Das ICP betreibt Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der OLED, OPV, Perowskit-PV und nicht linearen optischen Kristalle für Terahertz-Photonik-Messsysteme. Im ICP-Labor stellen wir zu Forschungs- und Entwicklungszwecken OLED und neuartige Solarzellen in einem kleinen Rahmen her, zusätzlich bauen wir ein Terahertz-Photonik-Messsystem auf. Im unsichtbaren Spektralbereich der elektromagnetischen Wellen ist die Terahertz-Photonik angesiedelt als ein wachsendes technisches Feld für nicht-invasive Diagnose-Anwendungen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die laufenden Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die auf diesem interdisziplinären Forschungsgebiet des ICP ausgeführt werden.



Tobias Bach



Ennio Comi



Jonas Dunst



Mojca Jazbinsek



Christoph Kirsch



Evelyne Knapp



Vincent Michel



Martin Neukom



Kurt Pernstich



Uros Puc



Markus Regnat



Beat Ruhstaller



Andreas Schiller



Simon Züfle

3.1 Aus dem Labor in die Fabrik: Hochskalieren von Perowskit-Solarzellen

Perowskit ist ein vielversprechendes Material für Solarzellen. Diese zeigen herausragende Wirkungsgrade von mehr als 20 %, also fast dem doppelten Wert dessen, was von organischen Solarzellen erreicht wird. Mit Hilfe numerischer Simulationen und Messungen will das ICP die Funktionsweise dieser Zellen besser verstehen und hilft dabei, ein Software-Tool zu verbessern, das die Leistung grossflächiger Perowskit-Zellen vorhersagt.

Mitarbeiter: E. Comi, E. Knapp, M. Neukom, B. Ruhstaller, A. Schiller
 Partner: Empa, Fluxim AG
 Finanzierung: CTI
 Dauer: 2016–2019

Der Name *Perolec-Projekt* ist aus den zwei Wörtern *Perowskit* und *OLEC* zusammengesetzt, weil das Projekt darauf abzielt, Simulations- und Mess-Tools für Perowskit-Solarzellen und organische, licht-emittierende elektrochemische Zellen (OLEC) zu entwickeln. Es wird angenommen, dass diese beiden Technologien neben der Elektron- und der Lochtransport-Eigenschaft noch die Ionen-Transporteigenschaft gemeinsam haben. Ionentransport ist vergleichsweise langsam, verglichen mit Elektron- und Lochtransport. Dieses Verhalten erfordert eine Anpassung des Messsystems und der Simulations-Software. In den früheren Jahren des Projekts wurde die Hardware verbessert, um die Technologie vollständig zu charakterisieren. Der numerische Solver wurde mit Gleichungen zum Ionentransport ergänzt, um die Hysterese in Perowskit-Solarzellen adäquat zu beschreiben. Diese Modifikationen wurden für kleine Laborzellen, nur wenige Quadratmillimeter gross, vorgenommen. Neben der Entwicklung von Mess- und Simulations-Tools für kleine Laborzellen wendeten wir die Software LAOSS der Fluxim AG an, um grossflächige Perowskit-Zellen zu simulieren. Um die Simulationszeiten und Belastung auf ein Minimum zu beschränken, wird dabei ein kompakter 1+2D-Ansatz verfolgt. Statt eine komplette Zelle in 3D zu simulieren, wurden die Charakterisierungsdaten aus der Untersuchung der kleinen Zellen in die Berechnung der grossflächigen Zellen übernommen, wie in Abb. 1 dargestellt. Dieser Aufbau wird für die reduzierte Leitfähigkeit der transparenten Elektrode verantwortlich gemacht und kann Selbstaufheizung beinhalten. Wir imitieren kleine und grosse Zellen dadurch, dass die grossen Zellen mit Masken unterschiedlicher Grösse bedeckt werden, während Licht auf sie scheint. Die resultierenden Strom-Spannungs-Kurven zeigen eine

interessante Verschiebung der Leerlaufspannung [1], die zum Teil durch die Simulation erklärt werden kann. Aktuell testen wir Fitting-Algorithmen für grossflächige Strom-Spannungs-Kurven.

Die Zusammenarbeit mit dem ICP-Spin-off-Unternehmen Fluxim macht die Implementierung der neuen Tools in die Simulations-Software Setfos und LAOSS und die integrierte Messlösung Paios möglich. All diese Programme sind kommerziell erhältlich und werden von einer Vielzahl an Kunden genutzt. Der Forschungspartner EMPA stellt OLEC- und Perowskit-Solarzellen her, die dann am ICP und von Fluxim gemessen werden, um die neuen Tools zu validieren. Mit dem Perolec-Projekt trägt das ICP zu einem wachsenden Feld in der akademischen und industriellen Forschung bei.

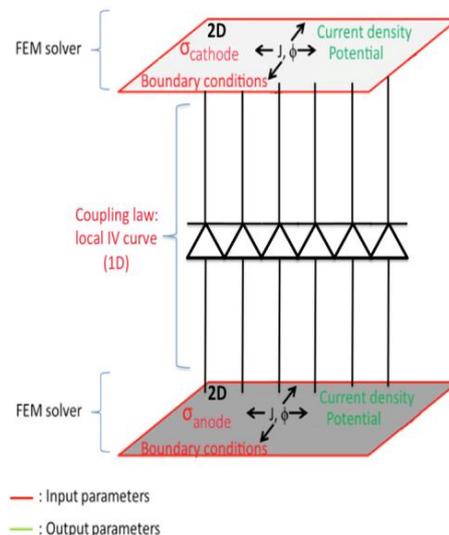


Abb. 1: Zusammenspiel des 1D-Modells oder die Messung der Laborzelle und das 2D-Modell für Elektroden.

Literatur:

[1] Kiermasch et al., Effects of Masking on Open-Circuit Voltage and Fill Factor in Solar Cells, Joule (2018), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.10.016>

3.2 Ultra-Breitband-THz-Photonik basierend auf organischen Kristallen

Das Ziel dieses Projektes ist es, ein neues, kompaktes Instrument für nicht destruktive Terahertz (THz)-Materialprüfung und -Charakterisierung zu entwickeln. Das neue System wird THz-spektroskopische Messungen, THz-Bildgebung und THz-Dickenmessungen in einem Ultra-Breitband-Spektralbereich jenseits der 15 THz ermöglichen, welches derzeit auf dem Markt nicht verfügbar ist.

Mitarbeiter: U. Puc, T. Bach, V. Michel, M. Jazbinsek
 Partner: Rainbow Photonics AG
 Finanzierung: Innosuisse
 Dauer: 2017–2019

Organische elektro-optische Kristalle sind sehr vielversprechende und effiziente THz-Wellen erzeugende Materialien. Sie ermöglichen sowohl sehr hohe elektrische Felder im THz-Bereich, die mehrere GV/m übersteigen mittels optischer Gleichrichtung von Femtosekundenlaserpulsen als auch die Möglichkeit für eine sehr breite Bandbreite von weit über 10 THz. Da aber die in Laboren üblichen THz-Systeme, die auf diesen Kristallen basieren, sehr grosse und teure Ti:sapphire-Femtosekunden (fs)-Lasersysteme benutzen, kommen sie für industrielle Einsätze der THz-Bildgebung und -Spektroskopie nicht infrage. Deshalb entwickeln wir ein kompaktes THz-Zeitbereichsspektroskopie- und Bildgebungssystem, das auf relativ preiswerten und kleinen Fasern basieren, die mit Telekommunikationswellenlängen arbeiten.

Wir haben die Brechungsindizes im Breitband-THz-Bereich einiger dem letzten Stand der Technik entsprechender elektro-optischer Kristalle, DAST, DSTMS, OH1 und HMQ-TMS charakterisiert. Das erlaubt es uns, theoretisch auszuwerten, in welchen Bereichen die Erzeugung ultra-breiter THz-Wellen und die kohärente Detektion von THz-Feldern anzuwenden ist, in Abhängigkeit von der verfügbaren Wellenlänge des Pumpenlasers und den gewünschten THz-Frequenzen, die erzeugt werden sollen (s. Abb. 1). Für unsere Pumpen-fs-Laser-Quelle, die mit der zentralen Frequenz von 1560 nm arbeitet, ist die beste Wahl DSTMS, was wir auch experimentell bestätigten.

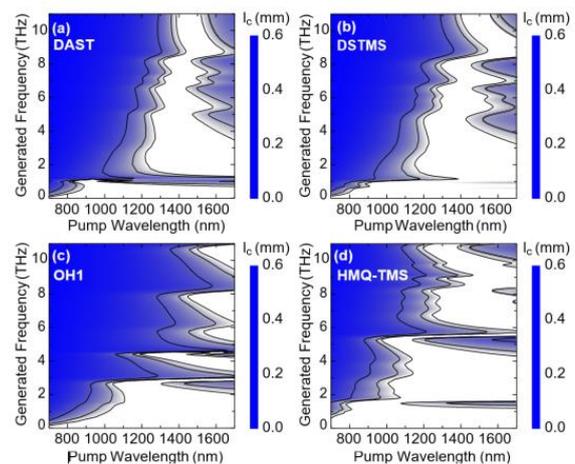


Abb. 1: Kohärenzlänge l_c für die Generierung von THz-Wellen in (a) DAST, (b) DSTMS, (c) OH1 und (d) HMQ-TMS als eine Funktion der optischen Wellenlänge der Pumpe und der generierten THz-Frequenz f . Das weisse Gebiet stellt dabei Kohärenzlängen von mehr als 0,6 mm dar, was am besten für die effiziente Generierung und/oder den Nachweis von THz-Wellen ist.

Wir verwenden einen sehr kompakten ($19,5 \times 9,5 \times 7,5 \text{ cm}^3$) kommerziell verwendeten fs-Laser von Menlo Systems mit einer Pulslänge von 40 fs, 190 mW durchschnittlicher Leistung und 100 MHz Wiederholungsrate als Pumpenquelle. Abbildung 2 zeigt das erlangte THz elektrische Feld im Zeitbereich und das korrespondierende Spektrum, das in einer trockenen Luftatmosphäre mittels DSTMS-Kristallen sowohl für die Generierung als auch die Detektion von THz-Wellen erlangt wurde. Wir erzielen eine sehr grosse Frequenz-Bandbreite von über 15 THz mit einem hohen dynamischen Bereich von bis zu 60 dB.

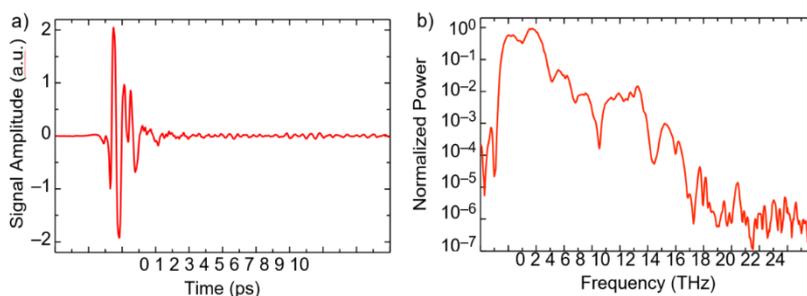


Abb 2: Das THz Zeitbereichssignal (a) und das korrespondierende Leistungsspektrum (b) des kompakten Terahertz-Aufbaus.

3.3 Farbstoffsolarzellen: Simulation der Impedanz, experimentelle Validierung und Parameterextraktion

In dieser Bachelorarbeit wurden die Impedanzspektren sechs verschiedener Farbstoffsolarzellen (DSCs), die vom Industriepartner H. Glass zur Verfügung gestellt worden waren, mit unterschiedlichen Vorspannungen gemessen und miteinander verglichen. Zusätzlich wurde ein Simulationsmodell für elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) formuliert, das auf Differentialgleichungen (die ein Diffusionsmodell beschreiben) und RC-Elementen (die ein Übertragungsleitungsmodell repräsentieren) basiert. Schliesslich wurde dieses Modell in PECSIM, eine Software für die Simulation von DSCs, implementiert, um die Parameter der Zellen zu extrahieren.

Studenten: L. Basler, E. Comi
 Kategorie: Bachelorarbeit
 Betreuer: D. Bernhardsgrütter, M. Schmid
 Eingereicht am: 08.06.2018

DSCs stellen eine alternative Technologie zu konventionellen Silizium-basierten Zellen dar. Die möglichen Vorteile von DSCs liegen in ihren niedrigen Produktionskosten dank billiger Rohmaterialien. Insbesondere für Nischenanwendungen gelten sie als eine vielversprechende Lösung.

Elektrochemische Impedanz-Spektroskopie (EIS) ist eine Messtechnik, die unter Beweis gestellt hat, dass sie sehr nützlich für die Charakterisierung von DSCs ist. EIS macht die Determinierung der Impedanz einer Zelle bei unterschiedlichen Frequenzen möglich. Mit der Hilfe der gemessenen Impedanzen können der Ladungstransport und die unerwünschten Rekombinationsprozesse innerhalb einer DSC erforscht und in der Folge optimiert werden.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit wurde ein Simulationsmodell für Impedanzspektroskopie entwickelt und in PECSIM implementiert. Es basiert auf Diffusions- und Übertragungsleitungsmodellen der Farbstoffsolarzelle. Zusätzlich wurden DSCs mit unterschiedlichen Materialeigenschaften mittels EIS-Messungen untersucht und miteinander verglichen. Dies geschah mittels der Messmethode Paios, das vom ICP-Spin-off Fluxim AG an der ZHAW entwickelt wurde. Hauptziel dieser Arbeit ist es, die gemessenen Daten in PECSIM zu simulieren und die wesentlichen Eigenschaften der Zellen zu extrahieren.

Mittels extensiver Parameteranpassung konnte nachgewiesen werden, dass das EIS-Simulations-

Tool in der Lage ist, die gemessenen Spektren akkurat abzubilden. Mittels dieses Prozesses wurde die neue Version von PECSIM nicht nur validiert, es wurde auch gezeigt, dass sie in der Lage ist, informative Eigenschaften der DSC, etwa Transport und Rekombinationswiderstände, abzuleiten. Diese Arbeit bildet die Grundlage für die weitere simulationsbasierte Optimierung der DSC-Technologie, mit der Aussicht darauf, dass diese Zellen in naher Zukunft kommerziell hergestellt werden könnten.

