

Institutsbericht 2025

Illustration eines künstlichen Hautmodells durch 3D Druck,
betrachtet durch ein optisches Mikroskop.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
1 Multiphysik Modellierung	4
1.1 Thermal Design Lab - Thermophysikalische Eigenschaften von Flüssigkeiten und Festkörpern bestimmen	5
1.2 Korrosionsverhalten von mehrphasigen Titanimplantaten	6
1.3 Digital Wolfram: Expertensystem für WIG-Schweissen	7
1.4 Digital Wolfram – Erweiterte Prozessüberwachung durch Plasmaspektroskopie . . .	8
1.5 Modell des Korrosionsmechanismus von Titanimplantaten	9
1.6 1D-Modell der Blutgefäße in einem arteriellen Baumnetzwerk	10
2 Elektrochemische Zellen und Mikrostrukturen	11
2.1 Modellierung elektrochemischer Durchflusszellen auf der Meso- und Kontinuumsskala für die elektroorganische Synthese	12
2.2 Porenskalige Modellierung elektrochemischer Syntheseprozesse mittels Lattice-Boltzmann-Methoden	13
2.3 Robuste PEMFC-Membran-Elektroden für Schwerlastanwendungen	14
2.4 Mesoskalenmodelle der Katalysatorschicht in PEMFCs	15
2.5 Multiskalen-Modellierung organischer Flussbatterien	16
3 Organische Elektronik und Photovoltaik	17
3.1 Terahertz-Bildgebung von Verkapselungsschichten für Perowskit-Solarzellen	19
3.2 Terahertz-Spektroskopie von komplexen Chalkogeniden	20
3.3 Design und Entwicklung industriekompatibler Charakterisierungsgeräte für neuartige Perowskit- und Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen (DICE)	21
3.4 Untersuchung des Ladungstransports in organischen Halbleitern mit elektrochemischen Methoden und theoretischen Modellen	22
3.5 Beschleunigte Alterung und Modellierung von Perowskit-Solarzellen	23
3.6 Autoencoder für die Parameterschätzung und zur Simulation von Perowskit-Solarzellen	24
3.7 Ionenmigration in Perowskit-Solarzellen	25
3.8 Weisslicht emittierende Dioden mit Abwärtskonversion auf Basis bleifreier Perowskit-Derivate	26

3.9 Verstehen und Steuern des resistiven Schaltens in Hochleistungs-Memristoren	27
3.10 Charakterisierung und Modellierung von Grenzflächen in Perowskit–Silizium-Tandem- Bauelementen	28
3.11 Solarzellen auf der Nanoskala verstehen – der Schlüssel zu effizienter erneuerbarer Energie	29
4 Sensorik und Messsysteme	30
4.1 Lock-in-Thermographie zur Charakterisierung photothermischer transparenter Dünnschichten	31
4.2 Miniaturisiertes magnetisches Aktuierungssystem für präzise Strömungsbeeinflussung in medizinischen Umgebungen	32
4.3 Point-of-Care Device for Blood Ammonia Monitoring	33
4.4 Innovative 3D-gedruckte Semi-Dry-Elektrode für ein tragbares EEG-Gerät	34
4.5 Replikation von Fingerabdrücken in künstlichen Hautmodellen durch 3D-Druck	35
4.6 Entwicklung eines multimodalen optischen Messsystems zur Quantifizierung und Differenzierung von Bilirubin	36
5 Gebäudesimulation	37
5.1 ThermoPlaner3D - Energiebeurteilung von Gebäuden aus grossflächiger 3D-Thermographie	38
5.2 Crowd-Management bei Grossveranstaltungen durch Faster Than Real-Time Simulationen	39
5.3 EFFIWAG: Effizienzpotenzial eines Ersatzes des Wärmeabgabesystems	40
5.4 Energiesparen mit intelligenten Beschattungssystemen	41
5.5 Simulation effizienter Heizsysteme in Kirchen	42
5.6 Massive Parallelisierung für die Simulation von dezentralen Energiesystemen	43
5.7 Thermochemische Netzwerke (TCN) zur Deckung des Wärmebedarfs in Wohngebäuden	44
Anhang	45
A.1 Wissenschaftliche Publikationen	45
A.2 Buchkapitel	47
A.3 Konferenzen und Workshops	47
A.4 Patente	50
A.5 Studierendenprojekte	50
A.6 Vorlesungen	52
A.7 ICP-Spin-off-Firmen	55
A.8 Laborinfrastruktur	55
A.9 ICP-Mitarbeitende	58
A.10 Standort	60

Vorwort

Vor zwei Jahren hatte ich gedacht, ChatGPT müsse nicht erwähnt werden im ICP-Jahresbericht, denn wir machen ja keine Large Language Model (LLM)-Forschung. Letztes Jahr schien es mir als Thema dann doch erwähnenswert und ich hatte eine Vision für Anwendungen im Bereich von Softwaretools für physikalische Simulation skizziert [1]. Nun möchte ich dem Thema nochmals Aufmerksamkeit widmen und über den Einsatz des neuen Werkzeugs in der Lehre berichten. Sowohl für Dozierende wie auch für die Studierenden haben wir Herausforderungen und interessante neue Anwendungsfälle.

Eine tiefgreifende Veränderung ist in Aufgabenstellungen zu erkennen, wo ein Bericht abgegeben werden muss. Es ist unbestritten, dass das Entwickeln von Gedanken und Ausformulieren in Worten für die Studierenden eine wichtige mentale Tätigkeit ist, die den Lernprozess fördert. Falls wir wie bisher an der Berichtsform festhalten, wird aufgrund der neuen Werkzeuge die Hirnaktivität keine kreative Tätigkeit mehr sein, sondern aufgrund des ChatGPT ein eher passives (im besten Fall noch kritisches) Gegenlesen. Anstelle vom Schreiben eines Berichts besitzt das LLM aber die Fähigkeit, mit Studierenden in einen interaktiven Dialog zu treten und deren Gedanken zu folgen. Im Zwiegespräch wird das Mitdenken gefördert und gerade für die eher schüchternen Studierenden eine Schranke abgebaut. Konkretes Beispiel: zur Vorbereitung der mündlichen Semesterendprüfung in Physik habe ich den Studierenden einen angepassten Chatbot zur Verfügung gestellt, der Fragen formuliert und Antworten entgegennimmt. Es sind freiwillige Lerneinheiten zum Simulieren der mündlichen Prüfung. In den Übungsstunden bin ich dann selbst präsent und biete mit den Diskussionen an der Wandtafel noch etwas mehr als das LLM. Die Gespräche sind anregend, denn im persönlichen Austausch bekommt man unmittelbares Studierendenfeedback, kann bei manchem *aha*-Erlebnis unmittelbar dabei sein und erkennt die wahren Hürden im Stoff besser.

Interessiert an diesem digitalen Mentor? ZHAW-intern steht das Tool kostenlos zur Verfügung [2]. Es wurde durch den Transformative Educational Fund [3] gefördert und von Kurt Pernstich ausprogrammiert. An einigen Orten steht es aktuell als Betatest im Einsatz. Für Dozierende erlaubt es das Erstellen neuer Assistenten, die mit normaler Sprache instruiert werden über den Stoffumfang und über ihre spezifischen Aufgaben im Dialog mit den Studierenden. Ein entsprechendes Tutorial wird im Tool mitgeliefert. Wir sind gespannt auf euer Feedback.

Nun empfehle ich noch die weitere Lektüre der Kurzberichte zu den Forschungsprojekten des ICP. Ich möchte mich beim ganzen ICP-Team bedanken, einerseits für den grossen Einsatz, aber mindestens so sehr für das angenehme Arbeitsklima und die Inspiration.

Andreas Witzig, Institutsleiter ICP

Links:

[1] <https://www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/icp/forschungsberichte>

[2] <https://mentormate.zhaw.ch>

[3] <https://www.zhaw.ch/en/focus-topics/zhaw-digital/education/tef>

1 Multiphysik Modellierung

Multiphysik-Modelle sind wirksame Werkzeuge, um eine grosse Bandbreite an physikalischen Phänomenen zu erkunden, und so die Energieflüsse, Strukturen, elektromagnetische, thermodynamische, chemische und akustische Effekte miteinander zu verbinden. Auf diesem Gebiet gab es in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte und die potenzielle Reichweite der Anwendungen wurde stetig ausgeweitet. Zudem wurden numerische Methoden immer ausgefeilter und an die verfügbaren, wachsenden Rechnerkapazitäten angepasst. Heutzutage sind detaillierte physikalisch-chemische Modelle kombiniert mit belastbaren numerischen Lösungsmethoden 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-Modellierung und entwickeln Finite-Elemente- ebenso wie Finite-Volumen-Simulationssoftware. Unsere Erfahrung in numerischer Analyse, Modellierung und Simulation erlaubt es uns, simulationsbasierte Optimierung in vielen Fachgebieten erfolgreich anzuwenden. Dabei sind wir mit einer grossen Bandbreite an physikalischen Gleichungen vertraut und finden auch dann numerische Lösungen, wenn die Effekte in enger Wechselwirkung zueinanderstehen. 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 unserer eigenen Finite-Element-Software SESES, der Fluidodynamik-Software OpenFoam (Open Source) und kommerziell angebotener Produkte wie COMSOL.



A. Schubiger



C. Fiant



D. Meier



G. Sartoris



L. Holzer



L. Keller



P. Marmet



Y. Safa



G. Marcello



G. Boiger



T. Hocker



S. Ehrat

1.1 Thermal Design Lab - Thermophysikalische Eigenschaften von Flüssigkeiten und Festkörpern bestimmen

In unseren F&E-Projekten unterstützen wir unsere Projektpartner mit physikalischen Computersimulationen. Für deren Genauigkeit werden zuverlässige Stoffdaten benötigt, die häufig nicht in der Literatur verfügbar sind und deshalb eigene Messungen erfordern.

Contributors: S. Ehrat, G. Martins Marcello, T. Hocker
Partners: Medyria AG, Universitätsspital Zürich (USZ)
Funding: ICP, Innosuisse
Duration: Fortlaufend

Für die Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften von Flüssigkeiten sind im Thermal Design Lab unterschiedliche Messinstrumente vorhanden. Die Dichte einer Flüssigkeit kann mit dem tragbaren Dichtemessgerät "DMA 35" von Anton Paar bestimmt werden, während das Rotationsviskosimeter "ViscoQC 300L" zur Bestimmung der Viskosität dient.

Für die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme wurde mit dem "MP-V" von Thermtest ein ausgezeichnetes Instrument für die Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften kürzlich angeschafft. Diese vielseitige Messplattform kann mit unterschiedlichen Sensoren bestückt werden, um die Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern, Flüssigkeiten, Pasten und Pulvern zu bestimmen. Das transiente Messprinzip beruht auf dem zeitlichen T-Verlauf des Erwärmungsprozesses durch eine konstanten Heizquelle. Dies erlaubt kurze Messzeiten und somit einen hervorragenden Messdurchsatz. Zudem erlauben unterschiedliche Module in der Messsoftware die Ausmessung von Dünnschicht- oder anisotropen Materialien.

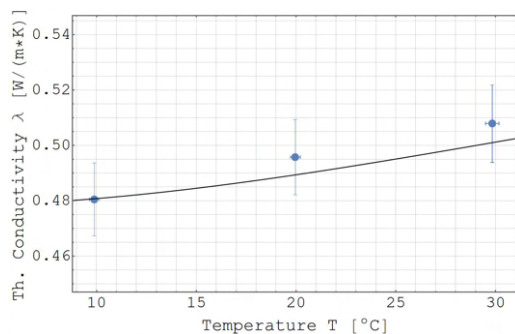


Abb. 1: Wärmeleitfähigkeitsmessung „S34“ (Sucrose-Wasser) mit Messungengenauigkeit (3σ) verglichen mit den Literaturwerten [1].

Um den Messablauf für die unterschiedlichen Messinstrumente zu evaluieren und deren Genauigkeit mit Literaturwerten zu beurteilen, wurden

unterschiedliche Zucker- und Glycerine-Wasser-Lösungen ausgemessen. Die Abbildungen zeigen die Messresultate (blaue Punkte) für die Wärmeübertragungseigenschaften einer 33.72 M% Sucrose-Wasser-Mischung verglichen mit den Literaturwerten (schwarze Linie) [1][2].

Nach einer zusätzlichen Korrektur der Messdaten, welche über eine Referenzmessung mit einer Modellschubstanz erfolgt, weisen die Messdaten eine perfekte Übereinstimmung zu den jeweiligen Literaturwerten auf. Dies trifft auf alle Zucker-Wasser- und Glycerin-Wasser-Mischungen zu, welche analysiert wurden. Des Weiteren wurden die Dichten und dynamischen Viskositäten überprüft, welche gleichermassen eine hervorragende Übereinstimmung zur Literatur aufweisen.

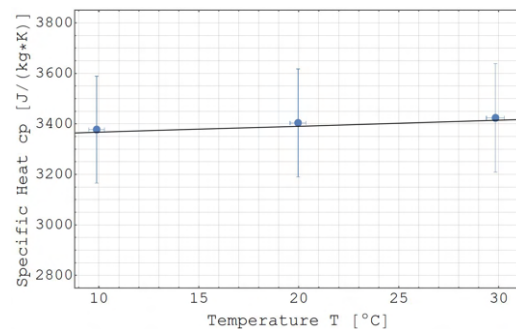


Abb. 2: Wärmekapazitätsmessung „S34“ (Sucrose-Wasser) mit Messungengenauigkeit (3σ) verglichen mit den Literaturwerten [2].

Neben Flüssigkeiten können mit dem MP-V auch Festkörper und Dünnschicht-Materialien ausgemessen werden. Hierfür stehen die benötigten Sensoren und Softwarelizenzen bereit.

Literatur:

[1] Ferenc A. Mohos, *Confectionery and Chocolate Engineering: Principles and Applications, 2nd Edition*, John Wiley & Sons, 2017.

[2] Mosen Asadi PhD, *Beet-Sugar Handbook*, John Wiley & Sons, 2005.

1.2 Korrosionsverhalten von mehrphasigen Titanimplantaten

Titanlegierungen werden aufgrund ihrer guten Biokompatibilität und Korrosionsbeständigkeit häufig für Implantate im menschlichen Körper eingesetzt. Entzündungen können jedoch eine sehr aggressive Umgebung erzeugen, welche zur Korrosion der Implantate führt. In diesem Projekt erforscht ein schweizerisch-französisches Konsortium die grundlegenden Korrosionsmechanismen von additiv gefertigten Titanimplantaten mit einer Kombination aus experimentellen Methoden und mathematischer Modellierung.

Contributors: L. Holzer, Y. Safa, P. Marmet

Partners: Thermomechanical Metalurgy Lab EPFL, Institut de la Corrosion Brest France, Laboratoire de Réactivité de Surface Sorbonne France

Funding: SNSF, Agence nationale de la recherche

Duration: 2023–2026

Titan und seine Legierungen gehören zu den gängigsten biokompatiblen Materialien für Implantate im menschlichen Körper. Unter dem Einfluss verschiedener elektrochemischer, mechanischer und biologischer Faktoren kann es jedoch zu korrosiven Schäden kommen. Die Korrosionsbeständigkeit von Titan beruht hauptsächlich auf einer dünnen Passivschicht, die jedoch von oxidierenden Medien wie Wasserstoffperoxid oder Radikalen, welche bei Entzündungen entstehenden, angegriffen wird, was zur Korrosion des Metalls führt. In diesem Projekt erforscht ein Konsortium von Partnern aus Frankreich und der Schweiz die grundlegenden Mechanismen der Korrosion von additiv gefertigten Ti6Al4V-Implantaten mit einer Kombination aus experimentellen Methoden und Modellierung. Abb. 1 zeigt den Querschnitt einer korrodierten Ti6Al4V-Probe nach zehn Tagen in einer PBS-Lösung mit 3 % Wasserstoffperoxid. Die β -Phase löst sich dabei bis zu einer Tiefe von etwa $70\ \mu\text{m}$ gleichmässig auf. Zur Interpretation der elektrochemischen Korrosionsexperimente werden die Impedanzspektren unter Verwen-

dung der realen Geometrie der β -Phase modelliert, die aus FIB-SEM-Tomographiedaten rekonstruiert wird (Abb. 2a, b). Diese strukturellen Daten dienen als Grundlage für Frequenzbereichssimulationen in Comsol Multiphysics (Abb. 2c, d). Dies ermöglicht die Identifikation mikrostruktureller Einflüsse auf die elektrochemischen Messungen (z.B. de Levie Impedanzmerkmal).

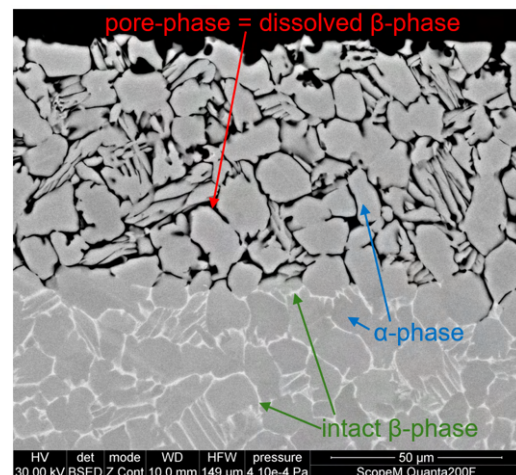


Abb. 1: Querschnitt einer korrodierten Ti6Al4V Probe.

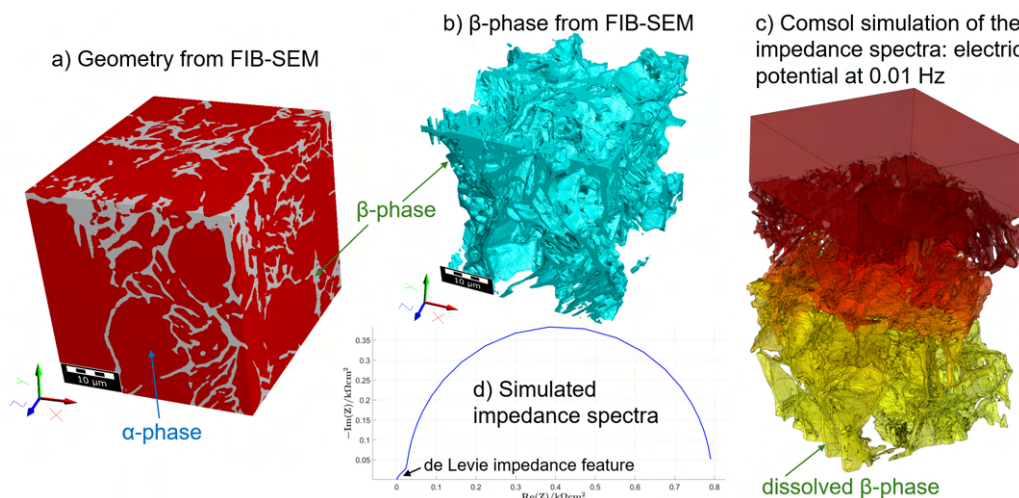


Abb. 2: Simulation des elektrochemischen Impedanzspektrums: a) and b) 3D Geometrie aus FIB-SEM Tomographie, c) and d) FEM Frequenzbereichssimulationen in Comsol Multiphysics.

1.3 Digital Wolfram: Expertensystem für WIG-Schweissen

In einem interdisziplinären Team entwickeln wir Digital Wolfram, ein Expertensystem, das WIG-Schweissprozesse in Echtzeit überwacht. Das System erfasst Strom-, Spannungs-, Lichtbogenlängen- und optische Emissionssignale, erkennt Prozessabweichungen und gibt konkrete Handlungsempfehlungen.

Contributors: T. Hocker, L. Holzer, D. Meier, M. Schmid, C. Fiant, R. Gubler, M. Abegglen, J. Rosset, O. Hoenecke (ISC), A. Kipka, M. Türkes (BFH)
 Partners: Wolfram Industrie GmbH
 Funding: Innosuisse
 Duration: 2023–2025

Für hochwertige WIG-Schweissnähte ist ein stabiler Prozess entscheidend. Unerwünschte Ereignisse – wie schlechte Lichtbogenzündung oder Turbulenzen im Schutzgas – können zu Defekten führen und aufwendige Nacharbeiten erfordern. Ein Expertensystem, welches frühzeitig auf Prozessinstabilitäten hinweist, bietet daher sowohl wirtschaftliche als auch qualitätsbezogene Vorteile.

Das Kernstück von Digital Wolfram ist ein galvanisch getrennter Datenlogger, der am Institute of Signal Processing (ISC) entwickelt wurde. Die Elektronik ist in der Lage, die bei der kontaktlosen Zündung auftretenden Spannungsspitzen von mehreren Kilovolt zu verkraften und erfasst 16 analoge sowie 12 digitale Kanäle mit einer Abtastrate von bis zu 40 kHz (Abb. 1).



Abb. 1: Prototyp des Digital Wolfram-Datenloggers, geschützt durch ein stabiles Metallgehäuse.

Mit dieser Hardware untersuchen wir das Auftreten von Anomalien in Strom-, Spannungs-, Lichtbogenlängen- und optischen Emissionsdaten. Das System erkennt derzeit über zwanzig charakteristische Merkmale. Dazu zählen typische Prozessgrößen wie die Sollwerte eines gepulsten Schweißstromsignals – Kennwerte, die für die Dokumentation und Qualitätssicherung von Schweißprozessen wichtig sind. Andere Merkmale deuten auf Störungen hin, die kostspielige Defekte verursachen können, etwa fehlerhafte

Lichtbogenzündungen oder eine unzureichende Schutzgasabdeckung.

Die Benutzerinteraktion ist eine zentrale Eigenschaft eines solchen Expertensystems. Die Prozessdaten werden durch Algorithmen in Echtzeit ausgewertet. Detektierte Anomalien führen zu farbkodierten Hinweisen und Warnungen in der grafischen Benutzeroberfläche des Systems (siehe Abb. 2).

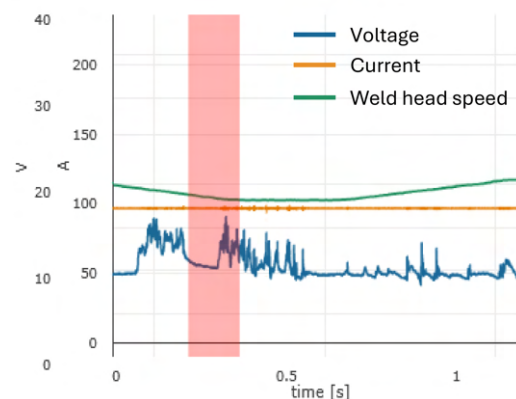


Abb. 2: Live-GUI mit Darstellung von Spannung, Strom und Schweisskopfgeschwindigkeit über der Zeit. Eine detektierte Anomalie (Turbulenz im Schutzgas) wird durch ein rotes Band markiert.

Der Prototyp stösst auf grosses Interesse bei führenden Industriepartnern. Einige von ihnen testen das System bereits im Rahmen von Forschungs- oder Produktionsumgebungen im Beta-Betrieb.

Im letzten Projektjahr erfassen wir synchronisierte Daten einer erweiterten Sensorpalette und ergänzen diese durch mikroskopische Analysen der Schweißnahtqualität sowie der Elektroden Degradation. Diese Daten sollen dazu beitragen, die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und den zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen, wie beispielsweise dem Degradationsprozess der Elektrode, besser zu verstehen.

1.4 Digital Wolfram – Erweiterte Prozessüberwachung durch Plasmaspektroskopie

Im Rahmen des Projekts Digital Wolfram erweitern wir unser Expertensystem für das WIG-Schweissen über elektrische Sensorsignale hinaus und analysieren die Emission des Lichtbogens. Durch die Analyse optischer Emissionsspektren ermitteln wir Plasmatemperatur, Elektronendichte und Spezieszusammensetzung. Ziel ist es, eine bestehende Lücke in der Prozessüberwachung zu schliessen.

Contributors: T. Hocker, L. Holzer, D. Meier, M. Schmid, C. Fiant, R. Gubler, M. Abegglen, J. Rosset, O. Hoenecke (ISC), A. Kipka, M. Türkes (BFH)

Partners: Wolfram Industrie GmbH

Funding: Innosuisse

Duration: 2023–2025

Beim Wolfram-Inertgasschweissen (WIG) entsteht ein elektrischer Lichtbogen (Abb. 1) zwischen einer nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück. Ein inertes Schutzgas – meist Argon oder Helium – schirmt Elektrode und Schweissbad von der Umgebung ab. Der Lichtbogen erreicht Temperaturen von rund 9'000 bis 12'000 Grad Celsius, wodurch Schutzgas und verdampfendes Metall ionisiert und ein Plasma gebildet wird.

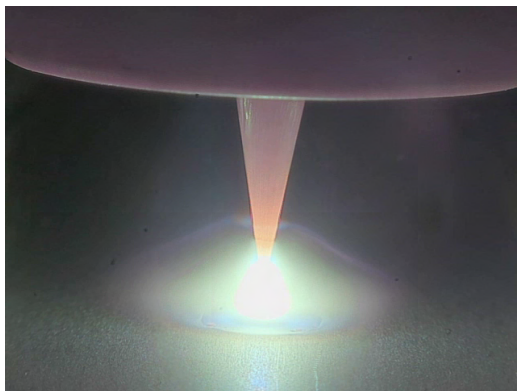


Abb. 1: Detailansicht der Wolframelektrode und des Lichtbogenplasmas beim WIG-Schweissen mit Argon als Schutzgas.

Aufgrund der hohen Nahtqualität ist das WIG-Schweissen eine häufig eingesetzte Methode in der Luft- und Raumfahrt, der Nukleartechnik und anderen technisch anspruchsvollen Anwendungen. Um die geforderte Qualität sicherzustellen, ist ein stabiler und gut überwachter Prozess erforderlich. Unerwünschte Prozessanomalien können zu schwerwiegenden und kostenintensiven Defekten

führen. Zur Erweiterung der Prozesskontrolle entwickeln wir ein digitales Assistenzsystem, das die schweisende Person basierend auf Strom- und Spannungsverläufen auf Anomalien hinweist. Die ausschliessliche Analyse elektrischer Daten lässt jedoch eine entscheidende Lücke offen: die Zusammensetzung und Temperatur des Plasmas. Diese Grössen sind schwer direkt zu erfassen, bestimmen aber wesentlich das Verhalten des Lichtbogens und damit die Schweissqualität.

Zur Schliessung dieser Lücke erfassen wir während des Schweissvorgangs optische Emissionsspektren mit einem fasergekoppelten Spektrometer. Die Auswertung erfolgt über einen selbst entwickelten Workflow: Ein synthetisches Referenzspektrum wird auf Basis spektroskopischer Konstanten erzeugt, mit den gemessenen Peaks abgeglichen und mittels mehrkomponentiger Saha-Boltzmann-Analyse ausgewertet. So lassen sich Plasmatemperatur und Spezieszusammensetzung bestimmen. Diese Parameter dienen als Indikatoren für die Prozessstabilität und ermöglichen das Erkennen kritischer Störungen – beispielsweise beim Eindringen von Sauerstoff in die Nähe der Elektrode.

Im laufenden Jahr werden wir die Methode mit einem erweiterten Datensatz validieren. Darüber hinaus ist die Integration der wichtigsten Plasmakennwerte in einen Echtzeitalgorithmus vorgesehen, sodass sie zusammen mit den elektrischen Warnhinweisen in der Benutzeroberfläche dargestellt werden können.

1.5 Modell des Korrosionsmechanismus von Titanimplantaten

Die Korrosion medizinischer Titanimplantate wird häufig mit entzündlichen Effekten im menschlichen Körper in Verbindung gebracht, die die Lebensqualität einer beträchtlichen Anzahl von Personen beeinträchtigen. Das Verständnis des Mechanismus der korrosiven Degradation von Titanimplantaten trägt zu einem besseren Materialdesign bei. Für eine konsistente Analyse der korrosiven Aktivitäten zwischen den Phasen der Titanlegierung wird ein modellbasierter Ansatz gewählt.

Contributors: Y. Safa, P. Marmet, L. Holzer

Partners: Mechanical Metallurgy Lab EPFL, Institut de la Corrosion Brest, Laboratoire de Réactivité de Surface Sorbonne

Funding: SNSF

Duration: 2023–2026

Titan wird oft als erfolgreiches Material für die Herstellung medizinischer Implantate für den menschlichen Körper angesehen. Die Titanlegierung (Ti6Al4V) enthält eine β -Phase, die eine besondere mechanische Funktionalität bietet. Die Dissoziation der β -Phase verringert die Haltbarkeit des Implantats und führt zu einem komplexen Gesundheitszustand.

