

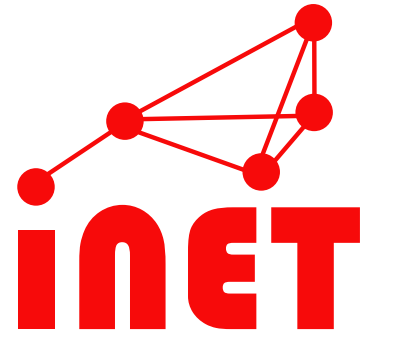
# Exploring DSME MAC for LoRa - A System Integration and First Evaluation



José Álamos\*, Peter Kietzmann\*, Thomas C. Schmidt\*, Matthias Wählisch†

\* Hamburg University of Applied Sciences, Department of Computer Science, Germany

† Freie Universität Berlin, Institute of Computer Science, Germany



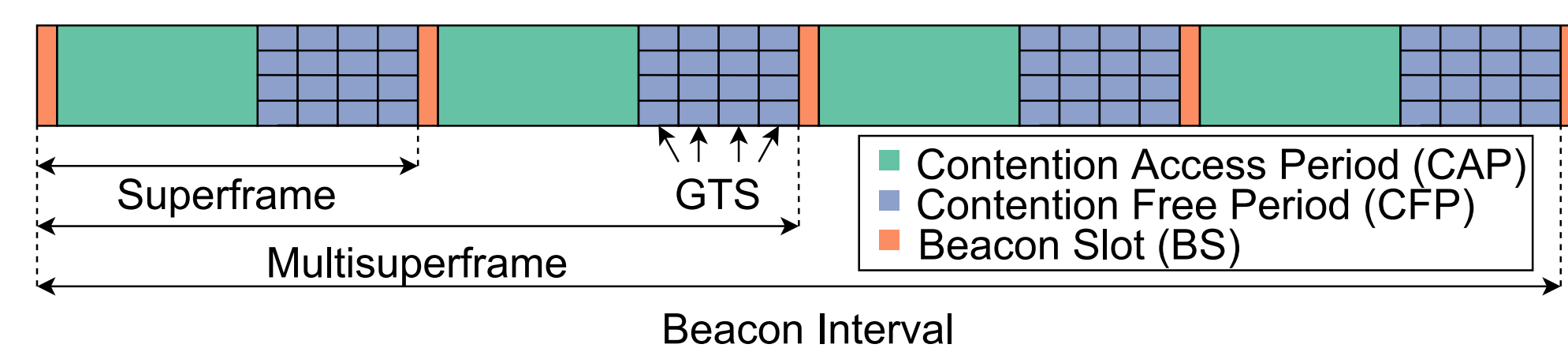
## Introduction & Motivation

- LoRa is a low-throughput long-range wireless technology.
- LoRaWAN is a network architecture for LoRa.
- Limitations of LoRaWAN
  - Low downlink rate and unpredictable latency.
  - Hard to distribute applications across the Internet.
  - Mandatory infrastructure backhaul.
- Potentials of time-slotted MAC layers [1] to overcome LoRaWAN limitations.
- We implement IEEE 802.15.4e DSME over LoRa in the Open Source IoT operating system RIOT

## Background

### IEEE 802.15.4e DSME MAC

- Coordinated communication based on superframes, which consist of: beacon slot (BS), contention access period (CAP) and contention free period (CFP).
- Two data transmission options:
  - **CAP**: CSMA-CA
  - **CFP**: Guaranteed Time Slot (GTS)



### DSME over LoRa

- Proposal of DSME-LoRa [2]
  - MAC and PHY mappings.
  - Omnet++ based simulation environment.

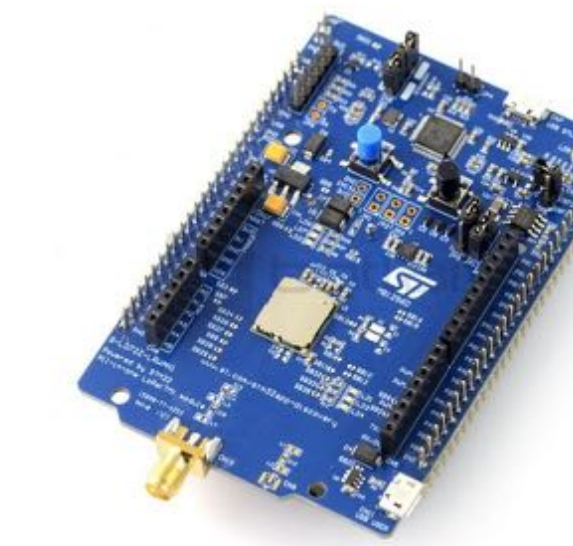
## Challenges

- Device de-synchronization due to long time on air.
  - Need for precise and accurate timer platform.
- LoRa devices do not add RX timestamp.
  - Requires estimation from radio IRQ events.
- Concurrent hardware access between OS and DSME.
  - Need to leverage HW operations to the OS.
- Constrained memory resources.
  - Need for slim integration and data de-duplication.

## Experiment Deployment

### Target Platform

- B-L072z-LRWAN1
  - ARM Cortex-M0 @ 32 MHz
  - 192 kB of ROM & 20 kB of RAM
  - SX1276 LoRa transceiver



### Deployment on FIT IoT-LAB

- Very large scale IoT testbed with 1500+ nodes.
- Provides 20 x B-L072z-LRWAN1 nodes.

## Evaluation

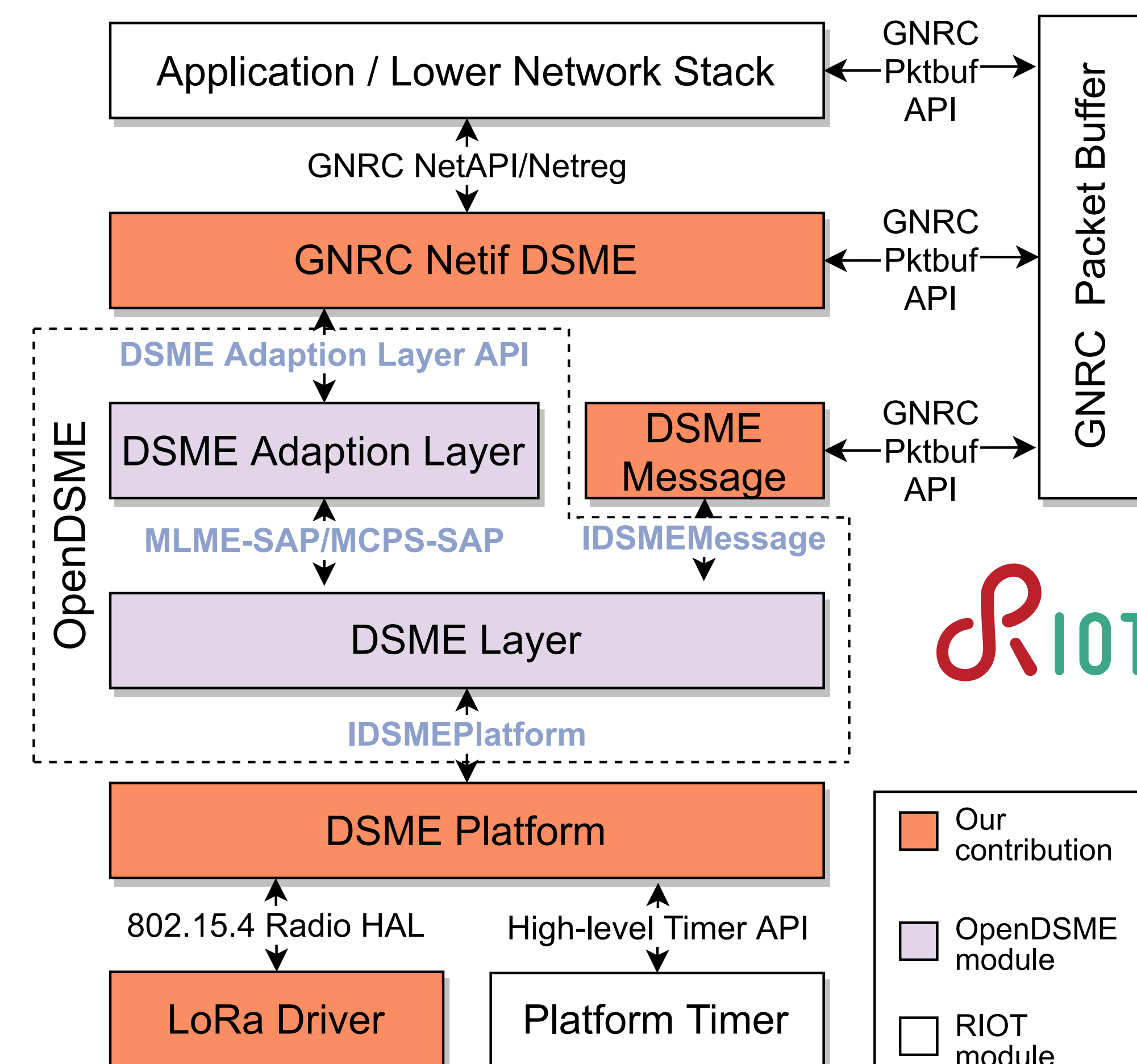
### Transmission during CAP

- Completion time increases with an increase of network size and a decrease of TX interval.
- PRR decreases with an increase of network size and a decrease of TX interval.

### Transmission during CFP

- Completion time and PRR do not vary with network size.
- MAC queue does not overflow  $\Rightarrow \approx 0\%$  packet loss.

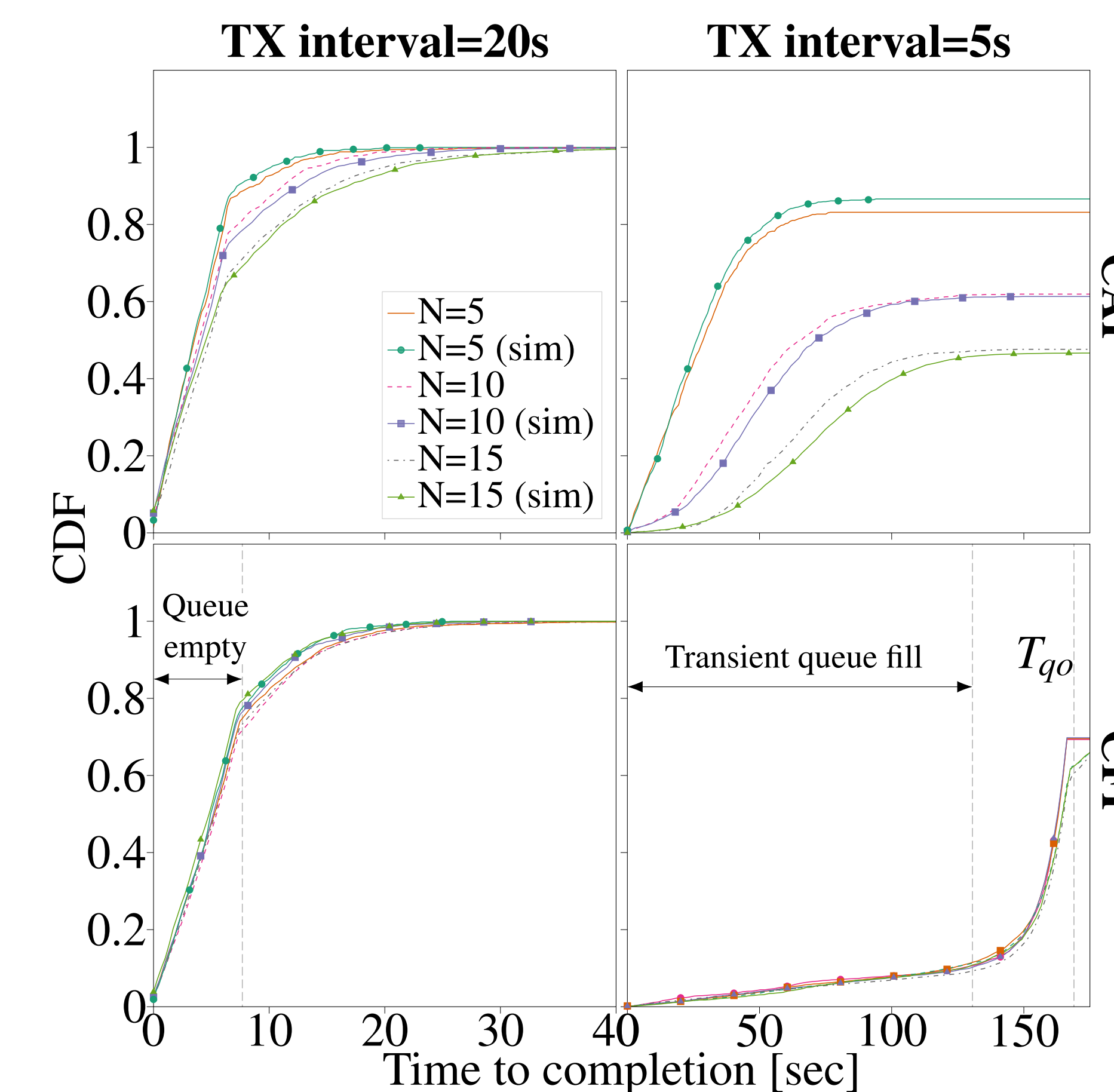
## Implementation



Consumes  $\approx 108$  kB of ROM and  $\approx 12$  kB of RAM.

## Experiment Results

### Completion time and PRR for varying number of nodes



## Achievements

- ✓ First implementation of DSME-LoRa on real hardware.
- ✓ Evaluation of the performance on resource constrained hardware in an open-access testbed.
- ✓ Validation of DSME-LoRa simulation environment.

## Next steps

- Evaluation of energy consumption
  - Deploy on battery-powered devices.
- IPv6 over DSME-LoRa
  - Adapt concepts proposed by the IETF 6TiSCH group

## References

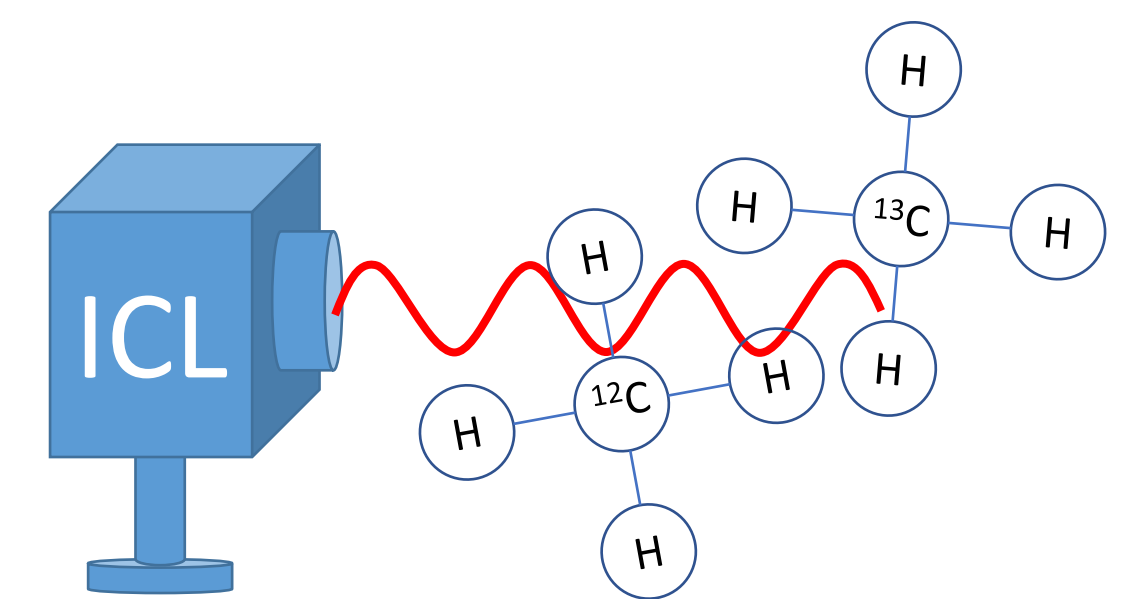
- [1] D. Zorbas and X. Fafoutis, "Time-Slotted LoRa Networks: Design Considerations, Implementations, and Perspectives," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 84 – 89, 3 2021.
- [2] J. Alamos, P. Kietzmann, T. C. Schmidt, and M. Wählisch, "DSME-LoRa – A Flexible MAC for LoRa," in *Proc. of 29th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2021), Poster Session*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, November 2021, accepted for publication.



# Entwicklung eines KI-basierten Sensors zur Bestimmung der isotopologischen Zusammensetzung von Treibhausgasen

## EINE NEUE METHODE FÜR DIE ERFORSCHUNG KLIMATISCHER PROZESSE

In der überwiegenden Zahl an Diskussionen bezogen auf den Klimawandel wird oftmals allein Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas proklamiert. Dabei gerät beispielsweise der Einfluss von Methan (ein kurzkettiger Kohlenwasserstoff) auf den Klimawandel in den Hintergrund. Es ist bewiesen, dass Methan einen 28-fach stärkeren Einfluss auf die klimatischen Temperaturänderungen im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid bewirkt, bezogen auf 100 Jahre ([1], S. 2). Mit der neuen Methode wird es möglich sein, die Quellen der kurzkettigen Kohlenwasserstoffe in unserer Atmosphäre zu identifizieren.