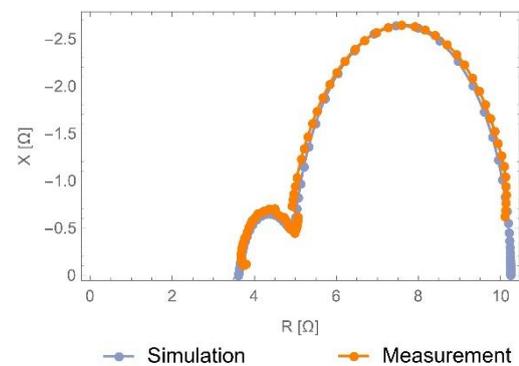


Abb. 1: EIS-Simulation und Messung einer DSC abgebildet in einem Nyquist-Diagramm. Die Simulation mit PECSIM liefert eine Kurve, die das Messergebnis perfekt abbildet.

Studenten-Projekt:

L. Basler, E. Comi, Farbstoffsolarzellen: Simulation der Impedanz, experimentelle Validierung und Parameterextraktion, Akademische Betreuer: D. Bernhardsgrütter, M. Schmid, Bachelorarbeit in Energie- und Umwelt-Ingenieurwesen.

3.4 Verbesserte Lichtausbeute in organischen Leuchtdioden dank einer neu entwickelten Streuschicht

Im Rahmen des Forschungsprojektes FlexOLED wurden Materialien, Messgeräte und Simulationssoftware entwickelt, um die Energieeffizienz von organischen Leuchtdioden (OLEDs) zu verbessern.

Mitarbeiter: M. Regnat, T. Beierlein, B. Blülle, M. Diethelm, M. Jazbinsek, K. Lapagna, K. Pernstich, B. Ruhstaller
 Partner: Avantama AG, PV-LAB (EPFL), ZPP (ZHAW), Fluxim AG
 Finanzierung: KTI
 Dauer: 2015–2018

Immer mehr Bildschirme für Computer, Mobiltelefone und neuerdings auch Beleuchtungsanwendungen werden heute aus organischen Leuchtdioden (OLEDs) gefertigt. Dazu werden dünne Schichten verschiedenster Halbleitermaterialien so kombiniert, dass die beim Anlegen einer Spannung bewegten Ladungsträger rekombinieren und Licht erzeugen. Ein Teil dieser Strahlung wird jedoch wegen des unterschiedlichen Brechungsindex der einzelnen Schichten totalreflektiert und bleibt innerhalb der OLED gefangen.

Im Rahmen des FlexOLED-Projektes wurden neue Materialien entwickelt, die helfen sollen, mehr des in einer OLED erzeugten Lichts an die Umgebung abzustrahlen. Dazu wurde eine zusätzliche Schicht entwickelt, welche zwischen dem Trägersubstrat und der eigentlichen OLED aufgebracht wird und das Licht streut. In dieser Streuschicht sind einerseits Nanopartikel eingebettet, um den effektiven Brechungsindex zu erhöhen und andererseits sorgen ebenfalls eingebettete Mikropartikel für eine effektive Streuung des Lichtes auch bei grossen Winkeln, welches ansonsten totalreflektiert würden. Die neuartigen Streuschichten wurden von der Firma Avantama entwickelt und anschliessend im Labor der ZHAW getestet.

Die Entwicklung einer solchen Streuschicht wäre ohne geeignete Simulationssoftware kaum möglich gewesen. Mithilfe von Simulationen konnten die optimalen Materialparameter gefunden werden. Für ein optimales Ergebnis werden je nach Aufbau der OLED unterschiedliche Schichtdicken und Partikelkonzentrationen benötigt. Am ICP wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Fluxim neue Softwarealgorithmen entwickelt, mit welchen diese optimalen Materialparameter gefunden werden konnten. Durch die Herstellung von eigenen OLEDs mit den internen Streuschichten konnte deren Entwicklung wesentlich verbessert werden. Durch das Testen der Schichten unter realen Bedingungen wurden

Schwachstellen erkannt und die Materialkombinationen konnten weiter optimiert werden. Wichtiger Bestandteil einer OLED ist insbesondere eine transparente Leiterschicht. Das dazu benötigte Material ist schwierig in guter Qualität abzuschneiden. Im Zuge dieses Projektes wurde an der EPFL auch ein neuartiger transparenter Leiter entwickelt, der ohne das wertvolle Edelmetall Indium auskommt. Die restlichen Schichten der OLED wurden im haus-eigenen Labor des ICP hergestellt. Die internen Streuschichten beeinflussen die Winkel, unter denen das Licht der OLED abgestrahlt wird. Generell ist dieses Abstrahlverhalten ein wichtiges Kriterium, sodass in dieser Arbeit ein Messgerät entwickelt wurde, um das winkelaufgelöste Abstrahlverhalten von OLEDs zu messen. Dazu wurde ein Prototyp an der ZHAW (ICP und ZPP) entwickelt, der von der Firma Fluxim zur Serienreife weiterentwickelt wurde (Abb. 1). Der Erfolg dieses Projektes lag mitunter darin, dass die gesamte Kette in der Entwicklung von den beteiligten Partnern abgedeckt wurde, also von der Materialentwicklung über die Optimierung der Materialparameter durch Simulation bis zur Herstellung und Charakterisierung eigener Proben zum Verifizieren der erwarteten Spezifikationen.



Abb. 1: Vom Prototyp zum Produkt: Das im Projekt entwickelte Messgerät PHELOS zur Bestimmung des winkelaufgelösten Abstrahlverhaltens von OLEDs.

3.5 Grenzen der Triplett-Ausbeute von fluoreszierenden organischen Leuchtdioden

Die Ziele dieses Forschungsprojektes bestanden zum einen darin, den Mechanismus der Triplett-Ausbeute in hocheffizienten Fluoreszenz-basierten Exciplex-organischen Leuchtdioden (OLED) zu untersuchen und zum anderen den Grenzwert des Wirkungsgrades und die Effizienzreduktion bei erhöhten Betriebsbedingungen sowie bei andauerndem Betrieb zu untersuchen und zu quantifizieren. Ein elektro-optisches Drift-Diffusionsmodell wird dazu verwendet, die Charakteristika der OLED zu beschreiben und vorherzusagen.

Mitarbeiter: M. Regnat, K. Pernstich, B. Ruhstaller
 Partner: Gruppe um Jang-Joo Kim von der Seoul National University, Südkorea
 Finanzierung: SNF
 Dauer: 2016–2019

Fluoreszenz-basierte OLEDs haben bestimmte Vorteile im Vergleich zu Phosphoreszenz-basierten OLEDs: niedrige Materialkosten, weil keine Edelmetalle (wie Ir, Pt) verwendet werden müssen, lange Lebensdauer der Dioden, enge Emissionsspektren, die zu saturierten Farben führen und ein besseres Umfeld beim geistigen Eigentum. Ein grosser Nachteil besteht jedoch in dem geringen Wirkungsgrad, der mit der geringen Singlett-Exzitonen-Ausbeute von 25 % verbunden ist. Dieser geringe Wirkungsgrad kann signifikant gesteigert werden, wenn die OLED-Materialien in der Lage sind, (nicht strahlende) Triplett-Exzitonen in ausstrahlende Singlett-Exzitonen umzuwandeln.

In diesem Projekt nutzten wir die Möglichkeiten am ICP für die fortgeschrittene Charakterisierung (Paios) und Simulation (Setfos) von OLEDs dazu, die hoch effizienten TADF OLEDs mit fluoreszenten Emittlern, die uns vom Team von Prof. Jang-Joo Kim von der Seoul National University zur Verfügung gestellt wurden, zu untersuchen.

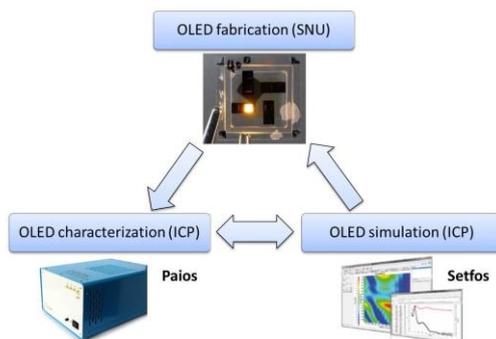


Abb. 1: Projektvorgehensweise für die Untersuchung von hoch effizienten, fluoreszenten TADF exciplex OLEDs.

Mittels des Messgerätes Paios sowie neuer am ICP entwickelter Add-on-Messaufbauten waren wir in der Lage, diese OLEDs mit unterschiedlichen Methoden zu charakterisieren, wie beispielsweise der Stromdichte – Spannungsverlauf, Impedanz und Kapazität – Spannungsmessung oder winkelabhängigen Elektrolumineszenz (EL) -

Spektren und temperaturabhängigen, zeitlichen EL-Messungen. Basierend auf den OLED-Charakterisierungs-Ergebnissen wurde ein elektro-optisches Drift-Diffusions-OLED-Modell mittels der Simulationssoftware Setfos etabliert. Abb. 2 zeigt die gute Übereinstimmung von Messung und Simulationsergebnis für das Beispiel des temperaturabhängigen, zeitlichen EL-Abfallverhaltens der OLED nach dem Abschalten der Spannung.

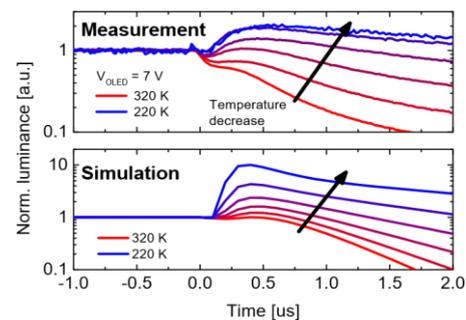


Abb. 2: Gemessenes und simuliertes temperaturabhängiges, zeitliches EL-Abfallverhalten der OLED nach Abschalten der Spannung ($t = 0$ us).

In Abb. 2 wird ein langsamerer EL-Abfall für sinkende Temperaturen nach dem Abschalten der Spannung beobachtet ($t = 0$ us), was ein typisches Verhalten für OLEDs mit einem Triplett-Ausbeute-Mechanismus ist. Die Abweichung des Spitzenwertes in der Simulation im Vergleich zum gemessenen Wert in Abb. 2 zeigt an, dass die Parameter des elektro-optischen Modells angepasst und/oder neue Mechanismen hinzugefügt werden müssen, was derzeit untersucht wird. Am Ende des Projekts sollte ein umfassendes Modell zur Beschreibung und Vorhersage der OLED-Effizienzgrenze und der Abnutzungsphänomene dieser dem Stand der Technik entsprechenden Fluoreszenz-basierten Exciplex OLED etabliert werden, was zur Verwirklichung von verbesserten TADF OLED führen würde.

M. Regnat, K.P. Pernstich, S. Züfle, B. Ruhstaller, *Analysis of the bias-dependent split emission zone in phosphorescent OLEDs*. ACS Applied Materials & Interfaces 10 (37), 31552 (2018)

4 Sensorik und Messsysteme

Heutzutage hat beinahe jedes Objekt unseres Alltags eine funktionale Beschichtung. Diese Beschichtung bestimmt nicht nur sein Aussehen, sondern es betrifft auch seine Eigenschaften wie seine Widerstandsfähigkeit gegen Kratzer oder Korrosion. Um die Qualität der Beschichtungen sicherzustellen, müssen ihre Dicke, Homogenität, Materialzusammensetzung und Hafteigenschaften bestimmte Standards erfüllen. Früher konnten diese Beschichtungseigenschaften nur an eher wenigen individuellen Musterstücken bestimmt werden. Um Fehler zu minimieren, hatte das oft zur Folge, dass Beschichtungen zu dick wurden, was eine Materialverschwendung war.

Lock-in-Thermographie ist eine relativ neue, zerstörungsfreie und kontaktlose Testmethode. Dafür wird eine Oberfläche über einen sich über die Zeit verändernden Hitzestrom thermisch erregt. Die daraus resultierende Wärmestrahlung wird von Infrarotsensoren aufgezeichnet und über Computeralgorithmen ausgewertet. Das erlaubt es beispielsweise, unsichtbare Oberflächendefekte zu entdecken, indem der Tiefenbereich mittels der angewandten Modulationsfrequenz verändert werden kann.

Am ICP wurde die Lock-in-Thermographie über mehrere Jahre im Rahmen zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsprojekte fortentwickelt. So wurde beispielsweise in Zusammenarbeit mit den industriellen Partnern J. Wagner, Oerlikon Metco und AkzoNobel der CoatMaster entwickelt, der die Dicke von Beschichtungen misst. Zusätzlich nutzt das ICP die Lock-in-Thermographie, um Hautkrankheiten zu entdecken.



Andreas Bachmann



Mathias Bonmarin



Daniel Fehr



Lorenz Holzer



David Schaltegger



Matthias Schmid



Andreas Witzig

4.1 Skinobi – ein preiswerter Sensor zum Ermitteln des Zustandes und des Alters der Haut

Skinobi ist ein preiswerter Sensor, der den Zustand und das Alter der Haut ermittelt. Er kann von jedermann zuhause genutzt werden, um ihren oder seinen Hautzustand nach einiger Zeit zu verbessern. Der Sensor basiert auf der Messung der Oberflächentemperatur der Haut im Zeitablauf, während diese aktiv gekühlt wird.

Mitarbeiter: Ch. Kirsch, A. Zubiaga, G. Boiger, M. Bonmarin
 Partner: opus néoi GmbH
 Finanzierung: Innosuisse
 Dauer: 2018–2020

Die Haut ist der erste Schutzwall unseres Organismus und spielt deshalb eine sehr wichtige Rolle. Wie jedes andere Organ kann die Haut von einer Vielfalt von Krankheiten betroffen sein. Auch wenn nur sehr wenige von ihnen tödlich sind, können sie für die betroffenen Menschen dramatische psychologische Auswirkungen haben. Zusätzlich reflektiert in unserer modernen Gesellschaft der Zustand und die Jugend unserer Haut unseren Gesundheitszustand, auch spielt sie eine sehr wichtige soziale Rolle. Heute sind Tausende verschiedener Produkte frei erhältlich, die entweder spezielle Hautstörungen behandeln oder lediglich die Haut vor dem Altern und vor externen Aggressionen schützen sollen.

Unser Ziel ist es, jedem Kunden dabei zu helfen, die Wirksamkeit ihrer oder seiner Hautbehandlung oder bevorzugten Tageslotion zu bestimmen. Das Messinstrument wird sich drahtlos mit einem Smartphone oder Tablet verbinden lassen und wird es der Nutzerin oder dem Nutzer ermöglichen, wichtige Hautparameter einfach zu ermitteln. Um das zu leisten, werden wir einen innovativen Sensor einsetzen, der speziell dafür entwickelt wurde, die thermischen Charakteristika menschlicher Haut zu messen. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität oder Dichte sind sehr gute Marker für den Zustand der Haut und sie korrelieren mit den physiologischen Parametern wie der Hydratation oder der Dicke der Epidermis. Bis jetzt sind die wenigen am Markt erhältlichen Geräte entweder ausgebildeten Fachleuten vorbehalten oder sie sind eher *Lifestyle Gadgets* als wissenschaftlich basierte Geräte. Wir wollen diese Lücke schliessen und ein ebenso preiswertes

wie zuverlässiges Gerät für den Hausgebrauch anbieten.