In diesem Projekt untersuchen wir die Beziehungen zwischen der biologischen korrosiven Umgebung, der mechanischen Belastung und der ursprünglichen Mikrostruktur der Ti6Al4V-Legierung. Wir verwenden einen modellbasierten Ansatz, der mit anderen Aktivitäten der Konsortialpartner (additive Fertigung, Korrosionsexperimente und mechanische Ermüdungstests) interagiert um die Entwicklung der beta-dissozialen Phase vorherzusagen, die durch einen elektrochemischen Prozess im korrosiven Entzündungsmedium des menschlichen Körpers angetrieben wird.

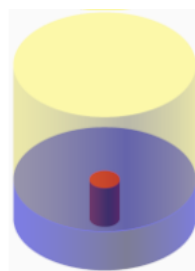


Abb. 1: Phasen: β (rot), α (blau) unter Elektrolyt (gelb)

Am ICP wurde eine neue Implementierung des hausinternen numerischen Modells durchgeführt, das eine verbesserte Vorhersagefähigkeit zur Beschreibung des reaktiven Transports von Ionenladungen innerhalb der metallurgischen Struktur von Titanphasen demonstriert. Als Beispiel wird in diesem Bericht die Entwicklung der Reaktantenkonzentration für eine Dissoziationstiefe der β -Phase dargestellt. Ähnliche Ergebnisse in der Kor-

rosionskerbe beschreiben die Abhängigkeit zwischen Masse Migration, Diffusion und der Leitfähigkeit des Electrolyten. Die Reproduktion der Simulation für verschiedene Dissoziationstiefen liefert eine Erklärung für die impedanzspektroskopische Beobachtung, die den gemessenen Widerstand im Elektrolyt mit der Dissoziationstiefe und dem Massentransport korreliert.

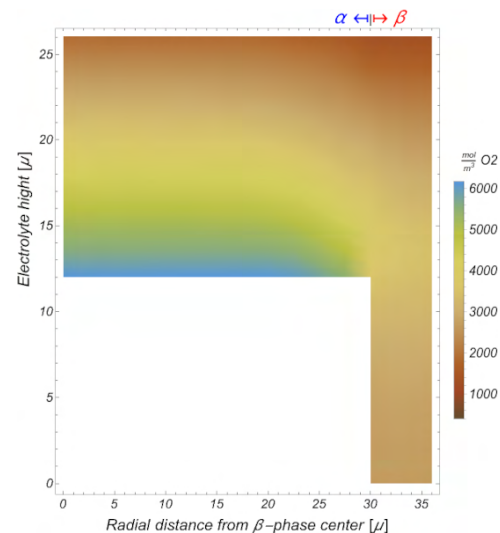


Abb. 2: Verteilung der molaren Sauerstoffkonzentration über der α -Phase und innerhalb der Kerbe der aufgelösten β -Phase

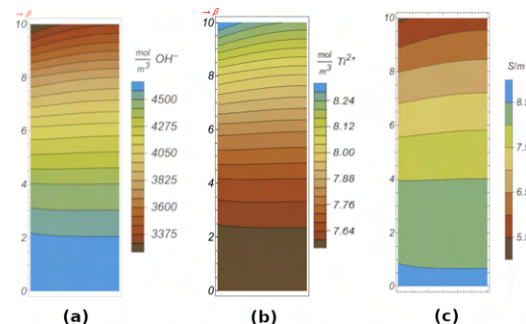


Abb. 3: (a-b) Verteilung der molaren Konzentration der Reaktanten (c) Leitfähigkeit des Elektrolyten innerhalb der Kerbe der aufgelösten β -Phase

1.6 1D-Modell der Blutgefäße in einem arteriellen Baumnetzwerk

Weltweit unterziehen sich etwa zwei Millionen Patienten (pro Jahr), die unter Brustschmerzen leiden, einer Herzkatheteruntersuchung, die durch eine Ischämie ohne obstruktive Koronararterien (INOCA) verursacht wird. Die Verwendung von katheterbasierten Druck- und Geschwindigkeitsdaten $(p, v)(t)$, um physiologische Indizes zu erhalten, ist die bestmögliche Methode zur Diagnose von INOCA. Am ICP leisten wir einen Beitrag zur Entwicklung von PhysioCath, einem innovativen Katheter, der von der Medyria AG entwickelt wurde. Dies beinhaltet Flussmodellierung und ML. In diesem Bericht konzentrieren wir uns auf ein 1D-Modell des Arterienbaumnetzwerks.

Contributors: Y. Safa, C. Kirsch, T. Hocker
 Partners: USZ, EOC, Medyria AG
 Funding: Innosuisse
 Duration: 2024–2026

PhysioCath wurde von Medyria AG entwickelt und ist ein innovativer Katheter für die Diagnose von mikrovaskulären Erkrankungen. Er bietet eine einzigartige Funktion für genaue und zuverlässige zeitaufgelöste Blutdruck- und Geschwindigkeitsdaten. Sein Prinzip basiert auf der Gewinnung der Blutgeschwindigkeit aus einer quantifizierten Wärmequelle, die zur Aufrechterhaltung einer konstanten Leistung des Temperatursensors erforderlich ist. Dieser Sensor ist mit der Wärmequelle kombiniert und stellt ein außergewöhnliches Merkmal der PhysioCath-Technologie dar.

Andererseits werden 1D-Modelle des Arterienbaums als guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenkosten für die Simulation der Ausbreitung arterieller Pulswellen angesehen. Insbesondere sind sie aufgrund der vereinfachten 1D-Strukturdarstellung wesentlich effizienter als vollständige 3D-CFD-Modelle, die die tatsächliche geometrische Komplexität erfassen sollen. Es sei daran erinnert, dass 1D-Baummodelle mit 1D-Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls in Kombination mit elastischen oder unelastischen Wandmodellen im Vergleich zu 0D-Modellen viel mehr physikalische Details erfassen. In diesem Projekt nutzen wir die leistungsstarken Möglichkeiten von 1D-Arterienmodellen, um realitätsnahe Wellenmuster zu simulieren. Es sollte klar sein, dass die mit PyCath gewonnenen Informationen $v(t)$ und $p(t)$ ergeben, die lokal um einen festen Punkt innerhalb des Arteriensystems sondiert werden, woraus wir dann die entsprechenden Wellenintensitäten berechnen (eine lokale Zeitvariation der Wellenleistung, d. h. $dl=dp \cdot dv$, die sich als Reaktion auf die Pumpaktion des Herzens ergibt).

Mit Hilfe des 1D-Arterienmodells kann auch die lokale PyCath-Ausgabe (d. h. lokale $v(t)$, $p(t)$) simuliert werden, und somit kann der Wave Analyzer mit simulierten Daten aus dem 1D-Arterienmodell getestet werden.

Das implementierte numerische Modell berücksichtigt die Vorwärts- und Rückwärtsausbreitung von Wellen, die durch das Reimann-System beschrieben werden. Die sich daraus ergebenden Signale werden auf den Auslass-/Einlassseiten verfolgt, wobei die Randbedingungen aus den anstehenden Eigenschaften abgeleitet werden. Ein Beispiel für eine visualisierte Ausgabe ist in Abb. 1 mit zwei Zeitraffern ($T1$ und $T2$) der Reaktion einer dreifachen Bifurkationsarterie auf einen Druckimpuls am Einlass des Muttergefäßes dargestellt.

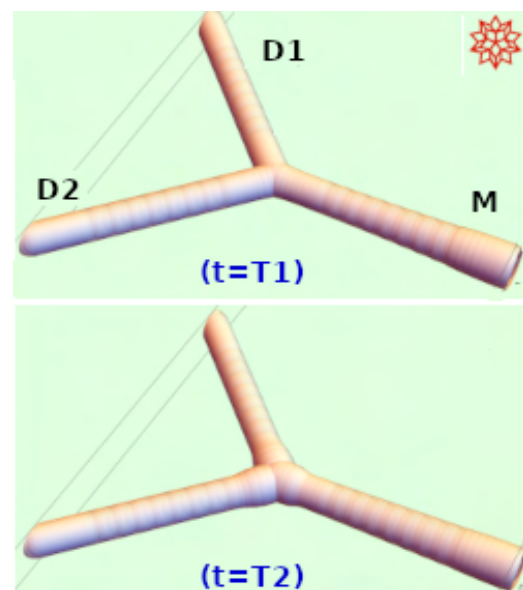


Abb. 1: Zwei Zeitraffer der Simulation einer Dreifachbifurkation mit Mutter- (M) und zwei Tochtergefäßen (D1,2))

2 Elektrochemische Zellen und Mikrostrukturen

Das Team Elektrochemische Zellen und Mikrostrukturen beschäftigt sich mit der Modellierung und Simulation von elektrochemischen Zellen für verschiedene Anwendungen:

- Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen werden für den Antrieb von Schwerlastfahrzeugen wie Lastwagen entwickelt. Das Ziel ist es, Verbrennungsmotoren zu ersetzen, die derzeit mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Die wichtigste technische Herausforderung besteht darin, die Haltbarkeit der Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs) zu erhöhen. Wir befassen uns derzeit im Rahmen des europäischen Projekts PENTASTIC mit einer Kombination aus mikro- und mesoskaligen MEA-Modellen, die es ermöglichen, sowohl die Zellleistung als auch die Langlebigkeit bzw. Degradation bei Lastwechseln zu simulieren.
- Redox-Flow-Batterien (RFBs) sind eine Technologie für die Energiespeicherung von fluktuierendem erneuerbarem Strom aus Photovoltaik und Windkraftanlagen. Wässrige organische RFBs haben den Vorteil niedriger Lösungsmittelkosten und relativ hoher Leitfähigkeit. Zudem gewährleisten Elektrolyte auf Wasserbasis einen sicheren Batteriebetrieb. Als Ergebnis des europäischen Projekts SONAR haben wir kürzlich ein rechnerisch effizientes physikalisches Modell für eine organische RFB veröffentlicht. Das Modell eignet sich für die Anwendung im computergestützten *high-throughput-screening* zur Identifikation neuer aktiver Materialien.
- Elektrochemische Flow-Zellen sind eine Schlüsselkomponente der zukünftigen Synthesetechnologie in der chemischen Industrie, bei der elektrische Energie für die elektrochemischen Reaktionen verwendet wird. Der Einsatz von Flow-Zellen für die elektroorganische Synthese wird die Herstellung von Feinchemikalien oder Arzneimitteln unter Verwendung erneuerbarer Energie ermöglichen. Unser Team nimmt an dem europäischen Projekt MiEl teil, in dem wir an der Simulation von Elektrodenstrukturen und der modellbasierten Analyse und dem Design von elektrochemischen Flow-Zellen arbeiten.



A. Dullak



R. Schärer



E. Scoletta



L. Corte Vieira



M. Diana



J. Schumacher

2.1 Modellierung elektrochemischer Durchflussszellen auf der Meso- und Kontinuumsskala für die elektroorganische Synthese

MiEl ist ein Forschungs- und Ausbildungsprojekt, das durch das Marie-Skłodowska-Curie-Programm der Europäischen Union finanziert wird. Es befasst sich mit der Entwicklung neuer Synthesetechnologien für die chemische Industrie, wobei die Vorteile der Elektrochemie, der Mikroverfahrenstechnik und der Strömungschemie kombiniert werden. Das ehrgeizige Forschungsziel besteht darin, durch die gemeinsame Anstrengung eines internationalen Netzes von 12 Doktoranden diese Durchflussszellentechnologien hochzuskalieren und sie in Arrays für die sichere, flexible und nachhaltige Synthese chemischer Produkte für die Zukunft zusammenzustellen.

Contributors: L. Vieira, J. Schumacher, R. Schärer

Partners: ICT, UvA, DTU, UWK, UCT Prague, SU, INO, ECHEM, JAN, KIT, USZ

Funding: Horizon-MSCA-2021-DN-01-01

Duration: 2023–2026

Elektrochemische Technologien bieten nachweislich eine hohe Energieeffizienz in der Produktion, während die Mikrofluidik die Sicherheit und Prozesskontrolle in einer Vielzahl von chemischen Prozessen erhöht. Die Verschmelzung der beiden Verfahren in Form von elektrochemischen Durchflussszellen scheint daher der logische Schritt hin zu einer zuverlässigeren und skalierbaren, sichereren und umweltfreundlicheren chemischen Industrie zu sein. Die drei verschiedenen untersuchten Syntheserouten können als relevante Modellprozesse für dieses Ziel angesehen werden.

Als grundlegender Partner des MiEl-Konsortiums hat das ZHAW-ICP die Aufgabe, ein systematisches Verständnis dieser elektrochemischen Prozesse und ihrer Machbarkeit zu ermöglichen, indem es numerische Modelle von Durchflussszellen entwickelt, die die gekoppelten Effekte von Massen-, Impuls-, Energie- und Ladungstransport berücksichtigen. Am ICP wird die Kinetik und der Stofftransport in Elektrodenstrukturen simuliert, in denen eine mehrphasige Flüssigkeitsströmung und Mehr-Elektronen-Schritt-Reaktionen stattfinden. Damit soll die Leistung der entwickelten Zellen bewertet und verbessert werden. Abbildung 1 zeigt eine simulierte Strom-Spannungskennlinie, zudem werden die Konzentrations-, Geschwindigkeits- und Druckverteilung berechnet.

Das ZHAW-ICP arbeitet ausserdem im Rahmen des MiEl-Projekts an der mesoskaligen Elektrodenmodellierung. Damit werden effektive Parametrisierungen für die Zellmodelle auf der Kontinu-

umsskala berechnet. Die experimentelle Modellvalidierung, die Parametrisierung und die Identifikation von Reaktionsmechanismen sind von grosser Bedeutung und werden für die untersuchten chemischen Prozesse in enger Zusammenarbeit mit dem Konsortium angegangen. Ziel der Modelle ist es, Daten zu generieren, die die Materialeigenschaften widerspiegeln, und geeignete Betriebsbedingungen für die Konstruktion einer Durchflussszelle in Abhängigkeit von Durchflussmenge, Reaktantenkonzentrationen, Druck, Temperatur und angelegter Spannung zu ermitteln, die auf die verschiedenen untersuchten Prozesse zugeschnitten sind.

Die anschliessende Optimierung dieser Modelle in Bezug auf Kennzahlen soll die richtigen Auslegungs- und Betriebsbedingungen für diese Technologien garantieren, um die angestrebte Nachhaltigkeit der industriellen Anwendung zu erreichen.

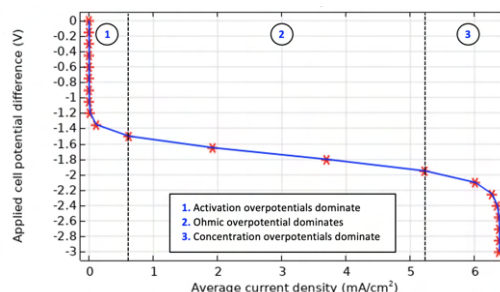


Abb. 1: Simulierte Strom-Spannungskennlinie einer Durchflussszelle mit Aufschlüsselung der Einflüsse auf die erhaltene Zellpotentialdifferenz.

Referenzen:

[1] Website zum MiEl-Projekt: <https://project-miel.eu/>

2.2 Porenskalige Modellierung elektrochemischer Syntheseprozesse mittels Lattice-Boltzmann-Methoden

Poröse Elektroden sind eine wichtige Komponente elektrochemischer Durchflusszellen für die Elektrifizierung der Synthese von Feinchemikalien. Das komplexe Zusammenspiel von Mehrphasenströmung, Stofftransport, elektrochemischen und chemischen Reaktionen in diesen Geometrien stellt eine Herausforderung für die Prozessoptimierung dar. Im Rahmen des Projekts MiEI [1] entwickeln wir ein mesoskaliges Lattice-Boltzmann-Modell zur Simulation porenskaliger Phänomene und zur Bestimmung effektiver Parameter für makro-homogene Zellmodelle.

Contributors: A. Dullak, R. Schärer, J. Schumacher
Partners: ICT, UvA, DTU, UWK, UCT Prague, SU, INO, EICHEM, JAN, KIT, USZ
Funding: Horizon-MSCA-2021-DN-01-01
Duration: 2023–2026

Im MiEI-Projekt [1] werden neuartige Synthesetechnologien für die chemische Industrie durch Kombination elektrochemischer Systeme, Mikroverfahrenstechnik und Reaktionstechnik entwickelt. Elektrochemische Durchflusszellen sind essentiell für die grossskalige kontinuierliche Produktion von Feinchemikalien. Am ICP entwickeln wir gekoppelte physikalische Modelle zur Vertiefung des Verständnisses und zur Optimierung elektrochemischer Zellen. Während parallele Arbeiten die Kontinuumskala betreffen, geht es in dieser Arbeit um die Modellierung von Transportprozessen und der elektrochemischen Reaktionen auf der Porenskala. Poröse Elektroden bestimmen Effizienz und Selektivität elektrochemischer Syntheseprozesse, besonders bei Mehrphasensystemen wie Reaktionen mit Gasblasenbildung oder nicht mischbaren Flüssigphasen. Das komplexe Porennetzwerk kontrolliert die Reaktantenzugänglichkeit, Produktentfernung und die Verteilung von Strom und elektrischem Potenzial.

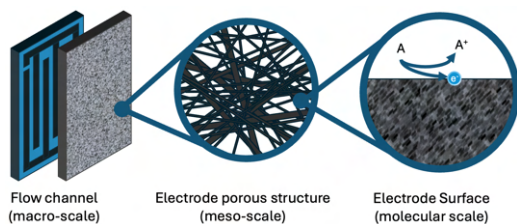


Abb. 1: Überblick über die Skalen, die bei der Modellierung von Strömungen in porösen Elektroden beteiligt sind.

Der Fokus dieser Forschung liegt auf der Entwicklung eines Lattice-Boltzmann-Frameworks zur Simulation von Zweiphasenströmungen, Stofftransport einschliesslich Migration und mehrstufigen elektrochemischen Reaktionen in realistischen porösen Geometrien. Diese Geometrien werden durch Röntgen- μ CT-Tomographie porö-

ser Elektroden gewonnen. Das Modell ist geeignet für die Lösung von Strömungen mit einem hohen Viskositäts- zu Dichteverhältnisses zwischen den Fluidphasen sowie für die Berücksichtigung von Oberflächenspannungseffekten durch Freie-Energie-Mehrphasenmodelle und Multi-Relaxationszeit-Kollisionsoperatoren. Über die porenskalige Simulation hinaus nutzen wir die Ergebnisse zur Hochskalierung auf die Kontinuumskala. Dies erfolgt durch Extraktion effektiver Parameter wie Permeabilität und Diffusivität, welche in makro-homogenen Modellen benötigt werden und die die wesentliche Physik der porösen Elektroden für Simulationen auf der Zellskala beinhalten. Es wurde eine gekoppelte Lattice-Boltzmann-Simulation von Fluidströmung und Stofftransport in Kombination mit einem Finite-Differenzen-Lösungsschema für das elektrische Potenzial implementiert. Die elektrochemischen Reaktionen werden als Randbedingung berücksichtigt. Die Implementierung wurde in einem Modell für den Ionentransport durch Advektion, Diffusion und Migration in Kanalströmung getestet. Die Simulationsergebnisse beinhalten den Transport entgegengesetzt geladener Ionen.

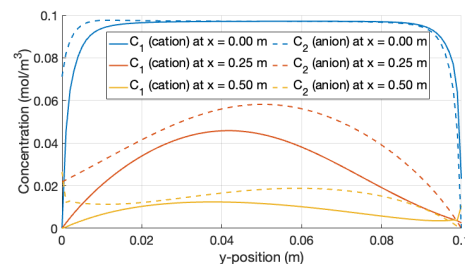


Abb. 2: Konzentrationsprofil

Literatur:

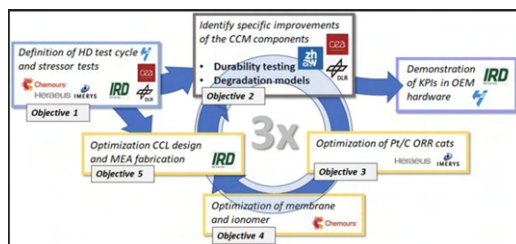
[1] MiEI-Projekt-Website: <https://project-miei.eu/>

2.3 Robuste PEMFC-Membran-Elektroden für Schwerlastanwendungen

Ziel dieses Projekts ist es, die technischen Herausforderungen zu meistern, um die Haltbarkeit von Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) für Schwerlastfahrzeuge zu erhöhen. Diese Herausforderungen werden mit einer Kombination aus modellbasiertem Design und der Entwicklung langlebiger katalysatorbeschichteter Membranen angegangen, wobei Materialien für den Schwerlastbetrieb bei hohen Temperaturen (bis zu 105 °C) verwendet werden. Das Ziel entspricht einer Lebensdauer von 20'000 Stunden bei einer Leistungsdichte von 1,2 W/cm² bei einer Zellspannung von 0,65 V und einer Platinbeladung von 30 g/kW.

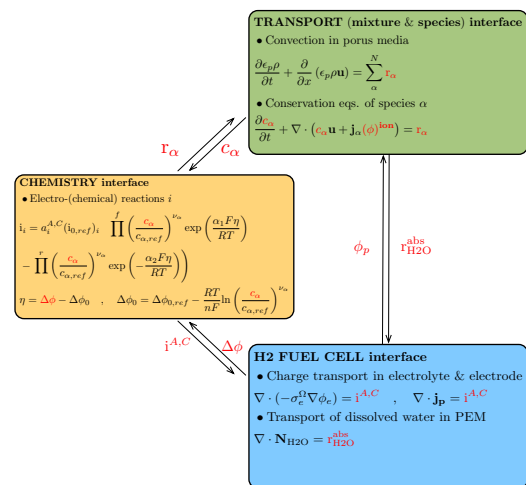
Contributors: J.O. Schumacher, E. Scoletta, R.P. Schärer, M. Diana
 Partners: DLR, IRD, Imerys, CEA, Chemours, Heraeus, Symbio
 Funding: Horizon
 Duration: 2023 – 2026

Das Projekt zielt auf eine höhere Langlebigkeit von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFCs) durch die Entwicklung anwendungsspezifischer Materialien, modellbasierter Zellkonzepte und Betriebsstrategien ab. Grundlage ist die strategische Forschungs- und Innovationsagenda (SRIA) von Clean Hydrogen. Ziel ist es, robuste MEAs für Schwerlastanwendungen bis zum Technologiereifegrad TRL-4 zu bringen. Verschiedene Institute tragen zum Projekt bei: DLR, CEA und ZHAW sind für MEA-Charakterisierung, Ex-situ-Analysen und modellbasierte Entwürfe verantwortlich. Komponentenlieferanten (IRD) und Materiallieferanten (IMERYS, Heraeus, Chemours) liefern verbesserte Teilkomponenten der katalysatorbeschichteten Membran (CCM).



Methodik der PEMTASTIC-Partner.

Wir haben ein Modell einer differentiellen PEMFC-Testzelle entwickelt, das den Transport von Gasspezies, Wasser, Ladung und Wärme sowie die elektrochemischen Reaktionen in den Katalysatorschichten berücksichtigt. Darüber hinaus können wir den Leistungsabfall aufgrund von chemischer Membrandegradation und der Degradation der Katalysatorschichten simulieren.



Kopplungsdiagramm des Modells einer differentiellen Testzelle.

Die chemische Membrandegradation wird durch Hydroxylradikale verursacht, die durch Reaktionen mit Wasserstoffperoxid entstehen. Hydroxylradikale können eine Spaltung der Polymerketten und den Verlust der mechanischen Membranintegrität verursachen. Darüber hinaus haben wir ein Modell zur Degradation der Katalysatorschicht [1] implementiert. Damit simulieren wir den Leistungsabfall, der auf die Abnahme der protonischen Leitfähigkeit der Membran und das Wachstum von Platinpartikeln zurückzuführen ist, was zu einem Verlust der elektrochemischen Oberfläche in den Katalysatorschichten führt. Ausserdem wollen wir das zeitabhängige Verhalten der Brennstoffzelle bei Lastzyklen eines Fahrzeugs berechnen.

Literatur:

[1] A. Kregar et al., *J. Power Sources*, Vol. 514, 230542, 2021.

2.4 Mesoskalenmodelle der Katalysatorschicht in PEMFCs

Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFCs) sind eine vielversprechende Technologie, die zur Dekarbonisierung der Industrie und des Verkehrssektors beiträgt. Das von der EU finanzierte Projekt PEMTASTIC zielt darauf ab, die Lebensdauer von Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs) für PEMFCs durch einen kombinierten experimentellen und modellbasierten Ansatz zu erhöhen. Die Kathodenkatalysatorschicht wirkt sich aufgrund der trägen Sauerstoffreduktionsreaktion stark auf die Gesamtleistung aus. Darüber hinaus wird die Langlebigkeit der Brennstoffzelle durch Degradationsprozesse wie Kohlenstoffkorrosion, Platinauflösung oder Ionomerabbau beeinträchtigt. Am ICP entwickeln wir mesoskopische Modelle um die gekoppelten Prozesse auf der Mesoskala besser zu verstehen und verbesserte Parametrisierungen für makrohomogene Zellmodelle zu entwickeln.

Contributors: R. P. Schärer, E. Scoletta, M. Diana, J. O. Schumacher
Partners: DLR, IRD, Imerys, CEA, Chemours, Heraeus, Symbio
Funding: Horizon
Duration: 2023 – 2026

Die Kathodenkatalysatorschicht in PEMFCs besteht aus Kohlenstoffpartikeln, die als Strukturträger dienen, katalytischen Platin-Nanopartikeln und protonenleitendem Ionomer. Die gesamte Sauerstoffreduktionsreaktion wird häufig vereinfacht als Einschrittreaktion $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ modelliert. Der eigentliche Prozess besteht jedoch aus mehrstufigen Reaktionswegen und konkurrierende Reaktionen.

Die Sauerstoffreduktionsreaktion auf Platinoberflächen umfasst aufeinander folgende Elektronentransferschritte, die je nach der lokalen elektrochemischen Umgebung zu unterschiedlichen Reaktionsprodukten führen können. Ein kritischer Aspekt ist die Bildung von Wasserstoffperoxid als Zwischenprodukt, das nicht nur die Gesamtreaktionseffizienz beeinträchtigt, sondern auch als Schlüsselreaktant bei Membranabbauprozessen dient.

Das Verständnis dieser gekoppelten mehrstufigen Oberflächenreaktionen ist von entscheidender Bedeutung, da Zwischenprodukte die verfügbaren aktiven Oberflächenstellen blockieren können, was die katalytische Aktivität verringert. Darüber hinaus treibt die vernetzte Natur dieser Reaktionen parasitäre Prozesse wie die Kohlenstoffkorrosion an, bei der die geschwächte strukturelle Integrität des Kohlenstoffträgers letztlich zum Zusammenbruch der Mikrostruktur und zu erheblich veränderten Transportwiderständen führen kann.

Am ICP entwickeln wir instationäre und räumlich aufgelöste Modelle, die diese mehrstufigen Reaktionswege als Reaktionsnetzwerk beschreiben, das

die Sauerstoffreduktionsreaktion, die Wasserstoffperoxidbildung und die Kohlenstoffkorrosionsreaktionen verbindet (siehe Abbildung 1). Unser Ansatz integriert ein Doppelschichtmodell, das die Bildung von Oxidschichten auf der Platinoberfläche berücksichtigt und eine genaue Vorhersage der lokalen chemischen Umgebung an der Reaktionsebene ermöglicht.

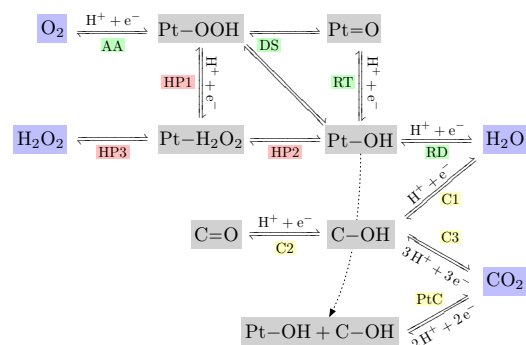


Fig. 1: Heterogene mehrstufige Reaktionen auf Platin- und Kohlenstoffoberflächen.