Laserstrahlung des Interbandkaskadenlasers trifft auf Methan-Isotopologen.

### Einleitung

Der anthropogene Verbrauch fossiler Brennstoffe generiert jährlich um 8 Gigatonen atmosphärischen Kohlenstoff (GtC/a). Im Gegensatz dazu speichern die arktischen Permafrostböden mindestens 600 GtC und die Weltmeere mehr als 11.000 GtC. Die Freisetzung eines Bruchteils der Kohlenstoffe aus den vorhergehend genannten Speichern, ausgelöst durch eine Temperaturerhöhung in der polaren Troposphäre, würde zu weitreichenden negativen klimatischen Effekten führen.

In diesem Moment werden aus den genannten Quellen Kohlenwasserstoffe freigesetzt. Das Isotopenverhältnis ( $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ) der emittierten Kohlenwasserstoffe ermöglicht die Rückverfolgung zu ihren vielfältigen biogenen und anthropogenen Quellen.

### Zielsetzung des Projektes

Das Hauptziel des Projektes ist die Entwicklung eines spektroskopischen Sensors zur isotopelektiven Detektion von Treibhausgasen. Aufgrund der Tatsache, dass Methan, Ethan und Propan einen rund 28-fach stärkeren Einfluss auf die klimatischen Temperaturänderungen im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid hat, liegt der Fokus zunächst auf den drei genannten kurzkettigen Kohlenwasserstoffen.

### Interbandkaskadenlaser

Distributed Feedback Interbandkaskadenlaser (DFB-ICL) werden als Laserstrahlungsquelle für die Spektroskopie eingesetzt. Es handelt sich bei den DFB-ICL um eine Weiterentwicklung des Quantenkaskadenlasers, sie sind erst seit wenigen Jahren auf dem Markt erhältlich. DFB-ICL ermöglichen eine ultra-hochauflösende Spektroskopie, da ihre spektrale Linienbreite weniger als  $3 \cdot 10^{-4}$  nm beträgt. Damit eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten in der Spektroskopie. Des Weiteren sind DFB-ICL sehr kompakt, robust und vergleichsweise einfach bei Raumtemperatur zu betreiben. Daher sind sie ebenfalls dafür geeignet,

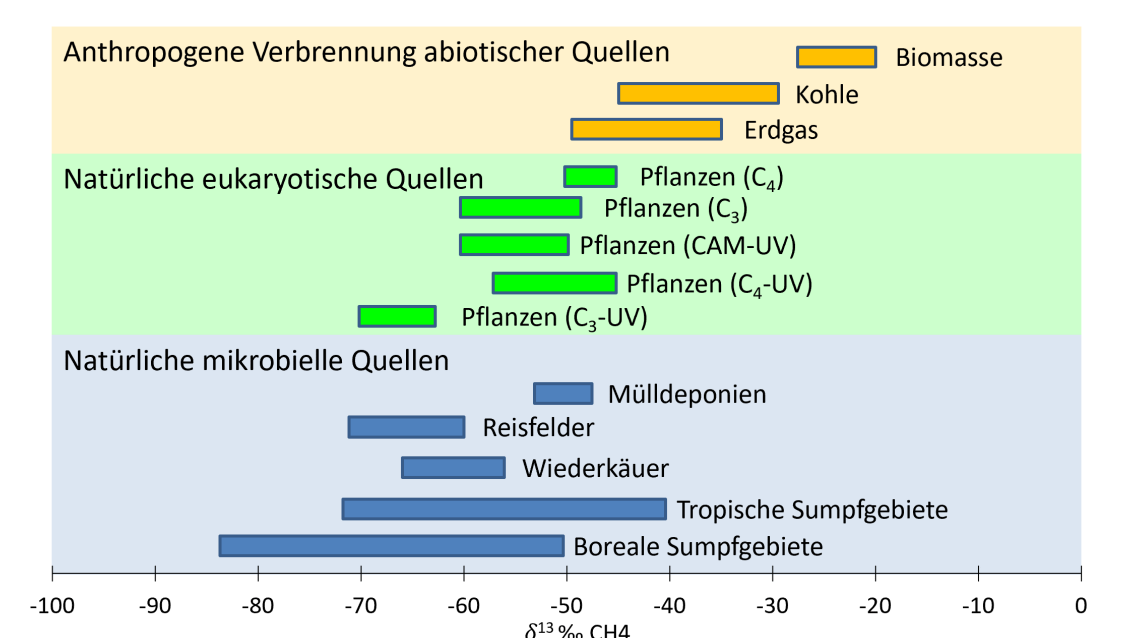
in portablen Geräten eingesetzt zu werden. Die Interbandkaskadenlaser lassen sich zudem direkt durch den Betriebsstrom in ihrer emittierten Wellenlänge modulieren. Dadurch entfällt ein so genannter „Chopper“, welcher den Laserstrahl mechanisch periodisch unterbricht und so dessen Modulation bewirkt. Die Möglichkeit der direkten Modulation trägt zur Portabilität des Lasers bei.

### Photoakustische Spektroskopie (PAS)

Als spektroskopische Methode kommt die photoakustische Spektroskopie (PAS) zum Einsatz, da diese Methode aufgrund ihrer Eigenschaften für den hier beschriebenen Anwendungsfall prädestiniert ist. PAS basiert auf der Absorption der Laserstrahlung durch die zu analysierenden Gasmoleküle. Die absorbierte Energie der Photonen führt zu einem Anstieg der kinetischen Energie der Gasmoleküle und damit auch zur Temperaturerhöhung des Gases. Die durch die direkte Modulation des Lasers bewirkte periodische Temperaturerhöhung führt zu einer Druckänderung, dessen Schallwelle durch ein Mikrofon in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Für die Berechnung der isotopologischen Konzentrationen auf Basis der gewonnenen spektralen Daten wird ein Algorithmus auf Basis von künstlicher Intelligenz benötigt, welcher zu entwickeln ist. Durch diesen Ansatz lassen sich eine hohe Detektionssensitivität und -selektivität erreichen, sowie eine kurze Messzeit.

### Weitere Einsatzgebiete

Das Verhältnis der Methan kurzkettigen Isotopologen, bspw.  $^{13}\text{CH}_4 / ^{12}\text{CH}_4$  liefert fundamentale Erkenntnisse über den Kohlenstoffkreislauf der Erde. Des Weiteren ist das Mischungsverhältnis von Ethan, Propan und anderen nicht-Methan Kohlenwasserstoffen ein wichtiger Indikator für atmosphärische Oxidations- und Transportprozesse für regionale und globale Bereiche. Die für die beiden beschriebenen Fälle benötigten Messwerte ließen sich mit dem neu entwickelten Sensor erfassen.



Methan-Isotopenverhältnisse verschiedener Quellen [2].

### Quellen

1. Methan - Auswirkungen auf Klima und Gesundheit. URL: [http://www.duh.de/uploads/tx\\_duhdownloads/DUH\\_Hintergrundpapier\\_Methan.pdf](http://www.duh.de/uploads/tx_duhdownloads/DUH_Hintergrundpapier_Methan.pdf) (besucht am 12.01.2022).
2. Biogeosciences, 17, 3891–3901, 2020 (<https://doi.org/10.5194/bg-17-3891-2020>).
3. Bahr, M.-S.; Wolff, M. (2021). Interferometric Technique for the Spectral Characterization of High Frequency Current-Modulated Mid-Infrared Semiconductor Lasers. Photonics, 8, 443. <https://doi.org/10.3390/photonics8100443>.
4. Bahr, M.-S.; Wolff, M. (2021). Konferenz-Poster: Interferometric technique for the spectral characterization of current modulated mid-infrared semiconductor lasers. Konferenz: International School of Quantum Electronics, 64th Course, Progress in Photoacoustic & Photothermal Phenomena.
5. Loh, A.; Wolff, M. (2017). Absorption cross sections of  $^{13}\text{C}$  ethane and propane isotopologues in the  $3 \mu\text{m}$  region. JQSRT, 203, 517-521.
6. Loh, A.; Wolff, M. (2019). High Resolution Spectra of  $^{13}\text{C}$  Ethane and Propane Isotopologues Photoacoustically Measured using Interband Cascade Lasers near  $3.33$  and  $3.38 \mu\text{m}$ , respectively, JQSRT, 227, 111-116.

### KONTAKT

M.Sc. Marc-Simon Bahr  
marc-simon.bahr@haw-hamburg.de  
+49 40 42875 8663

Prof. Dr. Marcus Wolff  
marcus.wolff@haw-hamburg.de  
+49 40 42875 8624



# StaTuR—Prototyp eines Stacks aus tubulären Redox-Flow-Batteriezellen

Fabian Brandes, Peter Kuhn, Simon Ressel, Thorsten Struckmann

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Heinrich Blasius Institut für physikalische Technologien

## Einführung & Motivation

Eine vielversprechende Option für eine flexible Energiewandlung und -speicherung mit rasant wachsenden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bilden Redox-Flow-Batterien (RFB).

Durch die Verschaltung einzelner Redox-Flow-Zellen zu Stacks und der Energiespeicherung über Redox-Paare in separat gelagerten Elektrolyten können stationäre Speichersysteme mit nahezu unabhängig skalierbarer Leistung und Kapazität realisiert werden.

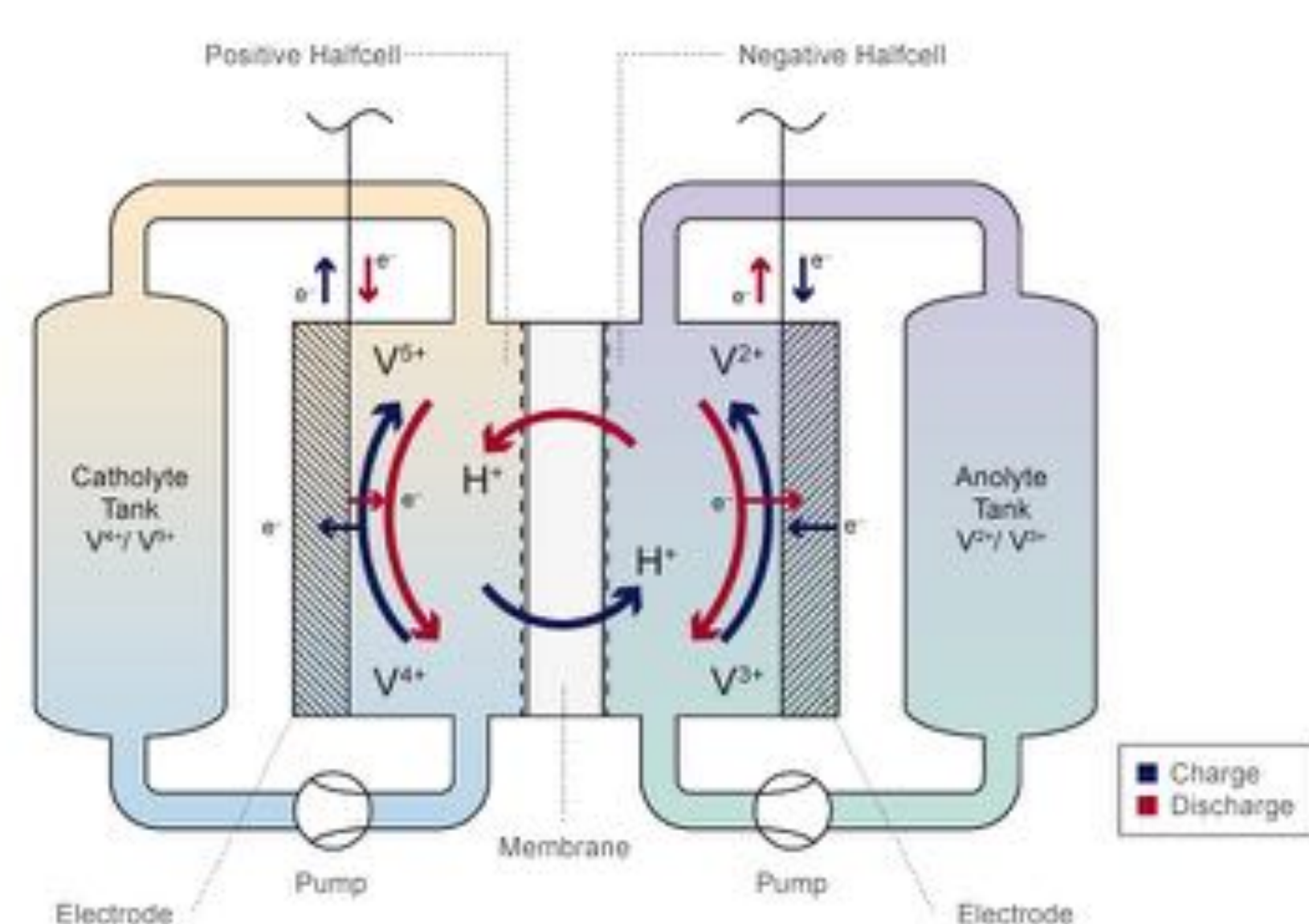


Abb. 1: Funktionsweise einer Vanadium-RFB [4]

Das Gesamtziel des im Dezember 2018 gestarteten BMWi-Verbundvorhabens StaTuR ist die Überführung einer tubulären Einzelzelle in den Prototyp eines Vanadium-Redox-Flow-Stacks. An dem bis November 2022 laufenden Projekt sind neben der HAW Hamburg die folgenden Partner beteiligt: Uniwell Rohrsysteme GmbH & Co. KG, fumatech-BWT GmbH und das Dechema Forschungsinstitut.

### Vorteile tubulärer Ansatz:

- Kosteneffiziente Produktion durch Extrusion
- Verringerte Dichtungslängen
- Flexible elektrische Verschaltung

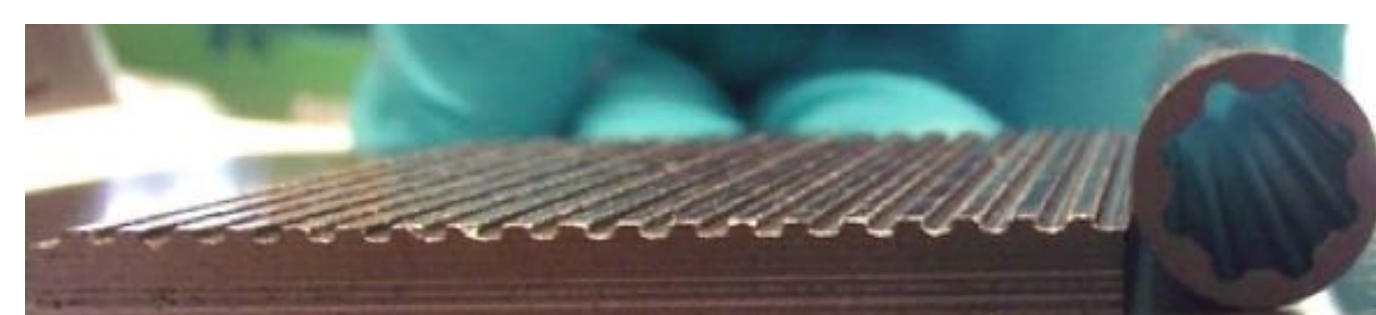


Abb. 2: Flow-Fields in planarer und tubulärer Form

## Tubuläre All-Vanadium-RFB (VRFB)

Der Aufbau einer tubulären All-Vanadium-Redox-Flow-Batterie wird in Abbildung 3 gezeigt.

Komponenten:

1. Innere Elektrode aus Graphitfilz
2. Extrudierter innerer Stromsammelring aus Graphitcompound mit eingeklebtem Kupferdraht
3. Extrudierte Membran
4. Äußere Elektrode aus Graphitfilz
5. Extrudierter äußerer Stromsammelring aus Graphitcompound mit aufgeklebter Kupferfolie



Abb. 3: Tubuläre Einzelzelle und Komponenten [1]

Die tubuläre Struktur findet ebenfalls Anwendung im HAW-Projekt Tubulyze, in dem Wasserstoff-Elektrolysezellen in tubulärer Form entwickelt werden.