Während im Rahmen eines SATW-Projektes bereits einige Vorarbeiten geleistet wurden, sind noch erhebliche wissenschaftliche und technische Entwicklungen erforderlich, um die Proof-of-Concept-Phase zu erreichen. Ziel dieses Projektes ist es, einen voll funktionsfähigen Prototyp sowohl in Hard- als auch in Software zu entwickeln, der als Demonstrator eingesetzt werden kann. Die technischen Entwicklungen werden in enger Zusammenarbeit mit der ZHAW durchgeführt, während die experimentelle Validierung am Universitätsspital Basel stattfindet. Schliesslich wird eine erste Serie von 100 Geräten von der opus néoi GmbH produziert und an wichtige Meinungsbildner und potenzielle strategische Partner geliefert.

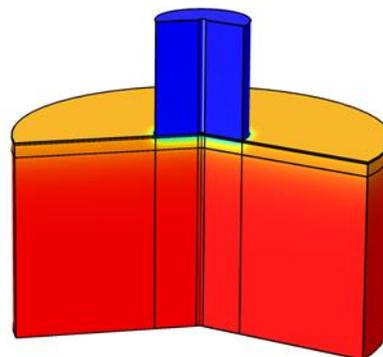


Abb. 1: Computersimulation des Messprozesses. Ein kalter Aluminiumblock wird mit der Hautoberfläche in Kontakt gebracht, während die zeitabhängige Hautoberflächentemperatur mit einem Thermosäulensensor überwacht wird.

4.2 3D-Thermografie für Medizinalanwendungen

Mit Thermografie können lokale Wärme-Anomalien in der Haut detektiert und klassifiziert werden. In diesem Projekt wurde die konventionelle 2D-Thermografie erweitert für 3D-Untersuchungen. Die 3D-Rekonstruktion basiert dann auf einer geometrischen Analyse von 2D-Stereo-Bildpaaren, wobei unterschiedliche Algorithmen implementiert und verglichen wurden. Für die Bild-Akquisition wurde ein Versuchsaufbau erstellt, welcher gleichzeitig Aufnahmen im sichtbaren Spektrum (vis: ca. 380 – 780 nm) als auch im langwelligen Infrarotbereich (IR: ca. 7 – 14 μm) aufzeichnen kann. Die Kombination von vis- und IR-Daten erhöht die Qualität der 3D-Wärmebilder signifikant.

Mitarbeiter: C. Bader, L. Holzer, M. Bonmarin

Partnes: Prof. A. Navarini, Uni Basel

Finanzierung: -

Dauer: 2018–2019

Um 3D-Körperoberflächen rekonstruieren zu können, werden (multiple) 2D-Stereobilder benötigt, welche dasselbe Objekt jeweils aus unterschiedlichen Winkeln erfassen. In diesem Pilotprojekt wurde ein Thermografie-Versuchsaufbau derart ausgelegt, dass unterschiedliche 3D-Rekonstruktionsmethoden mit demselben Setup durchgeführt werden können. Gegenwärtig enthält der Versuchsaufbau zwei RGB-Kameras (Logitech C270) und zwei Longwave-Infrarotkameras (FLIR Lepton 3.5), welche unter einem konstanten Winkel auf einem Schwenkarm fixiert sind. Die Bildakquisition kann über ein beliebiges Drittgerät gesteuert werden (Python-Interpreter). Dank der flexiblen Steuerungssoftware wäre es auch möglich, den Versuchsaufbau mit zusätzlichen Sensoren auszustatten um die Oberflächen von grösseren Körpern vollständig abbilden zu können.

Die 3D-Rekonstruktion unter Verwendung von Matlab, ReCap, Fiji und OpenCV basiert auf der Identifizierung identischer Punkte in Stereo-Bildpaaren. Aufgrund der geometrischen Beziehung können mittels Triangulation die entsprechenden 3D-Koordinaten von markanten Bildpunkten berechnet werden. Aus zahlreichen Punkten wird dann eine sogenannte *point-cloud*, welche in eine polygonale 3D-Oberfläche umgewandelt werden kann (Abbildung 1a). Für herkömmliche vis-Bilder kann diese 3D-Rekonstruktion zuverlässig durchgeführt werden. Verschiedene Algorithmen wie *structure from motion* und *multi view stereo vision* kommen dabei zum Einsatz.

Im Gegensatz dazu stellt die 3D-Rekonstruktion von IR-Wärmebildern wegen der relativ kleinen Zahl an markanten Bildmerkmalen eine grosse Herausforderung dar. Die 3D-Rekonstruktion von Wärmebildern wird deshalb in zwei Teilschritten durchgeführt. In einem ersten Schritt wird eine herkömmliche 3D-Rekonstruktion mit vis-Bilddaten generiert (Abbildung 1a). In einem zweiten Schritt werden die IR-Bilder dann auf die bereits erstellte 3D-Rekonstruktion überlagert (Abbildung 1b).

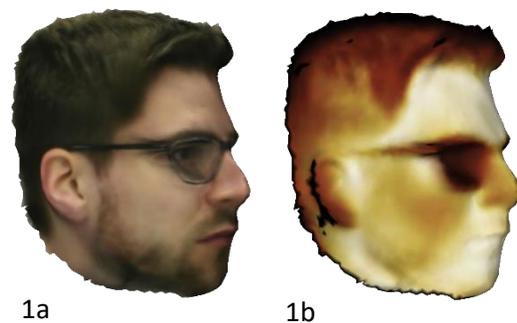


Abbildung A: 3D-Rekonstruktion von vis- (1a) und IR-Bilddaten (1b).

In Zukunft können solche 3D-Wärmebilder verwendet werden für grundlegende Untersuchungen von thermischen Hautanomalien basierend auf modernsten Methoden zur Datenanalyse (Big Data/Künstliche Intelligenz).

4.3 Tragbares Gerät zur Frühdiagnose von Lymphödemen

Mitarbeiter: D. Fehr, A. Bachmann, B. Bonmarin
 Finanzierung: Innosuisse
 Dauer: 2018–2019

Die Wahrscheinlichkeit, bis ans Lebensende ein Lymphödem zu entwickeln, liegt nach einer Brustkrebsbehandlung bei ca. 30 % – und das ist nur einer der möglichen Risikofaktoren. Millionen von Menschen müssen daher mit einem erhöhten Risiko rechnen, an einem Lymphödem zu erkranken. Bei dieser Krankheit ist die Funktion des Lymphsystems dauerhaft gestört, wodurch z. B. die Arme irreversibel anschwellen, wenn nicht rechtzeitig eine geeignete Behandlung eingeleitet wird. Diese verlangsamt die Schwellung oder stoppt sie sogar komplett. Eine frühe Diagnose der Krankheit ist somit zentral. Dennoch gibt es zurzeit keine standardisierte, breit verfügbare Methode, die bei Menschen mit erhöhtem Risiko ein regelmässiges und zuverlässiges Monitoring erlaubt.

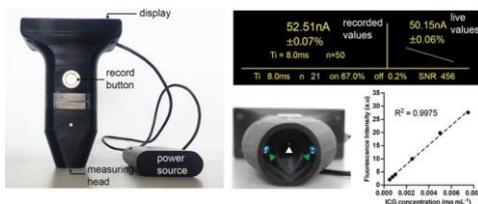


Abb. 1: Links: Autarkes Handgerät mit Batterie. Oben rechts: Display. Mitte: Messöffnung. Unten rechts: Gemessener Wert versus tatsächlicher Markerkonzentration.

In dieser Arbeit wird zusammen mit dem Institut für Pharmazeutische Wissenschaften der ETH Zürich eine geeignete Methode zur Frühdiagnose von Lymphödemen entwickelt. Sie besteht aus einem fluoreszierendem Marker, der in die Haut des Patienten injiziert wird, und aus einem für medizinische Verhältnisse einfachen Messgerät, welches die Abbaurrate des Markers mittels der Fluoreszenzintensität bestimmen kann. Bei einer reduzierten Abbaurrate besteht der Verdacht auf ein sich entwickelndes Lymphödem. Im Idealfall werden die Patienten mit dieser Methode ihr Lymphsystem selbständig und regelmässig überwachen können und im Verdachtsfall frühzeitig einen Spezialisten aufsuchen können. In verschiedenen Vorprojekten wurde ein geeigneter fluoreszierender Marker und ein erstes portables Messgerät mit optischer Sensorik zur Quantifizierung des Fluoreszenzsignals entwickelt. Dazu wurde die bestehende Optik (Abb. 2) um eine autarke Steuerelektronik und Bedienelemente ergänzt und in einem kompakten Gehäuse verbaut (Abb. 1). Mit diesem Handgerät konnte die Methode bereits in verschiedenen Versuchen validiert werden.

Momentan wird das Messgerät überarbeitet und als tragbarer Sensor realisiert, d. h. das bisherige Handgerät schrumpft auf die Grösse einer Armbanduhr. Dazu wird die Optik von Grund auf neu entwickelt, weil die bestehende prinzipbedingt nicht weiter verkleinert werden kann. Erste Versuche sind vielversprechend. Bei vergleichbarer Empfindlichkeit konnte die Optik beträchtlich verkleinert werden. Parallel wird eine passende Smartphone-App implementiert, die neben der Bedienung des Sensors auch eine modellbasierte Messdatenauswertung erlaubt.

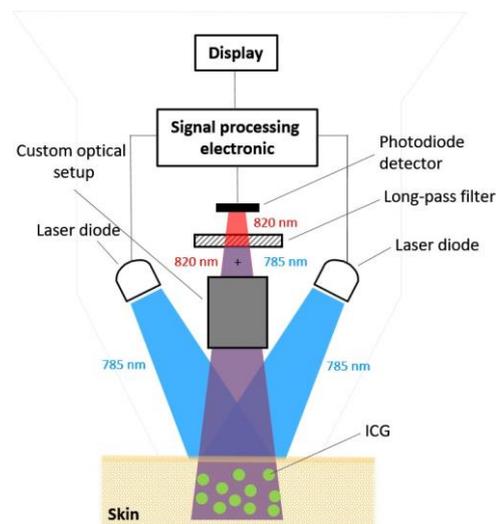


Abb. 2: Optische und elektronische Komponenten des Handgeräts.

Literature:

[1] A. Polomska et al., *Minimally invasive method for the point-of-care quantification of lymphatic vessel function*, JCI Insight, 4(4), 2019.

4.4 DermalR – Ausweitung der Möglichkeiten der Dermatoskopie durch Wärmebildsensoren

Wir wollen die Möglichkeiten der Standard-Epilumineszenz-Mikroskopie dadurch erweitern, dass wir dynamische Wärmebildaufnahmemöglichkeiten hinzufügen. Wenn Ärzte über zusätzliche Informationen über die Temperatur einer Läsion verfügen, wird dies die Differentialdiagnostik zahlreicher Hautkrankheiten deutlich verbessern. Dieses Projekt wird ein voll funktionsfähiges und klinisch erprobtes Gerät schaffen, das marktfähig ist und das FotoFinder-Produktportfolio ergänzen wird.

Mitarbeiter: Ch. Bader, A. Bachmann, M. Bonmarin

Partner: FotoFinder Systems GmbH

Finanzierung: EUROSTARS

Dauer: 2018–2021

Der Inhalt des Projekts ist vertraulich.

4.5 Modellierung von Erdregisterspeichern zur thermischen Analyse

Zur Planung von Wärmepumpen-Heizungssystemen mit Erdreichankopplung wird oft dynamische Simulation eingesetzt. Auf dieser Grundlage werden Variantenentscheide getroffen und Regelparameter optimiert. Die vorliegende Arbeit hilft, komplexe Erdregister adäquat abbilden zu können und der digitalen Planung zugänglich zu machen.

Mitarbeiter: T. Frei, A. Witzig
 Partner: E-Zeit Ingenieure, NM Numerical Modeling GmbH, Vela Solaris AG
 Finanzierung: Masterarbeit
 Dauer: 2018–2019

Wärmepumpen-Heizungssysteme nutzen häufig das Erdreich als Wärmequelle. Neben Erdsonden gibt es auch das Konzept des Erdregisters, wozu auch der im Jahr 2016 patentierte Erdwärmespeicher *E-Tank* zählt. Je nach Grösse und Auslegung sind Erdregisterspeicher geeignet zur saisonalen Speicherung.

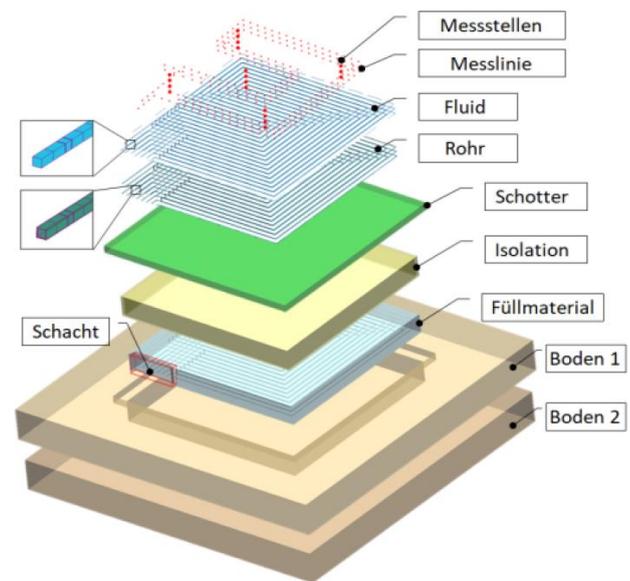
Beim thermisch aktivierten Erdreich handelt es sich um einen Speicher mit sehr grosser Masse und Trägheit. Eine einfache Langzeitberechnung des E-Tanks ist bereits möglich mit dem kommerziellen Planungstool Polysun [1]. Darin werden jedoch die kurzfristigen Wärmetauschereffekte und die detaillierte Geometrie des Erdregisters nicht abgebildet. Um das vorausgesagte Systemverhalten zu verbessern, ist ein dreidimensionales Simulationsmodell auf Basis der Finite-Elemente-Methode erstellt worden. Dabei kommt die am ICP entwickelte Multiphysik Software SESES zum Einsatz. Anhand eines einfachen instationären Versuchsmodells wurden die physikalischen Formeln und Parameter implementiert. Daran konnte getestet werden, wie sich der Einfluss des Berechnungszeitschritts und die Finite-Elemente-Grösse auf das Simulationsergebnis auswirken [2].