Das mehrstufige Oberflächenreaktionsmodell ist mit Massentransportgleichungen für mobile Reaktanten gekoppelt. Um die lokalen Transportwiderstände zu erfassen, berücksichtigen wir die Diffusionsprozesse entlang den Transportwegen durch die Porenphase, Wasserschichten und Ionomerdünnschichten über den reaktiven Pt-Nanopartikeln. Darüber hinaus berücksichtigen wir die dynamische Entwicklung des zweiphasigen Flüssigkeits-Gas-Gemisches in der porösen Katalysatorstruktur, das sich entscheidend auf die lokalen Transportwiderstände auswirkt.

Literatur:

[1] Webseite des PEMTASTIC-Projekts: <https://pemtastic-project.eu/>

2.5 Multiskalen-Modellierung organischer Flussbatterien

Redox-Fluss-Batterien (RFBs) sind eine vielversprechende Technologie für die stationäre Speicherung von Energie aus erneuerbaren Energiequellen. Organische Moleküle sind eine attraktive Alternative zu herkömmlichen Elektrolyten auf Metallbasis, da sie vor Ort synthetisiert werden können und somit die Risiken in der Lieferkette verringern. Im Rahmen des europäischen Marie Skłodowska-Curie Doktoranden-Netzwerks PREDICTOR wird eine schnelle Hochdurchsatzmethode entwickelt, um Materialien für elektrochemische Energiespeicher zu identifizieren und zu entwickeln. Dieser Ansatz umfasst Modellierungs- und Simulationswerkzeuge für das computergestützte Screening organischer Chemikalien, automatisierte chemische Synthese und Charakterisierung, auf künstlicher Intelligenz basierende Selbstoptimierungsmethoden und Datenmanagementsysteme.

Contributors: R. P. Schärer, J. O. Schumacher
 Partners: ICT, SCAI, DTU, CNRS, KIT, UNSW, Aalto University, CEB, CellCube, SCM, AM
 Funding: European Union's Marie Skłodowska-Curie programme
 Duration: 2024–2028

RFBs stellen eine vielversprechende elektrochemische Energiespeichertechnologie dar, bei der Energie in flüssigen Elektrolyten mit gelösten elektroaktiven Molekülen gespeichert wird. Diese Elektrolyte zirkulieren durch elektrochemische Flusszellen, wo die Moleküle an den Elektrodenoberflächen reversible Redoxreaktionen durchlaufen und dabei Energie durch Elektronenübertragung in den beiden Halbzellen speichern und freisetzen.

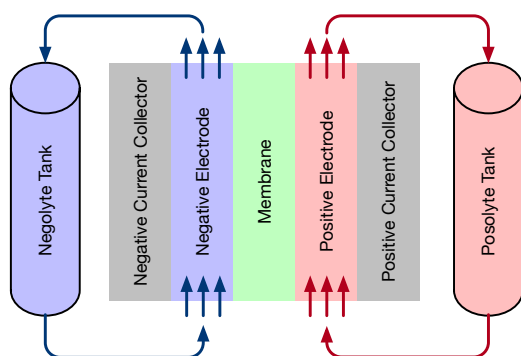


Fig. 1: Vereinfachte Geometrie einer Flusszelle.

Im Rahmen des PREDICTOR-Projekts [1] werden Hochdurchsatzmethoden entwickelt, die das Screening und die Materialentwicklung für elektrochemische Energiespeicher revolutionieren. Das Projekt fokussiert sich auf RFBs als eine der vielversprechendsten Technologien für die mittel- bis langfristige Energiespeicherung.

Das Projekt deckt drei Bereiche ab: 1) Modellierung, Simulation und rechnerisches Screening, 2) experimentelle Hochdurchsatzmethoden und 3) Datenmanagement und Validierung. Eine bestehende rechnergestützte Screening-Methode auf

der Grundlage eines digitalen Batteriezwillings aus dem EU-finanzierten SONAR-Projekt dient als Ausgangspunkt für das Screening konventioneller und Shuttle-basierter RFBs.

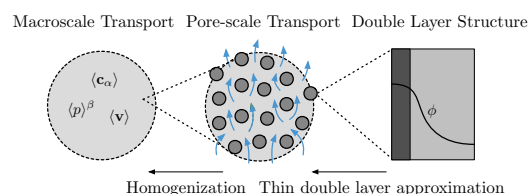


Fig. 2: Multiskalenmodellierung poröser Elektroden.

Das ICP trägt zum PREDICTOR-Projekt bei, indem es zwei Doktoranden betreut, die an kritischen Modellierungskomponenten arbeiten. Das erste Promotionsprojekt konzentriert sich auf Prozesse an der elektrochemischen Grenzfläche durch Beschreibung der Doppelschichtstruktur und mehrstufiger Reaktionen. Dieses Grenzflächenmodell wird in Modelle auf der Porenskala integriert um den reaktiven Massentransport in porösen Elektroden zu beschreiben und makroskopische Transporteigenschaften abzuleiten (siehe Abbildung 2). Das zweite Promotionsprojekt entwickelt makroskopische Modelle auf der Zellskala, um den gekoppelten Transport von Masse, Ladung und Energie zu beschreiben. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung und Integration von thermodynamisch konsistenten Membranmodellen. Darüber hinaus trägt das ICP aktiv zum Datenmanagement bei, das für den Erfolg des Projekts entscheidend ist.

Literatur:

[1] Webseite des PREDICTOR-Projekts: <https://www.rfb-predictor.eu>

3 Organische Elektronik und Photovoltaik

Organische Halbleiter werden in einer grossen Bandbreite von Anwendungen eingesetzt, meist in Form von OLED-Displays in Alltagsprodukten, die von Mobiltelefonen bis zu 77-Zoll-Fernsehern reichen.

Die besonderen Vorteile der OLED-Technik liegen in ihrer dünnen Bauweise, dem grossen Betrachtungswinkel, der Farbskala und hohen Effizienz bei der Energieumwandlung. OLEDs 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, welche die bedeutendste sich in Entwicklung befindende Photovoltaik-Technologie ist und auch ein grosses Potenzial bei LED-Anwendungen und Memristoren hat. Lumineszierende Quantenpunkte sind wichtige Bestandteile neuartiger Bildschirme, die wir ebenfalls charakterisieren. Tiefer in der unsichtbaren Bandbreite der elektro-magnetischen Wellen ist die Terahertz-Photonik, ein wachsendes technisches Feld für nicht-invasive Diagnose-Anwendungen.

Das ICP betreibt Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der OLEDs, OPV, Perowskit-PV und nicht linearen optischen Kristalle für Terahertz-Photonik-Messsysteme. Im ICP-Labor stellen wir zu Forschungs- und Entwicklungszwecken OLEDs und neuartige Solarzellen in einem kleinen Rahmen her, zusätzlich haben wir ein neuartiges Terahertz-Photonik-Messsystem aufgebaut. Im unsichtbaren Spektralbereich der elektromagnetischen Wellen ist die Terahertz-Photonik angesiedelt als ein wachsendes technisches Feld für nicht invasive Diagnose-Anwendungen. Nebst numerischen Methoden zur Lösung von Modellgleichungen haben wir auch Erfahrungen gesammelt mit maschinellem Lernen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die laufenden Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die auf diesem interdisziplinären Forschungsgebiet des ICP ausgeführt werden.



A. Sachan



C. Kirsch



E. Knapp



F. Garjan



F. Ji



K. Pernstich



M. Jazbinsek



U. Puc



E. Comi



M. Battaglia



M. Auer



M. Torre



O. Zbinden



B. Ruhstaller



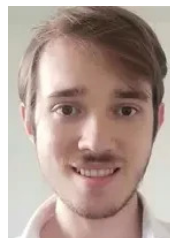
W. Tress



R. Wirth



T. Krucker



T. Sachsenweger

3.1 Terahertz-Bildgebung von Verkapselungsschichten für Perowskit-Solarzellen

Im Rahmen des internationalen Innosuisse-KIAT-Forschungsprojekts **PACSTATE** ist eines der Ziele die Entwicklung von Terahertz-Abbildungs- und Charakterisierungsmethoden für neuartige Verkapselungsfilme, die in Perowskit-Solarzellen verwendet werden. Durch den Einsatz der Terahertz-Technologie wollen wir ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Physik und der Langzeitstabilität der Verkapselungsmaterialien gewinnen und so die Leistung und Lebensdauer der Perowskit-Solarzellen verbessern.

Contributors: U. Puc, M. Auer, M. Jazbinsek

Partners: Solaronix, Fluxim, ZHAW-IMPE, Ajou University, UNIS, Pusan National University

Funding: Innosuisse – KIAT South Korea

Duration: 2024–2026

Das an der ZHAW ICP entwickelte Terahertz (THz)-System wird in diesem Projekt zur Untersuchung der Verkapselungsmaterialien für Perowskit-Solarzellen eingesetzt. Ziel ist es, die THz-Technologie für fortschrittliche zerstörungsfreie Prüfmethoden (NDT) zu nutzen, um die Gleichförmigkeit der Materialien, Degradationsnebenprodukte und optische/elektrische Eigenschaften zu bewerten, die die photovoltaische Leistung beeinflussen. Unser THz-System basiert auf organischen elektro-optischen Kristallen und kann ultra-breitbandige THz-Wellen mit einem Frequenzbereich von bis zu 20 THz erzeugen und nachweisen.[1] Dies verschafft uns einen einzigartigen Vorteil gegenüber kommerziell erhältlichen THz-Systemen bei der Erkennung von Molekülschwingungen im fernen Infrarot und Phononenmoden (optische Gitterschwingungen) in verschiedenen Materialien sowie von Ladungstransportphänomenen in leitenden oder halbleitenden Materialien, [2,3].

Verkapselungsfolien werden verwendet, um die Leistung von Solarzellen zu verlängern und zu erhalten, indem das Eindringen von Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit und Sauerstoff begrenzt wird. Diese Verkapselungen müssen optimiert werden, um bei der Anwendung auf Perowskit-Solarzellen eine maximale Leistung zu erzielen. Dafür untersuchen wir verschiedene Arten neuartiger Verkapselungen mit Hilfe von THz-Wellen, indem wir die Materialveränderungen nach dem Aufbringen auf

Perowskit-Zellen untersuchen. Ausserdem untersuchen wir die Homogenität der Schichten, indem wir die Gleichmässigkeit und Defekte analysieren. Die THz-Bildgebung ist ein ideales Instrument für solche Untersuchungen, da sie äusserst empfindlich auf Dickenschwankungen und Defekte an der Oberfläche oder im Material reagiert. Ein Beispiel für die THz-Bildgebung ist im Bild zu sehen.

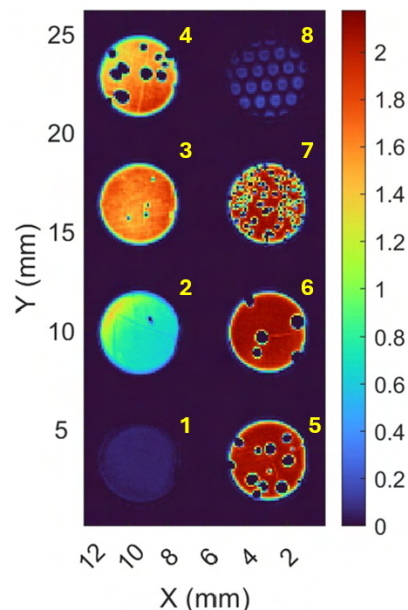


Abb. 1: Die THz-Amplitudenabbildung von Verkapselungsmaterialien zeigte Oberflächenfehler, die sich entwickelten, nachdem das Material verschiedenen Temperaturen ausgesetzt wurde. Die untersuchten Temperaturen waren wie folgt: 1 – 80 °C, 2 – 90 °C, 3 – 110 °C, 4 – 130 °C, 5 – 150 °C, 6 – 170 °C, und 7 – 200 °C. Das Originalmaterial (Nr. 8) wurde bei Raumtemperatur untersucht. Die Auflösung der THz-Bildgebung betrug 100 μm .

Literatur:

[1] Puc, Bach, Günter, Zgonik, Jazbinsek; Adv. Photonics Res. 2 (2021).

<https://doi.org/10.1002/adpr.202000098>

[2] Puc, Yang, Kim, Kwon, Jazbinsek; Opt. Mater. Express 13 (2023).

<https://doi.org/10.1364/OME.475427>

[3] Santhosh, Puc, Jazbinsek, Oberlintner, Shvalya, Zavasnik, Cvelbar; Appl. Surf. Sci. 682, 161698 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161698>

3.2 Terahertz-Spektroskopie von komplexen Chalkogeniden

In diesem schweizerisch-ukrainischen Forschungsprojekt wollen wir die Ultrabreitband-Terahertz (THz)-Eigenschaften und -Funktionalitäten von Chalkogenidkristallen untersuchen. Indem wir neue wertvolle Informationen über (photo)leitende, dielektrische und nichtlineare optische Parameter dieser Materialien erhalten, wollen wir neue Materialien für die Erzeugung, Modulation und Detektion von THz-Strahlung identifizieren. Das ICP ist für die optische, nichtlineare optische und THz Charakterisierung der Kristalle verantwortlich, die von dem ukrainischen Partner hergestellt werden.

Contributors: M. Auer, U. Puc, M. Jazbinsek
 Partners: Uzhhorod National University (Ukraine)
 Funding: SNSF
 Duration: 2025–2028

Bei der THz-Photonik ist das messbare Spektrum stark von der verwendeten THz-Quelle und dem Detektormaterial abhängig. Hochgradig nichtlineare optische Molekulkristalle bieten einzigartige Vorteile für die Erzeugung von THz-Wellen Erzeugung im Vergleich zu alternativen Methoden. Sie haben einen viel breiteren THz-Erzeugungsbereich, der den gesamten THz-Bereich von 0,1-20 THz abdecken kann. Die meisten organischen Kristalle führen jedoch zu unerwünschten Modulationen des Spektrums und einer begrenzten Ausgangseffizienz aufgrund von phononeninduzierter Absorption [1-3]. Am ICP verwenden wir organische Kristalle als THz-Quelle und -Detektor, was zu einem messbaren THz-Bereich um 20 THz führt [4]. THz-Zeitbereichsspektroskopie (THz-TDS) kann in ei-

nem Transmissions- oder einem Reflexionsaufbau durchgeführt werden. Transmissionsaufbauten liefern genauere Ergebnisse und sind einfacher zu implementieren und werden daher am häufigsten verwendet. Allerdings ist die messbare Absorption begrenzt, und stark absorbierende Proben können nur in einer Reflexionsanordnung gemessen werden. Der Aufbau am ICP ist so konzipiert, dass er von Transmissions- auf Reflexionsgeometrie umgeschaltet werden kann. Mit beiden verfügbaren Messgeometrien und einem breiten THz-Bereich ist das THz-System am ICP optimal geeignet, um die THz-Eigenschaften komplexer Proben wie Chalkogenide zu extrahieren und mögliche Materialien für photonische THz-Anwendungen zu identifizieren.

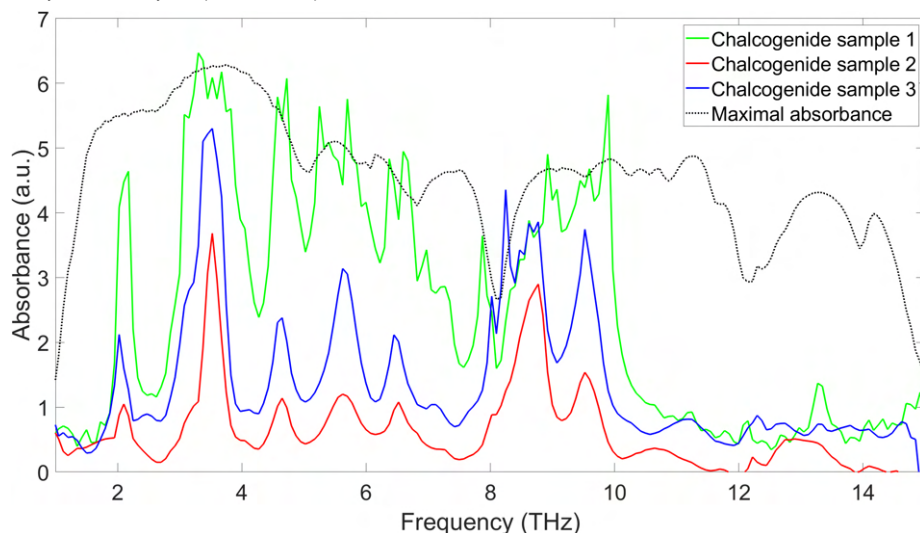


Abb. 1: Die gemessene Absorption von drei Chalkogenid-Einkristallen mit unterschiedlichen Dicken unter Verwendung von THz-TDS im Transmissionsmodus am ICP. Die Peaks weisen auf viele Phononmoden hin, die für die Dispersion der dielektrischen Suszeptibilität verantwortlich sind [4]. Die gestrichelte Linie zeigt das Maximum der messbaren Absorption im Transmissionsmodus an, das bei der dicksten Probe (Probe 1) in diesem Beispiel für mehrere Peaks erreicht wird.

- [1] Kwon, O-Pil and Jazbinsek, Mojca, *J. Mater. Chem. C* Vol. 12, No. 35, 2024.
- [2] Park, Kim, Auer, Shin, Yoon, Yun, Yu, Puc, Kim, Jazbinsek, Rotermund, Kwon, *Applied Physics Reviews* Vol. 12, No. 1, 2025.
- [3] Lee, Puc, Kim, Jazbinsek, Kwon, *Advanced Optical Materials* Vol. 12 No. 13, 2024.
- [4] Puc, Bach, Günter, Zgonik, Jazbinsek, *Adv. Photonics Res.* 2 2021.

3.3 Design und Entwicklung industriekompatibler Charakterisierungsgeräte für neuartige Perowskit- und Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen (DICE)

Dieses schweizerisch-finnische Innovationsprojekt hat zum Ziel, innovative Testsysteme für neuartige Solartechnologien zu entwickeln, mit Fokus auf Perowskit- und Perowskit/Silizium-Tandemzellen. Im Mittelpunkt von DICE stehen dabei ein industrieller Hochgeschwindigkeits-Sonnensimulator, ein multispektrales Bildgebungssystem zur Qualitätskontrolle sowie Simulationsmodelle zur Untersuchung der Ionenmigration und deren Einfluss auf die Effizienz der Zellen.

Contributors: E. Comi, C. Kirsch, E. Knapp
Partners: Endeas Oy, Fluxim AG, Abo Akademi, Tampere University, EPFL
Funding: Eureka/Innosuisse
Duration: 2024–2027

Perowskit-Solarzellen (PSC) und Perowskit/Silizium-Tandemzellen (PST) zählen zu den vielversprechendsten Ansätzen für hocheffiziente Photovoltaik. Während PSCs bereits zertifizierte Wirkungsgrade von 26,1% erreicht haben, liegen PSTs sogar bei fast 35%. Durch die Kombination der Vorteile beider Technologien besteht grosses Potenzial für die industrielle Anwendung.

Eine spezielle Eigenschaft von PSCs ist die Anwesenheit mobiler Ionen, die transiente Prozesse beeinflussen. Diese beeinflussen die elektrische Antwort der Zellen und führen zu Phänomenen wie Hysterese und Messgeschwindigkeits-Abhängigkeit bei IV-Messungen. Dies erschwert insbesondere die schnelle, präzise Effizienzerfassung, wie sie in industriellen Fertigungsprozessen gefordert ist.

Der Finnische Industriepartner Endeas bringt umfassende Erfahrung in der Inline-Messung von Siliziumzellen mit und kann IV-Kennlinien innerhalb kürzester Zeit erfassen. Ziel ist es, diese Messtechnologie auch für PSTs zugänglich zu machen. Aufgrund der komplexen Transienten in PSCs ist dies jedoch nur möglich, wenn zusätzliche Informationen zur Interpretation der Messdaten bereitgestellt werden. Hier kommen Simulationen ins Spiel.

Das ICP und Fluxim nutzen dafür die Software Setfos, das auf Drift-Diffusions-Modellen basiert und Ionenmigrationsprozesse in den Zellen zeitabhängig simulieren kann. Ein präzises Modell kann durch Parameterextraktion und maschinelles Lernen dabei helfen, die Steady-State Performance zu berechnen.

Vor der Modulherstellung, müssen PSTs hochskaliert werden. Dabei treten meist laterale In-

homogenitäten und Defekte auf. Diese können durch bildgebende Verfahren wie Photolumineszenz (PL), Elektrolumineszenz (EL) oder Lock-in Thermografie (DLIT, ILIT) analysiert werden. Fluxim und das ICP haben bereits ein multispektrales Imaging-System entwickelt (s. Abb. 1), das nun für PSTs, insbesondere hinsichtlich Kamera und Beleuchtung, auf den nötigen Spektralbereich erweitert werden soll. Zudem wird das 1D+2D-Simulationstool Laoss um eine dritte Elektrode ergänzt, um laterale Effekte von Tandemzellen simulieren zu können.

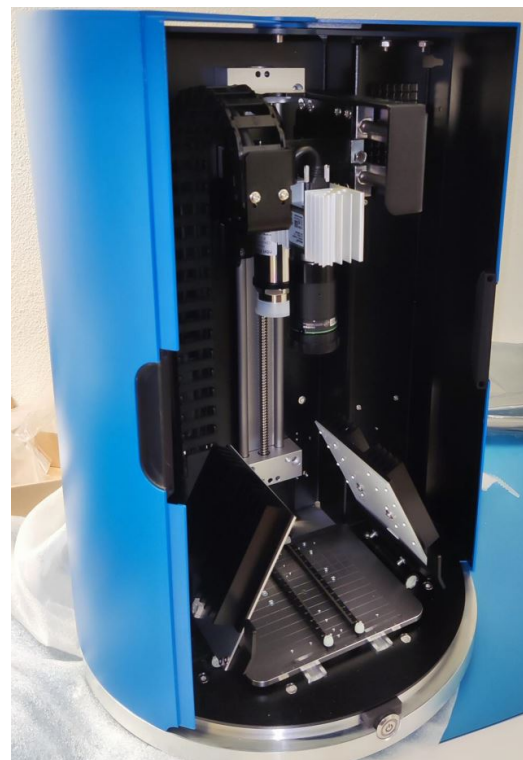


Abb. 1: Dieser Imaging-Prototyp wird im DICE-Projekt weiterentwickelt.

3.4 Untersuchung des Ladungstransports in organischen Halbleitern mit elektrochemischen Methoden und theoretischen Modellen

Organische Halbleiter werden heutzutage in vielen verschiedenen technologischen Gebieten verwendet. Um hergestellte Produkte zu verbessern, müssen diese Materialien aber vollumfänglich verstanden werden. In unserem Projekt streben wir an, die organischen Halbleiter anhand elektrochemischer Messungen in Kombination mit Computersimulationen besser zu charakterisieren.

Contributors: Ş. C. Cevher, G. Kissling, B. Ruhstaller, K. P. Pernstich

Partners:

Funding: SNSF

Duration: 2020–2025

Organische Halbleiter werden im Bildschirm- und Beleuchtungsbereich eingesetzt und kommen auch in neuartigen Transistoren, Sensoren und Solarzellen zur Anwendung. Um die Anwendungen weiter zu optimieren, benötigt man ein besseres Verständnis der physikalischen Vorgänge und genauere Materialparameter. In diesem Projekt untersuchen wir organische Halbleiter mittels elektrochemischer Methoden und multiphysikalischer Modelle. Ziel des Projekts ist es, eine Methode zu entwickeln, welche es ermöglicht spezielle Eigenschaften und Materialparameter organischer Halbleiter zuverlässig zu eruieren.

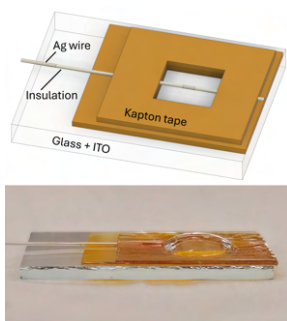


Abb. 1: Integrierte Referenz-Gegen-Elektrode (IRCE) mit Kapton-Klebeband, das den teilweise isolierten Silberdraht fixiert und ein Reservoir für den Gel-Polymer-Elektrolyten bildet.

Wir haben zunächst elektrochemische Methoden in Lösung verwendet [1], um die Energieniveaus organischer Halbleitermoleküle zu bestimmen. Dieses Verfahren ist zwar einfach umzusetzen, hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: Die gemessenen Energieniveaus unterscheiden sich oft deutlich von denen im Festkörper, also dem Zustand, in dem die Materialien tatsächlich eingesetzt werden. Um dieses Problem zu lösen, haben wir eine neue Technik entwickelt [2], die elektro-chemische Messungen direkt an Dünnschichten ermöglicht. Im Zentrum steht eine inte-

grierte Referenz-Gegen-Elektrode (IRCE), die in Abb. 1 gezeigt ist. Sie besteht aus einem kleinen Reservoir mit einem Gel-Polymer-Elektrolyten und einem eingebetteten Silberdraht als quasi-Referenzelektrode. Die kompakte Struktur kann sanft auf ein mit Halbleitermaterial beschichtetes Substrat gepresst werden, sodass Voltammetrie an Dünnschichten möglich ist.

Mit diesem Aufbau haben wir beispielsweise eine Dünnschicht des OLED-Materials NPB vermesen. Zur Kalibrierung wurde die IRCE mit einer dünnen Schicht Ferrocen beschichtet, einem bekannten Redox-Standard. Das resultierende Voltammogramm in Abb. 2 zeigt sowohl die Redox-Peaks von Ferrocen als auch den Beginn der Oxidation von NPB. Daraus konnten wir das HOMO-Niveau von NPB zu -5.43 eV bestimmen, was sehr gut mit Literaturwerten übereinstimmt, die mit aufwendigeren Methoden gewonnen wurden.

Diese Resultate zeigen, dass unsere Technik zuverlässige und praxistaugliche Energieniveaumessungen in realitätsnahen Schichtstrukturen erlaubt. Wir sind überzeugt, dass sich diese Methode als Standard in der Forschung zu organischer Elektronik etablieren kann.

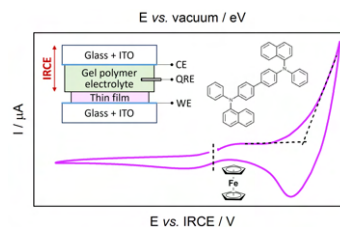


Abb. 2: Elektrochemische Messung einer NPB-Dünnschicht mit der IRCE. Das Voltammogramm zeigt sowohl die Redox-Peaks von Ferrocen (zur Kalibrierung) als auch den Beginn der Oxidation von NPB, aus dem das HOMO-Niveau bestimmt wird.

[1] G. P. Kissling et. al., doi: 10.1016/j.orgel.2023.106888

[2] S. C. Cevher et al., doi: 10.1016/j.orgel.2024.107152.

3.5 Beschleunigte Alterung und Modellierung von Perowskit-Solarzellen

Im Rahmen dieses vom SNF geförderten Forschungsprojekts in Zusammenarbeit mit dem Saule Research Institute in Polen verfolgen wir das Ziel, die Degradation von Perowskit-Solarzellen schnell und zuverlässig zu verstehen, zu modellieren und vorherzusagen. Hierzu nutzen wir beschleunigte Alterung in Kombination mit zerstörungsfreier in-situ-Charakterisierung. Zur Unterstützung dieses Ziels haben wir einen hausintern entwickelten Alterungsaufbau geschaffen, der sowohl die Lichtintensität als auch die Temperatur variieren kann und den Betrieb am Maximum Power Point oder an anderen kritischen Arbeitspunkten ermöglicht.

Contributors: S. P. Shaji, K. Meraji, W. Tress
 Partners: Saule Research Institute Wroclaw Polen
 Funding: SNF
 Duration: 2023–2027

Perowskit-Solarzellen (PSCs) gehören zu den am schnellsten fortschreitenden Photovoltaik-Technologien und haben im Vergleich zu anderen Solarzelltypen beispiellose Fortschritte bei der Leistungsumwandlungseffizienz (PCE) erzielt. Trotz im Labor nachgewiesener Wirkungsgrade von über 26.9% nach fast zwei Jahrzehnten Forschung wird ihre breite Kommerzialisierung durch eine zentrale Herausforderung gehemmt: die langfristige Betriebsstabilität.