## Ergebnisse

### Modul- und Stackentwicklung:

- Entwicklung von Modul-/Stack-Konzepten
- Charakterisierung von Modulen

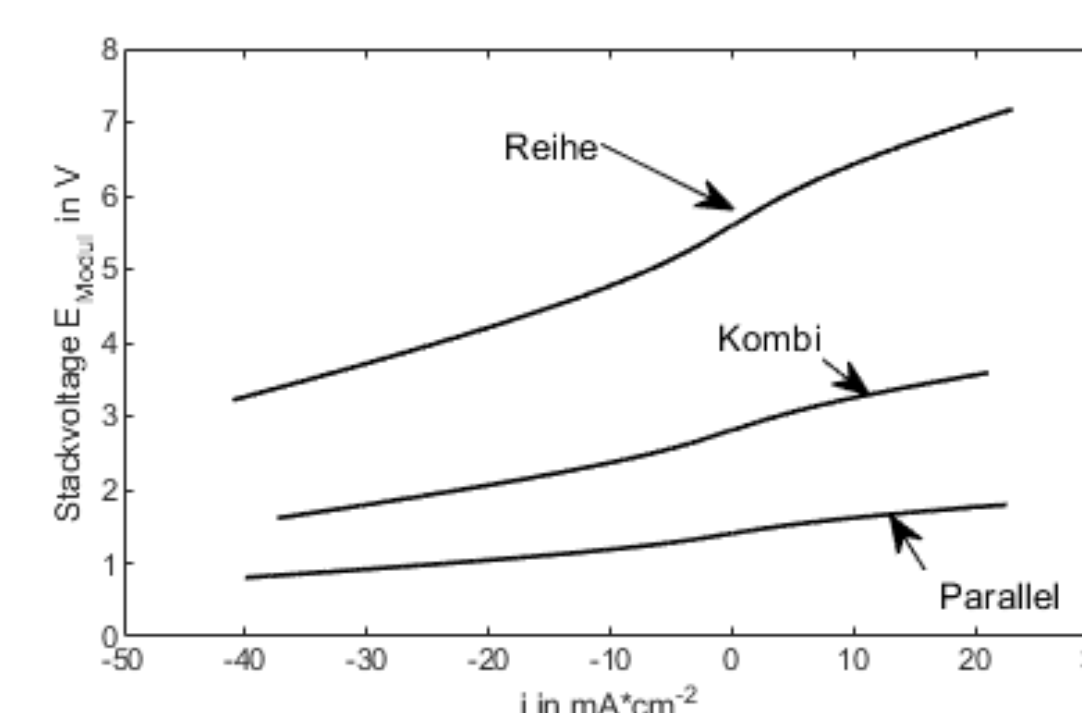
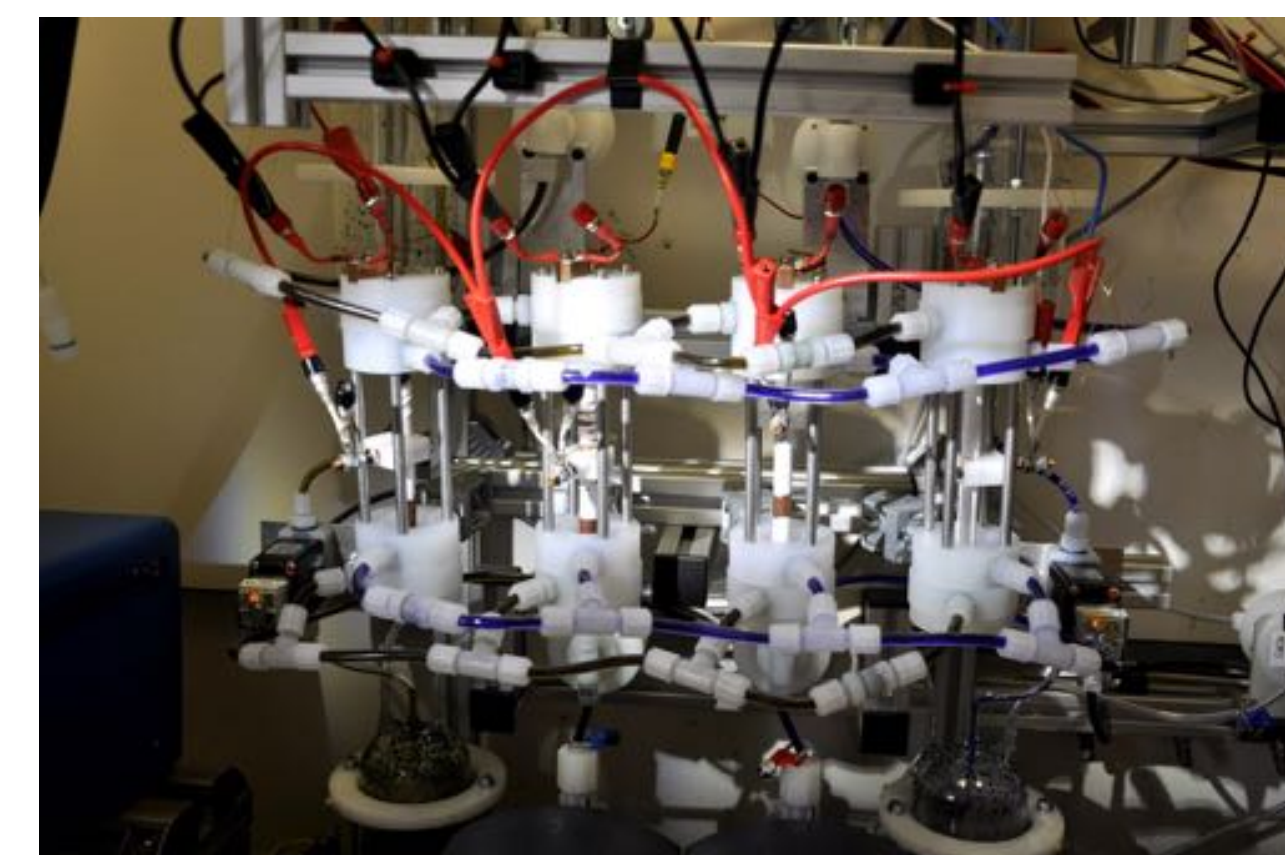


Abb. 4: 4 aggregierte Zellen der Generation 0 (oben) und zugehörige elektrische Verschaltungen



Abb. 5: Modul aus 5 Zellen der aktuellen Generation

### Kontinuierliche Verbesserung der Zellperformance:

- Anpassung der Geometrie
- Auswahl des Materials anhand planarer Tests
- Verbesserung des Fügeprozesses
- Charakterisierung der Zellen

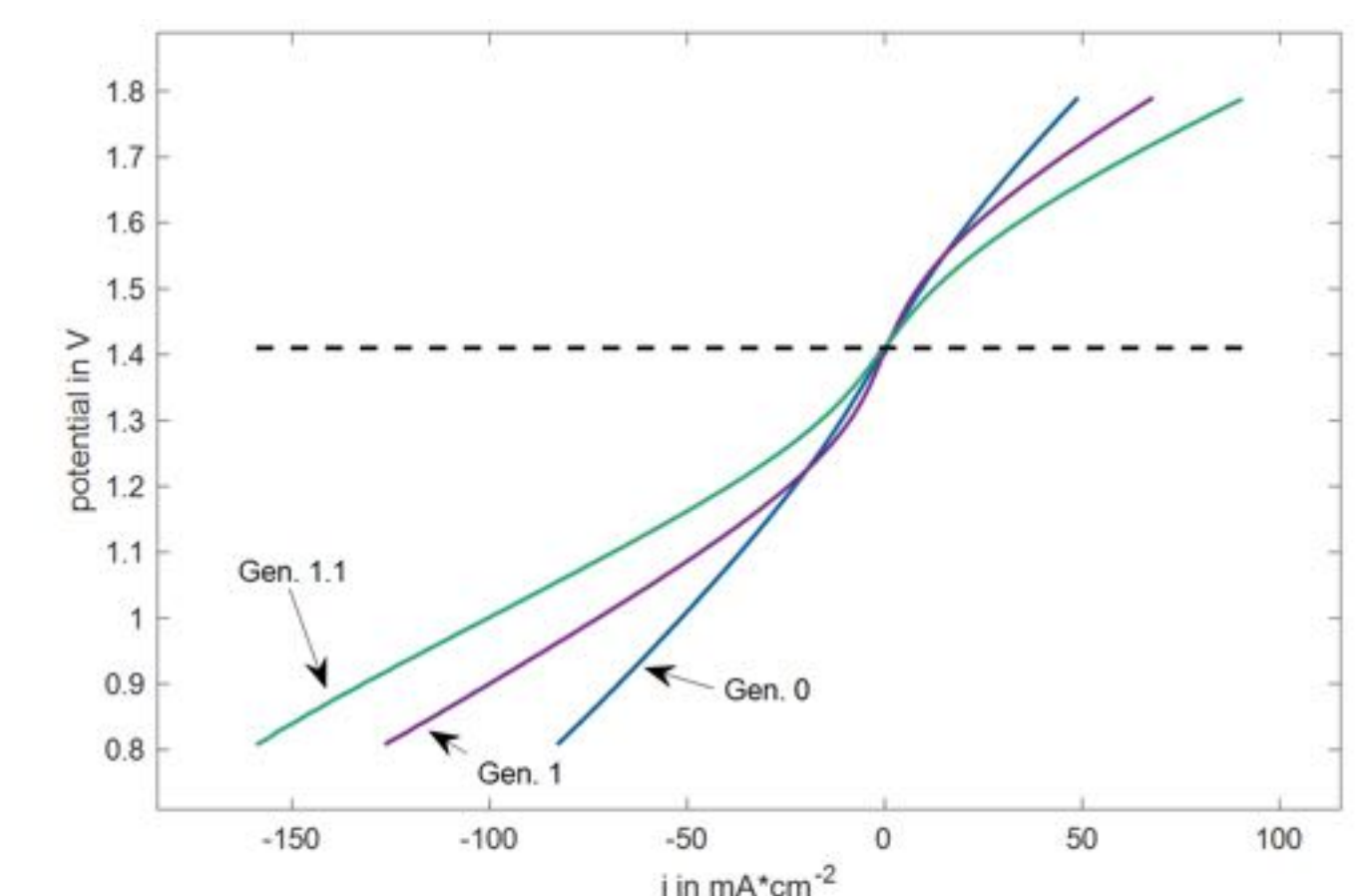


Abb. 6: Zellspannung in V über Stromdichte in mA/cm<sup>2</sup> („Polarisationskurve“) der Zell-Generationen 0, 1 und 1.1

### Multiskalen-Modellierung:

- Design-Tool zur Auslegung tubulärer Stacks
- Unterstützende FEM-Modellierung

### Sonstiges:

- Entwicklung zur in-situ Ladestandsbestimmung [2,3], abgeleitetes Projekt VaMoS

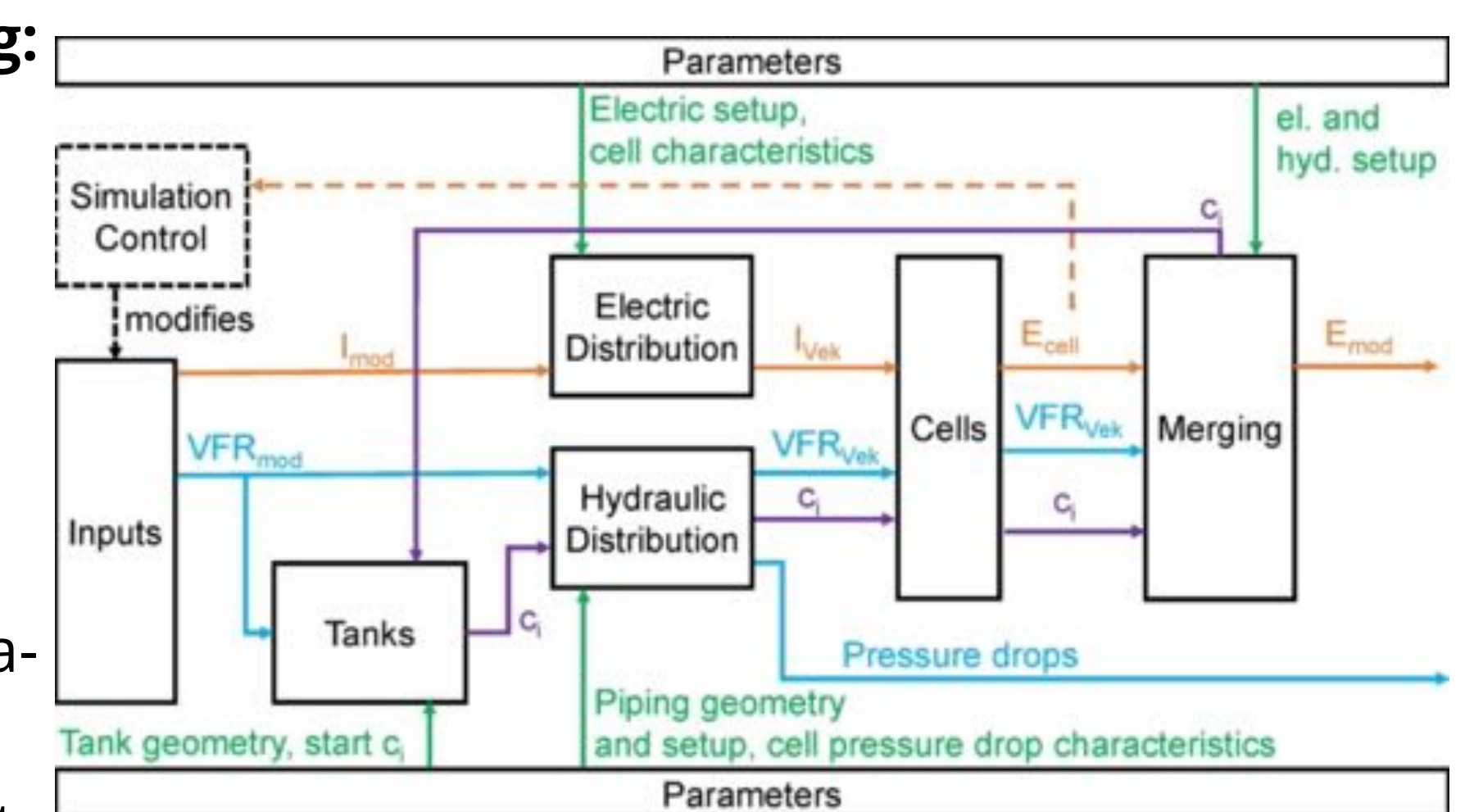


Abb. 7: Operationen innerhalb eines Zeitschrittes im Design-Tool

## Ausblick

Mit dem finalen Einzelzell-Design werden unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus den Prototypen-Tests mehrere Module aufgebaut und charakterisiert. Anschließend wird das Verschalten der Module zu Stacks erfolgen. Konzepte für Systeme im kW-Bereich werden simuliert und bewertet. Zudem soll ein einfacher Demonstrator aufgebaut werden.

## KONTAKT

E-Mail: fabian.brandes@haw-hamburg.de  
Telefon: +49 40 42872 8736

## REFERENZEN

- [1] Ressel, Simon, et al. „An all-extruded tubular vanadium redox flow cell - Characterization and model-based evaluation“, *Journal of Power Sources Advances* 12 (2021): 100077
- [2] Ressel, Simon, et al. „State of charge monitoring of vanadium redox flow batteries using half cell potentials and electrolyte density.“ *Journal of Power Sources* 378 (2018): 776-783.
- [3] Struckmann, Thorsten, Peter Kuhn, and Simon Ressel. „A combined in situ monitoring approach for half cell state of charge and state of health of vanadium redox flow batteries.“ *Electrochimica Acta* 362 (2020): 137174
- [4] Ressel, Simon. „Tubular all vanadium and vanadium/air redox flow cells.“ Diss. Universitat Politècnica de València, 2019.

Webseite AG: <https://www.haw-hamburg.de/hochschule/technik-und-informatik/departments/maschinenbau-und-produktion/forschung/forschungsgruppen/batterie-und-brennstoffzellentechnik/>

Supported by:



on the basis of a decision by the German Bundestag



# Development of a state of charge/state of health sensor for vanadium redox flow batteries

Niklas Janshen<sup>1,2)</sup>, Antonio Chica Lara<sup>2)</sup>, Thorsten Struckmann<sup>1)</sup>

1) Hochschule für angewandte Wissenschaften, Heinrich-Blasius –Institut für Physikalische Technologien. Hamburg, Deutschland

2) Instituto de Tecnología Química, UPV-CSIC, València, Spain

## Introduction and motivation

Vanadium redox flow batteries (VRFBs) are a promising technology for stationary long-term energy storage, because of their independent scalability of power and capacity, their theoretically low self-discharge and potentially high life cycle.

### Problems:

- VRFB operation is accompanied by capacity loss and half-cell imbalances caused by side reactions and crossover through the membrane [1].
  - In commercially operated VRFB systems the SOC is estimated by using a cell voltage based on both half-cells or on coulomb counting.
- ⇒ Imbalances cannot be detected, the theoretical SOC range cannot be used and states of high side reactions and crossover cannot be avoided.

## Research requirements

A sensor which measures the SOC of both half-cells independently and a thorough understanding of the crossover through the membrane is needed to reliably describe the state of health (SOH) of the VRFB and to enable an efficient use of the theoretical SOC range.