An unterschiedlichen Bereichen des Modells sowie in einer Rohrleitung wurden die Temperaturen und Energieströme aufgezeichnet. Anhand der Feldmessdaten einer Versuchsanordnung in Chemnitz konnte das Simulationsmodell kalibriert werden. Es wurde eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten aus dem Jahr 2016 gefunden.

Die gewonnenen Kenntnisse werden in der dynamischen Jahressimulation nicht laufend mitgeführt, da sie in der aktuellen Implementierung noch viel Rechenpower beanspruchen. Das vollständig parametrisierbare Simulationsmodell besteht derzeit aus

33 Millionen Elementen. Ein Lösungsweg für die Reduktion des Rechenaufwands wurde theoretisch aufgezeigt, aber noch nicht umgesetzt.

Der Erfolg dieser Arbeit liegt darin, dass solche grosse Simulationsgebiete abbildbar sind. Das neue Simulationsmodell ist ein hervorragendes Werkzeug für die Weiterentwicklung und Optimierung des E-Tanks und anderer Systeme mit Erdregister.



Figur: E-Tank Erdregisters in Explosionsansicht. Rohrführung und Schichtaufbau des Erdreichs werden für die Simulation detailliert abgebildet.

Referenzen:

- [1] www.polysunsoftware.com
- [2] T. Frei: Modellierung und Simulation eines neuartigen Erdregisterspeichers (E-Tank) zur thermischen Analyse. Masterarbeit ICP-ZHAW, Juli 2018.

4.6 Digitaler Zwilling: Building Information Modeling (BIM) nutzen für Simulation von gebäudeintegrierten Energiesystemen

Mitarbeiter: A. Witzig, D. Schaltegger

Partner: Swisscom Industrial IoT, Meier Tobler AG, BS2 AG, Vela Solaris AG

Finanzierung: Innosuisse

Dauer: 2018–2020

Die Digitalisierung hat die Baubranche erreicht: Building Information Modeling (BIM) bedeutet in einem ersten Schritt die geometrische Erfassung von Bauwerksdaten und bietet in Kombination mit veränderten Planungsabläufen ein grosses Potential für eine umfassende optimierte Planung. Aufgrund der technologischen Möglichkeiten werden ausserdem viele Geräte ans Internet angeschlossen (Internet of Things, IoT). Digitale Pläne wie auch IoT-Logdaten bleiben aber für die energetische Optimierung der Gebäude weitgehend ungenutzt.

Für die Simulation bietet sowohl BIM wie auch IoT grosse Erfolgsaussichten: Neue internationale Standards und offene Schnittstellen erlauben die Verwendung von Geometriedaten als Input für die numerischen Modelle. Messdaten von Sensoren stehen für die Validierung der Berechnungen und für die Kalibrierung von Simulationsparametern zur Verfügung. Letztlich verspricht die Übertragung der in der Simulation ermittelten optimalen Regelung auf das Heizungssystem sowohl Zeitersparnis wie auch eine Reduktion von Unsicherheiten. Der technologische Fortschritt erlaubt die Optimierung von Arbeitsabläufen, wie beispielsweise die extensive Nutzung von Fernwartung für Wärmepumpensysteme.

Am ICP laufen mehrere Projekte, die sich mit der konkreten Umsetzung des digitalen Zwillings im Gebäudebereich befassen. Einerseits werden dabei die numerischen Modelle entwickelt, welche die Heizungs- bzw. Kühlsysteme hinreichend genau abbilden und aufgrund der Einbindung von Messresultaten die Simulationsparameter bestimmt. Andererseits werden organisatorische Herausforderungen adressiert: So wird beobachtet, dass die Steuerung und Regelung von Wärmepumpensystemen in der Praxis oft nicht den ursprünglich geplanten Regelalgorithmen folgen. Aus diesem Grund können Planungswerte für den Energieverbrauch und dem Eigennutzungsgrad der Photovoltaikanlage nicht er-

reicht werden. Zur Lösung können technische Neuerungen beitragen (direkte Programmierung der Regler aus den Planungsdaten [1]) oder eine Anpassung der Abläufe und Geschäftsmodelle [2].

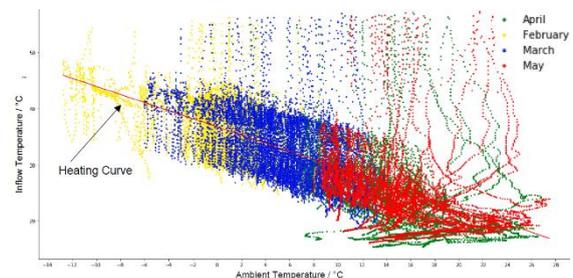


Abb. 1: Figure Caption.

Das übergeordnete Ziel für die Forscher am ICP sowie auch die involvierten Industriepartner ist die energetische Optimierung. Aus den verschärften Energiegesetzen ergeben sich aber auch finanzielle Anreize: Die im Baugesuch versprochene energetische Performance muss durch Messungen im fertiggestellten Gebäude nachgeprüft werden. Abweichungen werden durch Simulationen mit BIM-Daten bereits während der Bauphase erkannt. Damit werden Risiken minimiert und Geld eingespart.

Referenzen:

[1] R. Grosskopf: [Wärmepumpen direkt angesteuert via Simulationssoftware](#). Bachelor Thesis ICP-ZHAW, Juni 2017.

[2] H. Sotnikova: Predictive IoT-maintenance for heat pump systems. Master Thesis ICP-ZHAW, Oktober 2018.

4.7 Messen der thermischen Beschichtungsbeständigkeit von Turbinenschaufeln

Wärmedämmschichten (TBC) schützen Turbinenschaufeln vor Hitze und mechanischer Belastung. Da die Prozessparameter nicht kontrollierbar sind, schwankt die thermische Beschichtungsbeständigkeit während der Herstellung von Turbinenschaufeln. Aktuell wird der Widerstand durch eine sichtbare Inspektion der Bilder von mikroskopischen Querschnitten gemessen. Das ist sehr arbeitsintensiv und verlangt die Zerstörung von Mustern aus der Produktion. Deshalb haben wir einen neuen, schnellen und nicht zerstörenden Messansatz untersucht, der die Impuls-Thermographie einsetzt. Wir zeigten, dass es möglich ist, die thermische Beschichtungsbeständigkeit verlässlich zu messen, wenn die Effusivität des Substrats bekannt ist.

Mitarbeiter: A. Bariska, N. Reinke, S. Hauri
 Partner: Winterthur Instruments AG, Oerlikon Metco AG
 Finanzierung: CTI
 Dauer: 2015–2018

TBC bestehen aus zwei Schichten: Zunächst wird eine Bindschicht (Nickel-Legierung) auf dem Stahlsubstrat aufgebracht, dann wird die funktionelle Deckschicht (mit Yttrium stabilisiertes Zirkonia, YSZ) auf die Bindschicht aufgebracht. Die beiden wichtigsten Faktoren, welche den Grad der Schutzfunktion bestimmen, sind die Porosität und die Dicke der YSZ-Beschichtung. Um die Dämmeigenschaften zweier unterschiedlicher Beschichtungen miteinander vergleichen zu können, müssen diese beiden Parameter quantitativ kombiniert werden. Diese Kombination ist jedoch schwierig, weil der Einfluss der Porosität auf die Dämmeigenschaft auch von der Mikrostruktur der Hohlräume abhängt.

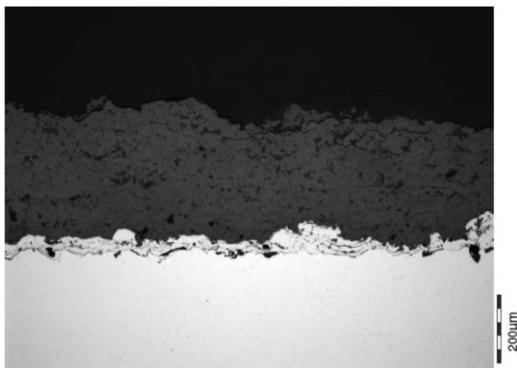


Abb. 1: Poliertes Querschnittsbild einer TBC, bestehend aus seiner Bindschicht (Mitte) und einer Deckschicht (oben) auf einem Stahlsubstrat (unten). Quelle: Oerlikon Metco AG, Wohlen.

Statt nun mikroskopische Querschnittsbilder zur Bestimmung der Porosität und der Dicke zu verwenden, wie in Abb. 1 gezeigt, nutzten wir das Impuls-Thermographie-basierte CoatMaster-Messsystem, um die thermischen Eigenschaften des TBC direkt zu messen. Als einfache Annäherung gehen wir von einer konstanten Heizleistung auf der Aussenseite

und von einer konstanten Kühlleistung auf der Innenseite der Turbine aus. Die Temperaturdifferenz ΔT und der Wärmefluss ϑ durch die Beschichtung sind konstant. Sie stehen in Beziehung miteinander durch den Materialparameter Wärmewiderstand R_{th} , mit der Formel $\vartheta = \Delta T / R_{th}$. Um flächenunabhängige Werte zu erhalten, verwenden wir die Wärmeflussdichte in W/m^2 . Der Wärmewiderstand der Beschichtung ist danach in $(Km^2)/W$ gegeben. Mit dem CoatMaster-Messsystem können wir direkt die thermische Ausbreitungszeit einer Beschichtung τ (Einheit: s) messen. Wenn die thermische Effusivität E (Einheiten: $J/(m^2K\sqrt{s})$) der Beschichtung bekannt ist und die thermische Ausbreitungszeit gemessen wird, kann der Wärmewiderstand der Beschichtung mit $R_{th} = \sqrt{\tau}/\varepsilon$ berechnet werden. In einer Messserie konnten wir zeigen, dass es möglich ist, den Wärmewiderstand der Beschichtung mit einem schnellen und zerstörungsfreien Messprinzip zuverlässig zu bestimmen. Eine Auswahl der Messresultate wird in Tab. 1 gezeigt.

Sample	Average Coat Thickness	Top Coat Porosity (image analysis)	Thermal Coating Resistance (absolute)	Thermal Coating Resistance (relative)
270	160µm			
284	140µm	4%	169 µKm ² /W	75%
285	270µm	4%	225 µKm ² /W	100%
286	328µm	1.9%	-	-
287	150µm	11.3%	221 µKm ² /W	98%
288	228µm	11.1%	317 µKm ² /W	141%
289	356µm	11%	-	-
290	75µm	15%	242 µKm ² /W	108%
291	340µm	17.9%	-	-
292	280µm	15%	576 µKm ² /W	256%

Tab. 1: Beschichtungs-Wärmewiderstand gemessen mit dem Coat-Master-System.

4.8 Technologien zur Viskositätsregelung für die kontrollierte Applikation von Beschichtungsmaterialien

Eine Steuerelektronik zur Auswertung von Viskositätssensoren und die darauf ausgeführten DSP-Algorithmen wurden an eine neuartige Inline-Sensortechnologie angepasst. Danach ist ein Flow-Loop-System entwickelt und aufgebaut worden, um die Inline-Sensoren unter definierten Bedingungen zu testen und eine vollständige Charakterisierung der Sensoren durchzuführen. Erweitert man den Flow-Loop um eine automatisierte Verdünnerdosierung, so erhält man ein vollautomatisches Viskositätsregelsystem, welches eine konstant hohe Beschichtungsqualität gewährleistet und dem Anwender Einsparungen an Material, Anlagen und Arbeitszeit ermöglicht.

Mitarbeiter: D. Fehr, U. Vögeli, A. Bariska, S. Hauri, N. Reinke
 Partner: Rheonics GmbH
 Finanzierung: KTI
 Dauer: 2016–2018

Zur Auswertung der Sensorsignale eines neuartigen Inline-Viskositätsmeters wurde eine Auswerteeinheit auf Basis eines DSP (Digitaler Signalprozessor) entwickelt. Als Ausgangslage diente eine Elektronik mit zugehöriger Software von einem vorgängigen Projekt. Das Analog- Front-End und die Algorithmen wurden an die neuen Inline-Viskositätssensoren angepasst.

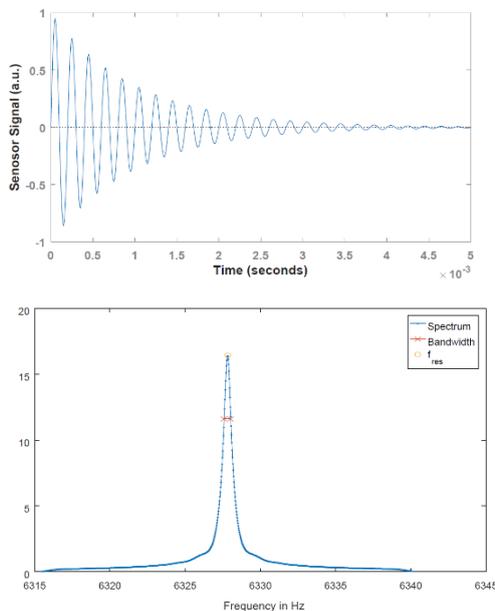


Abbildung 1: Charakteristischer Ausschwingvorgang eines mechanischen Schwingers zur Viskositätsbestimmung (oben) und das zugehörige Spektrum, aus dem durch Bestimmung von Mittenfrequenz und Bandbreite auf die Viskosität des Fluids rückgeschlossen werden kann (unten)

Das zugrundeliegende Messprinzip kann wie folgt beschrieben werden: Die Elektronik versetzt den mit Fluid umspülten mechanischen Resonator in Schwingung. Dabei hängen Resonanzfrequenz und Dämpfung des Schwingers von der Dichte und Vis-

kosität des Fluids ab. Abbildung 1 zeigt einen charakteristischen Ausschwingvorgang, der die Form einer exponentiell abfallenden Schwingung aufweist. Die DSP-Elektronik bestimmt die Resonanzfrequenz und Dämpfung anhand des Spektrums des Ausschwingvorgangs, welches ebenfalls in Abbildung 1 zu sehen ist.

Parallel zur Auswerteelektronik ist auch eine Teststrecke (Flow-Loop) entworfen und realisiert worden (Abbildung 2). Die Strecke ist wie ein typischer Nassbeschichtungsprozess aufgebaut: Förderung von Beschichtungsmaterial und Verdünnern, Mischer, Zirkulation mit dem Inline-Viskositätssensor und einem Abgriff, der die Applikation des Beschichtungsmaterials simuliert. Mit dem Flow-Loop und der oben beschriebenen Auswerteelektronik können die Viskositätssensoren unter typischen Betriebsbedingungen getestet und charakterisiert werden. Weiterhin ermöglicht das System die Entwicklung einer Inline-Viskositätsregelung, bei der Verdünnern automatisiert mit den Beschichtungsmaterialien gemischt werden. Mit dieser Technologie kann eine konstante Viskosität in industriellen Beschichtungsanlagen garantiert werden.