Beschleunigte Alterungsmethoden ermöglichen eine schnelle und präzise Bewertung der Lebensdauer von Bauteilen unter realistischen Betriebsbedingungen. Dieses Projekt zielt darauf ab, das Stabilitätsproblem durch den Einsatz kontrollierter Stressfaktoren zu adressieren, die eine Degradation hervorrufen, während in-situ-Charakterisierungsmethoden genutzt werden, um zugrunde liegende Degradationsmechanismen unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen. Zur Analyse der entstehenden hochdimensionalen Daten integrieren wir Big-Data-

Analytik.

Wir haben eine maßgeschneiderte Plattform zur beschleunigten Alterung entwickelt, die eine präzise Einstellung der Beleuchtungsstärke von 0.1 bis 10 Sonnen sowie eine Temperaturregelung zwischen 10°C und 100°C ermöglicht. Der Aufbau ist modular und glovebox-kompatibel gestaltet, wodurch Degradationsstudien in unterschiedlichen kontrollierten Atmosphären möglich sind. Parallel dazu entwickeln wir Machine-Learning-Algorithmen zur Analyse der umfangreichen Datensätze, die während der Stresstests durch in-situ-Messungen erzeugt werden, mit dem Ziel, rasch Einblicke in sich verändernde Ladungstransportprozesse und Degradationsmerkmale zu gewinnen.

Langfristig soll diese Forschung die Entwicklung stabiler Perowskit-Photovoltaik deutlich beschleunigen und deren Integration in den globalen Energiemarkt erleichtern. Dies würde maßgeblich zur Dekarbonisierung beitragen und die Auswirkungen des Klimawandels auf unsere Gesellschaft mildern.

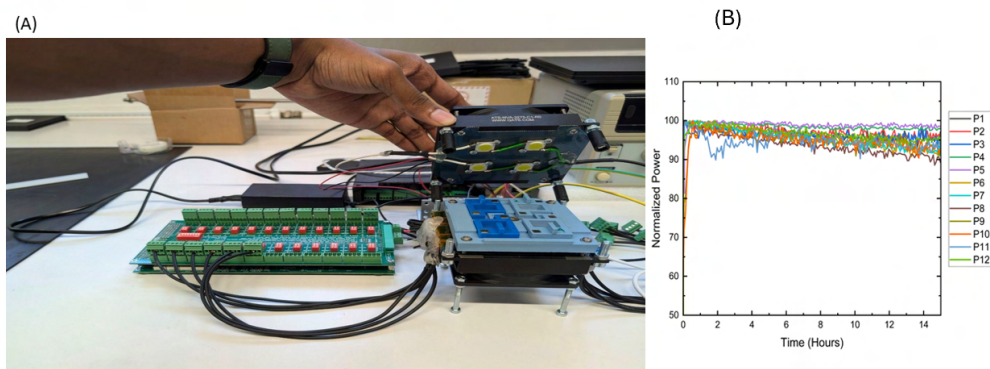


Abb. 1: (A) Alterungsaufbau mit 24-Kanal-MPP-Board sowie temperatur- und lichtintensitätsgesteuertem Probenhalter (B) Stabilitätsdaten einiger Perowskit-Zellen, die in unserem Labor hergestellt wurden.

3.6 Autoencoder für die Parameterschätzung und zur Simulation von Perowskit-Solarzellen

Ein tiefes Verständnis physikalischer Prozesse ist essenziell für die Erforschung von Perowskit-Solarzellen (PSCs), etwa beim Ladungstransport oder der Rekombination. Viele damit verbundene Schlüsselparameter lassen sich jedoch nur schwer oder ungenau messen. Dieses Problem wird durch einen Ansatz gelöst, der Gerätesimulation mit maschinellem Lernen (ML) kombiniert. Die Anwendung auf reale Geräte unterstreicht die praktische Relevanz der Methode.

Contributors: O. Zbinden, E. Comi, E. Knapp, W. Tress

Partners:

Funding: ERC

Duration: 2023–2025

Obwohl Perowskit-Solarzellen (PSCs) mittlerweile Wirkungsgrade von nahezu 27% erreichen, sind viele ihrer physikalischen Prozesse noch nicht vollständig verstanden. Ein tieferes Verständnis dieser Prozesse ist entscheidend, um die Technologie weiterzuentwickeln. Dafür wird ein PSC-Bauelement mithilfe eines Drift-Diffusionsmodells simuliert. Auf Basis dieses Modells werden relevante Parameter zufällig innerhalb realistischer Grenzen variiert, um einen umfangreichen Datensatz zu generieren. Dieser Datensatz dient dem Training eines Autoencoders (AE), der speziell für die Analyse dieser Parameter entworfen wurde. Eine angepasste Verlustfunktion sorgt dafür, dass nicht nur die Ausgangsdaten rekonstruiert, sondern auch die Struktur des latenten Raums sinnvoll erlernt wird. So lässt sich der Einfluss schwer messbarer Parameter auf das elektrische Verhalten datenbasiert erfassen. Nachdem der AE trainiert wurde, können Encoder und Decoder unabhängig voneinander verwendet werden. Der Encoder wird zur Vorhersage physikalischer Parameter

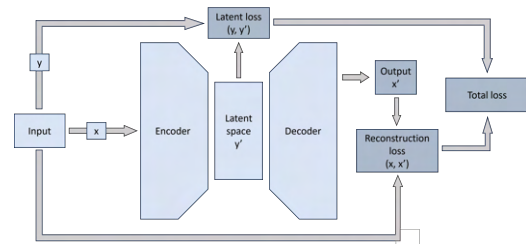


Abb. 1: Die Ströme, bezeichnet als x , werden an den Encoder-Teil der AE weitergeleitet. Die wahren Parameterwerte y , die aus der Simulation bekannt sind, werden nicht an den Encoder weitergegeben, sondern wirken sich nur auf die Verlustfunktion aus.

verwendet, und der Decoder ahmt einen schnellen Gerätesimulator nach. Um die Zuverlässigkeit der AE-Vorhersagen zu demonstrieren, werden die geschätzten Parameter erneut in der Simulation verwendet und die Ergebnisse mit den experimentellen Messungen verglichen. Außerdem werden diese Simulationen mit den von der AE vorhergesagten Strom-Spannungs-Kurven (J-V) verglichen, um zu zeigen, wie gut ML diese Aufgabe bewältigt.

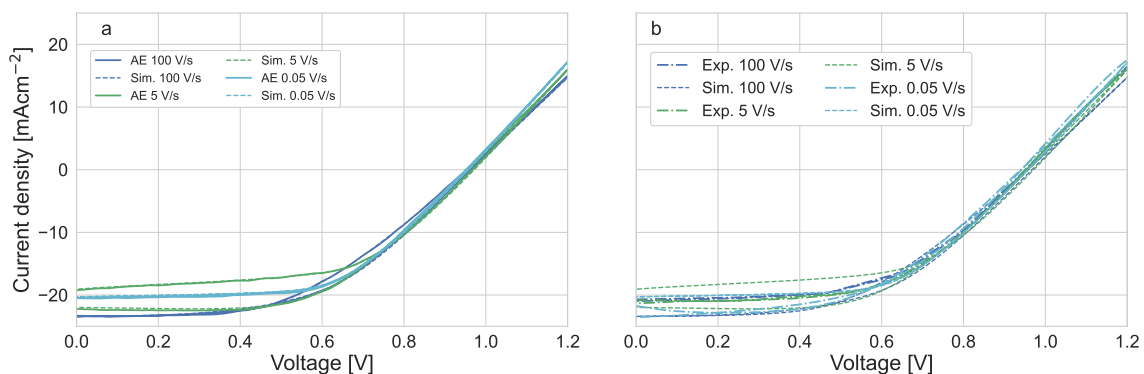


Abb. 2: a vergleicht die vom Decoder vorhergesagten und die Simulation auf der Grundlage der geschätzten Parameter. Die Ergebnisse sind fast identisch, der Decoder ist 1000-mal schneller als die Gerätesimulation, um diese Kurven zu erhalten. b zeigt die gemessenen J-V-Kurven und die Simulation, die auf den von AE geschätzten Parametern basiert. Die Gesamtform wird sehr gut erfasst, einige Details werden aufgrund von Einschränkungen in der Simulation übersehen.

3.7 Ionenmigration in Perowskit-Solarzellen

In diesem Projekt untersuchen wir, wie eine gemischte ionisch-elektronische Leitfähigkeit die Leistung von Perowskit-Solarzellen beeinflusst. Abhängig von ihrer Verteilung im Perowskit können mobile Ionenladungen die Fähigkeit der Solarzelle zur Stromextraktion unter Beleuchtung verändern. Wir entwickeln neue Charakterisierungsmethoden basierend auf spektral aufgelösten Messungen mit Temperaturkontrolle, die helfen können, die Gerätephysik von Perowskit-Solarzellen besser zu verstehen.

Contributors: M.A. Torre, W. Tress

Partners:

Funding: ERC

Duration: 2021–2025

Mobile Ionenladungen in Perowskit-Solarzellen (PSZs) können das elektrische Feld abschirmen und so die treibende Kraft für die Ladungsextraktion verringern. Wir haben kürzlich gezeigt, dass sich diese Feldabschirmung durch Ionen als spektrale Veränderungen in der Externen Quanteneffizienz (EQE) darstellen lässt [1], wie in Abb. 1a zu sehen ist. Für kohlenstoffbasierte PSZs zeigte sich, dass die EQE bei längeren Wellenlängen unter Ionenscreening abnimmt, was darauf hinweist, dass Stromverluste hauptsächlich von Ladungsträgern stammen, die tiefer im Absorber erzeugt werden. Der Einfluss unterschiedlicher Ionenverteilungen auf die EQE kann verglichen werden, indem man die Zelle unter verschiedenen Spannungen abkühlt und dadurch die Ionen effektiv einfriert. Die langsame Reaktion mobiler Ionen auf Änderungen der angelegten Spannung führt zu einer vom Scan-Tempo abhängigen Hysterese in der Strom-Spannungs-Kurve (J-V-Kurve) [2], wie in Abb. 1b zu sehen ist, wo ein signifikanter Stromverlust („Bump“) im Rückwärts-

Scan (BW) auftritt. Durch Kontrolle der Temperatur, Festlegung der Anfangsbedingungen und Variation der Vorspannung für die EQE-Messungen in derselben Reihenfolge wie im J-V-Scan können wir die J-V-Kurve mit spektraler Information rekonstruieren, was eine direkte Visualisierung des Ionenscreenings und des Ursprungs der Hysterese ermöglicht (Abb. 1c). Die Temperatur so zu variieren, dass Ionen während des Spannungsscans reagieren können, ahmt den Effekt unterschiedlicher Scan-Raten nach, da die Ionenmobilität stark temperaturabhängig ist. Dieser Ansatz erlaubt es, Stromverluste und J-V-Hysterese anhand der durch mobile Ionen verursachten Änderungen der tiefenabhängigen Ladungsträgerextraktionswahrscheinlichkeit zu erklären. Wir wenden diese Charakterisierungsmethode auf verschiedene PSZ-Architekturen an und ergänzen sie durch optische und drift-diffusionsbasierte Simulationen, um unser Verständnis der Gerätephysik von Perowskit-Solarzellen zu vertiefen.

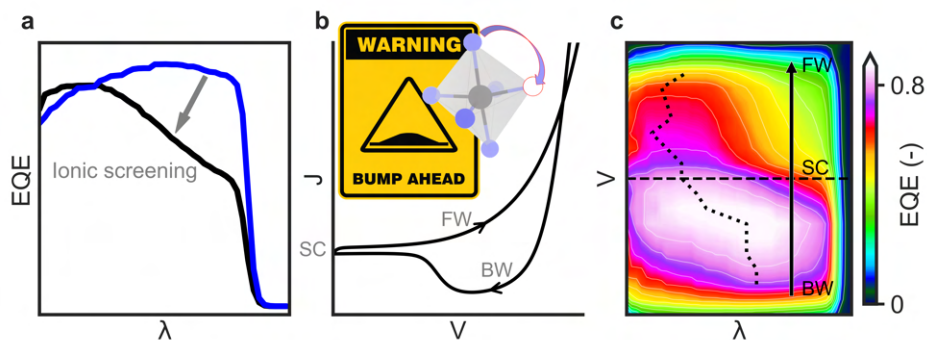


Abb. 1: a) EQE einer kohlenstoffbasierten PSZ, gemessen bei niedriger Temperatur, Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Ionenverteilungen (Abkühlspannungen). b) J-V-Kurve mit Hysterese und Stromverlust vor dem Kurzschluss („Bump“). c) EQE-Spannungs-Karte zur J-V-Kurve aus b).

Literatur:

- [1] M. A. Torre Cachafeiro, E. L. Comi, S. Parayil Shaji, S. Narbey, S. Jenatsch, E. Knapp, W. Tress, *Adv. Energy Mater.*, 15, 2403850, 2024.
- [2] W. Tress, N. Marinova, T. Moehl, S. M. Zakeeruddin, M. K. Nazeeruddin, M. Grätzel, *Energy Environ. Sci.*, 8, 995–1004, 2015.

3.8 Weisslicht emittierende Dioden mit Abwärtskonversion auf Basis bleifreier Perowskit-Derivate

Die Entwicklung effizienter und umweltfreundlicher Materialien für weisslichtemittierende Dioden (LEDs) ist entscheidend für den Fortschritt zukünftiger Beleuchtungstechnologien und das Erreichen der Klimaneutralitätsziele. In dieser Arbeit haben wir eine Reihe neuartiger, stabiler und ungiftiger bleifreier Perowskit-Derivate entwickelt, die vielfältige Emissionsfarben aufweisen und sich erfolgreich in Weisslicht-LEDs mit Abwärtskonversion einsetzen lassen.

Contributors: F. Ji, W. Tress

Partners:

Funding: SNSF (Postdoktorandenstipendien)

Duration: 2023–2025

Mit der wachsenden Nachfrage nach nachhaltiger und energieeffizienter Beleuchtung sind Weisslicht-LEDs in den Mittelpunkt der Materialwissenschaft gerückt. Die Entwicklung neuer lumineszierender Materialien ist entscheidend, um die Leistung zu verbessern und gleichzeitig giftige oder instabile Komponenten zu vermeiden.

Metallhalogenid-Perowskite haben als potenzielle lumineszierende Materialien für LEDs grosse Aufmerksamkeit erregt. Allerdings weisen die dominierenden bleihaltigen Perowskite aufgrund band-zu-band-Strahlungsrekombination ein schmales Emissionsspektrum auf, was den Einsatz mehrerer Emittier (Rot, Grün und Blau) zur Erzeugung von Weisslicht erforderlich macht. Darüber hinaus schränken die inhärente Toxizität von Blei und die begrenzte Stabilität dieser Materialien ihre praktische Anwendbarkeit in Beleuchtungstechnologien erheblich ein.

Um diese Einschränkungen zu überwinden, haben wir eine Reihe bleifreier Perowskit-Derivate auf Basis von Bismut und Antimon entwickelt, die ungiftig sind und eine deutlich verbesserte Umweltstabilität aufweisen. Diese Materialien zeigen eine Emission selbstgefangener Exzitonen (STE), ein einzigartiger Rekombinationsprozess von Exzitonen, der typischerweise zu einer breitbandigen Photolumi-

neszenz führt und sich hervorragend für die Erzeugung von Weisslicht aus einer einzelnen Komponente eignet. Wie in Abbildung 1a dargestellt, haben wir eine Reihe von Verbindungen mit der allgemeinen Formel $A_xBX_{(3+2x)}$ hergestellt, wobei A organische Kationen und X Halogenidanionen sind. Hier nehmen wir hauptsächlich drei repräsentative Materialien – S-1 bis S-3 – als Beispiele, um zu zeigen, dass ihre Emissionseigenschaften durch gezielte Zusammensetzungsänderungen systematisch einstellbar sind. Unter ultravioletter Anregung zeigen sie eine vielfältige Photolumineszenz, darunter Blau (S-1), warmes Gelb (S-2) und Rot (S-3).

Unter ihnen emittiert die Probe S-2 bei Anregung mit einer 254-nm-UV-Lampe ein warmes, gelbes Licht, das dem Weisslicht sehr ähnlich ist. Daher haben wir S-2 auf einen handelsüblichen 275-nm-LED-Chip aufgetragen, um eine Weisslicht-LED mit Abwärtskonversion herzustellen. Wie in Abbildung 1b gezeigt, emittiert die resultierende LED Weisslicht, was auf die STE-Emission von S-2 zurückzuführen ist. Die Lumineszenzintensität steigt mit zunehmendem Eingangsstrom (Abbildung 1c), was die hervorragende Abwärtskonversionsfähigkeit des Materials und sein Potenzial für Anwendungen in der Festkörperbeleuchtung bestätigt.

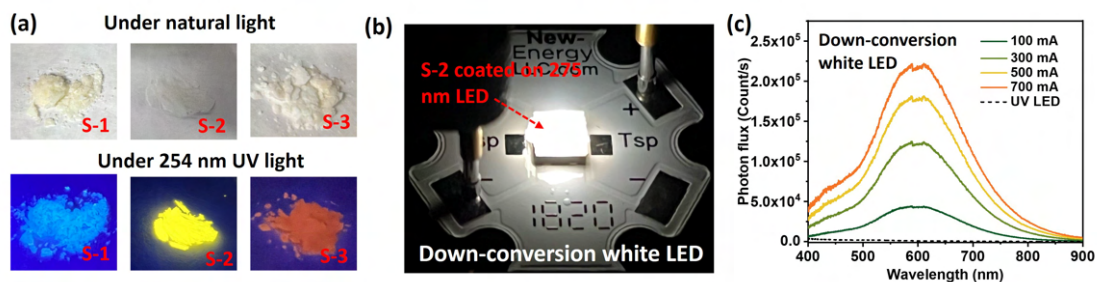


Abb. 1: a) Optische Aufnahmen von drei bleifreien Perowskit-Derivaten unter natürlichem Licht und unter 254-nm-UV-Licht. b) Weisslicht-LED mit Abwärtskonversion auf Basis des S-2-Materials, das auf eine 275-nm-LED aufgetragen wurde. c) Stromabhängige Emission der Weisslicht-LED mit Abwärtskonversion.

3.9 Verstehen und Steuern des resistiven Schaltens in Hochleistungs-Memristoren

Wir untersuchen Perowskit-Memristoren in Solarzellen und anderen Architekturen, fertigen verschiedene Strukturen und charakterisieren sie, um ihren ultraschnellen Resistenzwechsel (Stromanstieg von $\approx 10^{10}$ in Dutzend Nanosekunden) zu verstehen. Diese Kombination aus hoher Geschwindigkeit und grossem Kontrast macht sie attraktiv. Neben nicht-flüchtigem Speicher werden sie als künstliche Synapsen und energieeffiziente In-Memory-KI-Beschleuniger erforscht.

Contributors: M. Mohammadi, W. Tress

Partners:

Funding: ERC

Duration: 2021–2025

Perowskit-Solarzellen sind schnell zum Star der modernen Photovoltaik geworden; ihre aussergewöhnlichen opto-elektronischen Eigenschaften ermöglichen inzwischen Wirkungsgrade von über 26%. Während der Entwicklung fiel den Forschenden jedoch eine ausgeprägte Hysterese in der Strom–Spannungs-Kennlinie ($I - V$) auf. Nachfolgende Messungen zeigten langsame Transienten und eine deutliche Abhängigkeit vom Sweep-Tempo – klare Hinweise auf wandernde Ionen.

Obwohl die Hysterese bei Perowskit-Solarzellen normalerweise als Nachteil gilt, ist dasselbe Verhalten bei resistiv schaltenden Bauelementen wie Memristoren ein Pluspunkt. Die geschleifte ($I - V$)-Kennlinie liefert von Natur aus zwei stabile, nicht-flüchtige Widerstandszustände, die sich mit mässigen Vorwärts- und Rückwärtsspannungen (1 V) umschalten lassen. Nach dem Programmieren wird der Zustand mit einer kleinen Lesespannung abgefragt; unter dieser sanften Belastung ist die Antwort nahezu ohmsch und zeigt entweder einen niederohmigen **ON**-Zustand oder einen hochohmigen **OFF**-Zustand.

Die meisten Memristor-Stacks benötigen jedoch noch einen anfänglichen *Formierungs*- oder Elektroforming-Schritt, bei dem Spannungen über 2 V angelegt werden, bevor ein zuverlässiges Programmieren möglich ist. Diese Hochspannungskonditionierung erhöht den Energieverbrauch, führt zu Bauteilstreuungen und kann die dielektrische Alterung beschleunigen – alles Faktoren, die eine grossflächige Integration behindern. In unserer jüngsten Arbeit haben wir einen Memristor entwickelt, der ohne jeden Formierungsschritt auskommt und dennoch Referenzleistungen erreicht. Diese formierungsfreie Architektur beseitigt einen zentralen Engpass für den Einsatz von Memristoren in neuromorpher Hardware und nicht-flüchtigen Speichern.

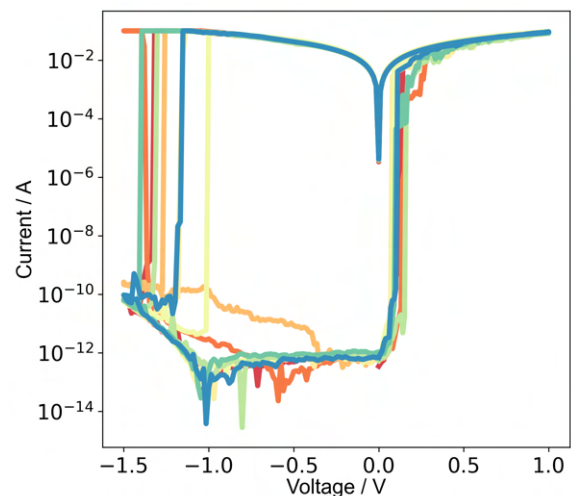


Abb. 1: I–V-Kurven eines Memristors nach der Formierung.

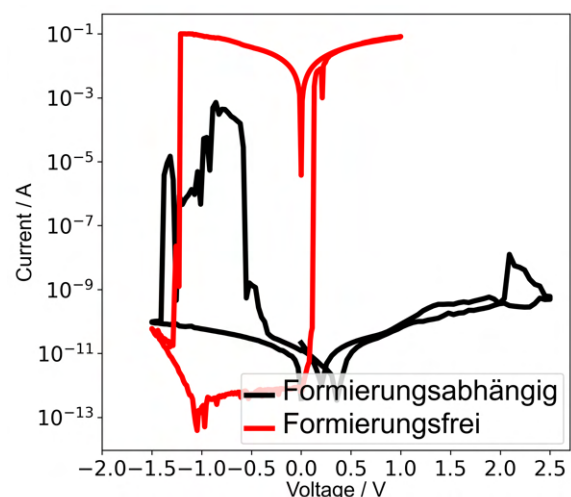


Abb. 2: Die schwarzen und roten Kurven zeigen jeweils die Formierungs-I–V-Kurven eines formierungsabhängigen bzw. formierungsfreien Memristors. Im Vergleich zu Abbildung 1a ist die Formierungskurve des formierungsfreien Memristors identisch mit seinen I–V-Kurven nach der Formierung.

3.10 Charakterisierung und Modellierung von Grenzflächen in Perowskit–Silizium-Tandem-Bauelementen

Unsere Arbeit konzentriert sich auf das Verständnis und die Kontrolle von verlustbehafteten Grenzflächen in neuartigen Tandem-Solarzellentechnologien, die Metall-Halogenid-Perowskite mit Silizium kombinieren. Diese Tandembaulemente bieten den vielversprechendsten Ansatz, um die photovoltaische Effizienz über das Einzelzell-Limit von Silizium hinaus zu steigern. Die Skalierung solcher Bauelemente von kleinen Labormustern zu industriell relevanten Modulen bringt jedoch neue Herausforderungen mit sich – insbesondere im Hinblick auf rekombinationsbedingte Verluste an Grenzflächen, Ladungsextraktion und mechanische Stabilität – viele davon sind auf mikroskopischer Ebene noch nicht gut verstanden.

Contributors: K. Meraji, T. Krucker, B. Ruhstaller, W. Tress
Partners: EPFL (PV-LAB), CSEM (PMD,NANO) group, FLUXIM, KTU
Funding: SNSF (Sinergia)
Duration: 2024–2028

Unsere Gruppe leitet eine Multiskalen-Charakterisierungs- und Modellierungsplattform, um die funktionellen Eigenschaften selbstorganisierter Monoschichten (SAMs) auf Nanometerebene zu untersuchen. Wir kombinieren elektrooptische Messungen mit numerischen Simulationen auf Basis von Drift-Diffusionsmodellen, die bewegliche Ionen und Photonenrecycling berücksichtigen. Diese Studien zeigen, wie SAMs den Ladungstransport, Energiebarrieren und Rekombination an verdeckten Grenzflächen beeinflussen. Auf Bauelementebene bewerten wir das elektrische und optische Verhalten von Einzelzell- und Tandemzellen mithilfe von stationären und transienten Methoden. Dies hilft, Verlustmechanismen zu identifizieren und informiert über Material-

auswahl und Prozessstrategien. Wir untersuchen auch den Upscaling-Prozess von Labormaßstäben zu Mini-Modulen, wobei der Fokus auf dem Einfluss räumlicher Inhomogenitäten und von Verschaltungen auf die Leistung liegt. Beispielsweise wird eine Elektrolumineszenz-Charakterisierung im Submikrometerbereich mittels konfokaler Mikroskopie durchgeführt, um den Einfluss von SAMs auf die Emission zu untersuchen und zu visualisieren, wie die Konformität von Perowskit-schichten über mikrotexturierten Siliziumsubstraten die Gerätestabilität beeinflusst (siehe Abbildung 1). Durch die Kombination von Charakterisierung und Simulation wollen wir die Fertigungsqualität mit der Langzeitstabilität unter Betriebsbedingungen korrelieren.

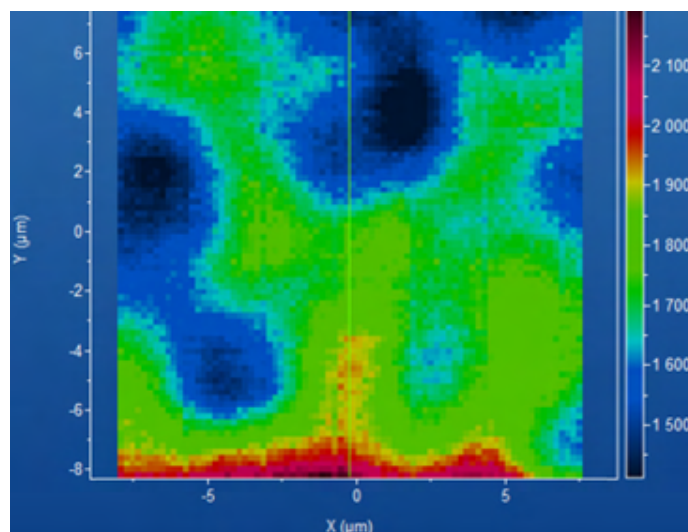


Abb. 1: Elektrolumineszenzabbildung einer Silizium-Perowskit-Grenzfläche, die räumliche Variationen in der Emissionsintensität zeigt.

3.11 Solarzellen auf der Nanoskala verstehen – der Schlüssel zu effizienter erneuerbarer Energie

Perowskit-Solarzellen (PSCs) haben bemerkenswerte Effizienzsteigerungen erzielt, doch weitere Fortschritte erfordern ein tieferes Verständnis nanoskaliger Phänomene, die die Leistung beeinflussen. In diesem Projekt untersuchen wir die strukturellen und optoelektronischen Eigenschaften von PSCs mithilfe der Rasterkraftmikroskopie (AFM) und ergänzender spektroskopischer Methoden. Durch die Analyse von Korngrenzen, Defekten und Grenzflächen wollen wir Mechanismen aufdecken, die Effizienz und Stabilität begrenzen – mit dem Ziel, langlebigere und leistungsfähigere Solarzellen zu entwickeln.