## State of charge monitoring methods

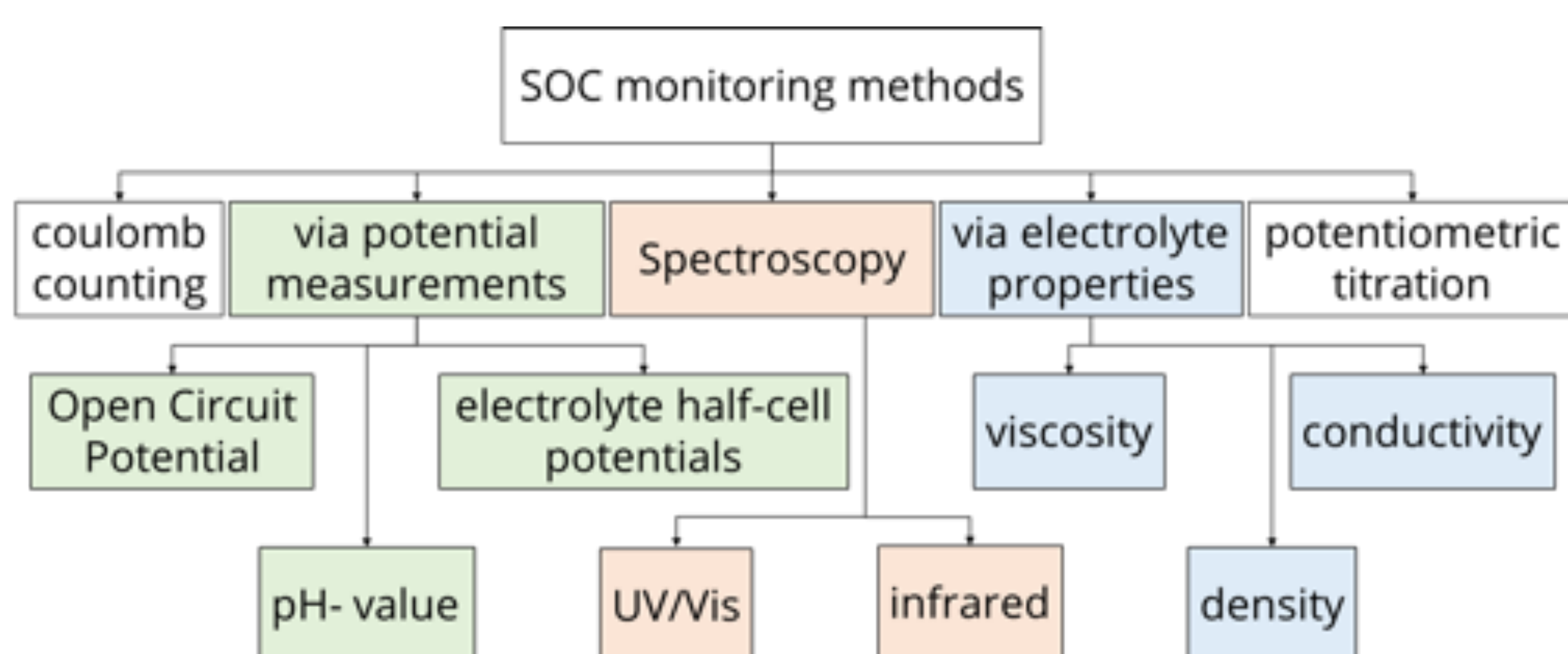


Fig. 2 - Overview of SOC monitoring methods for VRFBs.

## Crossover

The vanadium electrolyte can cross the membrane as bulk electrolyte or as individual species. In addition to the species depicted in figure 3 water can also cross the membrane.

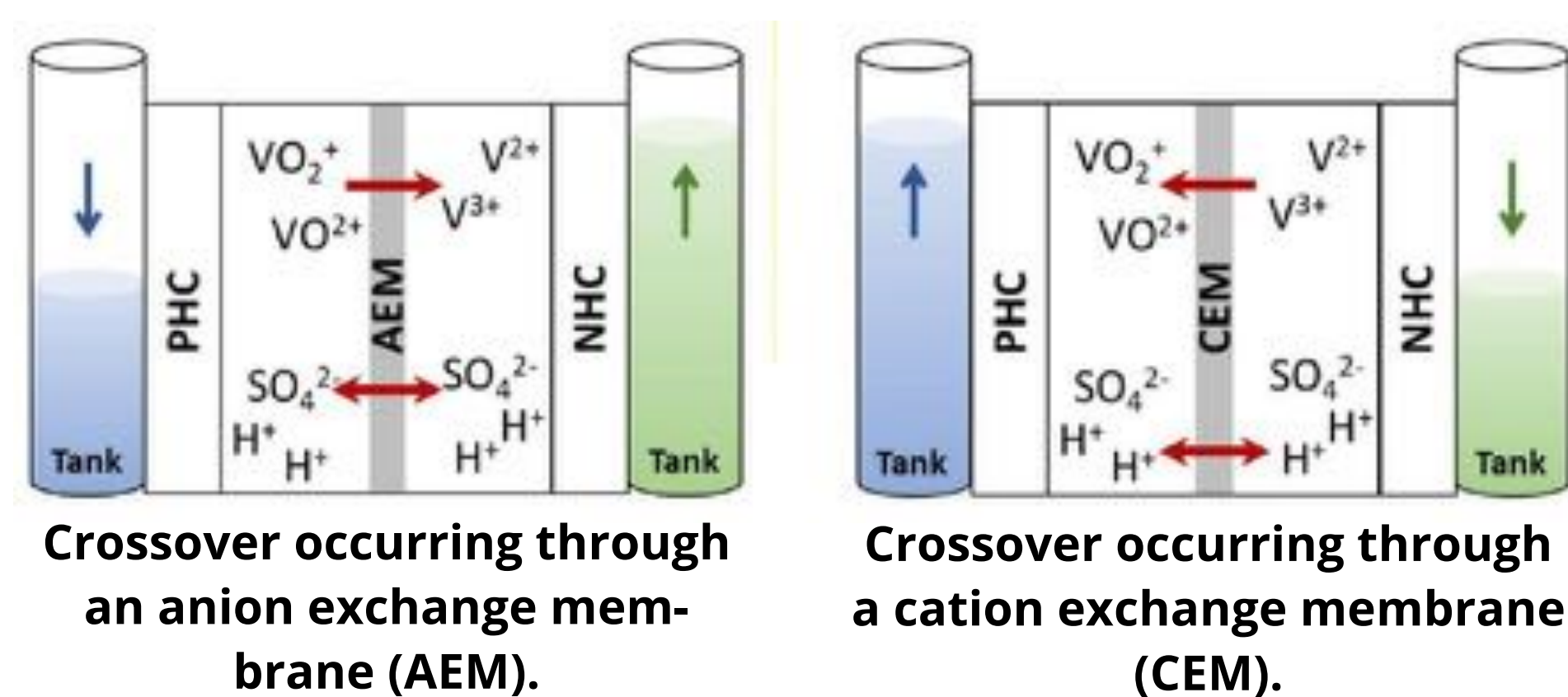


Fig. 3 - Schematic illustration of crossover in VRFBs [1].

## Methods

- Implementation of new SOC-monitoring methods (pH-value, conductivity, viscosity and UV/Vis spectroscopy) and combination with already established methods (electrolyte half-cell potentials, density, coulomb counting and OCV).
- Implementation of a fill level measurement and potentiometric titration for crossover detection and quantification.
- Short and long-term measurements to establish an extensive data base.
- Correlation of crossover related quantities on the basis of overall measured information of electrolyte to establish a crossover and SOH model.
- Development of a sensor concept to measure the SOC/SOH of a VRFB.

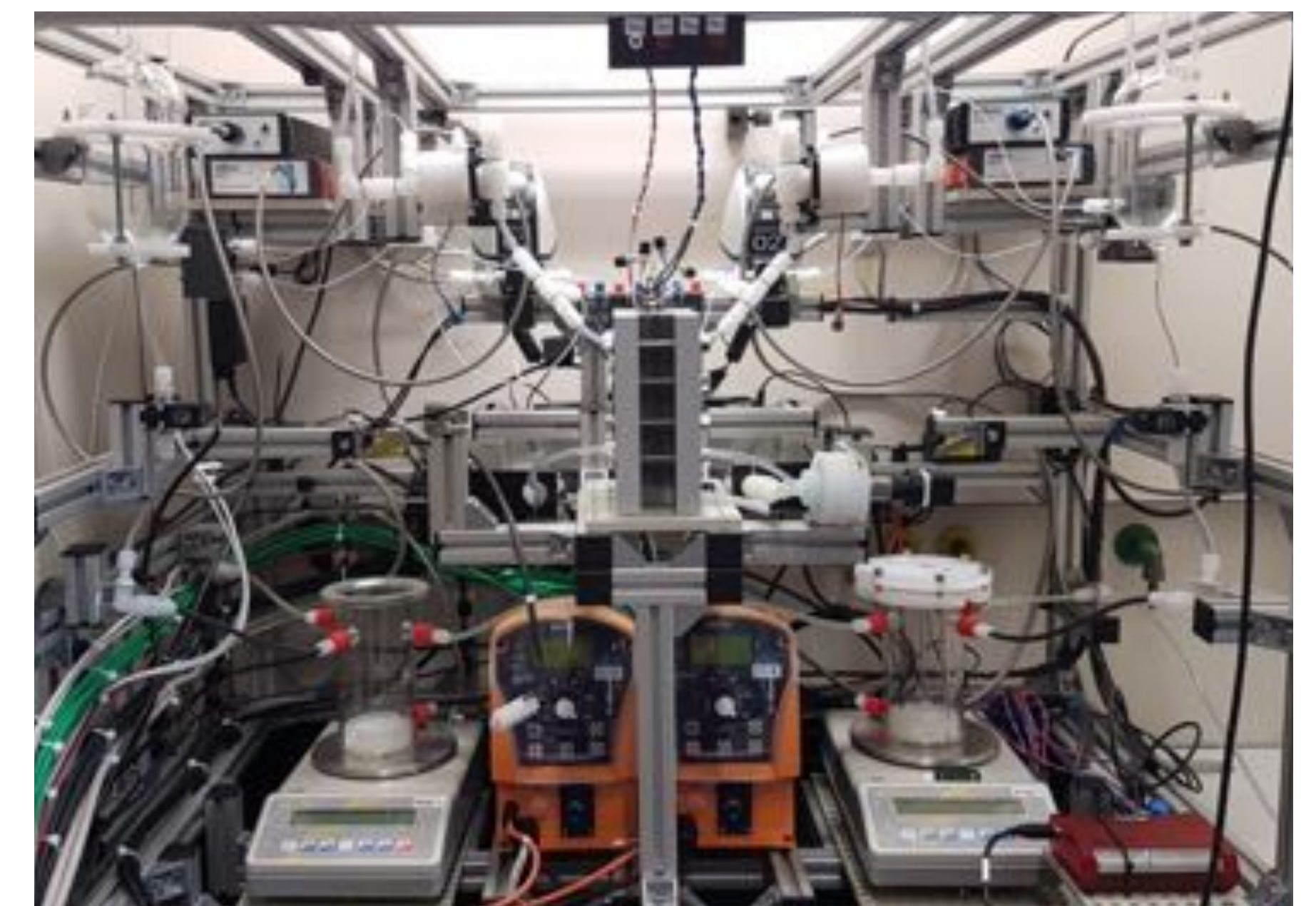


Fig. 4 - Test rig for single-cell vanadium redox-flow battery tests and state of health sensor development.

## Preliminary works

### SOC-monitoring via electrolyte half-cell potentials and electrolyte density

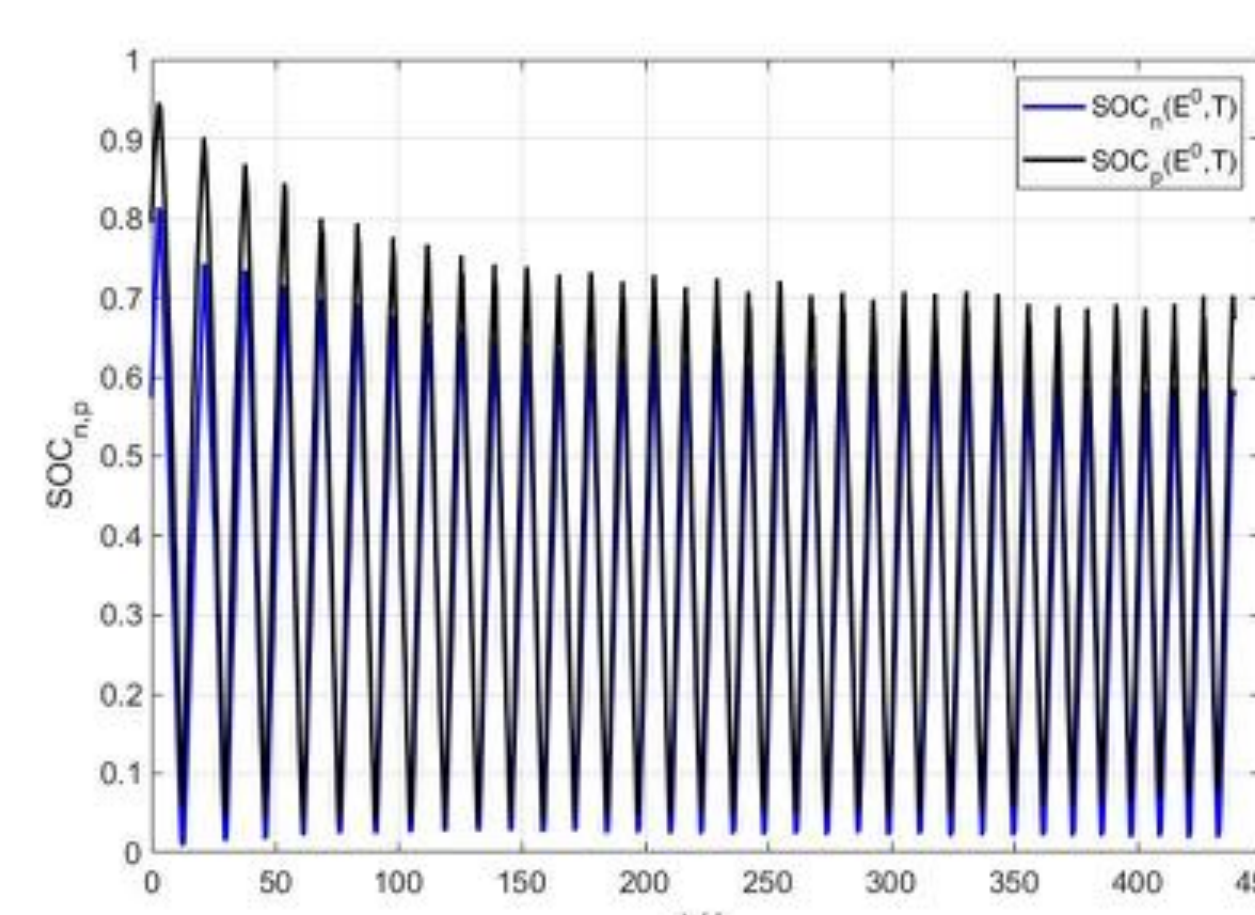


Fig. 5 - SOC of PHC (blue) and NHC (black) via electrolyte half-cell potentials [4].