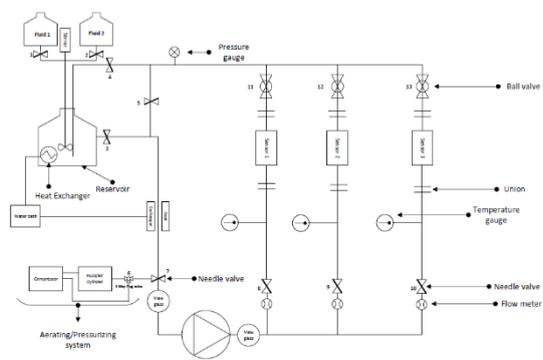


Abbildung 2: Flow-Loop-Testsystem.

5 Lehre

5.1 Gamification in der Lehre

Die zunehmende Digitalisierung ist in vielen Bereichen des Alltags bemerkbar und hat auch den Bereich der Lehre nachhaltig verändert. Eine weitere Zunahme in diesem Bereich ist zu erwarten und wird in der Strategie *Bildung und digitale Transformation* der ZHAW aktiv gefördert.

Als Ersatz oder Ergänzung für klassischen Frontalunterricht haben sich verschiedene Methoden etabliert, etwa die Unterstützung von Vorlesungen mittels digitaler Medien (Videos, Wiki, MOOCs, Klicker, Quizzes etc.) und Lernplattformen wie Moodle, OLAT oder Mahara. Besonders in technischen Fachgebieten ist es üblich, neben der Vorlesung auch noch Übungsstunden abzuhalten, in denen die Studierenden Übungsbeispiele lösen müssen. In diesem Bereich gibt es noch kaum Ansätze, den Präsenzunterricht durch digitale Methoden zu ergänzen und unterstützen.

In einem Pilotprojekt über *digitale Lehrformen* wurde eine Web-Applikation entwickelt, welche die Digitalisierungslücke im Bereich der Übungsstunden schliessen soll. Die Web-Applikation verwendet Elemente, die sich auch in Computerspielen wiederfinden und dort zu einem positiven Erlebnis führen, wie zum Beispiel das Sammeln von Punkten oder besonderen Medaillen.

Ausgangspunkt für die Entwicklung der App war, dass im Physikunterricht ein Grossteil der Übungen im Selbststudium stattfindet und dass man als Dozent kaum Kontrolle über den Lernfortschritt der Studierenden hat. Diese Situation wird durch die zunehmende Digitalisierung der Lehre verstärkt werden. Studierende konsultieren auch häufig die Musterlösung und meinen, die Aufgabe gemeistert zu haben, doch die Erfahrung zeigt, dass die Konzepte der Musterlösungen selten auf andere Problemstellungen übertragen werden können. Auch wirken die oftmals schwierigen Aufgaben demotivierend.

Mit der entwickelten Web-Applikation werden die Übungsaufgaben online verteilt. Es werden Punkte für korrekte Lösungen vergeben und ein Hilfesystem unterstützt das Lösen der Aufgaben, wobei jeder Hinweis Punkte kostet. Durch das Punktesystem erhalten Studierende live Feedback über den persönlichen Lernerfolg und Dozierende über den Lernerfolg der Klasse. Ein zentrales Feature der App ist die Möglichkeit, die Musterlösung zu kommentieren, falls man die Aufgabe nicht lösen konnte. Durch dieses Verschriftlichen findet vertieftes Lernen statt. Dieses Feature ist ein Alleinstellungsmerkmal der App, da eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Musterlösung im Präsenzunterricht praktisch nicht vorkommt.

Ein erster Probelauf während des laufenden Semesters verlief erfolgreich. Erste Rückmeldungen stellen der App ein gutes Zeugnis aus. Eine umfangreiche Evaluation wurde in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Evaluation der PHZH entworfen und die Durchführung ist für das Frühjahrssemester 2019 geplant.

Die von uns entwickelte Web-Applikation ist ein neuartiges und einzigartiges Tool in der E-Didaktik-Landschaft und bietet einen echten Mehrwert für digitale Lehrformen. Die App lässt sich in vielen Fächern einsetzen, insbesondere in Physik und Statistik mit R, sowie in allen Fächern in dem die Übungsaufgaben ein numerisches Resultat liefern. Anpassungen an die Anforderungen für Mathematik sind geplant und sollen in einer laufenden Bachelorarbeit implementiert werden.

Aufbau der Web-App

Abbildung 1 zeigt einen Screenshot der Web-App, wie sie in dem Semesterwochen 13 und 14 im Fach PHSVS1 eingesetzt wurde. Diese Seite erscheint nach dem Einloggen eines Studierenden und zeigt den sogenannten *Live Lernfortschritt* als Key Performance Indicator. In den Boxen oben sieht man die bereits erzielten *Punkte* (in diesem Fall 7 Punkte); die *Medaillen* und *Kudos* (= a score of honorary degrees) sind weitere Features, die noch nicht implementiert sind. Links befindet sich ein Auswahlmenü, welches zu den Aufgaben der einzelnen Wochen führt.

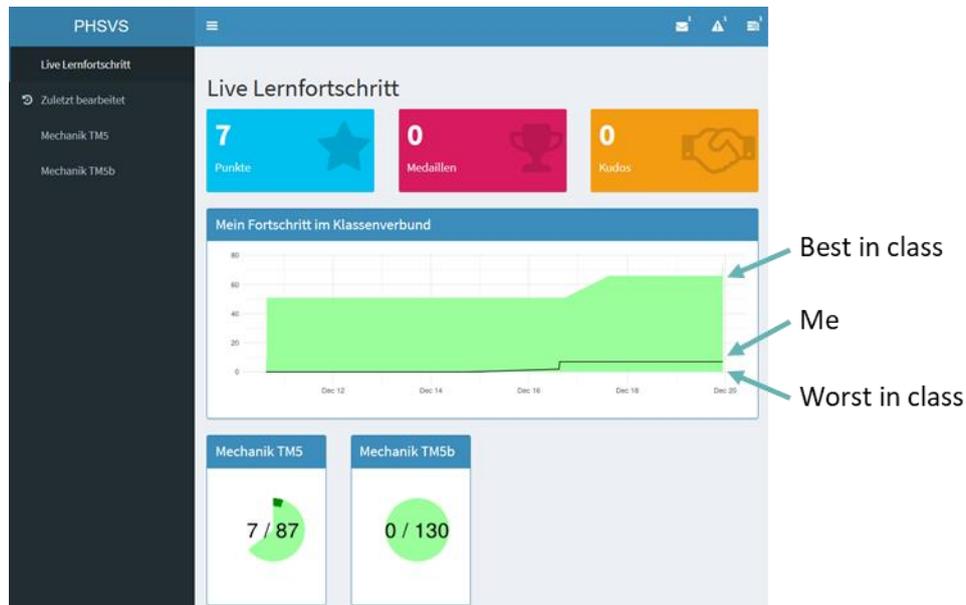


Abbildung 1 Screenshot der Seite "Live Lernerfolg". Neben den bereits erzielten Punkten sieht man den eigenen Lernerfolg im Vergleich zu seinen Kommilitonen sowie den Lernerfolg und die noch offenen Aufgaben für jede Woche.

Zentral ist auch die Darstellung der eigenen Punkte verglichen mit den Punkten der Mitstudierenden. Dies erzeugt einen gewissen Gruppendruck, der motivierend wirken soll. Durch die Verschleierung der einzelnen Identitäten sollte der Gruppendruck nicht zu gross werden.

Für jede Woche sieht man in dieser Darstellung auch die bereits erreichten Punkte sowie die Punkte, die man noch erzielen kann. Diese übersichtliche Darstellung sollte ebenfalls einen gewissen Leidensdruck erzeugen, da man jederzeit sieht, wie viel Arbeit noch bis zum Ende der Woche zu erledigen ist. Es ist aber auch eine Belohnung, wenn man sieht, dass man eine Woche vollständig bearbeitet hat.

Abbildung 2 zeigt die Wochenansicht für das Thema *Mechanik TM5*. Es sind vier Aufgaben zu lösen und zu jeder Aufgabe wird der Punktestand übersichtlich dargestellt. In der ersten Aufgabe wurden bereits 5 Punkte erzielt (dunkelgrüner Balken). In der zweiten Aufgabe wurde ein Hinweis benutzt, wodurch die Zahl der zu erreichenden Punkte gesunken ist (fehlendes Tortenstück in Aufgabe 2).

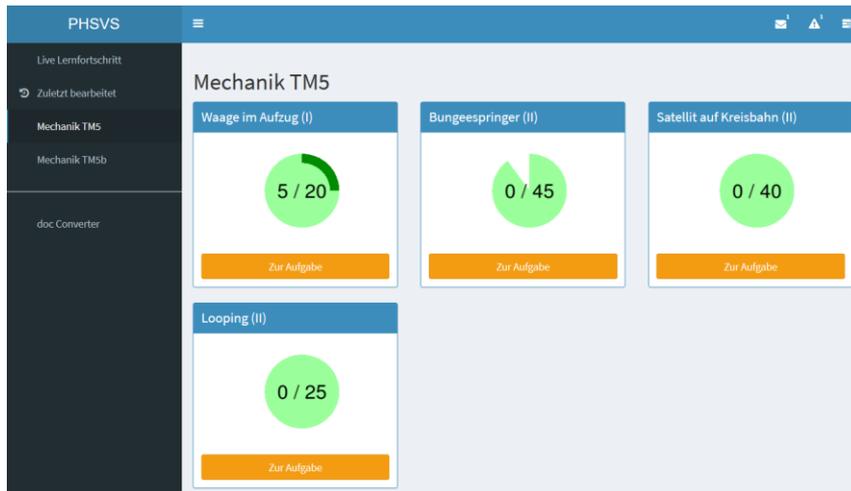


Abbildung 2 Wochenansicht mit den einzelnen Übungsaufgaben. Für jede Übung wird deutlich, wie viele Punkte man bereits erreicht hat (dunkelgrüner Balken), wie viele Punkte noch erzielt werden können (hellgrüne Fläche) und wie viele Punkte man durch die Benutzung von Hinweisen vergeben hat (fehlendes Tortenstück in Aufgabe Bungeespringer).

Abbildung 3 zeigt die Ansicht einer Übungsaufgabe, wobei der einleitende Text auch ein Bild oder Video beinhalten kann. Eine Übung kann beliebig viele Teilaufgaben (a), b), c), ... beinhalten. Jede Teilaufgabe besitzt ihren eigenen Text sowie ein Feld zur Übermittlung der eigenen Lösung. Gibt der Nutzer oder die Nutzerin die korrekte Lösung ein, werden die Punkte gutgeschrieben, in diesem Fall 30 Punkte.

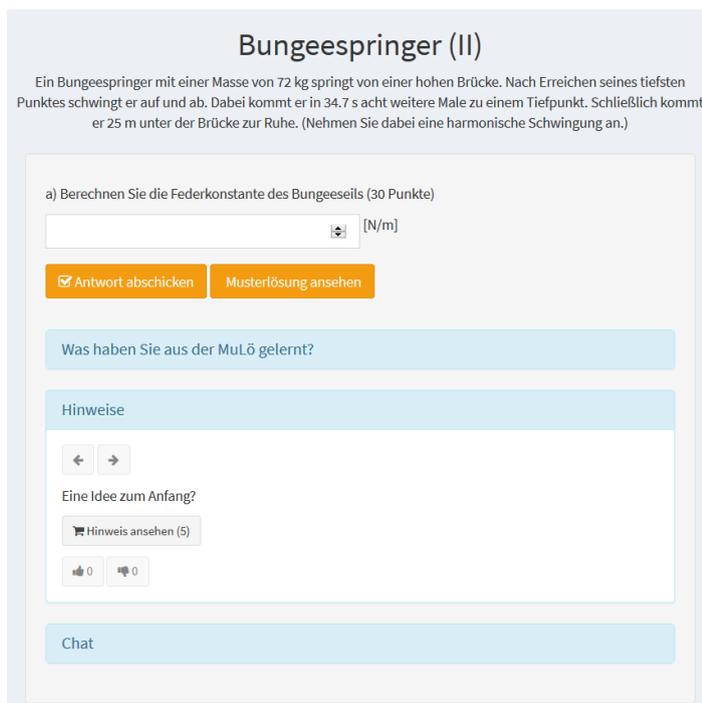


Abbildung 3: Ansicht einer Übungsaufgabe, wobei der einleitende Text auch ein Bild oder ein Video beinhalten kann. Eine Übung kann aus beliebig vielen Teilaufgaben (a), b), ... bestehen. Jede Teilaufgabe hat ihren eigenen Text sowie ein Feld zur Übermittlung der eigenen Lösung. Wird die Musterlösung angesehen, wird ein Feld zur Übermittlung der Reflektion über die Musterlösung eingeblendet. Sind für die Aufgabe Hinweise definiert, werden sie angezeigt. Ein Chat innerhalb der Klasse ist auch für jede Teilaufgabe verfügbar.

Wurden für diese Teilaufgabe Hinweise definiert, werden diese angezeigt. Jeder Hinweis ist mit Kosten verbunden, in diesem Beispiel 5 Punkte. Die Hinweise sind gratis, nachdem die Aufgabe korrekt gelöst oder die Musterlösung gekauft wurde. Die Hinweise können von Studierenden auch positiv oder negativ bewertet werden und helfen der Lehrperson, die Hinweise zu verbessern.

Für jede Teilaufgabe ist ein Chat verfügbar, in dem sich die Studierenden gegenseitig helfen können. Für hilfreiche Antworten im Chat sollen Kudos (= a score of honorary degrees) vergeben werden; derzeit ist dieses Feature noch nicht implementiert.

Kann die Lösung trotz Hinweisen und Chat nicht gelöst werden, kann man sich die Musterlösung ansehen. Dadurch erhält man natürlich keine weiteren Punkte mehr für diese Aufgabe, es sein denn, man beschreibt detailliert was man aus der Musterlösung gelernt hat. Die Lehrperson liest den Text und kann dafür Punkte vergeben oder Fehler in der Reflexion der Musterlösung zurückmelden. Diese vertiefte Reflexion findet im Präsenzunterricht praktisch nicht statt und ist ein Alleinstellungsmerkmal der App.