Contributors: A. K. Sachan, L. N. Schusser, T. Sachsenweger Ballantyne, F. Ji, W. Tress

Partners:

Funding: ERC Starting Grant

Duration: 2020–2025

PSCs zählen zu den vielversprechendsten PV-Technologien, mit Effizienzsteigerungen von ~3% auf über 25% in nur einem Jahrzehnt. Die aktive Perovskiteschicht besteht aus nanometergroßen Kristalliten (10–500 nm), getrennt durch Korngrenzen (GB), an denen Defekte auftreten können. Diese beeinträchtigen die Ladungsträgerdynamik und senken die Effizienz.

Wir untersuchen nanoskalige Struktur- und Funktionseigenschaften mit fortgeschrittener Rasterkraftmikroskopie (AFM), insbesondere Raster-Kelvin-Mikroskopie (KPFM) und Strom-Spannungs Microscopie (cAFM), um lokale elektrische Eigenschaften wie Oberflächenpotenzial, Leitfähigkeit und Austrittsarbeit zu analysieren. Eine eigens entwickelte Methode erlaubt zudem präzise Querschnittsuntersuchungen an Grenzflächen.

Durch Kombination von AFM-Methoden mit Raman- und Photolumineszenz-Spektroskopie führen wir Colokalisierte Messungen durch, um reversible/irreversible Prozesse unter Licht- und Spannungseinfluss zu verstehen.

Diese Erkenntnisse ermöglichen die gezielte Optimierung von Materialien und Schichtarchitekturen

für stabilere und effizientere PSCs – mit Bedeutung über die Photovoltaik hinaus, etwa für die Materialwissenschaft im Allgemeinen.

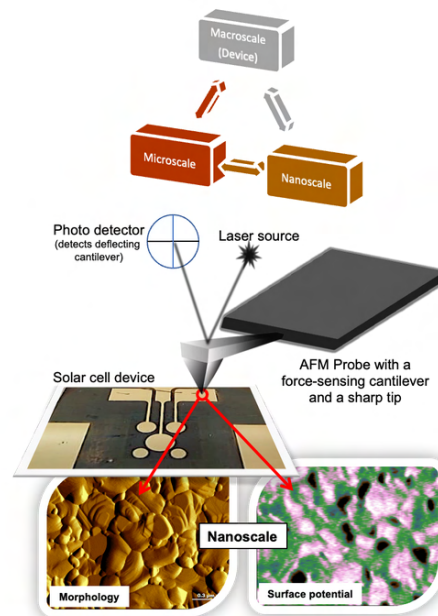


Abb. 1: Hochauflösende Untersuchung von Solarzellen mittels Rasterkraft- und Kelvin-Probe-Kraftmikroskopie.

4 Sensorik und Messsysteme

Unser Team von talentierten Ingenieuren und Wissenschaftlern der ZHAW wendet seit mehr als zehn Jahren etablierte und neue Messmethoden auf relevante medizinische und biologische Probleme an. Wir arbeiten mit Startups, internationalen Unternehmen sowie führenden akademischen Partnern zusammen und bringen unser Ingenieurwissen in Projekte ein, die den neuesten Stand der technischen Entwicklung erfordern.

Wir kultivieren eine unternehmerische Denkweise, die über das akademische Publizieren hinausgeht, indem wir uns auf den Technologietransfer vom Labor zur Industrie konzentrieren. Zu unseren Finanzierungsquellen gehören die Schweizerische Agentur für Innovationsförderung (Innosuisse), die EU (Eurostars, Horizon 2020), der Schweizerische Nationalfonds (SNF) und verschiedene private Stiftungen sowie die direkte Finanzierung durch die Industrie.

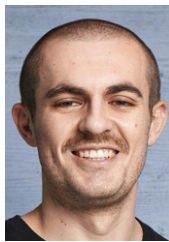
Unsere Kernkompetenz ist die Entwicklung neuer Sensoren und Messverfahren in der Biomedizintechnik. Insbesondere haben wir Erfahrung in der Hautwissenschaft und -technologie: künstliche Hautmodelle, Computersimulationen, Entwicklung neuer Sensoren usw. Wir profitieren von der hochmodernen Infrastruktur des Optoelektronischen Forschungslabors (OLAB), welches die Entwicklung anspruchsvoller Prototypen ermöglicht.



C. Aybar



D. Fehr



D. Bajrami



F. Spano



J. Zwicky



M. Hostettler



M. Boldrini



M. Bonmarin



R. Hagen



V. Buff

4.1 Lock-in-Thermographie zur Charakterisierung photothermischer transparenter Dünnschichten

Diese Studie untersucht den Einsatz des Lock-in-Thermographie-Systems Calorsito zur präzisen Analyse photothermischer Dünnschichten. Diese hochsensitive Bildgebungstechnologie ermöglicht die Erkennung von Temperaturverteilungen, Partikelaggregation und Inhomogenitäten. Das Calorsito-Gerät kombiniert infrarote Mehrwellenlängenbeleuchtung mit hochauflösender Thermalspektroskopie. Untersucht wurden Dünnschichten aus Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Cu}_{2x}\text{S}$ und Chlorophyllin. Die Ergebnisse zeigten, dass Calorsito erfolgreich thermische Inhomogenitäten und Partikelverteilungen sichtbar machen konnte. Messungen bestätigten, dass die mittlere visuelle Transmittanz (AVT) einen stärkeren Einfluss auf den Temperaturanstieg hatte als die Konzentration, wodurch die Bedeutung von AVT für die Lichtabsorption und photothermische Effizienz unterstrichen wird.

Contributors: G. Butler, H. Carter, D. Bajrami, S. Shrestha, D. Shi, M. Bonmarin
Partners: NanoLockin GmbH, EMPA, University of Cincinnati
Funding: SNSF Scientific Exchange
Duration: 2024

Photothermische Dünnschichten ermöglichen die Umwandlung von Licht in Wärme und gelten als Schlüsselkomponenten für energieeffiziente Anwendungen in Gebäuden, tragbaren Geräten und medizinischen Systemen. Anders als photovoltaische Systeme, die auf direkte Sonneneinstrahlung angewiesen sind, funktionieren photothermische Materialien auch unter diffusen Lichtverhältnissen und bieten somit größere Flexibilität bei der Energiegewinnung. Die gezielte Auswahl und Kombination von Nanopartikeln ermöglicht eine Feinabstimmung der Absorptionseigenschaften im UV-, sichtbaren und NIR-Bereich.

In dieser Studie wurden drei unterschiedliche Typen von Dünnschichten untersucht, die jeweils Fe_3O_4 -, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Cu}_{2x}\text{S}$ - sowie Chlorophyllin-Nanopartikel enthalten. Die Partikel wurden nach etablierten Methoden synthetisiert und anschließend durch Spin-Coating auf gereinigte Glasträger aufgebracht. Die strukturelle und optische Charakterisierung erfolgte mittels UV-Vis-Spektroskopie im Wellenlängenbereich von 300 bis 1000 nm. Die photothermische Charakterisierung erfolgte mit dem Calorsito-System, welches durch periodische Beleuchtung und infrarotbasierte Bildgebung sowohl Phasen- als auch Amplitudeninformationen liefert.

Fe_3O_4 zeigte eine starke Absorption im UV-Bereich sowie magnetische Eigenschaften, die zukünftige multifunktionale Anwendungen ermöglichen. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Cu}_{2x}\text{S}$ weist eine ausgeprägte plas-

monische Resonanz auf, die eine effiziente Absorption im NIR-Bereich erlaubt. Chlorophyllin, ein biologisch abgeleiteter Farbstoff, absorbiert vorwiegend im sichtbaren Bereich und bietet eine nachhaltige und kostengünstige Lösung für Innenanwendungen.

Die Ergebnisse der Lock-in-Thermographie zeigten, dass der Temperaturanstieg (ΔT) stark mit der mittleren visuellen Transmittanz (AVT) korreliert. Je geringer der Transmissionsgrad der Filme, desto höher war der beobachtete Temperaturanstieg, was auf eine effizientere Lichtabsorption hinweist. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Cu}_{2x}\text{S}$ -Filme erzielten die höchsten Temperaturwerte bei NIR-Bestrahlung, während Chlorophyllin-Filme insbesondere im blauen Spektralbereich effizient waren. Darüber hinaus konnte die Calorsito-Plattform durch bildgebende Verfahren mikroskopische Inhomogenitäten und Partikelagglomerationen sichtbar machen, die als Hotspots in den thermischen Karten erschienen.

Die Kombination aus spektroskopischer und thermographischer Analyse liefert ein umfassendes Verständnis der Materialeigenschaften. Calorsito erwies sich als zuverlässiges Werkzeug für die Bewertung der thermischen Leistungsfähigkeit, Filmhomogenität und strukturellen Integrität photothermischer Nanomaterialien. Diese Erkenntnisse tragen dazu bei, Materialien gezielt für Anwendungen in der nachhaltigen Energiegewinnung, Gebäudeintegration und biomedizinischen Diagnostik weiterzuentwickeln.

4.2 Miniaturisiertes magnetisches Aktuierungssystem für präzise Strömungsbeeinflussung in medizinischen Umgebungen

Diese Entwicklung konzentriert sich auf die Miniaturisierung und Neukonzeption eines magnetischen Aktuierungssystems zur hochpräzisen Strömungsveränderung in stark eingeschränkten Umgebungen, insbesondere im medizinischen Bereich. Aufbauend auf den zuvor entwickelten skalierbaren Simulationsmodellen wurde in dieser Phase die Übertragung der grundlegenden Prinzipien auf ein System mit einem inneren Flussdurchmesser von lediglich 1 mm untersucht. Die Reduktion des Massstabs stellte erhebliche Anforderungen an Konstruktion und Regelung, die durch einen iterativen Prozess aus Simulation, Prototypenbau und hochpräzisen Fertigungsmethoden überwunden werden konnten.

Contributors: M. Boldrini, V. Buff, G. Boiger
Partners: Vertraulich
Funding: Innosuisse
Duration: 2023-2025

Magnetische Aktuierungstechnologien bieten aufgrund ihrer kontaktlosen Funktionsweise und geschlossenen Geometrie wesentliche Vorteile für hygienisch anspruchsvolle Anwendungen. Die Übertragbarkeit auf Durchmesser unter 2 mm bringt jedoch neue Herausforderungen hinsichtlich Magnetfeldstärke, thermischer Belastung und mechanischer Toleranzen mit sich. In diesem Projektabschnitt wurde die Anpassung bereits validierter Aktuierungskonzepte an die Anforderungen miniaturisierter Flusssysteme untersucht – mit besonderem Fokus auf Energieeffizienz, präzise Regelbarkeit und dynamisches Verhalten.

Das neu entwickelte System basiert auf einer hybriden Konfiguration aus Permanentmagneten und dynamisch angesteuerten Elektromagnetspulen. Zur Bewältigung der geometrischen Einschränkungen wurden massgeschneiderte Mikrofertigungsstrategien eingesetzt sowie die magnetischen Feldverläufe mithilfe hochauflösender Finite-Elemente-Simulationen gezielt optimiert. Diese Simulationen waren entscheidend zur Vorhersage von Feldinteraktionen, Toleranzgrenzen bei der Bauteilausrichtung und Sättigungsverhalten bei reduzierten Systemgrößen (Abb. 1).

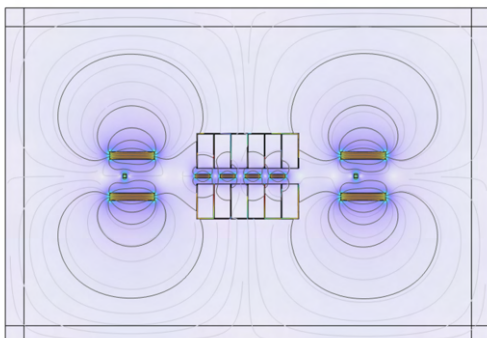


Abb. 1: Magnetfeldsimulation der Konfiguration.

Ein zentrales Ergebnis war die Identifikation und Kompensation nichtlinearer Kraftverläufe, die bei Miniaturisierung verstärkt durch Randeffekte und erhöhte Sensitivität gegenüber Magnetfehlstellungen auftreten. Die Regelalgorithmen wurden entsprechend angepasst, um auch im Submillimeterbereich eine stabile und wiederholgenaue Aktuierung mit minimalem Überschwingen zu ermöglichen. Dynamische Simulationen dienten der Charakterisierung von Reaktionszeiten und Energieverbrauch über verschiedene Betriebsszenarien (Abb. 2).

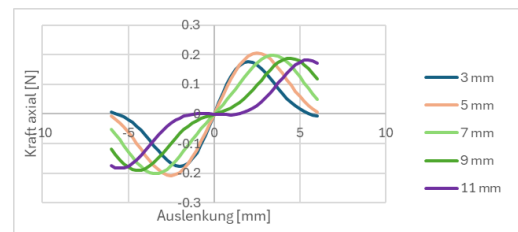


Abb. 2: Simulation Kraftverhältnisse.

Prototypen des Systems zeigten eine hohe Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen und bestätigten die Realisierbarkeit des miniaturisierten Designs. Das System gewährleistet eine präzise, reproduzierbare Aktuierung bei äusserst kompakter Bauweise und erfüllt die zentralen Anforderungen für den Einsatz in medizinischen Plattformen, die sterile, kontaktlose und präzise gesteuerte Flussregelung erfordern.

Diese Arbeit stellt einen bedeutenden Schritt dar, um skalierbare magnetische Aktuierungstechnologie auf mikroskalige Systeme für empfindliche Anwendungen zu übertragen.

4.3 Point-of-Care Device for Blood Ammonia Monitoring

Hyperammonämie und ihre neurologischen Folgen, wie zum Beispiel hepatische Enzephalopathie, betreffen bis zu 45% der Patientinnen mit Leberzirrhose und können zu Koma oder Tod führen. Ziel dieses Projekts war die Entwicklung eines tragbaren, benutzerfreundlichen und kosteneffizienten Point-of-Care-Diagnosegeräts zur schnellen Quantifizierung von Ammoniak im Blut. Das Gerät ist darauf ausgelegt, einen fluoreszenzbasierten pH-Gradienten-Polymersomen-Assay auszulesen und soll die regelmässige Überwachung durch medizinisches Fachpersonal und Patientinnen unterstützen.

Contributors: D. Fehr, J. Zwicky, M. Wyrsh, S. Steiger, R. Hagen,
C. Grossmann, F. Spano, M. Bonmarin

Partners: Versantis AG

Funding: Innosuisse

Duration: 2022–2025

Im Rahmen dieses Projekts wurde in Zusammenarbeit mit Versantis AG ein kompakter Prototyp eines Point-of-Care (POC) Diagnostikgeräts entworfen und umgesetzt. Das Gerät quantifiziert Ammoniak im Blut, indem es Fluoreszenzänderungen eines pH-sensitiven Farbstoffs misst, der in von Versantis entwickelten Polymersomen eingeschlossen ist. Diese Vesikel reagieren auf die Diffusion von Ammoniak, indem sie ihren inneren pH-Wert verändern, was wiederum die Fluoreszenzintensität des Farbstoffs moduliert [1].

Das optische System wurde so konzipiert, dass eine stabile ratiometrische Fluoreszenzmessung mit einer einzelnen Photodiode und einem anpassbaren Bandpassfilter möglich ist. Diese Konfiguration erlaubt die sequentielle Messung von Referenz- und Signalwellenlängen und trägt dazu bei, Variabilitäten durch Probenpositionierung und Bauteiltoleranzen zu reduzieren.

Die Elektronik wurde an die Anforderungen eines tragbaren Geräts angepasst. Das Schaltungsdesign wurde hinsichtlich Größe und Störfestigkeit gegenüber elektromagnetischen Einflüssen optimiert. Eine einfache Benutzeroberfläche mit physischen Tasten und einem Display wurde implementiert, um Messungen zu starten und Ergebnisse anzuzeigen. Kalibrierdaten und Messergebnisse werden auf einer herausnehmbaren SD-Karte gespeichert, und eine grafische Benutzeroberfläche wurde entwickelt, um Kalibrierung und Datenvisualisierung über einen angeschlossenen Computer zu unterstützen.

Das Fluidiksystem wurde so gestaltet, dass der Benutzeraufwand minimiert, kleine Blutvolumina verarbeitet und eine gleichmäßige Vermischung mit dem Reagenz gewährleistet wird. Gemäß den angezeigten Anweisungen lädt der Benutzer einen Beutel mit dem Reagenz in das Gerät, füllt eine Einweg-Transferpipette mit der Blutprobe und setzt

die gefüllte Pipette in das Gerät ein. Die Automatisierung wurde durch speziell geformte Blisterbeutel und einen servo-gesteuerten Pipettenmechanismus realisiert. Mehrere Iterationen wurden durchgeführt, um die Zuverlässigkeit der Probenhandhabung zu verbessern, einschließlich Anpassungen der Pipetteneinführtiefe und der Geometrie der Blister. Diese Optimierungen trugen dazu bei, die Variabilität im Assay zu verringern und die Gesamtleistung zu verbessern.

Der finale Prototyp, dargestellt in Abb. 1, ermöglicht die Quantifizierung von Ammoniak aus einer 80- μ L-Blutprobe innerhalb weniger Sekunden und deckt einen klinisch relevanten Konzentrationsbereich von 30 μ M bis 800 μ M ab. Er erfüllt die Validierungskriterien gemäß ICH M10 und bildet die Grundlage für die weitere Entwicklung und Industrialisierung des POC-Geräts mit dem Potenzial, die Krankheitsüberwachung und Patientenversorgung zu verbessern.



Abb. 1: Prototyp des Point-of-Care-Testgeräts zur Quantifizierung und Überwachung des Ammoniakgehalts im Blut unter Verwendung des von Versantis entwickelten Assays.

Referenzen

- [1] A. Spyrogianni, C. Gourmel, L. Hofmann, J. Marbach, and J.-C. Leroux, "Optimization of an ammonia assay based on transmembrane pH-gradient polymersomes," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 22032, Nov. 2021.

4.4 Innovative 3D-gedruckte Semi-Dry-Elektrode für ein tragbares EEG-Gerät

Diese Masterarbeit stellt die Entwicklung innovativer, 3D-gedruckter Semi-Dry-Elektroden zur EEG-Signalerfassung vor. Die Elektroden enthalten eine biologisch abbaubare Hydrogelschicht und eingekapselte Elektrolyttropfen, die bei Kontakt mit Hautfeuchtigkeit freigesetzt werden, um den Haut-Elektroden-Widerstand zu senken und die Signalqualität zu verbessern. Die Struktur wurde mithilfe von leitfähigem PLA-Filament kostengünstig und individuell anpassbar gefertigt. Zusätzlich wurde ein kompaktes, tragbares EEG-Gerät mit Bluetooth-Verbindung und Smartphone-App zur Echtzeit-Datenvisualisierung entwickelt. Erste Tests bestätigten eine erfolgreiche Signalerfassung und zeigen das Potenzial des Systems für tragbare neurotechnologische Anwendungen. Weitere Arbeiten sind notwendig, um die Hydrogelstabilität zu optimieren und die Langzeitzuverlässigkeit zu verbessern.

Contributors: C. Grossmann Aybar, F. Spano

Partners:

Funding: Master's Thesis

Duration: 2024–2025

Die Elektroenzephalographie (EEG) ist eine nicht-invasive Methode zur Aufzeichnung der Gehirnaktivität und spielt eine entscheidende Rolle sowohl in der klinischen Diagnostik als auch in der neurowissenschaftlichen Forschung. Traditionelle EEG-Systeme basieren auf Nass-Elektroden, die leitfähige Gele erfordern, um einen guten elektrischen Kontakt mit der Kopfhaut herzustellen. Obwohl sie effektive Signale liefern, sind diese Systeme oft zeitaufwändig in der Anwendung, unangenehm für die Nutzer und können Hautreizungen verursachen.

Trockene Elektroden bieten eine bequemere Alternative, da sie ohne Gel auskommen, einfacher anzubringen sind und sich besser für tragbare Anwendungen eignen. Sie weisen jedoch in der Regel einen höheren Haut-Elektroden-Widerstand auf und sind anfälliger für Bewegungsartefakte, was die Signalqualität beeinträchtigen kann. Um diese Nachteile zu überwinden, wurden sogenannte Semi-Dry-Elektroden entwickelt – eine vielversprechende Hybridlösung. Diese enthalten einen internen Mechanismus, der während der Anwendung nach und nach eine kleine Menge Elektrolyt freisetzt, wodurch der Widerstand gesenkt und gleichzeitig der Komfort und die einfache Handhabung trockener Elektroden beibehalten wird.

Aufbauend auf diesem Konzept stellt diese Arbeit einen innovativen Ansatz zur EEG-Signalerfassung mithilfe maßgeschneiderter, 3D-gedruckter Semi-Dry-Elektroden vor. Das Design integriert eine biologisch abbaubare Hydrogel-

schicht und eingekapselte Elektrolyttropfen in einer weichen Polymermatrix. Bei Kontakt mit Hautfeuchtigkeit zersetzt sich das Hydrogel und löst eine kontrollierte Freisetzung des Elektrolyten aus – was den elektrischen Kontakt verbessert, ohne dass externe Gele oder aufwendige Vorbereitungen erforderlich sind.

Der Elektrodenkörper wurde mit leitfähigem PLA-Filament im 3D-Druckverfahren gefertigt, was eine kostengünstige Herstellung und präzise geometrische Gestaltung ermöglicht. Ergänzend zur Elektrode wurde ein kompaktes EEG-Aufzeichnungsgerät entwickelt, das über einen wiederaufladbaren Akku, Bluetooth Low Energy (BLE) und eine Smartphone-App zur Echtzeit-Datenanzeige und -speicherung verfügt. Das Ergebnis ist ein tragbares, benutzerfreundliches System, das eine flexible EEG-Erfassung außerhalb traditioneller Laborumgebungen unterstützt.

Erste Tests bestätigten die erfolgreiche Signalerfassung und die funktionale Integration zwischen den Elektroden und dem Aufzeichnungsgerät. Obwohl weitere Optimierungen – insbesondere hinsichtlich des Hautwiderstands und der Hydrogelstabilität – notwendig sind, zeigt das System großes Potenzial für zukünftige Anwendungen in tragbarer und zugänglicher Neurotechnologie sowohl im klinischen als auch im privaten Bereich.

Literatur:

[1] G. L. Li et al., *J. Neural Engineering*, Vol. 17, 2020.

[2] J. Rosell et al., *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 35, 33–36, 1988.

4.5 Replikation von Fingerabdrücken in künstlichen Hautmodellen durch 3D-Druck

In dieser Arbeit implementieren wir die Replikation von Fingerabdrücken in künstliche Hautmodelle, die durch ein 3D-DLP-Druckverfahren erzeugt werden. Durch die Verwendung spezieller weicher Polymerharze können wir Fingerabdrücke direkt in ein Hautmodell drucken, das die Topografie der menschlichen Haut nachahmt.

Contributors: B. Heer, F. Spano & M. Bonmarin

Partners: Université de Lausanne (UNIL) – Ecole des Sciences Criminelles (ESC)

Funding: Student Project

Duration: 2024–2025

Der 3D-Druck hat viele Bereiche revolutioniert, von der Medizin über die Luft- und Raumfahrt bis hin zu Kunst und Design. Eine der faszinierendsten und potenziell umstrittensten Anwendungen dieser Technologie ist die Reproduktion von Fingerabdrücken. Fingerabdrücke, die bei jedem Menschen einzigartig sind, galten lange Zeit als unfehlbare Methode zur persönlichen Identifizierung. Mit den Fortschritten in der Technologie wirft die Möglichkeit, diese Fingerabdrücke zu duplizieren, jedoch sowohl technische als auch ethische Fragen auf. In dieser Arbeit werden die verschiedenen Facetten der Fingerabdruckerstellung mittels 3D-Druck untersucht. Wir beginnen mit einem Überblick über die verfügbaren 3D-Drucktechnologien und ihre jüngste Entwicklung. Wir befassen uns mit den spezifischen Techniken, die zur Erfassung und Reproduktion von Fingerabdrücken eingesetzt werden, sowie mit den Materialien, die zur Erstellung präziser Replikate verwendet werden. In Zusammenarbeit mit unserem Partner von der Hochschule für Strafrechtspflege (Universität Lausanne) gehen wir auch auf die möglichen Anwendungen dieser Technologie ein, z. B. im Bereich der Forensik. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit zielt das Projekt darauf ab, zunächst eine Reihe von Stempeln mit verschiedenen Mustern zu erstellen,

die die Fingerabdrücke nachahmen. Wir werden die Verformungsfähigkeiten der ausgewählten Materialien untersuchen, die das Muster tragen (z. B. Scherung, Prägung), so dass das Material seine Form anpassen kann, wenn es auf eine strukturierte Oberfläche aufgebracht wird, die Fingerabdrücke an einem Tatort simuliert. Zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften werden wir die Benetzungseigenschaften der verwendeten Harze mit unterschiedlichen Graden der Hydrophobie und Oleophobie untersuchen. Zunächst werden wir uns auf die Entwicklung eines entsprechenden Protokolls für die Realisierung der Stempelprototypen konzentrieren, insbesondere auf die Auswahl der verformbaren Materialien. Eine Vorarbeit könnte sich auf den Entwurf spezifischer Muster konzentrieren, die mit starren Stempeln als Modelle für Formen reproduziert werden können (solche Stempel werden von ESC/UNIL zur Verfügung gestellt). Die Fähigkeit, einzigartige biometrische Merkmale zu reproduzieren, stellt eine große Herausforderung in Bezug auf den Schutz der Privatsphäre und die Datensicherheit dar. Die School of Criminal Justice wird uns dabei helfen, die derzeitigen Vorschriften und die möglichen Maßnahmen zur Regelung der Nutzung dieser Technologie zu unterscheiden.

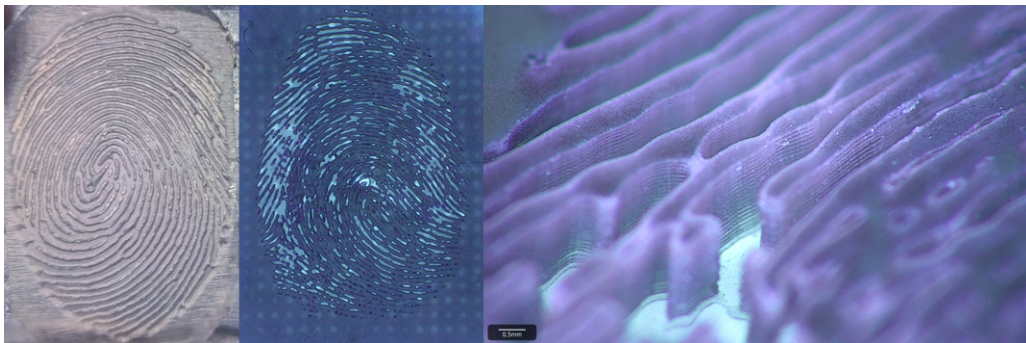


Abb. 1: Illustrationen verschiedener künstlicher Hautmodelle, die die Fingerabdrücke nachahmen.

4.6 Entwicklung eines multimodalen optischen Messsystems zur Quantifizierung und Differenzierung von Bilirubin

Diese Arbeit stellt einen optischen Ansatz zur Unterscheidung von freiem, gebundenem und konjugiertem Bilirubin vor, der für eine verbesserte Diagnostik von Ikterus relevant ist. Ein spezielles Gerät wurde entwickelt, das Absorptions-, Fluoreszenz-, Anisotropie- und Bleichmessungen mit einer Laserdiodenquelle und angepasster Elektronik durchführt. Messungen an synthetischen Bilirubinproben zeigten deutliche optische Signaturen für jede Form, wobei insbesondere Fluoreszenz und Anisotropie eine effektive Identifikation von gebundenem Bilirubin ermöglichten. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine präzise Bilirubinanalyse am Point-of-Care.

Contributors: J. Zwicky, D. Fehr, M. Bonmarin
Partners: Institute of Chemistry and Biotechnology (ZHAW)
Funding: Master's degree programme
Duration: 2024–2025

Bilirubin ist ein gelber Farbstoff, der beim Abbau von roten Blutkörperchen entsteht. Aufgrund seiner geringen Löslichkeit im Blut bindet es an das Transportprotein Albumin, bevor es in der Leber konjugiert wird, um die Wasserlöslichkeit für die Ausscheidung zu erhöhen. Erhöhte Konzentrationen von freiem Bilirubin können zu Ikterus und in schweren Fällen zu neurologischen Schäden führen, insbesondere bei Neugeborenen. Konventionelle klinische Methoden erfassen lediglich Gesamt- und konjugiertes Bilirubin, ohne zwischen freiem und gebundenem Bilirubin zu unterscheiden – was die diagnostische Aussagekraft einschränkt.