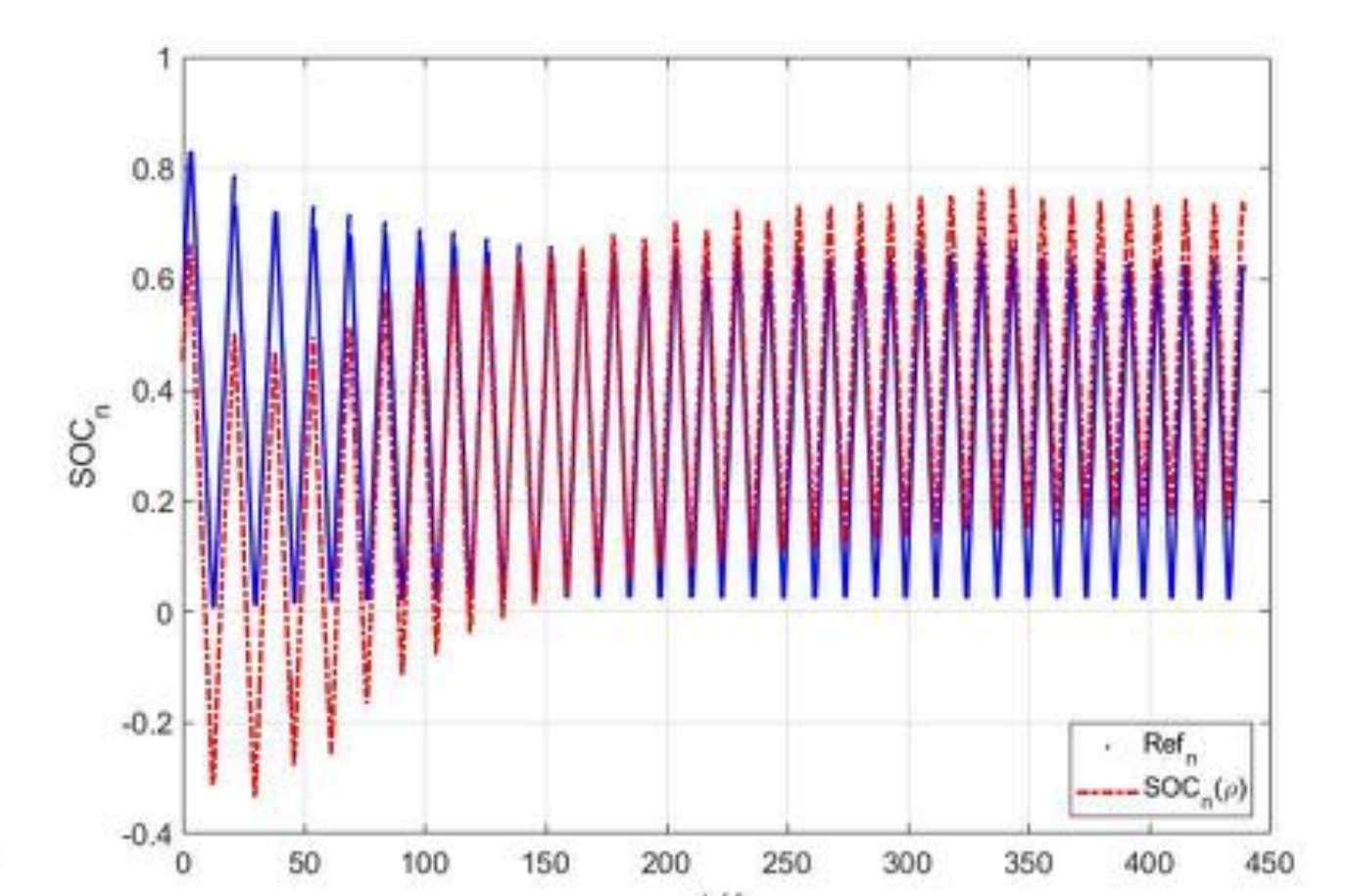


Fig. 6 - SOC of NHC via density (red) and reference (blue) half-cell via potentials [5].

- Stable over time, can be used for the calibration of other SOC-monitoring methods.
- Shifts over time due to crossover effects and can thus be used to characterize the crossover.

## Research project VaMoS

This dissertation is conducted within the research project VaMoS which is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. VaMoS is supervised by a project associated committee comprised of operators of VRFBs, manufacturer of VRFB components and sensor and measurement technology specialists. The project is done in cooperation with DECHEMA Research Institute (DFI).

## CONTACT

e-mail: Niklas.Janshen@haw-hamburg.de

phone: +49 40 428 75-8716

AG-Homepage

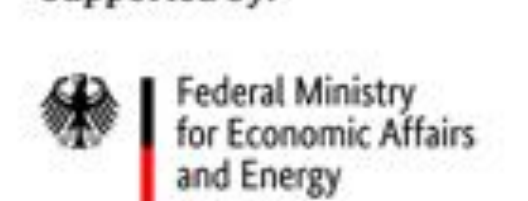
## REFERENCES

- [1] Haisch, T., Ji, H., & Weidlich, C. (2020). Monitoring the state of charge of all-vanadium redox flow batteries to identify crossover of electrolyte. *Electrochimica Acta*, 336, 135573.
- [2] Ressel, Simon, (2019). *Tubular all vanadium and vanadium/air redox flow cells*. [Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València].

- [3] Ressel et al. (2018). State of charge monitoring of vanadium redox flow batteries using half cell potentials and electrolyte density. *Journal of Power Sources*, 378, 776-783.

- [4] Struckmann et al. (2020). A combined in situ monitoring approach for half cell state of charge and state of health of vanadium redox flow batteries. *Electrochimica Acta*, 362, 137174.

Supported by:



on the basis of a decision by the German Bundestag



# Drehgeberloses Modell für Position und Drehzahl permanentmagneterregter Synchronmaschinen

## AUTONOME FAHRPLATTFORM

Im Teilprojekt **Autonome Fahrplattform** werden an der **HAW Hamburg** sensorlose Regelverfahren für Drehfeldmaschinen weiterentwickelt. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, den Aufbau eines Fahrzeug-Antriebsstrangs durch den Verzicht auf Positionssensoren zu vereinfachen, Bauraum einzusparen und dennoch den realen Antrieb drehmoment- und drehzahlgenau zu regeln. Für die erste Anwendung ist der Antrieb eines autonomen Logistikfahrzeugs, welches im Projekt **Testfeld Intelligente Quartiersmobilität (TIQ)** entwickelt wird, vorgesehen.

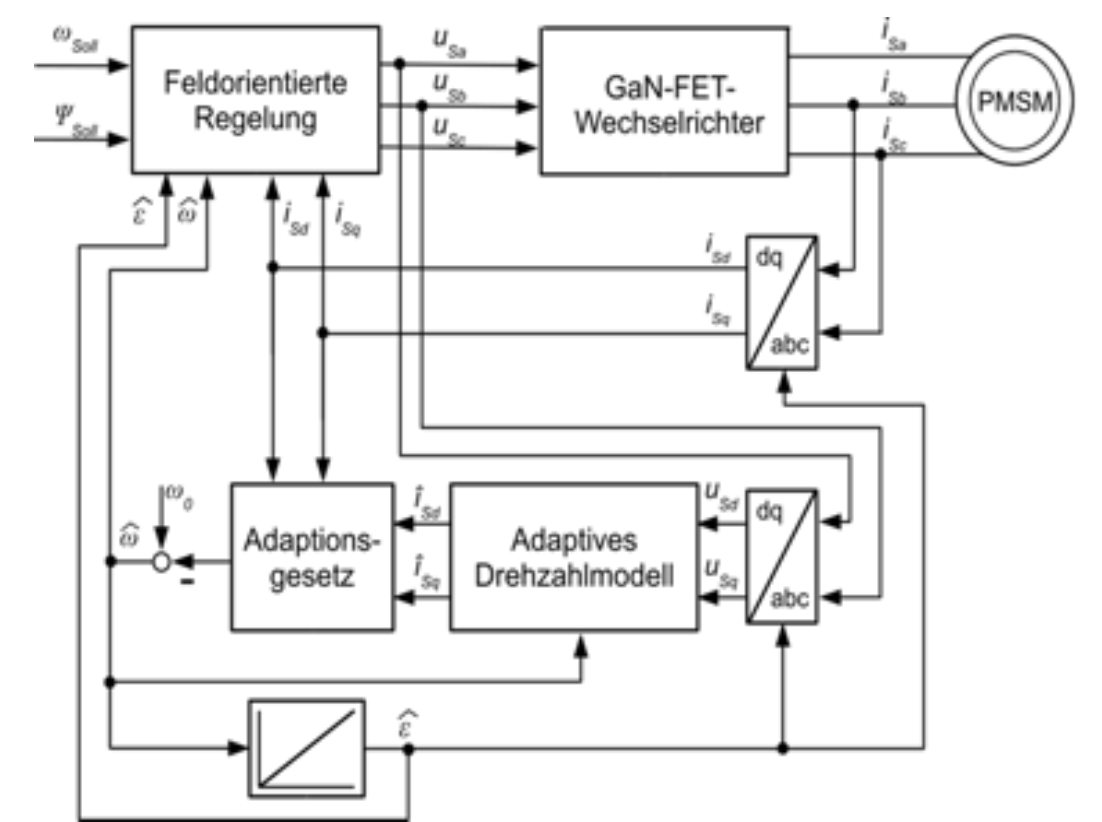


Abb. 1: MRAS-Verfahren zur drehgeberlosen Bestimmung von Drehwinkel und Drehzahl [2]

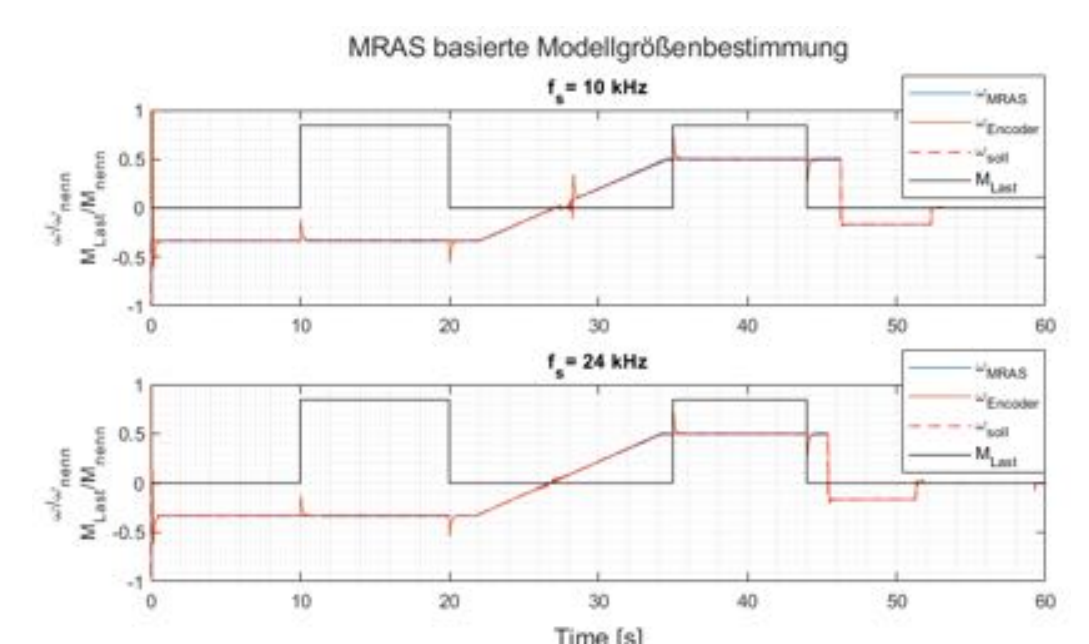


Abb. 2: Messergebnisse der drehgeberlos geregelten permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) bei unterschiedlichen Schaltfrequenzen [2]

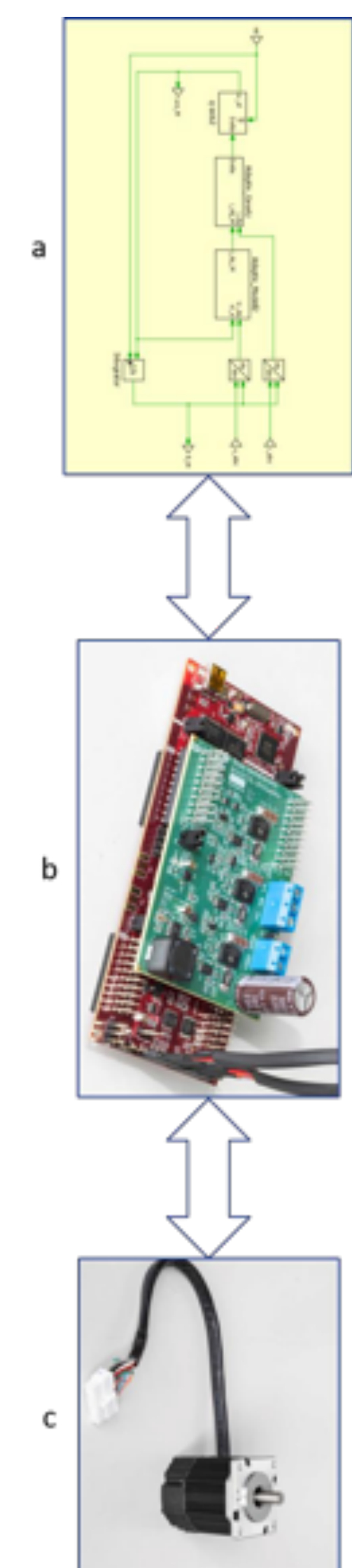


Abb. 3: Modellbasierte Systementwicklung von der Simulationsumgebung (a) über codegenerierte Implementierung auf dem Zielsystem (b) bis zur Motoransteuerung (c)

### Einleitung

Der Vorteil der elektrischen Energie liegt in der mannigfaltig technisch beherrschbaren Umwandlung und Übertragung, sie zählt zu den wichtigsten Schnittstellen zwischen Primär- und Nutzenergie. Im Mai 1834 stellte Moritz Jacobi die erste rotierende elektrische Maschine vor, welche eine größere mechanische Leistung bereitstellen konnte und legte somit den Grundstein für die zweite industrielle Revolution. Im Jahr 1974 kam es mit dem u.a. an der TU Braunschweig entwickelten Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Drehfeldmaschine zu einer weiteren wichtigen Innovation in der Antriebstechnik. Diese ermöglichte, durch die Drehmoment- und Drehzahlregelung von umrichter gespeisten Drehfeldmaschinen, die Erschließung von deutlich effizienteren Prozessen der elektromechanischen Energiewandlung, wobei stets die Kenntnis von Position oder Drehzahl unerlässlich ist (Abb. 4).

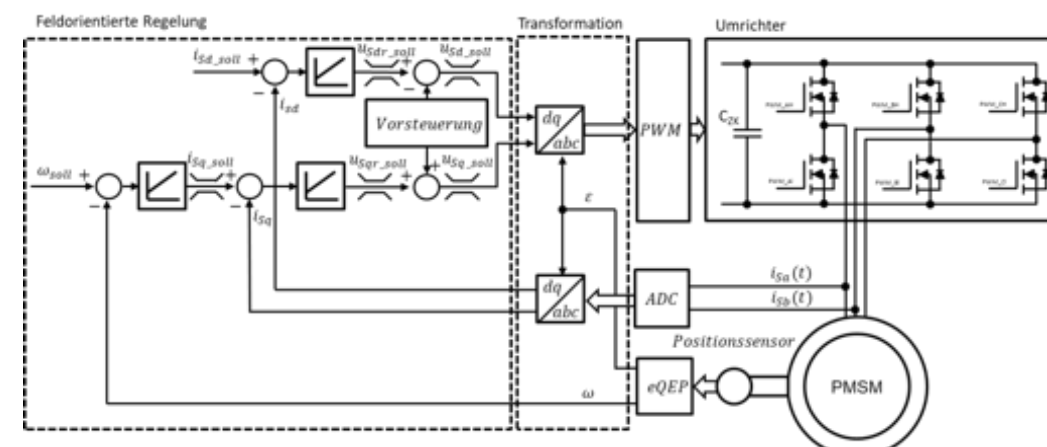


Abb. 4: Feldorientierte Regelung der umrichter gespeisten permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM)

Moderne Antriebstechniklösungen, z.B. im Bereich mobiler Arbeitsmaschinen, der Elektromobilität oder der Industrieanwendungen, erfordern Antriebssysteme mit hoher Leistungsdichte, hohem Wirkungsgrad und guten regelungstechnischen Eigenschaften. Die PMSM erfüllt dieses Anforderungsprofil bei attraktiven Systemkosten in einem weiten Anwendungsspektrum. Darüber hinaus ist es zusätzlich vorteilhaft, auch auf einen Positions- oder Drehzahlsensor zu verzichten. Dabei sind erzielbare Kostenvorteile sowie mögliche Systemvereinfachungen, welche die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Antriebs-

systems erhöhen, Bauraum sparen oder gar die redundante Auswertung eines sicherheitskritischen Systempfads ermöglichen, vielfältige Gründe, sensorlose Regelungen weiterzuentwickeln.

### Aktueller Stand der Forschung

Im kritischen Betriebsbereich bei niedrigen Statorfrequenzen bzw. Drehzahlen der PMSM kommen sensorlose Verfahren, die lineare Maschinenmodelle nutzen, an Genauigkeits- und Stabilitätsgrenzen. Nahezu alle bei niedrigen Statorfrequenzen funktionsfähigen Verfahren applizieren daher Testsignale, um die PMSM anzuregen oder gezielt Maschinenunsymmetrien auszuwerten. Dadurch wird dieser Betriebsbereich zwar zuverlässig erschlossen, jedoch ergeben sich neue Nachteile hinsichtlich des Schwingungsverhaltens, der Regelgüte sowie sogar der Geräuschemission des Antriebs. Ein Ziel ist daher, den kritischen Betriebsbereich, bei dem zusätzlich Testsignale eingesetzt werden, möglichst stark einzugrenzen.