Der Mechanismus zur Reflexion über die Musterlösung verspricht eine wesentliche Steigerung des Lernerfolgs. Durch das Verschriftlichen fasst man oft lose Gedanken in konkrete Worte und da die Lehrperson die Reflexion liest, können Fehlkonzepte erkannt und ausgebessert werden.

Neben dem soeben beschriebenen Fragetypus, bei dem Teilaufgaben gestellt werden und ein numerisches Resultat abgefragt wird, stehen weitere Fragetypen zur Verfügung. So gibt es beispielsweise Multiple-Choice-Fragen, Freitextfragen – die derzeit nicht automatisiert überprüfbar sind – sowie komplexe Fragetypen, bei denen die Studierenden R-Code eingeben und ausführen können. Der R-Code wird automatisiert überprüft und insbesondere im Fach Statistik eingesetzt. Nachdem die Web-App, basierend auf einem bestehenden Projekt (tguishiny, entwickelt von G. De Cilia, B. Meindl, M. Templ), selbst programmiert wurde, lässt sich die App auch leicht auf andere Fragetypen erweitern, um den jeweiligen Wünschen und Ansprüchen gerecht zu werden.

Fazit

Aus der bisherigen Arbeit mit der Web-Applikation bin ich zu der Überzeugung gelangt, dass sich die Web-App für meinen Unterricht bewähren wird, d. h. die Studierenden einerseits dazu ermuntert, mehr Aufgaben zu lösen und andererseits wird sie vertieftes Lernen ermöglichen. Auch im Kollegium stösst die App auf breites Interesse.

Kurt Pernstich, ICP

5.2 Seamless Learning: Projektcluster und Leitung des IBH-Labs

Im Rahmen des Hochschulverbunds Internationale Bodensee-Hochschule IBH werden seit 2016 sogenannte Labs angeboten. Dies sind in sich vernetzte Projekte, die eine inhaltliche Verknüpfung haben und in einem grösseren themenspezifischen Forschungskonsortium durchgeführt werden. Das ICP leitet gemeinsam mit dem Zentrum für Innovative Didaktik (ZID) der ZHAW School of Management and Law das *Seamless Learning Lab*. Das auf vier Jahre angelegte Projekt umfasst die Erarbeitung, Implementierung und Evaluation eines Seamless-Learning-Konzepts in verschiedenen Disziplinen mit Hochschul- und Industriepartnern.



Abbildung 1: Gruppenfoto beim internen Jahrestreffen des Seamless Learning Labs.

Folgende Partner gehören zum Projektkonsortium:

- ZHAW mit den Instituten ICP und IAMP aus der School of Engineering, ZID aus der School of Management and Law und LCC aus der Angewandten Linguistik
- HTWG Konstanz mit den Fakultäten Informatik und Life Science sowie dem Fachbereich Gesundheitsinformatik
- Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Fakultät für Life Sciences
- FHS St. Gallen, Institut für Modellbildung und Simulation
- Universität St. Gallen, Institut für Wirtschaftspädagogik
- Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB), Institut für Produktionsmesstechnik, Werkstoffe und Optik
- Duale Hochschule Baden-Württemberg, Ravensburg
- Universität Konstanz, Referat Lehre, Schreibzentrum
- Universität Liechtenstein, Fachstelle Didaktik und angewandte Linguistik
- Pädagogische Hochschule Vorarlberg, Fachdidaktik Naturwissenschaften

Gemeinsam werden Konzepte für grenz- und kontextüberschreitendes Lehren und Lernen erarbeitet. Dies geschieht vor dem Hintergrund des technologischen Fortschritts, der neue Anforderungen an Lehr- und Lernszenarien stellt. Es werden regelmässig Veranstaltungen durchgeführt, in denen Zwischenresultate präsentiert werden und die weitergehende Vernetzung gepflegt wird. Im vergangenen Jahr wurde in Winterthur die Seamless Learning Tagung 2018 durchgeführt und derzeit laufen die Vorbereitungen für den *Tag der Lehre* geplant mit dem Thema *Flexibles Lernen an Hochschulen gestalten*.

Nutzung moderner Technologien

Lernen und Lehren befindet sich in einem tiefgreifenden Wandel. Lernende brauchen nicht viel mehr als ein mobiles Endgerät mit Internetzugang sowie ein Blatt und einen Stift, um überall und zu jedem Zeitpunkt zu lernen. Lernressourcen sind allgegenwärtig verfügbar (z. B. als OERs¹, MOOCs²). Computergestütztes gemeinsames Lernen ist einfacher denn je (European Commission 2012: 9). Die Grenzen zwischen formalem und informellem Lernen verwischen zusehends. Die Technologien, die diesen Wandel befeuern, entwickeln sich rasant weiter. Die Anforderungen des lebenslangen Lernens stellen Herausforderungen für die Gestaltung adäquater technologieunterstützter Lehr-/Lernszenarien.

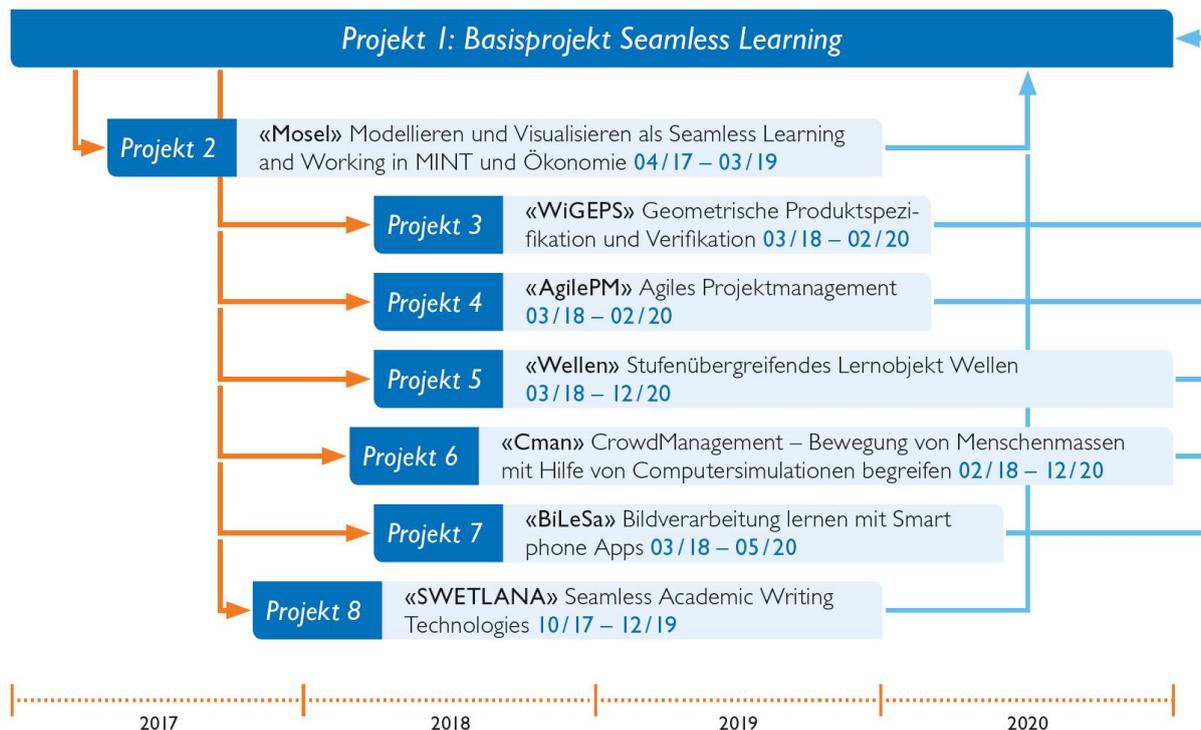


Abbildung 2: Projektübersicht. Das ICP ist im übergeordneten Steuerungsausschuss sowie in den Projekten 2, 5, 6 und 7 aktiv beteiligt.

Angepasste didaktische Konzepte

Aus Theorie und Praxis ist bekannt, dass zur Verfügung gestellte Technologie an sich noch wenig bewirkt. Sowohl Lehrende als Lernende müssen lernen, damit umzugehen, d. h. müssen befähigt werden. Ebenso bedarf es eines schlüssigen (fach-)didaktischen Konzepts. Ein weiteres, oftmals noch größeres Hindernis in der Karriere als (lebenslange) Lernende im 21. Jahrhundert stellen immer noch vorhandene Brüche in der Lernbiografie dar – exemplarisch von der Schule zur Ausbildung bzw. Hochschule

und im Beruf mit entsprechender Weiterbildung. Der Transfer und die Übergänge gelingen eingeschränkt.

Das Konzept des *Seamless Learning* bietet einen Rahmen, die skizzierten technologischen und didaktischen Herausforderungen zu adressieren und ein lebenslanges, nahtloses Lernen über Bildungskontexte hinweg zu ermöglichen. Ziel dieses Labs ist daher, Seamless Learning für verschiedene Bereiche (in Einzelprojekten zu den Bereichen MINT, Sozialwissenschaften und zu Schlüsselqualifikationen, wie beispielsweise Projektmanagement) zu konzeptualisieren, entwickeln, implementieren, evaluieren und optimieren. Während einzelne Dimensionen von Nahtstellen für Seamless Learning bereits identifiziert sind, fehlt es bisher vor allem an erfolgreichen Piloten in verschiedenen Feldern. Das IBH Lab ermöglicht gerade dies und zwar grenzüberschreitend in Bezug auf Bildungskontexte, Bildungsphasen und Bildungsstufen und dies zu den verschiedenen Anwendungsfeldern in der Praxis.

Matthias Schmid, ICP

<https://www.seamless-learning.eu>



Anhang

A.1 Studierendenprojekte

D. BAUMANN, F. HOERNLIMANN, *Erhöhung der Energieeffizienz eines neuartigen Holzvergasungssystems für Eukalyptus bei Melides, Portugal*. Betreuer: G. Boiger, A. Fassbind, Firmenpartner: Stiftung Alberta Nova, Projektarbeit Systemtechnik.

J. BAUMGARTNER, A. MORGADO, *Smartwatch for optical detection of impaired lymphatic vessel function*. Betreuer: M. Bonmarin, N. Reinke, Firmenpartner: Institute of Pharmaceutical Sciences at ETH Zurich, Bachelorarbeit Systemtechnik.

D. BEE, J. GIGER, *A new hand-held imaging device to investigate the thermal properties of the human skin*. Betreuer: G. Boiger, M. Bonmarin, Firmenpartner: Dermolockin GmbH, Projektarbeit Systemtechnik.

N. BOATENG, M. FLÜELER, *Android-Based Medical Image Processing*. Betreuer: M. Löser, M. Bonmarin, Firmenpartner: Dermolockin GmbH, Bachelorarbeit Electrotechnik.

C. BRÄNDLE, A. SCHÖNENBERGER, *Temperaturüberwachung an Blattoberflächen von Pflanzkulturen durch Infrarotdetektoren*. Betreuer: T. Hocker, T. Bergmann, Projektpartner: Meyer Orchideen AG, Projektarbeit Maschinentechnik.

Y. CORNAZ, *Weiterentwicklung eines neuartigen Holzvergasungssystems in Grandola (Portugal) zur Vergasung des lokalen Eukalyptus*. Betreuer: G. Boiger, A. Fassbind, Firmenpartner: Stiftung Alberta Nova, Bachelorarbeit Maschinentechnik.

S. EHRAT, *Theoretische und experimentelle Untersuchungen von Abkühlprozessen im sub-kW Bereich*. Betreuer: T. Hocker, Projektpartner: Wöhner AG, Vertiefungsarbeit Masterstudiengang.

A. FRIEDRICH, M. LAURIA, *Development and characterization of 3D skin tissue models with optical methods*. Betreuer: M. Bonmarin, M. Jazbinsek, Firmenpartner: Rainbow Photonics, Bachelorarbeit Systemtechnik.

J. GIANOTTI, *CFD basierte Optimierung eines Oel-Tanks*. Betreuer: G. Boiger, Firmenpartner: Regloplas AG, Bachelorarbeit Maschinentechnik.

R. HALDEMANN, F. HEUBERGER, *Erhöhung der Energieeffizienz eines Holzvergasungssystems in Portugal, durch thermo-dynamische 1D Modellierung*. Betreuer: G. Boiger, Firmenpartner: Stiftung Alberta Nova, Bachelorarbeit Maschinentechnik.

S. HELFENSTEIN, S. SATKUNARAJA, *Numerical thermal model of the human skin*. Betreuer: M. Bonmarin, G. Boiger, Firmenpartner: Dermolockin GmbH, Bachelorarbeit IT.

I. HERZIG, F. SCHOLPP, *Simulation und Experimentelle Validierung von Elektro-Statistischen Beschichtungsprozessen*. Betreuer: G. Boiger, Firmenpartner: Wagner International AG, Projektarbeit Systemtechnik.

C. HOCH, *Entwicklung und Prototypbau eines neuartigen Konservierungsverfahrens für Fluide*. Betreuer: G. Boiger, Bachelorarbeit Maschinentechnik.

F. JOHN, *Optimierung des Kristallisationsverhaltens von Schokoladenprodukten durch eine geeignete Kühlmethode*. Betreuer: T. Hocker, Projektpartner: P. Abegglen, H. U. Vollenweider, Bachelorarbeit Maschinentechnik.

P. KHODADUST, *Neuartige Kombination von CFD und Machine Learning Technologie*. Betreuer: G. Boiger, Bachelorarbeit IT.

S. LANDOLT, *Application of Novel Machine Learning Software to Predict Powder Coating Phenomena*. Betreuer: G. Boiger, Bachelorarbeit IT.

D. MEIER, *Modellierung von Uj-Kennlinien für Festoxidbrennstoffzellen unter Berücksichtigung der Brenngasverweilzeit*. Betreuer: T. Hocker, Projektpartner: Hexis AG, Masterarbeit Masterstudiengang.

G. QUADRI, A. BACHMANN, *A new hand-held imaging device to investigate the thermal properties of the human skin*. Betreuer: M. Bonmarin, M. Löser, Firmenpartner: Dermolockin GmbH, Bachelorarbeit Systemtechnik.

L. RUCKSTUHL, *Analysis of the calibration procedure of the Medyria velocity sensor based on thermo-fluidic CFD-models*. Betreuer: T. Hocker, Projektpartner: Medyria AG, Vertiefungsarbeit Masterstudiengang.

S. SPIRIG, *Untersuchung der optimalen Platzierung von Temperatursensoren zur akkuraten Oberflächen-temperaturmessung*. Betreuer: T. Hocker, Vertiefungsarbeit Masterstudiengang.