Diese Arbeit präsentiert ein neuartiges optisches System zur Quantifizierung und Differenzierung von freiem, gebundenem und konjugiertem Bilirubin. Das Messsystem kombiniert Absorptions-,

Fluoreszenz, Fluoreszenzanisotropie und Photo-bleaching Techniken zur Charakterisierung der optischen Eigenschaften der verschiedenen Bilirubinformen. Ein eigens entwickeltes Gerät integriert eine Laseranregungsquelle, optische Module sowie zentrale Steuerelektronik. Die Datenauswertung erfolgt über eine Python-basierte Softwareoberfläche.

Messungen an synthetischen Bilirubinproben zeigten konzentrationsabhängige Absorptions- und Fluoreszenzverläufe, wobei gebundenes Bilirubin ein charakteristisches Fluoreszenzsignal aufwies. Anisotropiemessungen machten Bindungseffekte auf molekularer Ebene sichtbar, während Bleichmessungen Unterschiede in der photostabilität der Bilirubinarten aufzeigten. Die Ergebnisse belegen die Machbarkeit eines multimodalen Ansatzes zur Bilirubinanalyse und bilden die Grundlage für zukünftige Point-of-Care-Diagnostiksysteme.

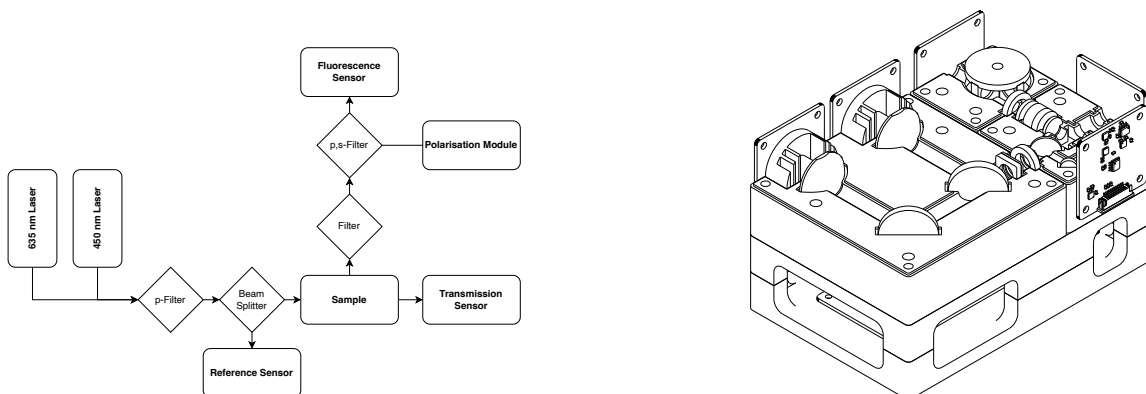


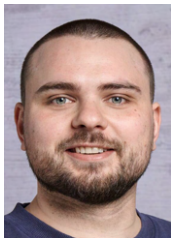
Abb. 1: Links: Funktionales Diagramm des optischen Aufbaus mit L-förmiger Geometrie. Ein Laser regt die Probe an, ein zweiter kompensiert Matrixabsorption. Referenz- und Transmissionssensoren ermöglichen ratiometrische Absorptionsmessungen. Die Fluoreszenz wird gefiltert, polarisiert und mit einem empfindlichen Sensor detektiert. Rechts: Isometrische Ansicht des aufgebauten Messgeräts mit den wesentlichen optischen und elektronischen Komponenten.

5 Gebäudesimulation

Gebäude beeinflussen unser Wohlbefinden, unsere Produktivität und vielfältige soziale Interaktionen. Ein grosser Teil unserer Energie wird im Gebäude umgesetzt, und mit der Nutzung von Sonnenenergie und Umweltwärme sind moderne Gebäude auch zum Energieproduzenten geworden. Grosse Mengen an Informationen, Gütern und Menschen bewegen sich in den Gebäuden. Damit in einer vermehrt digitalen Welt all diese Abläufe optimal unterstützt werden können, werden mit Sensorik und Messtechnik laufend Daten erfasst und mit Simulations- und Regeltechnik in das Geschehen eingegriffen.

Am ICP unterstützen wir die Digitalisierung im Gebäudebereich mit Computersimulationen für die physikalisch-technischen Zusammenhänge. Unsere Beiträge erstrecken sich von der frühen Planungsphase über die Detailplanung bis zum Betrieb der Gebäude. Dabei haben wir Zugriff auf eine grosse Anzahl Simulationstools und implementieren wo nötig auch eigene Algorithmen. Mit Messtechnik validieren wir die Simulationen, bestimmen Materialparameter und generieren Ausgangsdaten für vorausschauende Simulationen.

Seit 2022 gibt es den Verein Gebäudesimulation Schweiz, der seine Geschäftsführung dem ICP übertragen hat (www.gebaeudesimulation.ch). Im Verein schliessen sich die führenden Planungsbüros aus dem Bereich Bau- und Energieplanung zusammen, um gemeinsam physikalische Simulationen in der Baubranche zu fördern. Er zählt inzwischen bereit mehr als 50 Mitglieder.



A. Drigatti



C. Fachin



D. Bernhardsgrütter



F. Schranz



M. Schmid



E. Linder



A. Witzig



M. Roos



Z. Bratsos

5.1 ThermoPlaner3D - Energiebeurteilung von Gebäuden aus grossflächiger 3D-Thermographie

ThermoPlaner3D entwickelt grossflächige, detaillierte 3D-Gebäude-Energiebeurteilungen aus multiperspektivischen Thermografieaufnahmen und schafft damit neue quantitative Planungsgrundlagen sowie ein Marketingtool für Städte, Gemeinden und EVUs.

Contributors: M. Battaglia, E. Comi, D. Meier, F. Schranz
 Partners: FHNW, Considerate AG, BSF Swissphoto
 Funding: Innosuisse
 Duration: 2021–2024

Die Erhöhung der Sanierungsquote im Gebäudereich ist eine zentrale Komponente bei der Reduktion des Energiebedarfs der Schweiz. Das Projekt ThermoPlaner3D entwickelt ein innovatives Produkt, welches Energieversorgungsunternehmen (EVUs), Städten und Gemeinden ermöglicht, die Energiewende zu unterstützen und gleichzeitig davon zu profitieren.

Während energetische Beurteilungen von Gebäuden bislang hauptsächlich für Einzelobjekte erstellt werden, fehlt es an Werkzeugen, den Eigentümern in der Breite eine niederschwellige Erstbeurteilung ihres Gebäudes anzubieten und ihnen das Potential einer Sanierung aufzuzeigen. Das ThermoPlaner3D-Projekt hat zum Ziel, mit multiperspektivischen Thermalaufnahmen aus einem Fernerkundungsflugzeug die nötigen quantitativen Grundlagen für ein ganzes Stadtgebiet mit einem einzigen Messflug bereitzustellen.

Ein erster Testflug wurde vor Projektstart im Spätwinter 2021 in Grenchen durchgeführt. Mit den Stadtwerken Grenchen, ist ein Pilotkunde für Feedback involviert. Aus dem ersten Testflug konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die in einem zweiten Testflug im Winter 2023 in Aalen in Baden-Württemberg weiter verfeinert werden konnten.

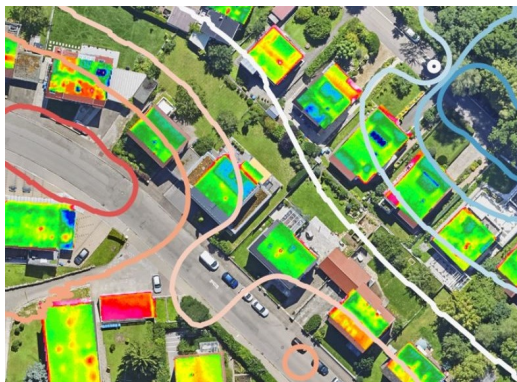


Abb. 1: Dachtemperaturen und Mikroklima eines Quartiers.

Das ICP ist im Projekt für die wissenschaftliche Begleitung der Datenerfassung mit der Infrarot-Messtechnik zuständig und versucht, die Auswertung und Korrektur der Daten mittels bekannter und neuer Ansätze zu verbessern. Zudem bringen wir unser Knowhow in der Gebäudesimulation ein, um aus Punktmessungen der Aussentemperaturen der Gebäudehülle, Aussagen über den Jahresverbrauch der jeweiligen Objekte machen zu können.

Abbildung 1 zeigt die Dachtemperaturen einiger Gebäude inklusive der Mikroklimatemperaturbereiche. Aus der gemittelten Dachtemperatur wird anschliessend mittels eines einfachen Wärmemodell des Daches ein Wärmetransmissionswert (U-Wert) abgeschätzt. Das Mikroklima kann als Nebenprodukt aus einer Thermographiebefliegung anhand des TURN-Algorithmus (Thermal Urban Road Normalization) berechnet werden.

Bei der Auswertung von Flugdaten wurde festgestellt, dass die Berechneten U-Werte teilweise stark von den tatsächlichen Werten abweichen. Folglich wurde eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Resultate in Abbildung 2 zeigen, dass die gemessenen Temperaturen für eine gute Abschätzung sehr genau sein müssen und die Wetterbedingungen während der Befliegung äusserst wichtig sind.

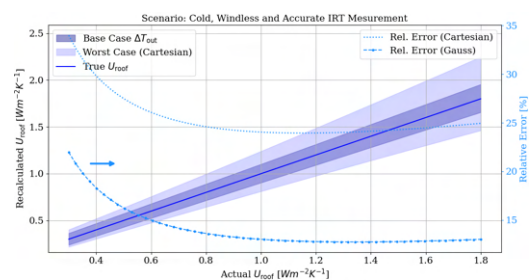


Abb. 2: Die Sensitivitätsanalyse zeigt die zu erwartende Abweichung in den U-Werten bei idealen Bedingungen.

5.2 Crowd-Management bei Grossveranstaltungen durch Faster Than Real-Time Simulationen

Fussgängersimulationen werden häufig bei der Planung von Grossveranstaltungen eingesetzt. Wir untersuchen, wie Personenstromsimulationen, die schneller als in Echtzeit ablaufen, zur Sicherheit live während der Veranstaltung beitragen können. Zu diesem Zweck verwenden wir ein kontinuierliches Modell zur Beschreibung der Fussgänger, das mit der Finiten Elemente Methode gelöst wird. Dieser Ansatz ermöglicht effiziente Simulationen mit kurzen Laufzeiten und ist damit ideal für das Crowd-Management in Echtzeit.

Contributors: D. Bernhardsgrütter, M. Schmid
Partners:
Funding: Digital Futures Fund (ZHAW digital)
Duration: 2024

Bei Grossveranstaltungen wie Konzerten oder Festivals ist das Crowd-Management von entscheidender Bedeutung. Die Sicherheit des Fussgängerstroms ist zentral, da selbst kleine Störungen zu Risiken wie Gedränge oder massiven Drucksituationen führen können. Es ist daher für Veranstalter wichtig geworden, Fussgängerströme in Echtzeit vorherzusagen und zu steuern.

Für eine dynamische Lenkung von Besucherströmen sind Simulationen erforderlich, die schneller als in Echtzeit ablaufen. Solche Faster Than Real-Time (FTRT) Simulationen ermöglichen es den Veranstaltern, potenzielle Probleme vorherzusehen und Strategien anzupassen, bevor Probleme auftreten. Wenn man beispielsweise bei einer Evakuierung den Menschenstrom zu den verschiedenen Ausgängen vorhersagen kann, ermöglicht dies Entscheidungen über das Öffnen oder Schliessen bestimmter Wege, den Einsatz von zusätzlichem Personal oder die Übermittlung bestimmter Anweisungen. Die Fähigkeit, diese Szenarien schnell und präzise zu simulieren, kann den Unterschied zwischen einer kontrollierten Evakuierung und einer chaotischen Situation ausmachen.

In diesem Kontext verwenden wir ein kontinuierliches Modell [1, 2] um Personenströme zu simulieren. Das Modell wurde durch Regularisierung von Hughes' Fussgängermodell [3] hergeleitet, was die Lösung durch die Finite Elemente Methode ermöglicht. Im Gegensatz zu agentenbasierten Modellen, die einzelne Personen in der Menge beschreiben, behandeln kontinuierliche Modelle die Fussgänger als Dichte ρ . Dieser Ansatz ist beliebig skalierbar und somit effizienter für die Modellierung von grossen Menschenmengen. In Abb. 1 ist die Personendichte ρ für eine Simulation der "Winterthurer Musikfestwochen" dargestellt, einem jährlich in der Winterthurer Altstadt stattfindenden

Festival mit mehreren tausend Besuchern.

Es ist möglich, den Personenstrom für die Winterthurer Musikfestwochen schneller als in Echtzeit zu simulieren. Wir definieren das FTRT-Verhältnis als den Quotienten aus der simulierten Evakuierungszeit $t_{eva} = 757$ s und der physikalischen Berechnungszeit $t_{sim} = 18$ s. Somit sind selbst bei Grossveranstaltungen mit Zehntausenden von Besuchern FTRT-Verhältnisse von $t_{eva}/t_{sim} = 42$ erreichbar. Die Simulationen wurden auf einem Laptop mit einer Intel i7 CPU mit 1.8 GHz durchgeführt.

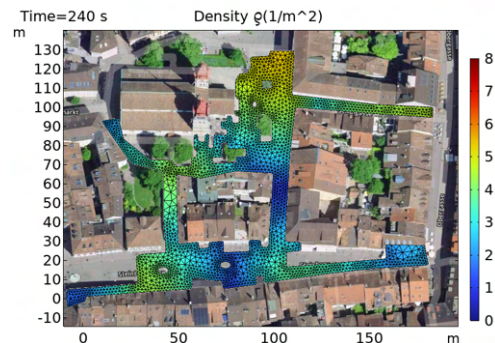


Abb. 1: Simulationsergebnisse für die Evakuierung der "Winterthurer Musikfestwochen". Dargestellt ist die Fussgängerdichte ρ (in Fussgängern/m²) bei $t = 240$ s.

In einem nächsten Schritt werden wir das Modell genauer validieren mit Hilfe von empirischen Daten von Veranstaltungen und anhand von Simulationsdaten aus agentenbasierten Modellen.

Literatur:

- [1] M. Schmid et al., Faster-than-real-time Simulation of Multi-group Pedestrian Flow, in Traffic and Granular Flow '24, Springer International Publishing (accepted for publication)
- [2] R. Axthelm, in Traffic and Granular Flow '15, edited by V.L. Knoop, W. Daamen (Springer International Publishing, 2016), pp. 233–240
- [3] R.L. Hughes, Transportation Research Part B: Methodological 36, 507 (2002)

5.3 EFFIWAG: Effizienzpotenzial eines Ersatzes des Wärmeabgabesystems

Der Marktanteil von Wärmepumpen steigt stetig, was zu einem erhöhten Strombedarf insbesondere in den Wintermonaten führt. Im EFFIWAG-Projekt analysieren wir verschiedene Massnahmen zur Reduktion des Stromverbrauchs von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden. Besonders effizient arbeiten Wärmepumpenheizungen bei niedrigen Vorlauftemperaturen, weshalb wir das Potenzial von Niedertemperaturradiatoren untersuchen. Modellierungen von fünf Zürcher Gebäuden zeigen, dass der Austausch von Radiatoren gegen Niedertemperaturradiatoren den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen im unsanierten Zustand um 30 % senkt.

Contributors: F. Schranz, J. Bruderer, L. Meier, A. Witzig
Partners: Lemonconsult AG
Funding: BFE, AWEL, Dr.-Stephan-à-Porta-Stiftung
Duration: 2023–2025

Eine Wärmepumpe arbeitet besonders effizient, wenn sie nur einen geringen Temperaturhub bereitstellen muss. Das bedeutet für Gebäude mit Wärmepumpenheizung, dass sie umso effizienter beheizt werden, je niedriger die Vorlauftemperatur des Wärmeabgabesystems ist. In Bestandsgebäuden kommen jedoch meist Radiatoren zum Einsatz, welche Vorlauftemperaturen von 60°C und mehr benötigen. Das führt bei Luft/Wasser-Wärmepumpen in den Wintermonaten zu einem niedrigen COP (Coefficient of Performance) von nur 1.6 bis 1.8. Im Rahmen dieses Projekts untersuchen wir daher, wie sich der Austausch des Wärmeabgabesystems in Kombination mit verschiedenen Sanierungsmassnahmen auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen eines Bestandsgebäudes auswirkt. Unser Fokus liegt dabei auf dem Potenzial von Niedertemperaturradiatoren, da der Einbau einer Bodenheizung im bewohnten Zustand meist nicht möglich ist.

Zu diesem Zweck haben wir fünf Gebäude aus dem Raum Zürich mit der Software IDA-ICE modelliert (siehe Abb. 1). Für jedes Gebäude wur-

den drei Sanierungszustände betrachtet: der teils rekonstruierte Ursprungszustand, eine energetische Teilsanierung mit neuen Fenstern sowie einer Dämmung von Kellerdecke und Dachboden, und eine Vollsanierung inklusive Fassadendämmung. Diese Zustände wurden jeweils mit drei Wärmeabgabesystemen (Radiator mit ca. 60°C Vorlauftemperatur, Niedertemperaturradiator mit 40°C und Bodenheizung mit 35°C) kombiniert und der Heizenergieverbrauch berechnet. Lemon Consult hat dazu die spezifischen COPs der Wärmepumpe ermittelt und die bei der Sanierung anfallende graue Energie berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass im unsanierten Zustand durch den Ersatz der Radiatoren durch Niedertemperaturradiatoren der Energieverbrauch sowie die CO₂-Emissionen für Erstellung und Betrieb um 30% gesenkt werden können. Eine weitere deutliche Reduktion von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen ist nur durch eine umfassende Vollsanierung möglich. Ein ausführlicher Artikel über dieses Projekt ist im Fachmagazin HK-Gebäudetechnik erschienen [1].

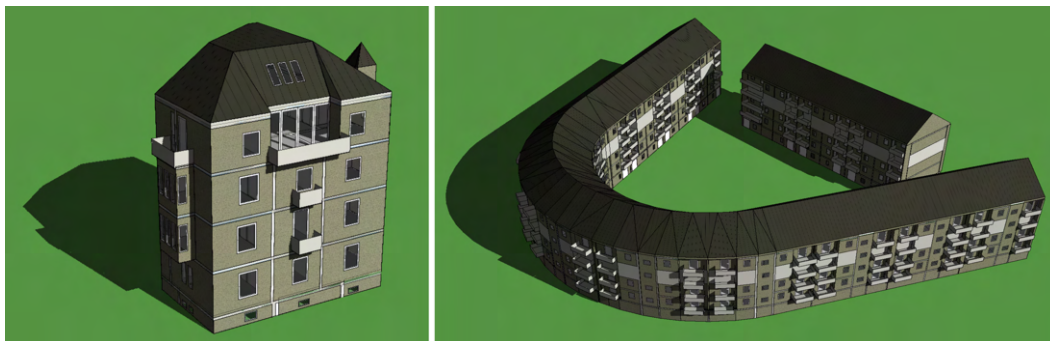


Abb. 1: Zwei der fünf Objekte welche mit IDA-ICE modelliert wurden. Um Rechenzeit zu sparen wird im rechten Gebäudekomplex der dritte Stock ausgelassen und dafür der zweite Stock dupliziert.

Referenzen:

[1] B. Vogel, *Runter mit der Vorlauftemperatur*, HK-Gebäudetechnik 3, 2025.

5.4 Energiesparen mit intelligenten Beschattungssystemen

In dieser Arbeit wird der ökologisch optimierte Betrieb von Beschattungssystemen untersucht. Anhand von Ray-Tracing Simulationen wird ausgerechnet, wie viel Sonnenenergie in einen Raum eindringt. Die nachgelagerte Analyse zeigt das Einsparpotenzial auf: Sonnenstoren leisten aufgrund der Abschattung einen Beitrag zum Überhitzungsschutz im Sommer. In der kalten Jahreszeit wird die Sonne wann immer möglich durch die Fenster gelassen, so dass die Passiv-Solargewinne das Heizen unterstützen.

Contributors: A. Ehrler, A. Witzig
 Partners: Bühler und Scherler AG, Schenker Storen AG
 Funding: Bachelorarbeit
 Duration: 2025

Der Gebäudepark verbraucht aktuell rund 40 Prozent des Schweizer Endenergiebedarfs. Eine wichtige und gut kontrollierbare Wärmequelle ist die Sonnenstrahlung durch die Fenster. Das kurzwellige Licht strahlt durch die Fenster ein und erzeugt Wärme. Die langwellige Wärmestrahlung von innen wird durch die Fenster reflektiert und bleibt im Gebäude (Treibhauseffekt). Mit einem intelligenten Beschattungssystem kann deshalb massiv Energie gespart werden.

Je nach Jahreszeit funktioniert dies unterschiedlich: Im Sommer trägt eine optimale Abschattung zum Überhitzungsschutz bei. Ein unnötiges Aufheizen des Innenraumes durch direkte Sonneneinstrahlung wird vermieden, und somit wird die ressourcenintensive aktive Kühlung reduziert. Im Winter hingegen werden die Passivsolargewinne gefördert und damit der Wärmebedarf des Gebäudes reduziert. Anhand von Simulationen kann der energetische Nutzen eines Beschattungssystems mit optimierter Steuerung quantitativ aufgezeigt werden.

Die Simulationen werden primär in 2D durchgeführt mit der Ray-Tracing Methode [1]. Dabei wird der Sonnenstand berücksichtigt, sowie auch die Art und die Stellung der Sonnenstoren. Zusätzlich wird abhängig von der Ausrichtung des Fensters und dem Azimutwinkel der Sonne die eingestrahelte Leistung berechnet. Es werden verschiedene Beschattungssysteme und Steuerungsalgorithmen miteinander verglichen.

Die Bachelorarbeit ist auf eine industrielle Anwendung ausgerichtet, welche viele Storensysteme unterstützt und europaweit zu grossen Energieeinsparungen führen wird.

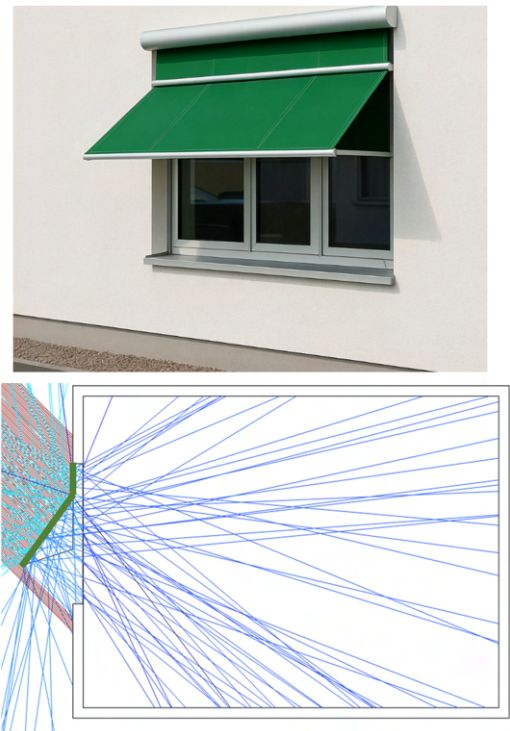


Abb. 1: Oben: exemplarische Darstellung einer Ausstellmarke (Bild mit KI generiert). Unten: 2D Ray-Tracing in einem Querschnitt durch das Storensystem und den dahinterliegenden Raum. Die Sonnenstrahlen werden am Stoff gestreut (grüne Kontur). In der Simulation wird berechnet, wie viel gestreutes Sonnenlicht in den Raum einfällt. Dunkelrote Linien: Einfallende Sonnenstrahlen, blaue Linien: gestreutes Licht. Im Bild wird das Prinzip mit einer reduzierten Anzahl Rays dargestellt. Die Konvergenzanalyse hat gezeigt, dass für die Simulationen eine höhere Strahlendichte nötig ist.

Referenzen:

[1] Comsol Ray Optics Module, *Application Example* <https://www.comsol.de/model/vdara-caustic-surface-18531>

5.5 Simulation effizienter Heizsysteme in Kirchen

Es ist anspruchsvoll, eine Kirche effizient zu heizen. Ein mehrfach preisgekröntes Konzept verspricht jedoch eine kostengünstige Lösung, die den speziellen Anforderungen gerecht wird und die im Betrieb nur einen Bruchteil der Energie verbraucht. Mit Simulationen kann man die Funktionsweise visualisieren und dazu beitragen, Skeptiker zu überzeugen. Das auf Luftheizung basierende System hat für künftige Sanierungen ein riesiges Potenzial.

Contributors: C. Tello, A. Witzig
Partners: Kegel Enegiesysteme
Funding: ICP
Duration: 2023–2025

Kirchen werden nicht wie Wohn- oder Bürogebäude konstant auf einer vorgegebenen Solltemperatur gehalten. Die Heizung wird nur bei Bedarf angestellt. Das ist auch bei der traditionellen Beheizung der Fall, wobei Heizkörper mit sehr hohen Temperaturen (typisch: 60 °C) nötig sind, damit genügend Energie in den Raum abgegeben wird.

Das hier untersuchte innovative Konzept beruht darauf, über einen Wärmetauscher mit Ventilatoren einen Luftstrom zu erzeugen, der die Wärme in den Raum einbringt. Die erforderlichen Vorlauftemperaturen für das Heizungswasser sind viel geringer (typisch: 27 °C). Für den Einsatz von Wärmepumpen ist das ein grosser Vorteil, da durch die kleineren Temperaturdifferenzen die Heizgeräte viel effizienter laufen. Auch die Wärmeabgabe in den Innenraum gelingt besser, da nicht Luftsäulen mit heisser Luft bis an die Decke aufsteigen. Vielmehr wärmt sich der Innenraum gleichmässiger auf. Insbesondere zeigt das Heizsystem eine vorteilhafte Dynamik, da primär die Luft erwärmt wird und nicht der träge Steinboden oder die Wände. Neben der besseren Effizienz kann der Umbau des Heizungssystems auch kostengünstiger und in kürzerer Zeit ausgeführt werden.

In dieser Arbeit wurde ein Vergleich simuliert zwischen einer Heizung mit einem traditionellen Heizsystem und der neuartigen Luftheizung. Die Resultate dienen dazu, Skeptiker zu überzeugen. Für eine weitere Verbreitung des innovativen energetisch überlegenen Systems ist es wichtig, dass die Physik des Systems nicht nur verstanden wird, sondern auch anhand von Simulationen gut kommunizierbar wird.

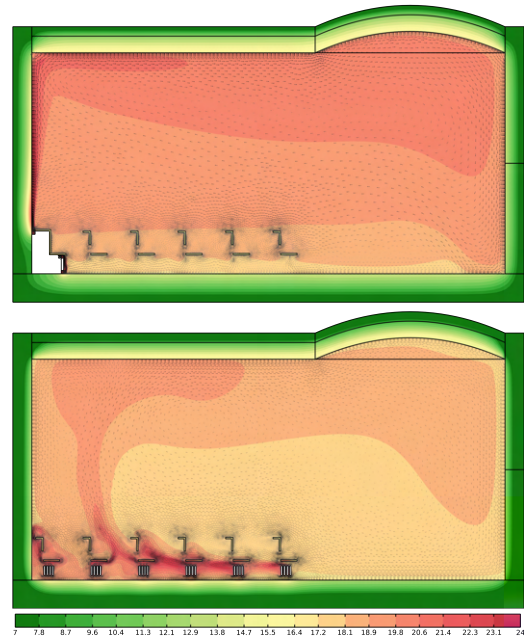


Abb. 1: Vergleich zwischen dem effizienten neuartigen Luftheizung (oben) mit der traditionellen Heizung, die unter jedem Sitzbank einen Radiator hat (unten). In den Simulationen im Längsschnitt der Kirche werden Luftströmung sowie Temperaturverteilung im Innenraum wie auch in den Wänden berechnet.

Referenzen:

- [1] B. Kegel, *Energieschleuder Kirche: Zürcher Kirche zeigt, wie es besser geht*, <https://energieiplus.com/2024/11/26/energieschleuder-kirche-zuercher-kirche-zeigt-wies-anders-geht/>.