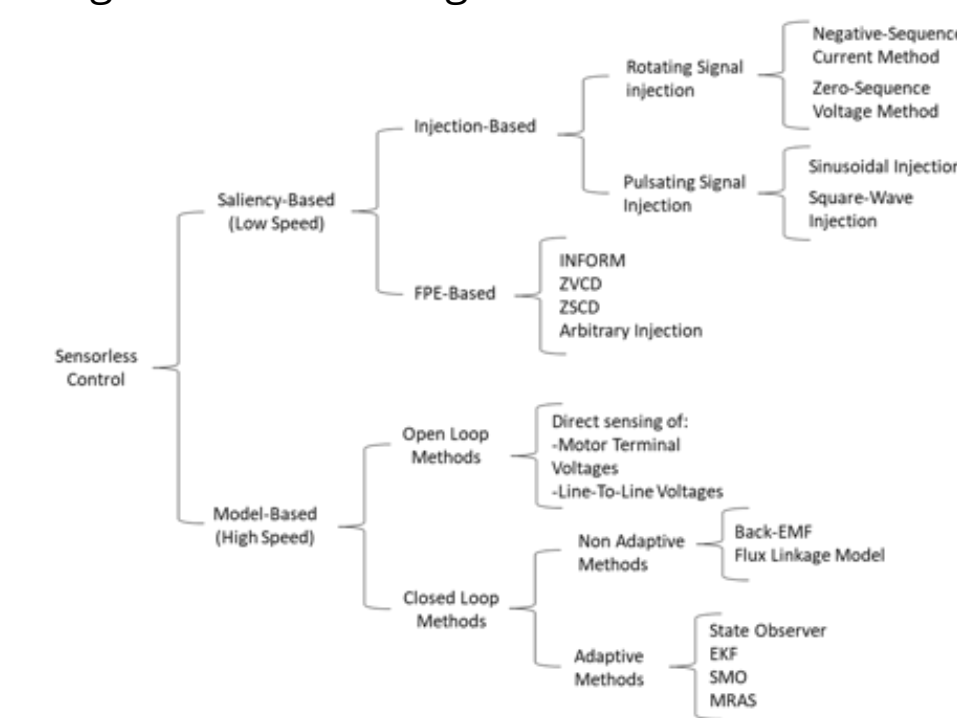


Abb. 5: Klassifikation ausgewählter Verfahren zur positionssensorlosen Regelung elektrischer Maschinen [1]

Wie in Abb.5 dargestellt, teilen sich die sensorlosen Verfahren in Gruppen und Untergruppen auf, wobei die Haupteinteilung hier vom adressierten Drehzahlbereich ausgeht. Weitere Abgrenzungen liegen in der Genauigkeit, Dynamik, Parametersensibilität, Emissionen durch

Akustik und EMV, Störanfälligkeit und benötigter Laufzeit auf dem zu implementierenden Zielsystem. Im Fall eines weit abzudeckenden Drehzahlbereichs kommt es oft zum Einsatz von kombinierten Verfahren, bei welchem jeweils das für den Arbeitspunkt optimierte Verfahren aktiv ist.

Im Fokus der derzeitigen Forschung liegen adaptive Verfahren, welche die Motorparameter kontinuierlich bestimmen. Dies ermöglicht, aufgrund der arbeitspunktabhängigen Maschineneigenschaften, eine maximale Ausnutzung des angesteuerten Antriebs.

### Untersuchungsdesign und Methodik

Ein adaptives Referenzmodell, welches das nicht lineare Systemverhalten von Antrieben bestimmt, stellt hohe Anforderungen an die Prozessorleistung des jeweiligen Zielsystems. Zudem zeigten an der HAW durchgeführte Untersuchungen eines modelladaptiven Verfahrens (Abb. 1) zur drehgeberlosen Bestimmung von Position und Drehzahl einer PMSM bei unterschiedlichen Schaltfrequenzen, dass sich die Abweichungen des ermittelten zum gemessenen Drehwinkel im niedrigen Drehzahlbereich mit steigender Schaltfrequenz reduzieren [2] (Abb. 2). Die Grundstruktur des Verfahrens ist nach dem Grundwellenmodell der PMSM aufgebaut. Dieses stößt jedoch gerade im Bereich der magnetischen Sättigung an seine Grenzen und eine Erweiterung der Modellstruktur hat stetig steigende Rechenlaufzeiten zur Folge. Dabei kann auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz, mit den verschiedenen Methoden zur Approximation einer Nichtlinearität, die Lösung liegen.

Ziel wäre es, mit neuronalen Netzen unbekannte Nichtlinearitäten nachzubilden und durch Anlernen vereinfachte neuronale Beobachter zu entwickeln. Die modellbasierte Systementwicklung ermöglicht es anschließend, die nach dem Signalflussplan dargestellten Verfahren mittels Codegeneratoren auf einem Microcontroller zu implementieren (Abb. 3) und am realen System zu validieren.

[1] G. Wang, M. Valla und J. Solsona, „Position Sensorless Permanent Magnet Synchronous Machine Drives—A Review“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Bd. 67, Nr. 7, S. 5830–5842, Juli 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2955409.

[2] M. Brüns, C. Rudolph und T. Müller, „Drehgeberlose, MRAS-basierte Bestimmung von Position und Drehzahl einer PMSM bei unterschiedlichen Taktfrequenzen und GaN-FET-Wechselrichter“, in ETG-Fachbericht, 2021, Bd. 164, S. 190–199. Zugriffen: Jan. 11, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://reposit.haw-hamburg.de/handle/20.500.12738/11968>



# Simultaneous 2D and 3D turbulent flows in Faraday Waves

RAFFAELE COLOMBI<sup>1,2</sup>, NICLAS ROHDE<sup>1</sup>, MICHAEL SCHLÜTER<sup>1</sup>, ALEXANDRA VON KAMEKE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INSTITUTE OF MULTIPHASE FLOWS, HAMBURG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, GERMANY

<sup>2</sup>DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING AND PRODUCTION MANAGEMENT, HAMBURG UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, GERMANY

In nature there are turbulent flows that are neither exclusively 2D nor 3D but are forced towards one state or the other by boundary conditions, such as varying stratification. The study of these flows focuses on the occurrence of an inverse energy cascade, typical of 2D turbulent flows, in shallow fluid layers, as well as the transition from 2D to 3D turbulence in non-shallow fluid layers and vice versa. The understanding of these properties is fundamental for developing accurate models of e.g. oceanic and atmospheric flows. For experimental testing, benchmarking flows exhibiting an inverse cascade are electro-magnetically-driven flows and Faraday flows occurring on the surface of parametrically-excited Faraday waves [1, 2].

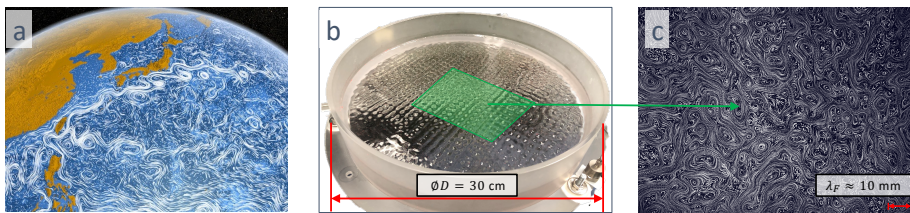


Fig. 1. a) Perpetual Ocean – Simulation of ocean surface currents [Source: Greg Shirah, NASA Goddard Space Flight Center]. b) Pattern of Faraday waves in water at a forcing frequency  $f_f = 50$  Hz. c) Visualization of fluorescent tracer particles trajectories in the Faraday flow on the fluid surface.

## Set-up

A function generator (1) is used to trigger the high-speed camera (2) and to drive the electromagnetic shaker (3) to vertically oscillate a cylindrical container of 30 cm diameter (4) filled with 3 cm layer of DI water. Accelerometers (5) are used to determine the forcing acceleration, and all signals are monitored through a digitizer (7). Both triggering signals are synchronized so that the camera captures the still surface frames in the Faraday waves. Illumination of neutrally buoyant red fluorescent tracer particles for PIV is performed with a wave argon-ion laser sheet (8, 9) or with LED (for surface measurements, to avoid reflection and refraction at water-air interface). The camera and the laser sheet can be adjusted at different horizontal planes (a), or rotated for measuring at the vertical cross-sectional plane (b).

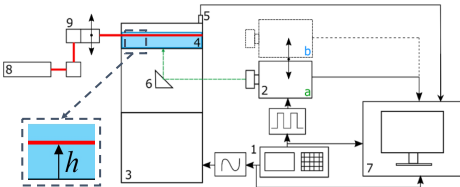


Fig. 2. Experimental setup.

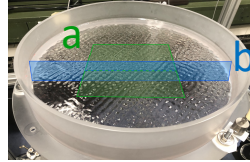


Fig. 3. Detail of positioning of horizontal and vertical measurement planes (a) and (b).

Forcing acceleration	$a_f = 0.47, 0.70$ g
Forcing frequency	$f_f = 50$ Hz
Resulting Faraday waves frequency	$f_w = 25$ Hz
Characteristic Faraday wavelength	$\lambda_F \approx 10$ mm
Camera imaging rate	$f_{cam} = 400$ fps
Camera resolution	$2560 \times 1600$ px
Horizontal planes positions	$h = [4, 21, 27, 30]$ mm
Tracer particles diameter	$d = 10 - 45$ $\mu$ m

## Results

• Three different flow-regimes identified at different depths:

1. Highly turbulent Faraday Flow on fluid surface: multiple vortices with different length scales and regions of jet-like flow accelerated in between.
  2. Transition layer with depth  $\approx \lambda_f$  (10 mm) with exponential decay in velocity and increased flow divergence in 3D bulk flow. Time scales in the flow increase as structures become larger in size and temporally persistent.
  3. For  $h \lesssim 20$  mm larger flow structures oriented in a dominant direction with long temporal scales [3].
- Strong and confined vertical jets cause explosive downward transport of momentum, injecting energy in the 3D flow structures below the surface.
  - Jets dissolve at approx. 1 Faraday wavelength below the surface and cause generation of vortices [4].
  - Double cascade feature of 2D turbulence in the Faraday flow at the surface is well resolved with sharp bend in energy spectrum slope at  $k \approx k_{inj}$ .
  - Inverse energy cascade and direct enstrophy cascade validated by negative net energy fluxes and positive net enstrophy fluxes.
  - Simultaneous existence of direct energy cascade at planes below the surface [4].

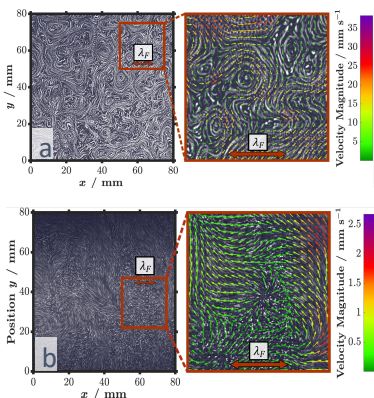


Fig. 4.: Tracer particles at forcing acceleration  $a_f = 0.47$  g at different horizontal planes (fluid surface,  $h = 30$  mm, a) and at  $h = 21$  mm, b). The enlargement panels further show the overlaid corresponding instantaneous velocity fields  $\mathbf{u} = (u, v)$  (every second arrow shown).

Fig. 5.  $a_f = 0.47$  g at the vertical cross-sectional plane.

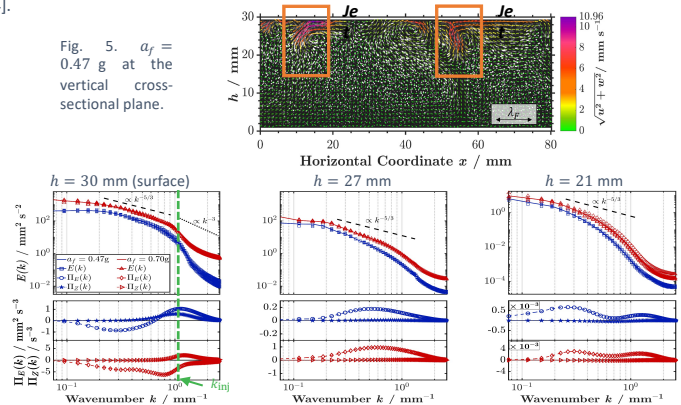
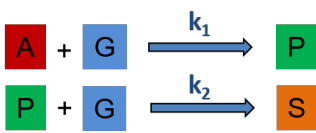


Fig. 6. Wavenumber spectrum of kinetic energy  $E(k)$ , net energy fluxes  $\Pi_E(k)$  and net enstrophy fluxes  $\Pi_\omega(k)$  at different horizontal planes for forcing accelerations  $a_f = 0.47$ g and  $0.70$ g (blue and red).



## Motivation & Aim

**Aim:** Unveiling the influence of fluid dynamics on the selectivity of a competitive-consecutive gas liquid reaction using Taylor bubbles



$k_i$  = reaction rate coefficient

Fig. 1: Schematics of a competitive-consecutive reaction

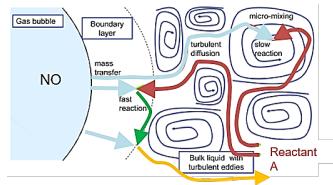
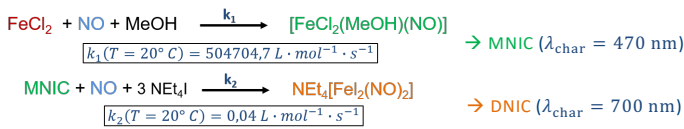


Fig. 2: Schematics of reactive mass transfer adapted from [1]

- Determination of the velocity fields in the bubble wake by means of PIV
- Measuring the temporal and spatial resolved concentration field in a bubble wake
- Determination of the temporal and spatial selectivity in the bubble wake

## Experimental Set-up & Procedure

**Model Reaction [3]:**



**Why Taylor bubble experiments?**

- Highly reproducible
- Terminal velocity  $v_B$  independent from bubble volume  $V_B$
- Rising behavior characterized by the Eötvös number [2]:

$$Eo = \frac{\Delta \rho g D^2}{\sigma}$$

**General Equipment:**

- Phantom VEO 640L high-speed camera with Carl Zeiss Makro Planar 2/50M
- Capillary diameters  $D$ : 4 mm and 5 mm

**Flow field:** Particle Image Velocimetry within Bubble wake

- Argon Bubble in Methanol
- Recording: 500 fps using a high-power LED (455 nm)
- 5-20  $\mu\text{m}$  silver coated hollow glass spheres with 0.75 g/cc density

**Concentration field:** High Speed Imaging UV-VIS Spectroscopy [3]

- Reactive System in Methanol
- Recording: 180 fps and alternating pulsed LED (blue/red) at  $f = 90 \text{ Hz}$
- Agilent Carry60 UV-VIS fiber optical probes for validation

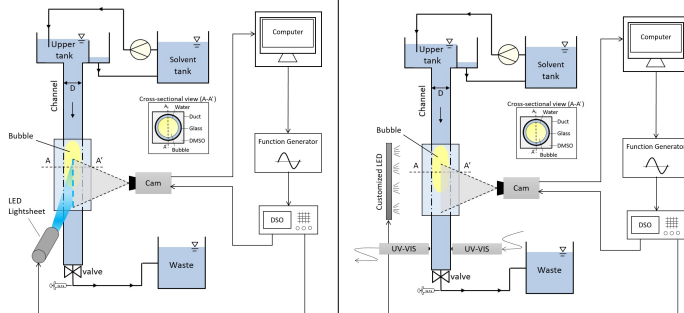


Fig. 3: Scheme of the experimental setups at the IMS used for imaging UV-VIS and PIV measurements

## Results & Discussion

**Concentration MNIC & DNIC based on Beer-Lambert:**

$$c_D = \left[ \frac{E_{700}}{d} - \frac{\varepsilon_{M,700} E_{470}}{d \varepsilon_{M,470}} \right] \cdot \frac{1}{\varepsilon_{D,700} + \frac{\varepsilon_{M,700} \varepsilon_{D,470}}{\varepsilon_{M,470}}}$$

$$c_M = \frac{E_{470}}{d \varepsilon_{M,470}} - \frac{\varepsilon_{D,470} c_D}{\varepsilon_{M,470}}$$

**Spatial and temporal Selectivity:**

$$S_p(i, j, t) = \frac{c_p V_{\text{pixel}}}{c_{\text{MNIC}} V_{\text{Pixel}} + c_{\text{DNIC}} V_{\text{Pixel}}} \cdot \frac{|v_i|}{v_p}$$

Inner Diameter $D$ / mm	4
Counter-current flow $v$ / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$6,83 \pm 0,16$
Eötvös Number $Eo$ / -	5,5
Reynolds Number $Re$ / -	36

laminar wake

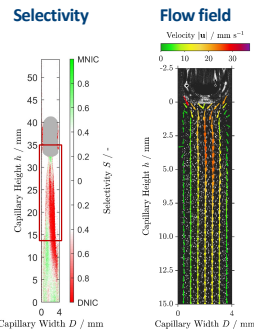


Fig. 5: Visualized temporally/spatially resolved selectivity (left) and the velocity field (right) in the 4 mm capillary [4]

- Laminar flow structures in the bubble wake
- Low degree of mixing in the wake
- Unreacted NO in the bubble wake

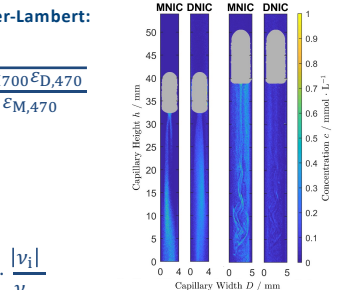


Fig. 4: Visualized concentration fields in the 4 mm (left) and 5 mm (right) capillary [3]