J. STOLL, F. ZIMMERLI, *Weiterentwicklung des thermischen Managements einer neuartigen Holzvergasungsanlage*. Betreuer: G. Boiger, Projektarbeit Energie- und Umwelttechnik.

A.2 Wissenschaftliche Publikationen

S. ALTAZIN, C. KIRSCH, E. KNAPP, A. STOUS, B. RUHSTALLER, *Refined drift-diffusion model for the simulation of charge transport across layer interfaces in organic semiconductor devices*. J. of Appl. Phys. 124 (13), 135501, 2018.

S. ALTAZIN, L. STEPANOVA, J. WERNER, B. NIESEN, C. BALLIF, B. RUHSTALLER, *Design of perovskite/crystalline-silicon monolithic tandem solar cells*. Optics express 26 (10), A579-A590, 2018.

F. ANZENGRUBER, F. ALOITAIBI, A. GHOSH, L. KAUFMANN, B. MEIER, L. FRENCH, M. BONMARIN, A. NAVARINI, *Thermography: High sensitivity and specificity diagnosing contact dermatitis in patch testing*. Allergy International, in press (2018).

D. BRUNNER, H. KHAWAJA, M. MOATAMEDI, G. BOIGER, *CFD modelling of pressure and shear rate in torsionally vibrating structures using ANSYS CFX and COMSOL multiphysics*. Int. Journal of Multiphysics, 12 (4), 349-358, 2018.

D. BURNAT, G. NURK, L. HOLZER, M. KOPECKI, A. HEEL, *Lanthanum doped strontium titanate-ceria anodes: deconvolution of impedance spectra and relationship with composition and microstructure*. J. Power Sources. 385 (2018) 62–75. doi:10.1016/j.jpowsour.2018.03.024.

L. CAPONE, P. MARMET, L. HOLZER, J. DUJC, J. O. SCHUMACHER, A. LAMIBRAC, F. N. BUECHI, J. BECKER, *An ensemble Monte Carlo simulation study of water distribution in porous gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells*. ASME Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 15 (2018) 031005 <https://doi.org/10.1115/1.4038627>.

P. CENDULA, L. STEIER, P. LOSIO, M. GRÄTZEL, J. O. SCHUMACHER, *Analysis of optical losses in a photoelectrochemical cell : a tool for precise absorptance estimation*. Advanced Functional Materials. 28(1), pp. 1702768, 2018. Available from: <https://doi.org/10.1002/adfm.201702768>.

M. DIETHELM, L. PENNINGCK, S. ALTAZIN, R. HIESTAND, C. KIRSCH, B. RUHSTALLER, *Quantitative analysis of pixel crosstalk in AMOLED displays*. J. of Information Display, 1-9, 2018.

- J. Dujc, A. Forner-Cuenca, P. Marmet, M. Cochet, R. Vetter, J. O. Schumacher, P. Boillat, *Modelling the effects of using gas diffusion layers with patterned wettability for advanced water management in proton exchange membrane fuel cells*. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage 15(2), 2018. Available from: <https://doi.org/10.1115/1.4038626>.
- D. FLUHR, S. ZÜFLE, B. MUHSIN, R. ÖTTKING, M. SEELAND, R. ROESCH, U. S. SCHUBERT, B. RUHSTALLER, S. KRISCHOK, H. HOPPE, *Aluminum electrode insulation dynamics via interface oxidation by reactant diffusion in organic layers*. physica status solidi (a) 125, 23, 1800474, 2018.
- S. JENATSCH, S. ALTAZIN, P.-A. WILL, M. NEUKOM, E. KNAPP, S. ZÜFLE, S. LENK, S. REINEKE, B. RUHSTALLER, *Quantitative analysis of charge transport in intrinsic and doped organic semiconductors combining steady-state and frequency-domain data*. J. App. Phys. 124, 10, 105501, (2018)
- S. JENATSCH, M. REGNAT, R. HANY, M. DIETHELM, F. A. NÜESCH, B. RUHSTALLER, *Time-dependent pin structure and emission zone in sandwich-type light-emitting electrochemical cells*. ACS Photonics, 2018.
- C. U. JEONG, B. J. KANG, S. H. LEE, S. C. LEE, W. T. KIM, M. JAZBINSEK, W. YOON, H. YUN, D. KIM, F. ROTERMUND, O. P. KWON, *Yellow-Colored Electro-Optic Crystals as Intense Terahertz Wave Sources*. Advanced Functional Materials 28, 1801143, 2018.
- B. J. KANG, S. H. LEE, W. T. KIM, S. C. LEE, K. LEE, G. BENACCHIO, G. MONTEMEZZANI, M. JAZBINSEK, O. P. KWON, F. ROTERMUND, *New Class of Efficient Terahertz Generators: Effective Terahertz Spectral Filling by Complementary Tandem Configuration of Nonlinear Organic Crystals*. Advanced Functional Materials 28, 1707195, 2018.
- L. M. KELLER, L. HOLZER, *Image-Based Upscaling of Permeability in Opalinus Clay*. J. Geophys. Res. Solid Earth. 123 (2018) 285–295. doi:10.1002/2017JB014717.
- S. C. LEE, B. J. KANG, J. A. LEE, S. H. LEE, M. JAZBINSEK, W. YOON, H. YUN, F. ROTERMUND, O. P. KWON, *Single Crystals Based on Hydrogen-Bonding Mediated Cation-Anion Assembly with Extremely Large Optical Nonlinearity and Their Application for Intense THz Wave Generation*. Advanced Optical Materials 6, 1701258, 2018.
- S. J. LEE, B. J. KANG, M. H. SHIN, S. C. LEE, S. H. LEE, M. JAZBINSEK, H. YUN, D. KIM, F. ROTERMUND, O. P. KWON, *Efficient Optical-to-THz Conversion Organic Crystals with Simultaneous Electron Withdrawing and Donating Halogen Substituents*. Advanced Optical Materials 6, 1700930, 2018.
- C. MEIER, D. MEIER, F. VANDERCROYSE, T. HOCKER, *Lagrangian model using CFD flow data to predict the current-voltage characteristics of a solid oxide fuel cell repeat unit*. The International Journal of Multiphysics, 12, 393–411, 2018.
- M. NEUKOM, S. ZÜFLE, S. JENATSCH, B. RUHSTALLER, *Opto-electronic characterization of third-generation solar cells*. Science and technology of advanced materials 19 (1), 291-316, 2018.
- M. NEUMANN, O. FURAT, D. HLUSHKOU, U. TALLAREK, L. HOLZER, V. Schmidt, *On microstructure-property relationships derived by virtual materials testing with an emphasis on effective conductivity*. 2018, Sim. Sci./Commun. Comput. Inf. Sci. (CCIS), Springer. 145–158. doi:10.1007/978-3-319-96271-9_9.
- D. PENNER, L. HOLZER, *Characterization and modelling of structure and transport properties of porous ceramics*. cfi Ceramic Forum International, 95 (*) E27-E32, doi: 10.21256/zhaw-3574.
- L. PENNING, M. DIETHELM, S. ALTAZIN, R. HIESTAND, C. KIRSCH, B. RUHSTALLER, *Modelling crosstalk through common semiconductor layers in AMOLED displays*. J. of the Society of Information Display 671, 2018.
- M. PRESTAT, J. SOARES COSTA, B. LESCOPEL, S. RIOUAL, L. HOLZER and D. THIERRY, *Cathodic Corrosion of Zinc under Potentiostatic Conditions in NaCl Solutions*. ChemElectroChem, 5, 1203-1211, doi: 10.1002/celec.201701325.
- U. PUC, A. ABINA, A. JEGLIC, A. ZIDANSEK, I. KASALYNAS, R. VENCKEVICIUS, G. VALUSIS, *Spectroscopic analysis of melatonin in the terahertz frequency range*. Sensors 18, 4098, 2018.

M. REGNAT, K. P. PERNSTICH, S. ZÜFLE, B. RUHSTALLER, *Analysis of the bias-dependent split emission zone in phosphorescent OLEDs*. ACS applied materials & interfaces 10 (37), 31552-31559, 2018.

A. ROVERE, Y. G. JEONG, R. PICCOLI, S. H. LEE, S. C. LEE, O. P. KWON, M. JAZBINSEK, R. MORANDOTTI, L. RAZZARI, *Generation of high-field terahertz pulses in an HMQ-TMS organic crystal pumped by an ytterbium laser at 1030 nm*. Opt. Express 26, 2509-2516, 2018.

M. H. SHIN, S. H. LEE, B. J. KANG, M. JAZBINSEK, W. YOON, H. YUN, F. ROTERMUND, O. P. KWON, *Organic Three-Component Single Crystals with Pseudo-Isomorphic CocrySTALLIZATION for Nonlinear Optics and THz Photonics*. Advanced Functional Materials 28, 1805257, 2018.

B. SIYAHHAN, M. BOLDRINI, S. HAURI, N. REINKE, G. BOIGER, *Procedure for experimental data assessment for numerical solver validation in the context of model based prediction of powder coating patterns*. Int. Journal of Multiphysics, 12 (4), 373--292, 2018.

L. WANG, S. JENATSCH, B. RUHSTALLER, C. HINDERLING, D. GESEVIČIUS, R. HANY, F. NÜESCH, *Organic Salt Semiconductor with High Photoconductivity and Long Carrier Lifetime*. Adv. Func. Materials 28, 16, 1705724, 2018.

A.3 Buchkapitel

S. ALTAZIN, L. PENNING, B. RUHSTALLER, *OLED Outcoupling technologies: concepts, simulation, and implementation*. Handbook of Organic Light-Emitting Diodes, Springer Japan, 2018.

A.4 Zeitungsartikel

D. NEESER, G. BOIGER, *Tüftler macht Strom aus Holz*. In: *Der Landbote*, August 2018.

A.5 Konferenzen und Workshops

S. ALTAZIN, T. BEIERLEIN, M. DIETHELM, R. FERRINI, R. HIESTAND, C. KIRSCH, T. OFFERMANS, L. PENNING, M. REGNAT, B. RUHSTALLER, *Electrothermal simulation of large-area semiconductor devices*. International Conference on Simulation of Organic Electronics and Photovoltaics (SimOEP 2018), Winterthur, Switzerland.

S. ALTAZIN, C. KIRSCH, E. KNAPP, A. STOUS, B. RUHSTALLER, *Refined drift-diffusion model for the simulation of charge transport across layer interfaces in organic semiconductor devices*. Applied Mathematics and Simulation for Semiconductors (AMaSiS 2018), Berlin, Germany.

G. BOIGER, *Eliminating anomalies of CFD model results of the powder coating process by refining aerodynamic flow-particle interaction and by introducing a dynamic particle charging model*. 3rd International Conference on Fluid Dynamics & Aerodynamics, Berlin, 2018.

G. BOIGER, B. SIYAHHAN, M. BOLDRINI, *Enhancing the understanding of complex phenomena in powder coating, by applying Eulerian-Lagrangian simulation methodology*. 13th International Conference of Multiphysics, Krakow, 2018.

D. BRUNNER, K. HAEUSELER, S. KUMAR, H. KHAWAJA, M. MOATAMEDI, G. BOIGER, *Impact of fouling on mechanical resonator-based viscosity sensors: comparison of experiments and numerical models*. 13th International Conference of Multiphysics, Krakow, 2018.

- D. FEHR, *Early diagnostics of lymphedema using a near-infrared fluorescent marker and custom portable detection device*. Swiss Society for Biomedical Engineering Annual Meeting, Biel, 2018.
- E. KNAPP, *Physical model for inductive loop and negative capacitance in perovskite solar cells*. Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference (AP-HOPV), Kitakyushu, Japan, January 29, 2018.
- E. KNAPP, *Modeling negative capacitance and inductive loop in perovskite solar cells*. Intl. Conference on Simulation of Organic Electronics and Photovoltaics (SimOEP'18), Winterthur, Switzerland, Sept 4-6, 2018.
- E. KNAPP, *Physical model for inductive loop and negative capacitance in perovskite solar cells*. Intl. Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (PSCO), Lausanne, Switzerland, September 30, 2018.
- M. NEUKOM, *Opto-Electronic Characterization of Third Generation Solar Cells*. Intl. Summer School on Nanosciences & Nanotechnologies (ISSON), Thessaloniki, Greece, June 30, 2018.
- J. PIOTROWSKI, A. HÄFFELIN, R. VETTER, J. O. Schumacher, *Analysis and extension of a PEMFC model*, 15th Symposium on Modeling and Validation of Electrochemical Energy Devices (ModVal 2018), Aarau, Switzerland, April 12-13, 2018. Available from: <https://doi.org/10.21256/zhaw-3599>.
- U. PUC, T. BACH, M. KRAJEWSKI, C. MEDRANO, M. JAZBINSEK, *Ultrabroadband terahertz time domain spectroscopy based on organic crystals*. 8th International Workshop on Terahertz Technology and Applications, Kaiserslautern, Germany, March 20-21, 2018.
- B. RUHSTALLER, *Modeling Pixel Crosstalk through Common Semiconducting Layers in AMOLED Displays*. DFF Work Group Meeting, Gundersheim, Germany, Jan 25, 2018.
- B. RUHSTALLER, *Reliable electrical characterization and modelling of organic LEDs and solar cells with doped layers and internal interfaces*. Intl. Conference on Simulation of Organic Electronics and Photovoltaics (SimOEP'18), Winterthur, Switzerland, Sept 4-6, 2018.
- B. RUHSTALLER, *Electronic, ionic and optical perovskite solar cell modeling and experimental validation*. NanoGe Fall'18 Meeting PeroMod, Torremolinos, Spain, Oct 22-26, 2018.
- J. O. SCHUMACHER, *Elektromobilität mit Brennstoffzellen*, Podium Nachhaltige Mobilität, Hochschule Rapperswil, Switzerland, March 2018.
- R. VETTER, J. O. SCHUMACHER, *An open implementation of a two-phase PEMFC model in MATLAB*, 15th Symposium on Modeling and Validation of Electrochemical Energy Devices (ModVal 2018), Aarau, Switzerland, April 12-13, 2018.
- R. VETTER, J. O. SCHUMACHER, *A new open-source PEMFC simulation tool for easy assessment of material parameterizations*, 15th Symposium on Modeling and Validation of Electrochemical Energy Devices (ModVal 2018), Aarau, Switzerland, April 12-13, 2018. Available from: <https://doi.org/10.21256/zhaw-3621.k>

A.6 Vorlesungen

- T. BERGMANN, T. HOCKER, *Thermische Energiesysteme, FS18*, Bachelor of Science.
- G. BOIGER, *Fluid- & Thermodynamik I für EU - Vorlesung & Praktikum FS18*, Bachelor of Science.
- G. BOIGER, *Numerik für IT II – Vorlesung & Praktikum, FS18*, Bachelor of Science.
- G. BOIGER, *Numerik für IT I – Vorlesung & Praktikum, HS18*, Bachelor of Science.
- G. BOIGER, *Physik und Systemwissenschaften für AV II – Praktikum, FS18*, Bachelor of Science.