5.6 Massive Parallelisierung für die Simulation von dezentralen Energiesystemen

Im Rahmen eines Forschungsprojekts zusammen mit dem Anbieter der Simulationssoftware Polysun wurde ein Framework entwickelt, das eine massive Parallelisierung von Gebäude-Simulationen ermöglicht. Mithilfe eines multiobjektiven Optimierungsalgorithmus können wir eine optimale Dimensionierung der Systemkomponenten automatisiert bestimmen.

Contributors: M. Battaglia, A. Drigatti, E. Linder, F. Schranz, A. Witzig
Partners: Vela Solaris AG
Funding: Innosuisse
Duration: 2023–2025

Die Polysun-Software ermöglicht die Simulation dezentraler Energiesysteme. In der Praxis definieren die Nutzer*innen typischerweise ein Energiesystem und begnügen sich mit der ersten plausiblen und funktionierenden Konfiguration, weil eine Optimierung manuell durchgeführt werden muss. Um dieses Problem zu lösen, haben wir in unserem ersten Prototyp ein Frontend entwickelt, das es den Nutzer*innen erlaubt, Parameter für Multi-Simulationen individuell für verschiedene vorgegebene Systemvarianten zu konfigurieren. Die Rechenzeit wird dabei durch die Parallelisierung der Simulationen massiv verkürzt. Das Frontend bietet zudem Werkzeuge zur Analyse der Ergebnisse, wobei der Fokus auf Schlüsselparametern wie CO₂-Emissionen, Kosten oder Eigenverbrauchsanteil liegt und so die Nutzer*innen bei der Auswahl des optimalen Systems unterstützt.

Im zweiten Prototyp fokussieren wir uns auf die automatisierte Suche nach dem optimalen System, sodass keine zusätzlichen Eingaben des Benutzers nötig sind. Das Framework unterstützt nun den gesamten Workflow: Es überträgt spezifische

Einstellungen aus Polysun-Desktop an eine web-basierte Multi-Simulations-Engine, in der die Optimierung automatisiert durchgeführt wird. Die zu optimierenden Komponenten werden automatisch ausgewählt, und wir haben Algorithmen entwickelt, die geeignete Randbedingungen und optimale Schrittweiten für diese Komponenten berechnen.

Um die optimalen Lösungen effizienter zu finden, haben wir einen genetischen Algorithmus für die multiobjektive Optimierung implementiert. Dieser Algorithmus erkundet intelligent den Lösungsraum und nähert sich der Pareto-Front, welche die Grenze der physikalisch möglichen Systeme zeigt. Der Optimierungsalgorithmus rechnet fünf Generationen an je zwanzig Simulationen und mit jeder neuen Generation sind die Punkte näher an der Pareto-Front wie man in Abb. 1 sieht. Als ein optimales System identifizieren wir eine Variante die auf der Pareto-Front liegt und geringere CO₂-Emissionen und niedrigere Kosten als das Ausgangssystem aufweist.

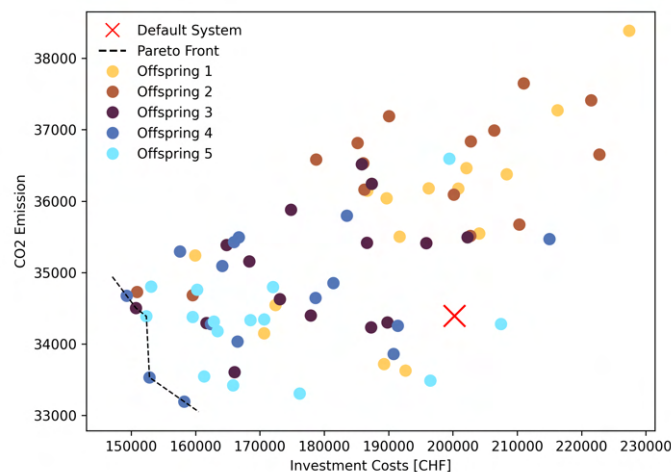


Abb. 1: Ein System mit Erdsonde, Wärmepumpe und PV wird hinsichtlich CO₂-Emissionen und Investitionskosten optimiert. Die Abbildung zeigt, wie der Multi-Objektive-Optimierungsalgorithmus sich der Pareto-Front annähert. Mit jeder neuen Generation (Offspring) bewegen sich die Punkte näher an die Pareto-Front.

5.7 Thermochemische Netzwerke (TCN) zur Deckung des Wärmebedarfs in Wohngebäuden

In diesem Themenbereich beschäftigen wir uns mit der Deckung des Wärmebedarfs in Wohngebäuden mittels thermochemischer Netzwerke (TCN). Das ICP konzentriert sich auf die Modellierung der thermischen Aspekte solcher Netzwerke. Das ICP arbeitet eng mit dem IEFE zusammen, das über umfassende Expertise im Bereich Salzlösungen und deren chemischer Eigenschaften wie spezifische Wärmekapazität und Siedetemperaturen verfügt. TCNs können als saisonale thermische Energiespeicher dienen und dazu beitragen, die Stromlücke im Winter zu überbrücken. Diese Forschung findet im Rahmen der Projekte PEDvolution und UPchange statt.

Contributors: E. Linder, F. Schranz, A. Witzig
 Partners: S. Danesi, T. Bergmann (IEFE)
 Funding: SNF
 Duration: 2025–2027

Der Energiebedarf für Heizung, Warmwasser und Kühlung in Schweizer Wohngebäuden macht fast 40% des gesamten Energieverbrauchs des Landes aus. Eine grosse Herausforderung besteht darin, diesen Bedarf im Winter zu decken. TCN bieten die Möglichkeit einer Langzeitspeicherung von Energie mit einer höheren Speicherdichte im Vergleich zu herkömmlichen Wärmespeichern auf Wasserbasis. Diese Technologie könnte helfen, die Winterstromlücke zu schliessen und die Dekarbonisierung der Wohnraumheizung voranzutreiben, indem überschüssige Energie aus dem Sommer in den Winter übertragen wird.

Ein thermochemisches Netzwerk funktioniert nach dem Prinzip einer Absorptionswärmepumpe. In einem solchen System dient eine Salzlösung als Absorptionsmittel und wird vom Verbraucherteil (Verdampfer-Absorber) zum Regenerator (Desorber-Kondensator) geführt. Auf der Verdampfer-Absorber-Seite wird Wasserdampf als Kältemittel zugeführt und von der konzentrierten Salzlösung absorbiert, wobei das chemische Potenzial (gespeicherte Exergie) als Nutzwärme frei-

gesetzt wird. Im Desorber-Kondensator wird die Salzlösung erhitzt, wodurch Wasser verdampft und die Konzentration der Salzlösung steigt. Die konzentrierte Lösung wird dann zurück zum Verdampfer-Absorber gepumpt (siehe auch Abb. 1). Das Potenzial dieser Technologie wurde bereits praktisch erprobt, indem ein Demonstrator in einem Gewächshaus installiert wurde [1].

Ziel dieser Arbeit ist es, eine TCN-Simulation zu realisieren und eine Fallstudie für die Siedlung Hard in Winterthur durchzuführen. In dieser Siedlung wurden Photovoltaik-Anlagen installiert, und der erzeugte Strom kann genutzt werden, um im Sommer eine Wärmepumpe zur Desorption der Salzlösung zu betreiben.

Die in dieser Arbeit behandelten Forschungsfragen beinhalten: Wie viel Salzlösung wird benötigt, um den Heizbedarf der Siedlung Hard zu decken? Welcher Typ von Wärmepumpe und welche PV-Fläche sind dafür erforderlich? Bietet die TCN-Technologie eine praktikable Lösung zur Deckung des Heizbedarfs der Siedlung?

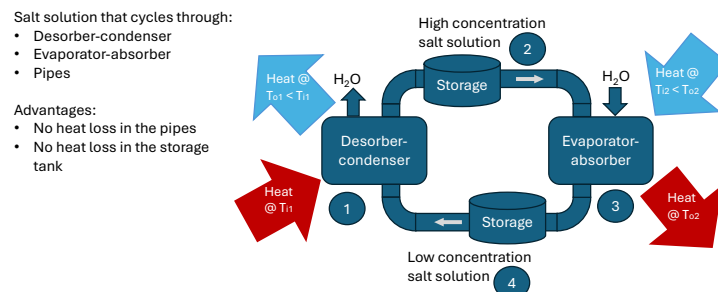


Abb. 1: Schematische Übersicht eines TCN.

Referenzen:

[1] C. Koller, S. Danesi, T. Bergmann, *Thermochemical district networks*, EuroSun 2018 Conference Proceedings.

Anhang

A.1 Wissenschaftliche Publikationen

Alsaedi, Mossab K., Omar Lone, Hojatollah Rezaei Nejad, Riddha Das, Rachel E. Owyung, Ruben Del-Rio-Ruiz und Sameer Sonkusale: *Soft Injectable Sutures for Dose-Controlled and Continuous Drug Delivery*. In: *Macromolecular Bioscience* 24.3 (2024), S. 2300365. ISSN: 1616-5187, 1616-5195. DOI: [10.1002/mabi.202300365](https://doi.org/10.1002/mabi.202300365). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mabi.202300365>.

Bajrami, Dardan, Asier Zubiaga, Timon Renggli, Christoph Kirsch, Fabrizio Spano, Daniel Fehr, Patrick Von Schulthess, Alisa Lindhorst-Peters, Stephanie Huber, Elisabeth Roider, René M. Rossi, Alexander A. Navarini und Mathias Bonmarin: *Variations of skin thermal diffusivity on different skin regions*. In: *Skin Research and Technology* 30.3 (2024), e13622. ISSN: 0909-752X, 1600-0846. DOI: [10.1111/srt.13622](https://doi.org/10.1111/srt.13622). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/srt.13622>.

Cevher, Sevki C. und Kurt P. Pernstich: *Novel integrated reference-counter electrode for electrochemical measurements of HOMO and LUMO levels in small-molecule thin-film semiconductors for OLEDs*. In: *Organic Electronics* 136 (2025), S. 107152. ISSN: 15661199. DOI: [10.1016/j.orgel.2024.107152](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2024.107152). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566119924001630>.

Gorshkov, Vyacheslav N., Vladyslav O. Kolupaiev, Gernot K. Boiger, Navid Mehreganian, Pooya Sareh und Arash S. Fallah: *Smart controllable wave dispersion in acoustic metamaterials using magnetorheological elastomers*. In: *Journal of Sound and Vibration* 572 (2024), S. 118157. ISSN: 0022460X. DOI: [10.1016/j.jsv.2023.118157](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118157). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X23006065>.

Katepalli, Anudeep, Neshwanth Kumar Tene, Yuxin Wang, Anton Harfmann, Mathias Bonmarin, John Krupczak und Donglu Shi: *Photothermal Utility Heating with Diffused Indoor Light via Multiple Transparent Fe₃O₄@Cu_{2-x}S Thin Films*. In: *Energy Technology* 12.8 (2024), S. 2400703. ISSN: 2194-4288, 2194-4296. DOI: [10.1002/ente.202400703](https://doi.org/10.1002/ente.202400703). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.202400703>.

Katepalli, Anudeep, Yuxin Wang, Jou Lin, Anton Harfmann, Mathias Bonmarin, John Krupczak und Donglu Shi: *A photothermal solar tunnel via multiple transparent Fe₃O₄@Cu_{2-x}S thin films for heating utility application*. In: *Solar Energy* 271 (2024), S. 112444. ISSN: 0038092X. DOI: [10.1016/j.solener.2024.112444](https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112444). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X24001385>.

Kwon, O-Pil und Mojca Jazbinsek: *Ionic organic terahertz crystals: a perspective on design and solid-state phonon absorption*. In: *Journal of Materials Chemistry C* 12.35 (2024), S. 13784–13796. ISSN: 2050-7526, 2050-7534. DOI: [10.1039/D4TC01786B](https://doi.org/10.1039/D4TC01786B). <https://xlink.rsc.org/?DOI=D4TC01786B>.

Lee, Chae-Won, Chaeyoon Kim, Woojin Yoon, Hoseop Yun, Mojca Jazbinsek, Fabian Rotermund und O-Pil Kwon: *Organic THz Crystals Based on Off-Diagonal Optical Nonlinearity with Optimal In-Plane Polar Axis*. In: *Advanced Optical Materials* 12.33 (2024), S. 2401590. ISSN: 2195-1071, 2195-1071. DOI: [10.1002/adom.202401590](https://doi.org/10.1002/adom.202401590). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.202401590>.

Lee, Yun-Sang, Chaeyoon Kim, Jungkwon Oh, Woojin Yoon, Hoseop Yun, Mojca Jazbinsek, Fabian Rotermund und O-Pil Kwon: *Organic Terahertz Generators with Wide Entire-Molecular Phonon-Free Range and Their Application in Broadband Terahertz Spectroscopy*. In: *Small Structures* 6.5 (2025), S. 2400483. ISSN: 2688-4062, 2688-4062. DOI: [10.1002/sstr.202400483](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sstr.202400483). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sstr.202400483>.

Marmet, Philip, Lorenz Holzer, Thomas Hocker, Holger Bausinger, Jan G. Grolig, Andreas Mai, Joseph M. Brader und Gernot K. Boiger: *Multiscale-multiphysics model for optimization of novel ceramic MIEC solid oxide fuel cell electrodes*. In: *The International Journal of Multiphysics* (Juni 2024). DOI: [10.21256/zhaw-30992](https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/30992). <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/30992>.

Marmet, Philip, Lorenz Holzer, Thomas Hocker, Gernot K. Boiger und Joseph M. Brader: *Effective transport properties of porous composites applied to MIEC SOC electrodes*. In: *Energy Advances* 3.8 (2024), S. 2013–2034. ISSN: 2753-1457. DOI: [10.1039/D4YA00074A](https://xlink.rsc.org/?DOI=D4YA00074A). <https://xlink.rsc.org/?DOI=D4YA00074A>.

Parayil Shaji, Sharun und Wolfgang Tress: *Data-driven analysis of hysteresis and stability in perovskite solar cells using machine learning*. In: *Energy and AI* 20 (2025), S. 100503. ISSN: 26665468. DOI: [10.1016/j.egyai.2025.100503](https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666546825000357). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666546825000357>.

Santhosh, Neelakandan M., Uroš Puc, Mojca Jazbinšek, Ana Oberlintner, Vasyl Shvalya, Janez Zavašnik und Uroš Cvelbar: *Exploring effects of plasma surface engineering on cellulose nanofilms via broadband THz spectroscopy*. In: *Applied Surface Science* 682 (2025), S. 161698. ISSN: 01694332. DOI: [10.1016/j.apsusc.2024.161698](https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433224024140). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433224024140>.

Schiller, Andreas, Sandra Jenatsch, Balthasar Blülle, Miguel Angel Torre Cachafeiro, Firouzeh Ebadi, Nasim Kabir, Mostafa Othman, Christian Michael Wolff, Aïcha Hessler-Wyser, Christophe Ballif, Wolfgang Tress und Beat Ruhstaller: *Assessing the Influence of Illumination on Ion Conductivity in Perovskite Solar Cells*. In: *The Journal of Physical Chemistry Letters* 15.45 (2024), S. 11252–11258. ISSN: 1948-7185, 1948-7185. DOI: [10.1021/acs.jpcllett.4c02403](https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcllett.4c02403). <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcllett.4c02403>.

Torre Cachafeiro, Miguel A, Naresh Kumar Kumawat, Feng Gao und Wolfgang Tress: *Pulsed operation of perovskite LEDs: a study on the role of mobile ions*. In: *National Science Review* 12.5 (2025), nwae128. ISSN: 2095-5138, 2053-714X. DOI: [10.1093/nsr/nwae128](https://academic.oup.com/nsr/article/doi/10.1093/nsr/nwae128/7637789). <https://academic.oup.com/nsr/article/doi/10.1093/nsr/nwae128/7637789>.

Torre Cachafeiro, Miguel A., Ennio Luigi Comi, Sharun Parayil Shaji, Stéphanie Narbey, Sandra Jenatsch, Evelynne Knapp und Wolfgang Tress: *Ion Migration in Mesoscopic Perovskite Solar Cells: Effects on Electroluminescence, Open Circuit Voltage, and Photovoltaic Quantum Efficiency*. In: *Advanced Energy Materials* 15.5 (2025), S. 2403850. ISSN: 1614-6832, 1614-6840. DOI: [10.1002/aenm.202403850](https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202403850). <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202403850>.

Wilcox, Logan M., Mathias Bonmarin und Kristen M. Donnell: *Effect of Signal Modulation on Active Microwave Thermography*. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 73 (2024), S. 1–12. ISSN: 0018-9456, 1557-9662. DOI: [10.1109/TIM.2024.3440402](https://ieeexplore.ieee.org/document/10630812/). <https://ieeexplore.ieee.org/document/10630812/>.

Wlodarczyk, Jakub K., Roman P. Schärer, K. Andreas Friedrich und Jürgen O. Schumacher: *Upscaling of Reactive Mass Transport through Porous Electrodes in Aqueous Flow Batteries*. In: *Journal of The Electrochemical Society* 171.2 (2024), S. 020544. ISSN: 0013-4651, 1945-7111. DOI: [10.1149/1945-7111/ad258e](https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/ad258e). <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/ad258e>.

Wu, Hongbo, Hao Lu, Yungui Li, Xin Zhou, Guanqing Zhou, Hailin Pan, Hanyu Wu, Xunda Feng, Feng Liu, Koen Vandewal, Wolfgang Tress, Zaifei Ma, Zhishan Bo und Zheng Tang: *Decreasing exciton dissociation rates for reduced voltage losses in organic solar cells*. In: *Nature Communi-*

cations 15.1 (2024), S. 2693. ISSN: 2041-1723. DOI: [10.1038/s41467-024-46797-5](https://www.nature.com/articles/s41467-024-46797-5). <https://www.nature.com/articles/s41467-024-46797-5>.

Yang, Jeong-A, Chae-Won Lee, Chaeyoon Kim, Michael Auer, In Cheol Yu, Jungkwon Oh, Woojin Yoon, Hoseop Yun, Dongwook Kim, Mojca Jazbinsek, Fabian Rotermund und O-Pil Kwon: *Chiral Cationic Chromophores: A New Class of Efficient Ultrabroadband Organic THz Crystals*. In: *Advanced Optical Materials* 12.22 (2024), S. 2400343. ISSN: 2195-1071, 2195-1071. DOI: [10.1002/adom.202400343](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.202400343). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.202400343>.

Yoon, Ga-Eun, Dong-Joo Kim, Yu-Jin Park, Chaeyoon Kim, Seung-Jun Kim, Bong-Rim Shin, Yun-Sang Lee, Chae-Won Lee, Jung-Wook Park, In Cheol Yu, Woojin Yoon, Hoseop Yun, Dongwook Kim, Mojca Jazbinsek, Fabian Rotermund und O-Pil Kwon: *Symmetry Reduction of Molecular Shape of Cationic Chromophores for High-Performance Terahertz Generators*. In: *Advanced Optical Materials* 12.21 (2024), S. 2400413. ISSN: 2195-1071, 2195-1071. DOI: [10.1002/adom.202400413](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.202400413). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.202400413>.

Zbinden, Oliver, Evelyne Knapp und Wolfgang Tress: *Identifying Performance Limiting Parameters in Perovskite Solar Cells Using Machine Learning*. In: *Solar RRL* 8.6 (2024), S. 2300999. ISSN: 2367-198X, 2367-198X. DOI: [10.1002/solr.202300999](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/solr.202300999). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/solr.202300999>.

Zhou, Junjie, Liguang Tan, Yue Liu, Hang Li, Xiaopeng Liu, Minghao Li, Siyang Wang, Yu Zhang, Chaofan Jiang, Ruimao Hua, Wolfgang Tress, Simone Meloni und Chenyi Yi: *Highly efficient and stable perovskite solar cells via a multifunctional hole transporting material*. In: *Joule* 8.6 (2024), S. 1691–1706. ISSN: 25424351. DOI: [10.1016/j.joule.2024.02.019](https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542435124001028). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542435124001028>.

A.2 Buchkapitel

Mehreganian, Navid, Yasser Safa und Gernot Kurt Boiger: *Impact analysis of wind turbines subjected to ship collision and blast loading*. In: *Multiphysics of Wind Turbines in Extreme Loading Conditions*. 2024, S. 101–138. ISBN: 978-0-323-91852-7. DOI: [10.1016/B978-0-323-91852-7.00008-8](https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323918527000088). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323918527000088>.

A.3 Konferenzen und Workshops

Bajrami, Dardan, Tobias Hammer, Fabrizio Spano, Kongchang Wei, Mathias Bonmarin und René Rossi: “A 3D printed bio-hybrid optical skin model for light-skin interactions”. In: 8th China-Europa Symposium on Biomaterials in Regenerative Medicine (CESB), Nuremberg, Germany, 15-18 September 2024. DOI: [10.21256/zhaw-31464](https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31464). <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31464>.

Boiger, Gernot Kurt und Bercan Siyahhan: “Simulation-based study of the impact of mean powder particle diameters on key-performance-attributes of the powder coating of U-profiles”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF NUMERICAL ANALYSIS AND APPLIED MATHEMATICS: ICNAAM2022. Heraklion, Greece, 2024, S. 030008. DOI: [10.1063/5.0211780](https://pubs.aip.org/aip/acp/article-lookup/doi/10.1063/5.0211780). <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-lookup/doi/10.1063/5.0211780>.

Corte Vieira, Lourenco, Filippo Begal, Roman Pascal Schärer, Robin Kunkel und Jürgen Schumacher: “Mechanistic study and parameter estimation of a multi-electron transfer organic synthesis”. In: 21st Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (ModVal), Karlsruhe, Germany, 11-12 March 2025. DOI: [10.21256/zhaw-32971](https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/32971). <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/32971>.

Fehr, Daniel, Lorenz M. Brunner, Christoph Kirsch, Martin Loeser, Anna Kedracka, Michael Detmar und Mathias Bonmarin: “Semi-Wearable LymphMeter: Preliminary Results From In-Vivo Validation”. In: 2024 IEEE 20th International Conference on Body Sensor Networks (BSN). 2024 IEEE 20th International Conference on Body Sensor Networks (BSN). Chicago, IL, USA: IEEE, 2024,

S. 1–4. ISBN: 9798331530143. DOI: [10.1109/BSN63547.2024.10780520](https://doi.org/10.1109/BSN63547.2024.10780520). <https://ieeexplore.ieee.org/document/10780520/>.

Gorbar, Michal, Roman Kontic, Philip Marmet, Lorenz Holzer und Dirk Penner: “DLP 3D printed hierarchical hybrid ceramic filters : design, fabrication, and performance analysis”. In: 10th International Congress on Ceramics (ICC'10), Montreal, Canada, 14-18 July 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/32451>.

Jan, Verstockt, Clarys Warre, Hillen Michaël, Verspeek Simon, Bonmarin Mathias, Thiessen Filip, Brochez Lieve und Steenackers Gunther: “HypIRskin: Thermography-Guided Device for Diagnosis and Characterization of Skin Cancer Lesions”. In: 2024 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA). 2024 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA). Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2024, S. 1–6. ISBN: 9798350307993. DOI: [10.1109/MeMeA60663.2024.10596792](https://doi.org/10.1109/MeMeA60663.2024.10596792). <https://ieeexplore.ieee.org/document/10596792/>.

Jazbinsek, Mojca, Uros Puc, Michael André Auer und O-Pil Kwon: “Ultra-broadband THz time-domain spectroscopy based on organic crystals for materials testing”. In: International Conference on Simulation of Organic Electronics and Photovoltaics (SimOEP), Winterthur, Switzerland, 2-4 September 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/32625>.

Marmet, Philip, Lorenz Holzer, Thomas Hocker und Gernot K. Boiger: “Modellbasierte Entwicklung von Elektroden für Festoxid-Brennstoffzellen”. In: VPE/PLM Swiss Symposium, OST – Ostschweizer Fachhochschule, Rapperswil, Schweiz, 11. April 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/30539>.

Medrano, Carolina, Tobias Bach, Peter Günter, Uros Puc, Michael Auer und Mojca Jazbinsek: “Terahertz spectroscopy and imaging up to 20 THz based on organic crystals”. In: *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XVII*. Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XVII. Hrsg. von Laurence P. Sadwick und Tianxin Yang. San Francisco, United States: SPIE, 11. März 2024, S. 13. ISBN: 978-1-5106-7030-3 978-1-5106-7031-0. DOI: [10.1117/12.3000136](https://doi.org/10.1117/12.3000136). <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12885/3000136/Terahertz-spectroscopy-and-imaging-up-to-20-THz-based-on/10.1117/12.3000136.full>.

Prestat, Michel, Philip Marmet, Yasser Safa, Lorenz Holzer, Shruti Banait, Laura Perrin, Roland Logé, Maxime Dumouchel und Flavien Vucko: “H₂O₂-driven corrosion of Ti6Al4V investigated by electrochemical impedance spectroscopy and quantitative microstructure analysis”. In: European Corrosion Congress (EUROCORR), Paris, France, 1-5 September 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31526>.

Regnat, Markus, Kurt Pernstich, Balthasar Blülle, Sandra Jenatsch, Moon K. Heo und Beat Ruhstaller: “Modeling the impact of the illumination geometry on the light conversion efficiency in quantum dot down-conversion films”. In: International Conference on Display Technology ICDT, Hefei, China, 31 March - 3 April 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/30630>.

Rodrigues Häusler, Ian C., Davide Paparo, Daniel Fehr, Raphael Hagen, Marta S. Velez Mestre und Mathias Bonmarin: “Assessment of Skin Impedance in Radiofrequency Therapy: A Study Utilizing Unique Electrode Form for Cutaneous Leishmaniasis Treatment”. In: 2023 IEEE International Humanitarian Technology Conference (IHTC). 2023 IEEE International Humanitarian Technology Conference (IHTC). Santa Marta, Colombia: IEEE, 2023, S. 1–5. ISBN: 9798350314311. DOI: [10.1109/IHTC58960.2023.10508818](https://doi.org/10.1109/IHTC58960.2023.10508818). <https://ieeexplore.ieee.org/document/10508818/>.

Schärer, Roman Pascal: “Modelling mass transport through porous flow battery electrodes”. In: iBAT Redox Flow Batteries Workshop, Dübendorf, Switzerland, 17. October 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31741>.

Schärer, Roman Pascal und Jürgen Schumacher: “A hybrid 3D/2D model for performance predictions of organic flow battery cells”. In: The International Flow Battery Forum (IFBF), Glasgow, Scotland, 25-27 June 2024. DOI: [10.21256/zhaw-31722](https://doi.org/10.21256/zhaw-31722). <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31722>.

Schärer, Roman Pascal und Jürgen Schumacher: "An open-source model for high-throughput flow battery cell performance predictions". In: 20th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (ModVal), Baden, Switzerland, 13-14 March 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31735>.

Schärer, Roman Pascal und Jürgen Schumacher: "Electrochemical interface model coupling oxygen reduction and degradation reactions in the cathode catalyst layer of a PEMFC". In: 21st Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (ModVal), Karlsruhe, Germany, 11-12 March 2025. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/32913>.

Schranz, Franziska, Vixay Phimmasane, Andreas Witzig, Andreas Rüst und Daniel Schmid: "User Assistance System for Smart Commercial Buildings - Use Cases and Proof of Concept". In: 2024 European Conference on Computing in Construction. 2024. DOI: [10.35490/EC3.2024.190](https://doi.org/10.35490/EC3.2024.190). https://ec-3.org/publications/conference/paper/?id=EC32024_190.

Schumacher, Jürgen und Roman Pascal Schärer: "Insights in MEA operation behavior from a modeling perspective I : performance and degradation modelling of MEAs". In: International Hybrid Workshop "Fuel Cell MEA Design", Freiburg, Germany, 10-11. October 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31724>.

Scoletta, Edoardo und Jürgen Schumacher: "A modelling framework for the simulation of coupled performance-degradation phenomena in proton exchange membrane fuel cells". In: 21st Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (ModVal), Karlsruhe, Germany, 11-12 March 2025. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/32802>.