Inner Diameter $D$ / mm	5
Counter-current flow $v$ / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$31,02 \pm 1,45$
Eötvös Number $Eo$ / -	8,6
Reynolds Number $Re$ / -	207

turbulent wake

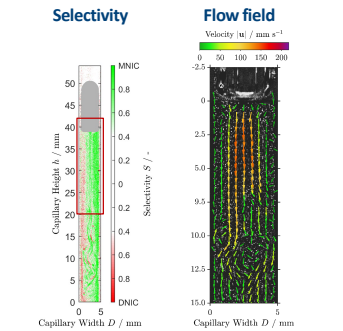
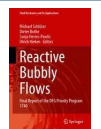


Fig. 6: Visualized temporally/spatially resolved selectivity (left) and the velocity field (right) in the 5 mm capillary [4]

- Highly turbulent flow in the bubble wake and 3D flow structures
  - High degree of mixing in the wake
  - No unreacted NO in the bubble wake
- Timescale of mixing is larger than the timescale of the second reaction step.
  - PIV Measurements in organic solvents using LED illumination have been performed successfully
  - Flow structures and mixing patterns in organic solvent strongly deviates from known flow structures in aqueous systems [5]
  - Mixing within the bubble wake strongly influences the selectivity
  - High correspondence between flow structures, concentration fields and spatial/temporal selectivity

## Further Work & Outlook

- Applying 4D-PTV for the visualization of 3D – Motion in the bubble wake
- Transferring gained knowledge to freely ascending bubbles
- Available now: Final report "Reactive Bubbly Flows"



The authors gratefully acknowledge the financial support by the DFG within the priority program SPP 1740 "Reactive Bubbly Flows" (SCHL 617/12-2)



**Prof. Dr. Alexandra von Kameke**  
Professur für Experimentalphysik und Angewandte Informatik  
T +49 40 42875-8624  
[alexandra.vonkameke@haw-hamburg.de](mailto:alexandra.vonkameke@haw-hamburg.de)

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG**  
Fakultät TI / Dpt. Maschinenbau + Produktion  
Heinrich-Blasius-Institut für Phys. Technologien  
Berliner Tor 21, D-20099 Hamburg

**References:**

- [1] Besagni et al., ChemEngineering 2018, 2 (2), 13.
- [2] Kastens et al., Chem. Eng. Technol. 2017, 40 (8), 1494–1501
- [3] Kexel et al., Chem. Ing. Tech. 2021, 93 (1–2), 297–305
- [4] Kexel et al., Chem. Ing. Tech. 2021, 93, (5) [accepted]
- [5] A. v. Kameke, et al., Chem. Eng. Sci. 2019, 207, 317–326

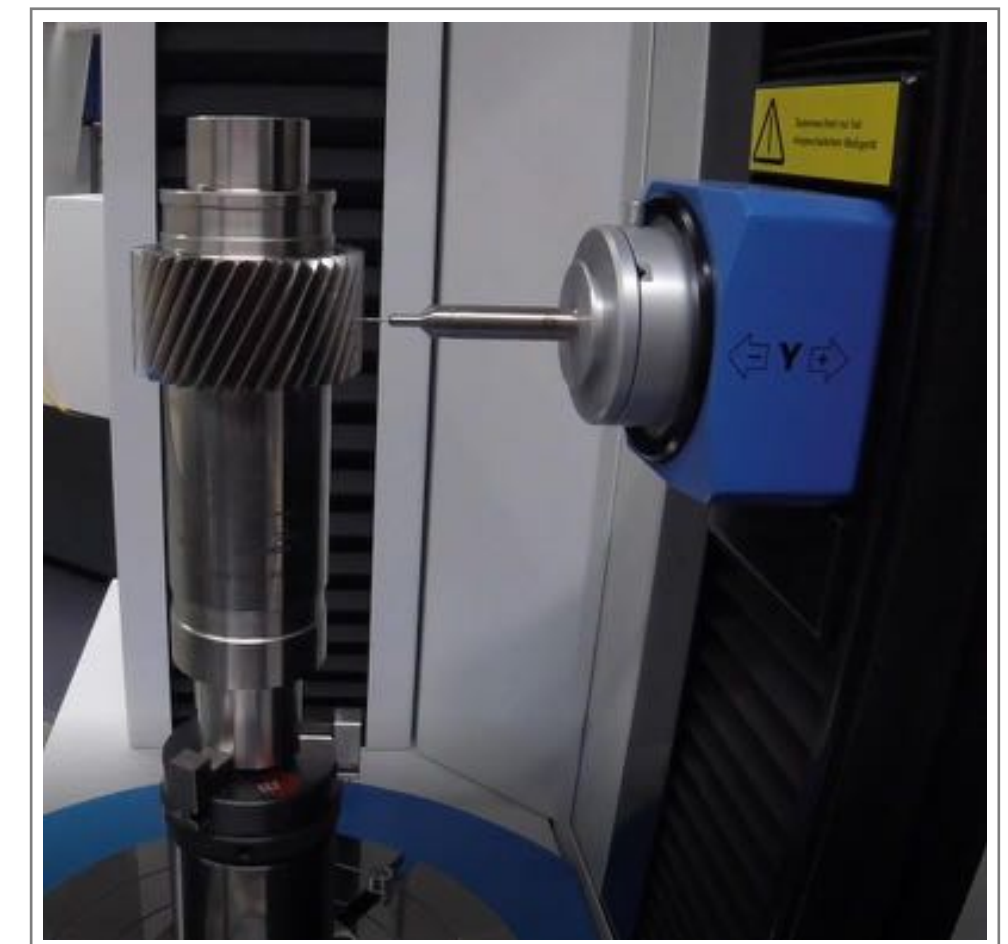




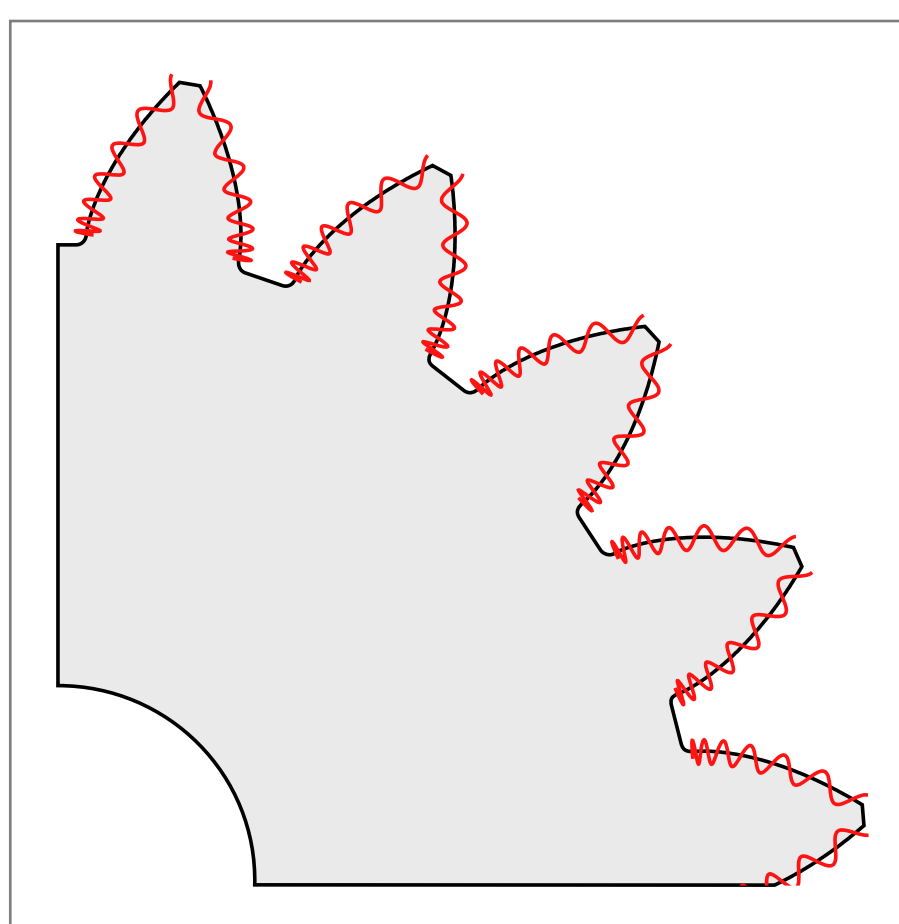
# Wirtschaftlich optimale Messstrategie für Welligkeiten auf Zahnradern

## KLEINSTE PERIODISCHE ABWEICHUNGEN AUF DEN ZAHN- FLANKEN MIT MINIMALEM MESSAUFWAND SICHER ERKENNEN

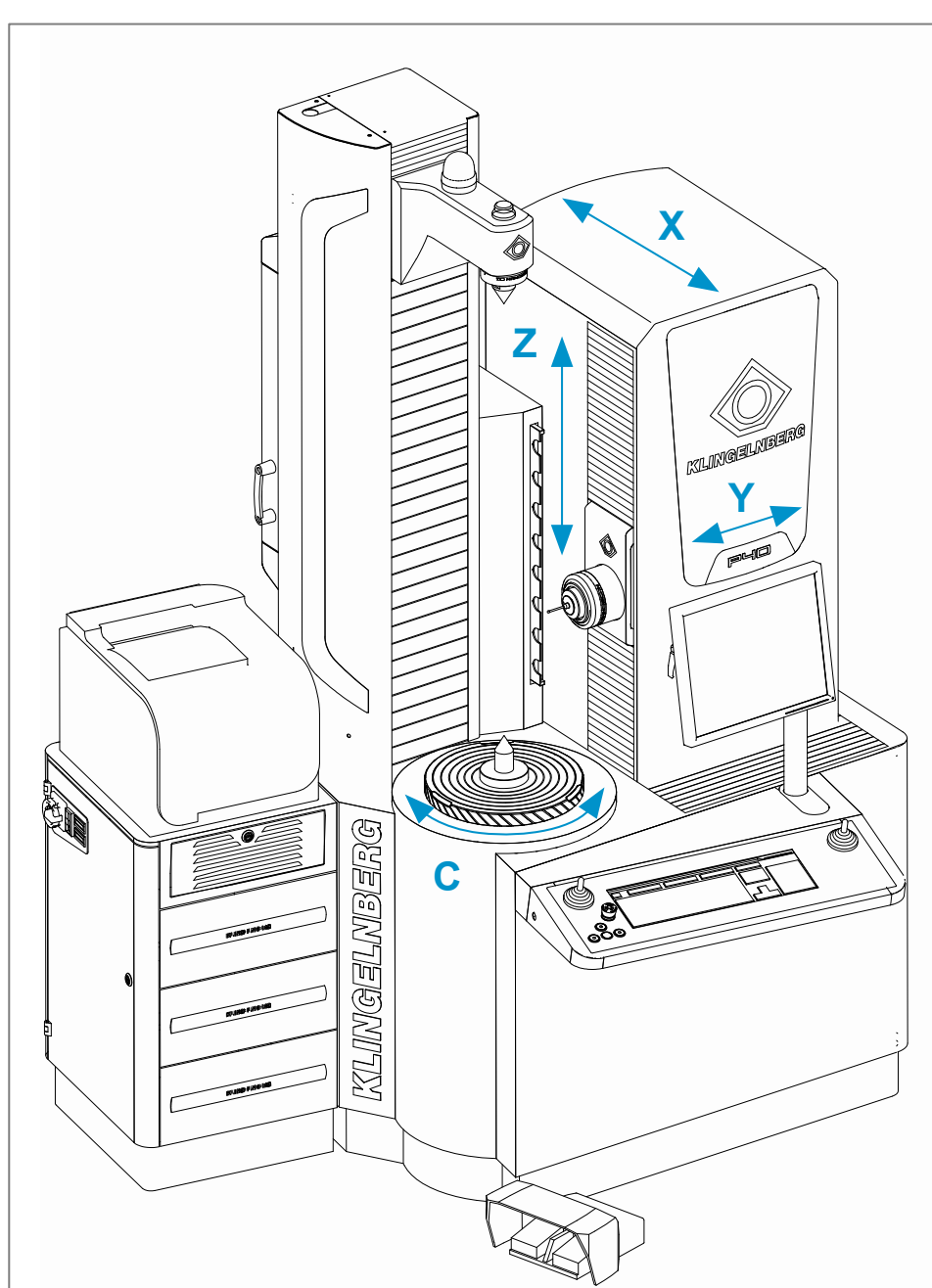
**Wellige Oberflächen auf Zahnradern können laute Getriebe verursachen. Die Amplituden dieser Welligkeiten liegen im Submikrometerbereich. Diese kleinsten Abweichungen zu erkennen ist anspruchsvoll. Im Forschungsvorhaben werden spezielle Strategien entwickelt, damit die Erkennung auch mit möglichst geringem Messaufwand gelingt.**



Taktile Messung eines Zahnrades

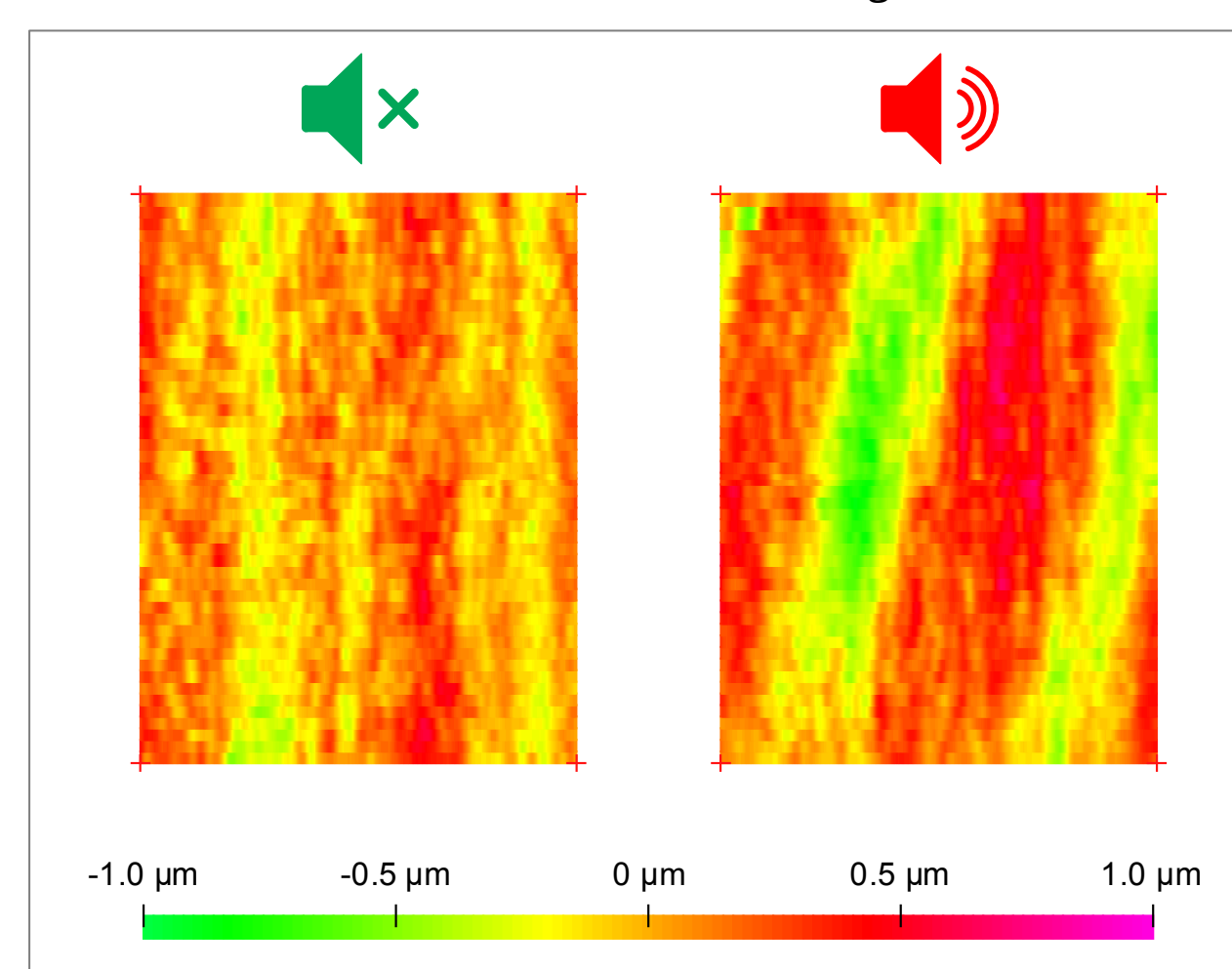


Evolutionäre Verzahnung mit überlagerten Welligkeiten, Amplituden stark überhöht dargestellt



Verzahnungsmessgerät mit 4 Messachsen (Firma Klingelnberg)

Für die Produktion leiser Getriebe müssen die eingesetzten Verzahnungen höchste Qualitätsanforderungen erfüllen. Aus diesem Grund werden in der Verzahnungsfertigung spezialisierte und sehr genau arbeitende Werkzeugmaschinen eingesetzt. Auch auf den genauesten Maschinen kann es jedoch zu Abweichungen im Fertigungsprozess kommen. Bei den meisten der aktuell eingesetzten Verfahren erfolgt eine kontinuierlich wälzende Bearbeitung der Zahnflanken mit dem Werkzeug. Neben vielen Vorteilen haben diese Verzahnverfahren aber auch den Nachteil, dass Störungen im Bearbeitungsprozess periodische Strukturen auf den Zahnflanken verursachen können. Diese Strukturen werden als Welligkeiten bezeichnet. Auch wenn die Amplituden der Welligkeiten sehr klein sind, können sie zu Anregungen im Getriebe und somit zur Geräuschenstehung führen.