- G. BOIGER, *Advanced Thermodynamics, HS18*, Master of Science in Engineering.
- G. BOIGER, *Thermofluidodynamik Modellentwicklung mit OpenFoam I, HS18*, Master of Science in Engineering.
- G. BOIGER, *Two Phase Flow with Heat and Mass Transfer, FS18*, Master of Science in Engineering.
- M. BONMARIN, *Numerik für IT I – Vorlesung & Praktikum, FS18*, Bachelor of Science.
- M. BONMARIN, *Physik für Systemtechnik II – Vorlesung & Praktikum, FS18*, Bachelor of Science.
- D. FEHR, *Mathematik: Analysis 1 für IT, FS18*, Bachelor of Science.
- A. HEEL, T. HOCKER, *Abgas- und Abwasserbehandlung, HS18*, Bachelor of Science.
- T. HOCKER, *Fluid- und Thermodynamik 1 – Vorlesung und Praktikum, FS18*, Bachelor of Science.
- T. HOCKER, *Fluid- und Thermodynamik 2 – Vorlesung und Praktikum, HS18*, Bachelor of Science.
- T. HOCKER, *Systemphysik für Aviatik 1 – Praktikum, HS18*, Bachelor of Science.
- T. HOCKER, *Systemphysik für Aviatik 2 – Praktikum, FS18*, Bachelor of Science.
- M. JAZBINSEK, *Physik für Energie und Umwelttechnik 1 – Vorlesung & Praktikum, FS18*, Bachelor of Science.
- M. JAZBINSEK, *Physik für Energie und Umwelttechnik 2 – Vorlesung und Praktikum, HS18*, Bachelor of Science.
- E. KNAPP, *Math for Aviation - Applied Numerics - FS18*, Bachelor of Science.
- E. KNAPP, *Mathematik: Numerik für Energie- und Umwelttechnik- FS18*, Bachelor of Science.
- C. KIRSCH, *MND2 – Mathematik: Numerik und Differenzialgleichungen 2 – FS18*, Bachelor of Science.
- C. KIRSCH, *MAE2 – Mathematik: Analysis für Ingenieure 2 – FS18*, Bachelor of Science.
- C. KIRSCH, *MANIT1 – Mathematik: Analysis 1 – HS18*, Bachelor of Science.
- C. KIRSCH, *MNUM – Mathematik: Numerische Methoden – HS18*, Bachelor of Science.
- K P. PERNSTICH, *Physik und Systemwissenschaften für Verkehrsingenieure 1 - HS18*, Bachelor of Science.
- K P. PERNSTICH, *Physik und Systemwissenschaften für Verkehrsingenieure 2 - FS18*, Bachelor of Science.
- B. RUHSTALLER, *Applied Photonics - HS18*, Master of Science in Engineering.
- B. RUHSTALLER, *Physik und Systemwissenschaften für Verkehrsingenieure 1 - HS18*, Bachelor of Science.
- B. RUHSTALLER, *Physik und Systemwissenschaften für Verkehrsingenieure 2 - FS18*, Bachelor of Science.
- J. O. SCHUMACHER, *Analysis für Ingenieure 4 - FS18*, Bachelor of Science.
- J. O. SCHUMACHER, *Analysis für Ingenieure 3 - HS18*, Bachelor of Science.
- J. O. SCHUMACHER, *Multiphysics Modelling and Simulation HS18*, Master of Science in Engineering.
- J.O. SCHUMACHER, *Numerical Simulation of Solar Cells FS18*, Master Online Photovoltaics.

A.7 Spin-off-Firmen



www.nmtec.ch

Die Numerical Modelling GmbH arbeitet auf dem Gebiet des Computer Aided Engineering (CAE) und bietet Dienstleistungen und Simulationstools kleinen und mittleren Unternehmen an. Unsere Kernkompetenz ist der Wissenstransfer, indem wir die Lücke zwischen wissenschaftlichem Know-how und seiner Anwendung in der Industrie schliessen. Mit unserem Wissen aus Physik, Chemie und den Ingenieurwissenschaften sind wir in der Lage, Ihren Produktentwicklungszyklus zu unterstützen und uns Ihrem Zeit- und Kostenrahmen anzupassen. Wir schaffen häufig sogenannte kundenspezifische CAE-Tools, in die die wissenschaftlichen Kenntnisse, die für Ihr Produkt nötig sind, eingebettet sind. In dieser Form kann es leicht innerhalb Ihrer F&E-Abteilung eingesetzt werden, aktuelle Projekte unterstützen sowie die Fähigkeiten Ihrer Mitarbeiter verbessern. Fragen Sie uns nach unserem unverbindlichen Beratungsangebot, das alle Gebiete des wissenschaftlichen Wissenstransfers umfasst.



www.fluxim.com

Fluxim ist ein Anbieter von Simulationssoftware und Messhardware für die Display-, Beleuchtungs- und Photovoltaik-Industrie weltweit. Die Hauptaktivität von Fluxim ist die Entwicklung der Simulationssoftware Setfos und Laoss, ebenso wie der Messsysteme Paios, Phelos und Litos. Die Kombination der Simulationssoftware mit Messdaten erlaubt die Bestimmung von Material- und Bauteilparametern. Die F&E-Tools werden weltweit in industriellen und akademischen Forschungslabors eingesetzt, um neue Bauelemente und Halbleitermaterialien mit verbesserter Leistung zu entwickeln und um die Physik der Bauelemente zu untersuchen.



www.winterthurinstruments.ch

Die Winterthur Instruments AG entwickelt Messsysteme für schnelle berührungslose und zerstörungsfreie Prüfung von industrieller Beschichtungen. Mit diesen Messsystemen können Beschichtungsdicken und Materialparameter bestimmt werden, etwa die Porosität und die Kontaktqualität, um beispielsweise Delamination zu entdecken. Das System basiert auf optisch-thermischen Messverfahren und lässt sich auf alle Arten von Beschichtungs- und Substratmaterialien anwenden. Unsere Messsysteme bieten die einzigartige Möglichkeit der berührungslosen und zerstörungsfreien Prüfung von beliebigen Beschichtungen auf Substraten.



www.nanolockin.com

NanoLockin entwickelt eine neue Benchmark-Technologie für den Nachweis und die Analyse von Nanopartikeln in allen Arten von Produkten. Das Unternehmen hat den Fribourg Innovation Award 2018 gewonnen.



www.skinobi.com

Opus Néoi ist ein im Jahr 2019 gegründetes Spin-off-Unternehmen, das Skinobi entwickelt, den ersten zuverlässigen Hautsensor für Endverbraucher. Skinobi ermöglicht es dem Kunden, den Hautzustand zu Hause zu überwachen und empfiehlt ihm die ideale, massgeschneiderte Hautpflegelösung. Die Analyse und Extraktion der Parameter geschieht mithilfe ausgeklügelter Algorithmen in einem IoT-Netzwerk. Das innovative, optische Messverfahren misst gezielt die Wärmetransporteigenschaft der Haut. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität oder Dichte sind sehr gute Indikatoren für den Zustand der Haut und korrelieren mit physiologischen Parametern wie Hydratation oder epidermaler Dicke.



www.zarawind.com

Zarawind ist ein ZHAW-Spin-off mit Sitz in Winterthur, das an der Entwicklung einer in der Luft schwebenden Windenergieturbine beteiligt ist.

Charakteristikum:

Die Technologie von Zarawind strebt an, erneuerbare und kostengünstige Elektrizität aus der in grosser Höhe und starken und konsistenten Windkraft zu produzieren. Das kann durch einen Rotor erreicht werden, der durch einen Aerostaten auf mehrere hundert Meter über Grund angehoben wird.

Vorzüge:

Windkraft ist eine starke, ständig verfügbare Energiequelle. Das Zarawind-Konzept stellt dauerhaften Betrieb sicher und verhindert Lärmprobleme, flackernde Lichtreflektionen und Vogelkollisionen.

Ziel:

Sicherstellen einer erneuerbaren Energiequelle in netzfernen Regionen zu geringen Kosten.

Kunden:

Eine Milliarde Menschen leben netzfern.

A.8 ICP-Mitarbeitende

Name	Function	Email
Dr. Tobias Bach	Research Associate	baht@zhaw.ch
Andreas Bachmann	Research Assistant	bacr@zhaw.ch
Christoph Bader	Research Assistant	bado@zhaw.ch
David Bernhardsgrütter	Research Associate	bens@zhaw.ch
Dr. Gernot Boiger	Lecturer	boig@zhaw.ch
Marlon Boldrini	Research Associate	bolm@zhaw.ch
Dr. Mathias Bonmarin	Lecturer	bmatt@zhaw.ch
Daniel Brunner	Research Assistant	brni@zhaw.ch
Vincent Buff	Research Assistant	buff@zhaw.ch
Ennio Comi	Research Assistant	comi@zhaw.ch
Jonas Dunst	Research Assistant	duns@zhaw.ch
Sandro Ehrat	Research Assistant	ehrd@zhaw.ch
Daniel Fehr	Research Associate	fehd@zhaw.ch
Joël Gianotti	Research Assistant	giat@zhaw.ch
Robert Herrendörfer	Research Associate	herf@zhaw.ch
Prof. Dr. Thomas Hocker	Lecturer	hoto@zhaw.ch
Dr. Lorenz Holzer	Research Associate	holz@zhaw.ch
Dr. Mojca Jazbinsek	Lecturer	jazb@zhaw.ch
Dr. Lukas Keller	Research Associate	kelu@zhaw.ch
David Kempf	Research Assistant	kempf@zhaw.ch
Dr. Christoph Kirsch	Lecturer	kirs@zhaw.ch
Dr. Evelyne Knapp	Research Associate	hube@zhaw.ch
Viktor Lienhard	Research Associate	lied@zhaw.ch
Philip Marmet	Research Assistant	mame@zhaw.ch
Dominic Neeser	Research Assistant	nees@zhaw.ch
Alexandra Meier	Administrative Assistant	bral@zhaw.ch
Vincent Michel	Research Assistant	micv@zhaw.ch
Jhimy Michel Rivero	Trainee	micr@zhaw.ch
Gaël Mourouga	Research Assistant	mouo@zhaw.ch
Martin Neukom	Research Assistant	neko@zhaw.ch
Dr. Kurt Pernstich	Lecturer	pern@zhaw.ch
Dr. Uros Puc	Research Associate	pucu@zhaw.ch
Markus Regnat	Research Associate	rega@zhaw.ch
Prof. Dr. Markus Roos	Lecturer	roor@zhaw.ch
Prof. Dr. Beat Ruhstaller	Lecturer	ruhb@zhaw.ch
Dr. Yasser Safa	Research Associate	safa@zhaw.ch
Dr. Guido Sartoris	Research Associate	srts@zhaw.ch
David Schaltegger	Research Assistant	sctg@zhaw.ch
Andreas Schiller	Research Assistant	scdr@zhaw.ch
Dr. Matthias Schmid	Lecturer	scmi@zhaw.ch
Prof. Dr. Jürgen Schumacher	Lecturer	schm@zhaw.ch
Bercan Siyahhan	Research Assistant	siya@zhaw.ch
Hanna Sotnikova	Research Assistant	sotn@zhaw.ch
Dr. Fabrizio Spano	Research Associate	span@zhaw.ch
Sebastian Spirig	Research Assistant	spii@zhaw.ch
Prof. Dr. Andreas Witzig	Lecturer, Head ICP	wita@zhaw.ch
Jakub Wlodarczyk	Research Assistant	wlod@zhaw.ch
Dr. Asier Zubiaga	Research Associate	zuba@zhaw.ch
Simon Züfle	Research Associate	zufe@zhaw.ch

A.9 Standort

ICP Institute of Computational Physics

Technikumstrasse 9
Postfach
CH-8401 Winterthur

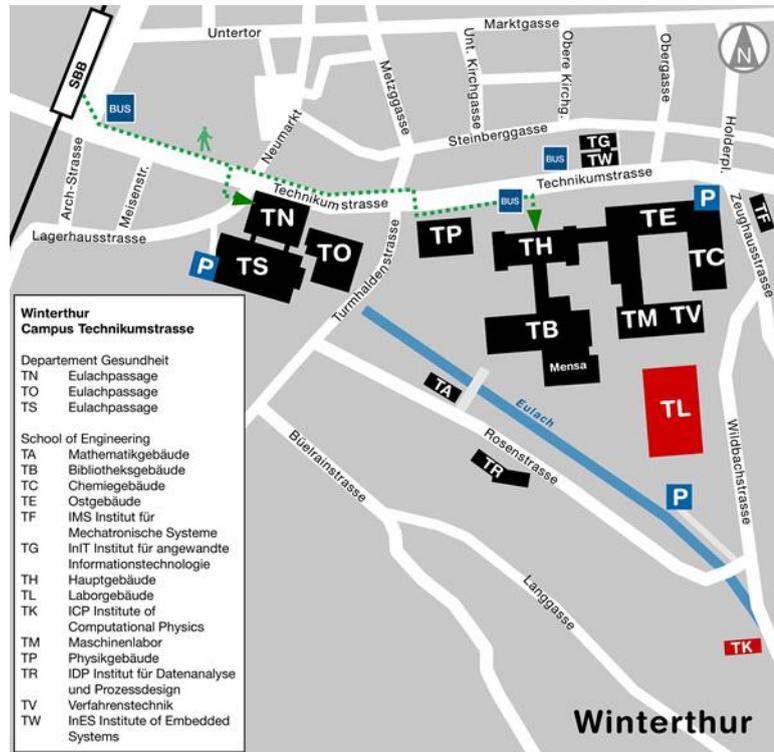
www.zhaw.ch/icp

Kontakt

Andreas Witzig
Fon +41 58 934 45 73
andreas.witzig@zhaw.ch

Administration

Alexandra Meier
Fon +41 58 934 76 82
alexandra.meier@zhaw.ch



TK-Gebäude



TL-Gebäude

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften

School of Engineering

ICP Institute of
Computational Physics

Technikumstrasse 9
Postfach
CH-8401 Winterthur

Fon +41 58 934 71 71
info.engineering@zhaw.ch
www.zhaw.ch/icp