Stanger, Katrin, Dardan Bajrami, Peter Wahl, Fintan Moriarty, Emanuel Gautier, Alex Dommann und Kongchang Wei: "Enabling hydrogel coating on silicone breast implants with poly(vinyl acetate) primer layer". In: SSB+RM2024 28th Annual Meeting "Complex materials and in vitro tissue models", St. Gallen, Switzerland, 4-5 September 2024. DOI: [10.21256/zhaw-31495](https://doi.org/10.21256/zhaw-31495). <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31495>.

Striewski, Friedrich, Ennio Luigi Comi, Fiona Tiefenbacher, Natalie Lack, Mattia Battaglia und Susanne Bleisch: "Application, Adaption and Validation of the Thermal Urban Road Normalization Algorithm in a European City". In: *Workshop on Visualisation in Environmental Sciences (EnvirVis)*. Hrsg. von Soumya Dutta, Kathrin Feige, Karsten Rink und Baldwin Nsonga. The Eurographics Association, 2024. ISBN: 978-3-03868-260-8. DOI: [10.2312/envirvis.20241135](https://doi.org/10.2312/envirvis.20241135). <https://diglib.org/handle/10.2312/envirvis20241135>.

Torre Cachafeiro, Miguel Angel, Ennio Comi, Sharun Parayil Shaji, Stéphanie Narbey, Sandra Jenatsch und Wolfgang Tress: "Visualizing ionic field screening in perovskite solar cells via photovoltaic quantum efficiency". In: International Conference on Simulation of Organic Electronics and Photovoltaics (SimOEP), Winterthur, Switzerland, 2-4 September 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/33260>.

Vucko, Flavien, Geoffrey Ringot, Philip Marmet, Yasser Safa, Lorenz Holzer, Shruti Banait, Laura Perrin, Roland Logé und Michel Prestat: "Fatigue-corrosion behaviour of Ti6Al4V alloys in H2O2-containing physiological solution". In: European Corrosion Congress (EUROCORR), Paris, France, 1-5 September 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/31523>.

Zbinden, Oliver, Evelyn Knapp und Wolfgang Tress: "Machine learning for surpassing limits in perovskite solar cells". In: International Conference on Simulation of Organic Electronics and Photovoltaics (SimOEP), Winterthur, Switzerland, 2-4 September 2024. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/33259>.

A.4 Patente

Bonmarin, Mathias, Gunter Festel, Christoph Geers, Marco Lattuada und Giulia Mirabello: "Determination of an unknown volume or weight of a sample by dynamic thermal imaging". Nov. 2024. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DEP4459265A1>.

Häusler, Ian, Davide Paparo, Daniel Fehr, Andreas Bachmann, Raphael Hagen, Mathias Bonmarin und Fabrizio Spano: "Device for skin or tissue treatment". Dez. 2024. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DW02024245572A1>.

Woodland, Kathryn, Madison Gass, Isabel Nearing, Grace Jolin, Ziya Isiksacan, Mathias Bonmarin, Sakthikumar Ambady und Ahmet Sabuncu: "Opacity testing through measured illuminance". Okt. 2024. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DW02024220801A1>.

A.5 Studierendenprojekte

S. AKUBUEZE, *Praxissemester BSc Medizininformatik*, Betreuer: D. Fehr.

M. ANDRES, J. HINNEN, *Entwicklung eines LED-basierten Sonnensimulators für die Solarzellenforschung*, Betreuer: K. Pernstich, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

J. AUS DER AU, R. MÜLLER, *Measuring the Skin Thermal Diffusivity In-vivo*, Betreuer: D. Fehr, Projektarbeit im Studiengang Systemtechnik.

S. BOLLETER, R. GEHRING, S. EMALE, *Microwave Hyperthermia for Cancer Treatment*, Betreuer: M. Bonmarin, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

Y. CORNAZ, *Erdreichtanbindung für Heiz- und Kühlsysteme ST*, Betreuer: A. Witzig, Bachelorarbeit im Studiengang Elektrotechnik.

A. DRIGATTI, L. KELLER, *Data Analysis for Blood Flow Sensor*, Betreuerin: E. Knapp, Bachelorarbeit im Studiengang Data Science.

A. EHRLER, *Intelligente Beschattungssysteme ET*, Betreuer: A. Witzig, Bachelorarbeit im Studiengang Elektrotechnik.

M. EUGSTER, *Praxissemester BSc Medizininformatik*, Betreuer: M. Bonmarin.

Q. FITZI, M. LUPO, *Entwicklung eines integrierten Blutvolumensensors für ein PoC-Messgerät*, Betreuer: D. Fehr, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

A. GARCIA BUSTOS, *Simulation of light-induced acoustic interactions with inner ear structures via plasmonic nanoparticle stimulation using Finite Element Methods (FEM)*, Betreuer: M. Jazbinsek, M. Bonmarin, Vertiefungsarbeit Masterstudiengang.

M. GNOS, M. WICKIHALDER, *Effiziente Heizungsanlage in einer Kirche*, Betreuer: A. Witzig, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

R. HAUS, *Upscaling of perovskite solar cells: from cell to module*, Betreuer: E. Knapp, E. Comi, Projektarbeit im Studiengang Systemtechnik.

R. HAUS, *Simulation and Optimization of Perovskite Solar Modules: A Software-Driven Approach*, Betreuer: E. Knapp, E. Comi, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

I. HÄUSLER, *Thermal Imaging Monitoring of Sweat Glands*, Betreuer: M. Bonmarin, Masterarbeit MSE Medical Engineering.

B. HEER, *Flexible multidirectional capacitive angle sensors for spine monitoring*, Betreuer: F. Spano, Vertiefungsarbeit Masterstudengang.

B. HEER, *DermatoTherma: Development of an artificial skin model for the characterization of radio-frequency heating*, Betreuer: F. Spano, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

N. KABIR, *Substrates for broadband terahertz time-domain spectroscopy of thin films*, Betreuerin: M. Jazbinsek, Vertiefungsarbeit Masterstudiengang.

N. KABIR, *Characterizing the spatial profile of deep UV light source*, Betreuer: M. Bonmarin, Vertiefungsarbeit Masterstudiengang.

T. KALONGI, *Flame-based synthesis for wound dressing applications*, Betreuer: F. Spano, Masterarbeit MSE Medical Engineering.

G.-L.-LIBERATO, S.-SUVAJAC, *Development and implementation of pressure sensors based on solid liquid composites*, Betreuer: F. Spano, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

J.T. LINK, *Praxissemester BSc Medizininformatik*, Betreuer: F. Spano.

S. MOHAMMAD, V.K. QUACH, *Perovskite Solar Cells*, Betreuer: W. Tress, Bachelorarbeit im Studiengang Informatik.

C. MÜNTENER, G. BURGER, *Modellierung eines Wohnraums in Matlab/Simscape für die Optimierung von Energiesystemen*, Betreuer: A. Witzig, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

A. OETSEN, *Development of an artificial intervertebral disk based on solid liquid composites*, Betreuer: F. Spano, Bachelorarbeit in Systems Engineering, Northeastern University - USA.

D. SHANMUGATHAS, *Praxissemester BSc Medizininformatik*, Betreuer: M. Bonmarin.

A. SUTHESAN, *Praxissemester BSc Medizininformatik*, Betreuer: D. Fehr.

A. SCHAUFELBERGER, *Microstructure Reconstruction Algorithms for the Catalyst Layer in Fuel Cells*, Betreuer: R. Schärer, Projektarbeit im Studiengang Informatik.

R. SCHWARZ, *Simulation of multi-group pedestrian flow*, Betreuer: M. Schmid, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

S. STEIGER, *A Quantitative Train-of-Four Monitoring Device*, Betreuer: M. Bonmarin, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

P. TEREFE, T. VOLLENWEIDER, *Red Blood Cells Monitoring and Preservation*, Betreuer: D. Fehr, Projektarbeit im Studiengang Systemtechnik.

P. TEREFE, T. VOLLENWEIDER, *Optimization and Characterization of an Optical Sensor Concept to Monitor Supercooled Blood*, Betreuer: D. Fehr, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

N. WARTMANN, *Microstructure Reconstruction Algorithms for the Catalyst Layer in Fuel Cells (ST)*, Betreuer: R. Schärer, Bachelorarbeit im Studiengang Informatik.

M. WYRSCH, *Development of a versatile wet-spinning system for multi-layered polymer fibers*, Betreuer: F. Spano, Vertiefungsarbeit Masterstudengang.

M. WYRSCH, *Fiber-based strain sensors*, Betreuer: M. Bonmarin, Bachelorarbeit im Studiengang Systemtechnik.

J. ZWICKY, *Development of a Multimodal Optical Measurement System for Bilirubin Quantification and Differentiation*, Betreuer: D. Fehr, Masterarbeit MSE Photonics.

A.6 Vorlesungen

M. BATTAGLIA, *Physics Engines*, FS25, Bachelor of Science.

D. BERNHARDSGRÜTTER, *Lineare Algebra 1 für Systemtechnik*, HS24, Bachelor of Science.

D. BERNHARDSGRÜTTER, *Lineare Algebra 2 für Systemtechnik*, FS25, Bachelor of Science.

D. BERNHARDSGRÜTTER, *Analysis 1 für Wirtschaftsingenieurwesen*, HS24, Bachelor of Science.

D. BERNHARDSGRÜTTER, *Analysis 2 für Wirtschaftsingenieurwesen*, FS25, Bachelor of Science.

M. BONMARIN, *Physik für Systemtechnik 1 – Vorlesung*, HS24, Bachelor of Science.

M. BONMARIN, *HealthTec Summer School – Inventing next generation medical devices: From clinic immersion to MVP & business plan*, FS24, Master of Science in Engineering.

M. BONMARIN, *Medical Market Access*, HS24, Master of Science in Engineering.

D. FEHR, *Grundlagen der Elektrotechnik und Digitaltechnik für Informatik – Praktikum*, HS24, Bachelor of Science.

D. FEHR, *Physikalische Grundlagen der Sensorik – Thema Elektronik*, HS24, Bachelor of Science.

D. FEHR, *Photonics EVA – Thermography*, FS25, Master of Science in Engineering.

D. FEHR, *Thermal Devices in Medicine*, FS25, Bachelor of Science.

T. HOCKER, *Physik 1 für Aviatik und Mobility Science*, HS24, Bachelor of Science.

T. HOCKER, *Physik 2 für Aviatik und Mobility Science*, FS25, Bachelor of Science.

T. HOCKER, *Projektmodul 1 für Aviatik*, HS24, Bachelor of Science.

T. HOCKER, *Projektmodul 2 für Aviatik*, FS25, Bachelor of Science.

T. HOCKER, *Thermische Energiesysteme*, FS25, Bachelor of Science.

M. JAZBINSEK, *Physik 1 für Maschinentechnik und Energie- und Umwelttechnik – Vorlesung & Praktikum* HS24, Bachelor of Science.

M. JAZBINSEK, *Physik 2 für Maschinentechnik und Energie- und Umwelttechnik – Vorlesung & Praktikum* FS25, Bachelor of Science.

M. JAZBINSEK, *Photonics EVA – Terahertz Spectroscopy*, FS25, Master of Science in Engineering.

C. KIRSCH, *Analysis 1 für Systemtechnik*, HS24, Bachelor of Science.

C. KIRSCH, *Analysis 2 für Systemtechnik*, FS25, Bachelor of Science.

C. KIRSCH, *Analysis 3 für Systemtechnik und Elektrotechnik*, HS24, Bachelor of Science.

- C. KIRSCH, *Numerik für Systemtechnik und Elektrotechnik*, FS25, Bachelor of Science.
- C. KIRSCH, *Intensivkurs in Mathematik, Sommer 24*, Studieninteressierte.
- E. KNAPP, *Modellierung komplexer Systeme MKS*, HS24, Bachelor of Science.
- E. KNAPP, *Numerik*, FS25, Bachelor of Science.
- E. LINDER, *Lineare Algebra 2*, FS25, Bachelor of Science.
- P. MARMET, *Mathematik: Analysis 1 für Aviatik, Vorlesung und Praktikum*, HS24, Bachelor of Science.
- P. MARMET, *Mathematik: Analysis 2 für Aviatik, Vorlesung und Praktikum*, FS25, Bachelor of Science.
- K. PERNSTICH, *Physik: Grundlagenprojekt 1 für Verkehrssysteme*, HS24, Bachelor of Science.
- K. PERNSTICH, *Physik: Grundlagen der Elektrotechnik und Digitaltechnik, Vorlesung und Praktikum, Studiengang Informatik*, HS24, Bachelor of Science.
- K. PERNSTICH, *Physik: Grundlagenprojekt 2 für Verkehrssysteme*, FS25, Bachelor of Science.
- K. PERNSTICH, *Photonics EVA – Quantum Dot Downconversion*, FS25, Master of Science in Engineering.
- K. PERNSTICH, *Data Science: Internet of Things for Data Science*, FS25, Bachelor of Science.
- K. PERNSTICH, *Physik: Physics Engines, Studiengang Informatik*, FS25, Bachelor of Science.
- B. RUHSTALLER, *Applied Photonics - FS25*, Master of Science and Engineering.
- B. RUHSTALLER, *Advanced Thin Films – HS24*, Master of Science and Engineering.
- F. SCHRANZ, A. WITZIG, *Naturwissenschaften für Medizininformatik*, FS24, Bachelor of Science.
- F. SCHRANZ, *Grundlagen der Elektrotechnik und Digitaltechnik für Informatik - Praktikum*, HS24, Bachelor of Science.
- F. SCHRANZ, *Physics Engines*, FS25, Bachelor of Science.
- J. O. SCHUMACHER, *Lineare Algebra 2*, FS25, Bachelor of Science.
- J. O. SCHUMACHER, *Wind-, Wasserkraft, Sektorkopplung, synthetische Treibstoffe*, FS25, Bachelor of Science.
- J. O. SCHUMACHER, *Multiphysics Modelling and Simulation*, FS25, Master of Science in Engineering.
- W. TRESS, *Physik 1 für Maschinentechnik*, HS24, Bachelor of Science.
- W. TRESS, *Physik 2 für Maschinentechnik*, FS25, Bachelor of Science.
- W. TRESS, *Physics on Micro and Nano Scale*, HS24, Master of Science in Engineering.
- A. WITZIG, *Physik 3, Studiengang Verkehrssysteme*, HS24, Bachelor of Science.

A. WITZIG, *Physik 3, Studiengang Systemtechnik, FS25*, Bachelor of Science.

A. WITZIG, *Wind-, Wasserkraft, Sektorkopplung und synthetische Treibstoffe, Studiengang Energie und Umwelttechnik, FS25*, Bachelor of Science.

A.7 ICP-Spin-off-Firmen



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.coatmaster.ch

Die coatmaster AG (zuvor Winterthur Instruments) entwickelt Messsysteme für schnelle berührungslose und zerstörungsfreie Prüfung 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.

A.8 Laborinfrastruktur

Ein häufig unterschätzter Aspekt der Entwicklung von physikalischen Simulationsmodellen ist deren Validierung sowie der damit verbundene Verbesserungszyklus. Es handelt sich hier bzgl. Aufwand häufig um wesentlich mehr als ein paar einfache Experimente zum Abgleich mit der Simulation. Stattdessen ist dieser Teil des Multiphysik-Entwicklungsprozesses der tatsächliche Link zwischen theoretischer Entwicklung und betrieblicher Realität. Validierungsanstrengungen und der damit verbundene, notwendige Modellverbesserungszyklus können bis 60% des Gesamtprojekts ausmachen. Entsprechend wichtig ist es, diesem Bereich seine entsprechende strategische Bedeutung zuzuerkennen. Der Erhalt bzw. der Ausbau der Möglichkeiten eines Validierungslabors ist daher wichtig.

Prozesslabor für organische Elektronik

Im Zentrum dieses Labors steht seit 2012 eine Glove Box mit Stickstoffatmosphäre und integrierter Vakuumkammer zur Bauelementherstellung mittels thermischer Verdampfung von organischen Halbleitern sowie Metallen. Eine zweite Box wurde im Jahr 2020 installiert. Aus Lösungen können im Aufschleuderverfahren ebenfalls dünne Schichten hergestellt werden und Chemiekapellen stehen zur Material- und Probenaufbereitung zur Verfügung. Das Labor verfügt über Messmethoden für die Bestimmung von optischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften der Bauelemente.

Elektroniklabor

Das Elektroniklabor erlaubt uns die effiziente Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung von Prototypen für F&E Projekte mit unseren Industriepartnern. Wir können damit unsere Simulationsmodelle an realen Systemen validieren, und es ermöglicht uns den Einsatz spezialisierter Instrumentation und Sensorik für die Versuchsaufbauten in unseren anderen Laboren. Nicht zuletzt profitieren auch die Studierenden von den Möglichkeiten unseres Elektroniklabors, wobei wir hier den Fokus auf Rapid Prototyping legen. Diesen Ansprüchen wird unser Labor mit einer ausgewogenen Grundausstattung gerecht, wie SMD-fähige Lötarbeitsplätze mit einem Grundstock an Komponenten, ein Arbeitsplatz für einfache mechanische Arbeiten und verschiedene Laborgeräte wie Speisungen, Frequenzgeneratoren, Multimeter, Oszilloskope, DAQs, Impedanzanalysatoren und Debugging-Werkzeuge für eingebettete Systeme.

Laser und THz-Photonics Lab

In diesem Labor stehen Spektroskopiesysteme für sichtbaren (UV/Vis) und unsichtbaren (THz) Bereich zur Verfügung bzw. werden weiterentwickelt. Mit fs-Laserpulsen werden über nichtlineare Effekte in einem organischen Kristall THz Strahlen erzeugt, welche durch eine zu untersuchende Probe geschickt werden, um deren Eigenschaften nicht-invasiv zu ermitteln. Die sichtbare Spektroskopie an temperaturabhängigen Proben wird in einer Vakuumkammer gemessen. Ein Supercontinuum Lasersystem wurde im Jahr 2022 angeschafft mit Kofinanzierung durch den Schweizer Nationalfonds.

Dünnschichtcharakterisierungslabor

In diesem Labor stehen verschiedene Messgeräte zur Verfügung, um Dünnschichtproben zu untersuchen mit winkelabhängiger Ellipsometrie, Profilometrie, 3D optischer Mikroskopie und FTIR Spektroskopie.

Nano-Imaging Lab

Die aktuelle Erforschung von Perowskit-Halbleitern benötigt Informationen über die Nanostruktur. Hierfür wurde 2022 ein Rasterkraftmikroskop (AFM) kombiniert mit einem optischen Spektrometer angeschafft. Es ist ein hoch-technisches komplexes Gerät, das konfokale optische Mikroskopie wie Lumineszenz und Raman erlaubt, die mit AFM-Techniken kombiniert werden können und dadurch auch Nahfeldmessungen zulassen. Die Investition wurde aus dem ERC Grant OptElon (grant agreement no. 851676) bezahlt.

Galvaniklabor (Kupferelektrolyse)

Das Herzstück des Galvanik-Labors ist eine experimentelle Kupferraffinationselektrolysezelle. In dieser Elektrolysezelle können unter Starkstrom aber Niedrigspannung kontrollierte Experimente zu strömungsgekoppelten Ionen-Transportphänomenen durchgeführt werden. Ursprünglich zwar für die Kupferraffination entwickelt, kann die Anlage auch zum Nachstellen alternativer Ionenübertragungsvorgänge (z.B. für galvanische Beschichtungsmethoden) herangezogen werden. Die Anlage ist vollelektronisch gesteuert, besitzt ein weitentwickeltes Interface, eine Selbstreinigungsanlage sowie entsprechende Be-/Entlüftungsanlagen.

Soft Materials Lab

Wir verfügen über ein voll ausgestattetes Labor mit zwei chemischen Abzügen, in welchem wir unter sicheren Bedingungen mit verschiedenen weichen Materialien (wie Polymeren, Hydrogelen etc.) arbeiten können. Beispiele verfügbarer Geräte: 3D-Biodrucker (Flüssigdruck), Stabbeschichter, Ultraschallreiniger, Zentrifuge, Magnetrührer, Heizplatten, pH-Meter, etc. Mit diesen Geräten können wir anspruchsvolle Prototypen für biomedizinische Anwendungen entwickeln.

Thermal Design Lab

Physikochemische Computermodelle sind wertvolle Hilfsmittel zur Entwicklung neuer funktionaler Materialien und industrieller Prozesse. Deren Zuverlässigkeit und praktischer Nutzen hängt jedoch stark von den verwendeten Stoffdaten ab. Ausserdem sind vor ihrem Einsatz meist umfangreiche Kalibrierungen und Validierungen notwendig. Mit dem Thermal Design Lab verfolgen wir das Ziel, über Temperatur- und Wärmeflussmesstechnik in Kombination mit thermischer Stoffdatenermittlung möglichst präzise Inputs für unsere Computermodelle zu generieren. Aktuell umfasst das Thermal Design Lab eine breite Palette an Kontakttemperatursensoren und Wärmebildkameras mit unterschiedlichen Spektralbereichen. Des Weiteren verwenden wir verschiedene Methoden zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeiten von Flüssigkeiten und Feststoffen.

Medizininformatiklabor

Während dem Aufbau des neuen Studiengangs Medizininformatik wird das Labor zuerst primär für reguläre Praktika genutzt. Später werden darin vermehrt auch Versuche aus Projekt- und Bachelorarbeiten durchgeführt. Wie in den anderen thematischen Schwerpunkten sind auch in der Medizininformatik und Medizintechnik während der vorlesungsfreien Zeit die Studierenden gerne gesehen als Assistierende im wertvollen Einsatz für die Forschungsprojekte des ICP.

A.9 ICP-Mitarbeitende

Name	Function	e-Mail
Michael Auer	Wissenschaftlicher Assistent	auei@zhaw.ch
Dardan Bajrami	Doktorand	bajr@zhaw.ch
Mattia Battaglia	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	batg@zhaw.ch
David Bernhardsgrütter	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	bens@zhaw.ch
Prof. Dr. Gernot Boiger	Dozent, Teamleiter	boig@zhaw.ch
Marlon Boldrini	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	bolm@zhaw.ch
Prof. Dr. Mathias Bonmarin	Dozent, Schwerpunktleiter	bmat@zhaw.ch
Zoi Bratsos	Assistentin Institutsleitung	brtt@zhaw.ch
Vincent Buff	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	buff@zhaw.ch
Ennio Comi	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	comi@zhaw.ch
Lourenço Corte Vieira	Wissenschaftlicher Assistent	corv@zhaw.ch
Martino Diana	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	diaa@zhaw.ch
Alessio Drigatti	Wissenschaftlicher Assistent	drig@zhaw.ch
Axel Dullak	Wissenschaftlicher Assistent	dull@zhaw.ch
Dr. Firouzeh Ebadi Garjan	Wissenschaftliche Mitarbeiterin	ebad@zhaw.ch
Sandro Ehrat	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	ehrd@zhaw.ch
Daniel Fehr	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	fehd@zhaw.ch
Cristian Fiant	Wissenschaftlicher Assistent	fian@zhaw.ch
Christian Grossmann Aybar	Wissenschaftlicher Assistent	grsm@zhaw.ch
Raphael Hagen	Wissenschaftlicher Assistent	hagp@zhaw.ch
Basil Heer	Wissenschaftlicher Assistent	hees@zhaw.ch
Prof. Dr. Thomas Hocker	Dozent, Schwerpunktleiter	hoto@zhaw.ch
Dr. Lorenz Holzer	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	holz@zhaw.ch
Marco Hostettler	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	hose@zhaw.ch
Dimitre Iankov	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	iank@zhaw.ch
Dr. Mojca Jazbinsek	Dozentin, Teamleiterin	jazb@zhaw.ch
Dr. Fuxiang Ji	Postdoktorand	fuxi@zhaw.ch
Dr. Lukas Keller	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	kelu@zhaw.ch
Dr. Christoph Kirsch	Dozent	kirs@zhaw.ch
Dr. Evelyne Knapp	Dozentin, Teamleiterin	hube@zhaw.ch
Tabea Krucker	Doktorandin	kruk@zhaw.ch
Esther Linder	Wissenschaftliche Mitarbeiterin	lidd@zhaw.ch
Gabriel Martins Marcello	Praktikant	macg@zhaw.ch
Dr. Philip Marmet	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	mame@zhaw.ch
Daniel Meier	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	meda@zhaw.ch
Kazem Meraji	Doktorand	meaj@zhaw.ch
Mahdi Mohammadi	Wissenschaftlicher Assistent	mohd@zhaw.ch
Sharun Parayil Shaji	Wissenschaftlicher Assistent	shaj@zhaw.ch
Dr. Kurt Pernstich	Dozent, Teamleiter	pern@zhaw.ch
Dr. Uros Puc	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	pucu@zhaw.ch
Prof. Dr. Markus Roos	Dozent	roor@zhaw.ch
Prof. Dr. Beat Ruhstaller	Dozent, Schwerpunktleiter	ruhb@zhaw.ch
Dr. Amit Sachan	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	sach@zhaw.ch
Tristan B. Sachsenweger	Doktorand	sacs@zhaw.ch
Dr. Yasser Safa	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	safa@zhaw.ch
Jim Doga Salma	Wissenschaftlicher Assistent	salj@zhaw.ch
Dr. Guido Sartoris	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	srts@zhaw.ch
Dr. Roman Schärer	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	scsl@zhaw.ch
Dr. Matthias Schmid	Dozent, stellvertretender Institutsleiter	scmi@zhaw.ch
Dr. Franziska Schranz	Wissenschaftliche Mitarbeiterin	scza@zhaw.ch
Alain Schubiger	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	scug@zhaw.ch
Prof. Dr. Jürgen Schumacher	Dozent, Schwerpunktleiter	schm@zhaw.ch

Laura Schusser	Wissenschaftliche Assistentin	shus@zhaw.ch
Edoardo Scoletta	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	sooe@zhaw.ch
Dr. Fabrizio Spano	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	span@zhaw.ch
Denis Stahl	Wissenschaftlicher Assistent	saah@zhaw.ch
Severin Steiger	Wissenschaftlicher Assistent	stgs@zhaw.ch
Camilo Tello Fachin	Wissenschaftlicher Assistent	telo@zhaw.ch
Miguel Torre	Wissenschaftlicher Assistent	torc@zhaw.ch
Prof. Dr. Wolfgang Tress	Dozent, Teamleiter	trew@zhaw.ch
Roland Wirth	Wissenschaftlicher Assistent	with@zhaw.ch
Prof. Dr. Andreas Witzig	Dozent, Institutsleiter	wita@zhaw.ch
Mario Wyrsh	Wissenschaftlicher Assistent	wycr@zhaw.ch
Oliver Zbinden	Doktorand	zbio@zhaw.ch
Jan Zwicky	Wissenschaftlicher Assistent	zwij@zhaw.ch

A.10 Standort

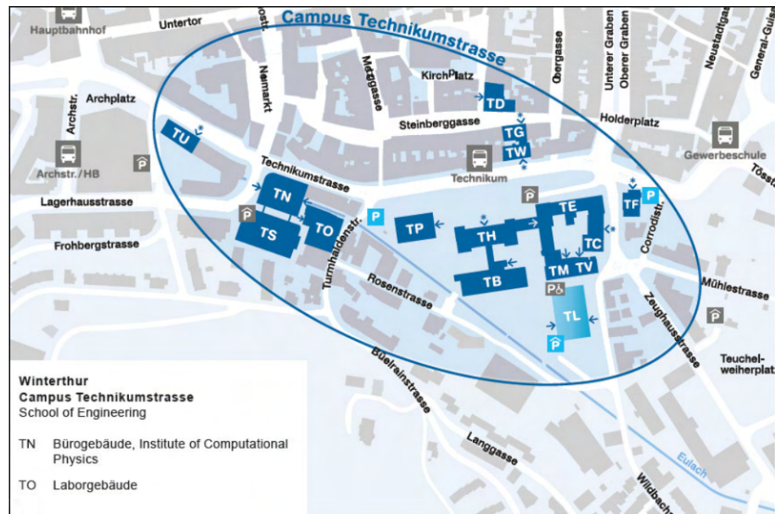
ICP Institute of Computational Physics

Technikumstrasse 71
Postfach
CH-8401 Winterthur

www.zhaw.ch/icp

Kontakt

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



TN-Gebäude

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften

School of Engineering

ICP Institute of
Computational Physics

Technikumstrasse 71
Postfach
CH-8401 Winterthur

Telefon +41 58 934 45 73
andreas.witzig@zhaw.ch
www.zhaw.ch/icp