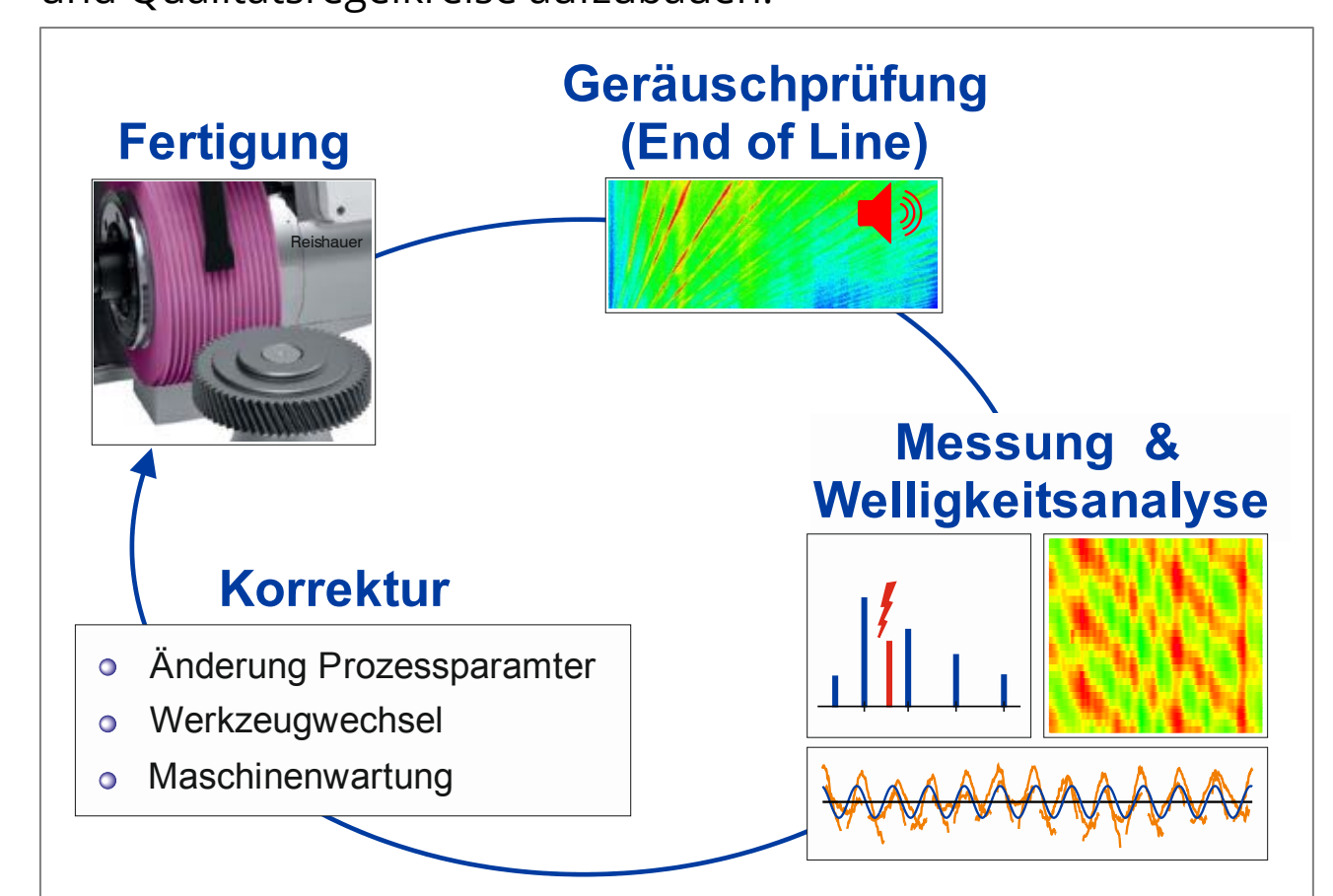
Zahnflanke eines leisen und eines lauten Zahnrades. Die Farbcodierung zeigt die Abweichung von der Sollgeometrie

### VERZÄHNUNGSMESSTECHNIK AN DER HAW

Sind die verursachten Geräusche unzulässig hoch, entstehen zusätzliche Kosten. Für eine wirtschaftliche Produktion ist es deshalb entscheidend, das Auftreten von Welligkeiten bereits auf den Zahnradern noch vor der Getriebemontage zu erkennen. Zur Messung von Verzahnungen werden spezialisierte Messgeräte eingesetzt, die eine eigene Untergruppe der Koordinatenmesstechnik bilden. Ein solches Verzahnungsmessgerät steht dem Institut für Produktionstechnik zur Verfügung und wird in den Forschungsvorhaben genutzt.

### WELLIGKEITSANALYSE & URSACHENSUCHE

In der klassischen Verzahnungsmesstechnik werden Maß-, Form- und Lageabweichungen betrachtet, eine ergänzende Welligkeitsanalyse der Messkurven rückt aber immer mehr in den Fokus. Diese Welligkeitsanalyse ist anspruchsvoll, da für eine funktionsbezogene Auswertung nicht nur die Welligkeiten auf den einzelnen Zahnflanke zu betrachten sind, sondern auch deren Kombination zu einem gemeinsamen Signal. Mit diesen spezialisierten Auswertelgorithmen können die gemessenen Welligkeiten den Ergebnissen der Geräuschprüfung zugeordnet werden. Gleichzeitig ermöglicht diese Auswertemethode Rückschlüsse auf die Entstehungsmechanismen. Die Verknüpfung zwischen Geräusch, Welligkeit und Ursache ist der Schlüssel um die richtigen Korrekturmaßnahmen abzuleiten und Qualitätsregelkreise aufzubauen.



Qualitätsregelkreis für die Produktion leiser Getriebe

### EFFIZIENTE MESS- UND AUSWERTESTRATEGIEN

Ein entscheidender Faktor im Aufbau solcher Qualitätsregelkreise ist die eingesetzte Messstrategie. Gerade für produktionsnahe Messungen in der Serienfertigung beeinflusst der Messaufwand maßgeblich die Wirtschaftlichkeit. Im aktuellen Forschungsvorhaben werden deshalb Strategien entwickelt, die bei möglichst kleinen Messumfängen dennoch ein sicheres Prozessmonitoring erlauben und eine effiziente Fertigungsüberwachung ermöglichen.



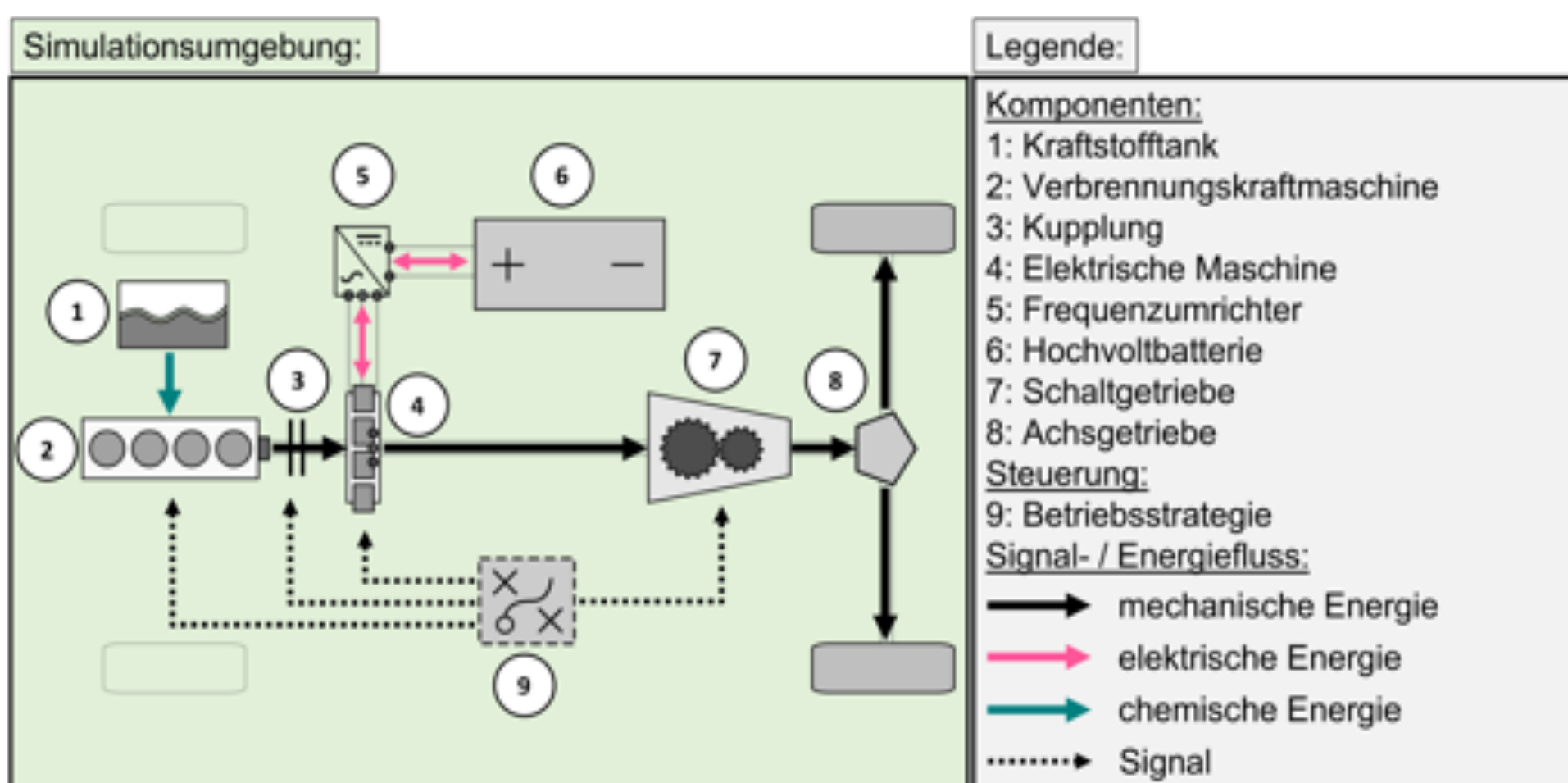
# Optimierung des Entwicklungsprozesses eines hybriden Antriebsstrangs bei Anwendung von realem System und Simulationsmodell unter Einbeziehung des Faktor Mensch

## Verifikation und Validierung der virtuellen Antriebsstrang-Entwicklung

Frontloading in der Automobilindustrie beschreibt das Vorverlagern von Komponententests in frühe Entwicklungsstadien. So kann mithilfe einer Simulation der CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Fahrzeugantrieben bewertet werden, ohne, dass ein Testfahrzeug entwickelt werden muss. Eine hohe Genauigkeit der Simulation bedeutet somit eine Kosten- & Zeitersparnis im Entwicklungsprozess. Voraussetzung dafür ist, dass die Simulationsmodelle verifiziert und für den Anwendungsfall validiert sind. In diesem Projekt wird eine Methode zur Verifikation und Validierung einer Simulation eines Hybridfahrzeugs entwickelt. Dabei steht die Frage im Vordergrund: Wie müssen die Daten für eine erfolgreiche Überprüfung und ein einfaches Verständnis visualisiert werden?

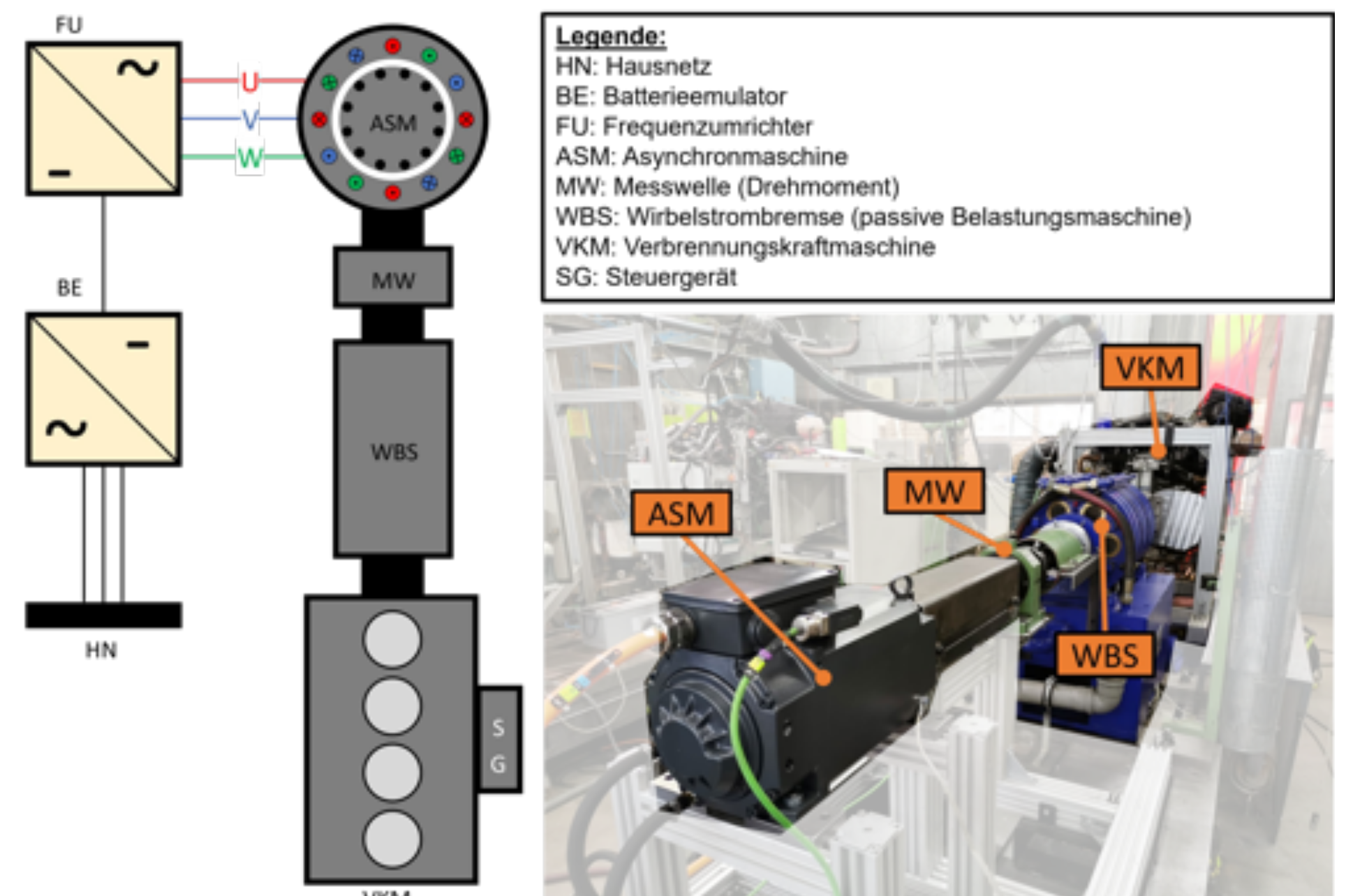
**Verifikation:** Durch die Verifikation wird ein Modell oder eine Simulation überprüft, ob es grundsätzlich plausibel und einsatzfähig ist und die vorab aufgestellten Anforderungen erfüllt.  
**Validierung:** Durch die Validierung wird überprüft, ob das Modell oder die Simulation die Realität in Bezug auf die zu untersuchenden Eigenschaften hinreichend genau abbildet.

Das **Bild 1** zeigt einen modellierten Antriebsstrang als schematische Darstellung. Mithilfe der Simulation des modellierten Antriebsstrangs und der gezielten Variation der Parameter ist es möglich, diese im Hinblick auf die lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu optimieren. Eine weitere Reduktion erfolgt über die Betriebsstrategie, die das zentrale System zur Wahl der Leistungsaufteilung zwischen der Verbrennungskraftmaschine und der elektrischen Maschine darstellt. Die Anzahl an Varianten beträgt für eine beispielhafte Untersuchung der Parameter Leistung der Verbrennungskraftmaschine, Leistung der elektrischen Maschine, Kapazität der Hochvoltbatterie und die Betriebsstrategie je nach Schrittweite 81 – 5000 Varianten, die jeweils 25MB an Daten umfassen. Für die Verifikation der Simulation und Analyse der relevanten Informationen aus den großen Datenmengen wird ein methodisches Verfahren entwickelt. Nach diesem Verfahren werden die Daten zuerst gefiltert, anschließend klassifiziert sowie visualisiert und dann bewertet. Gleiches kann für die anschließende Validierung der Simulation angewendet werden.



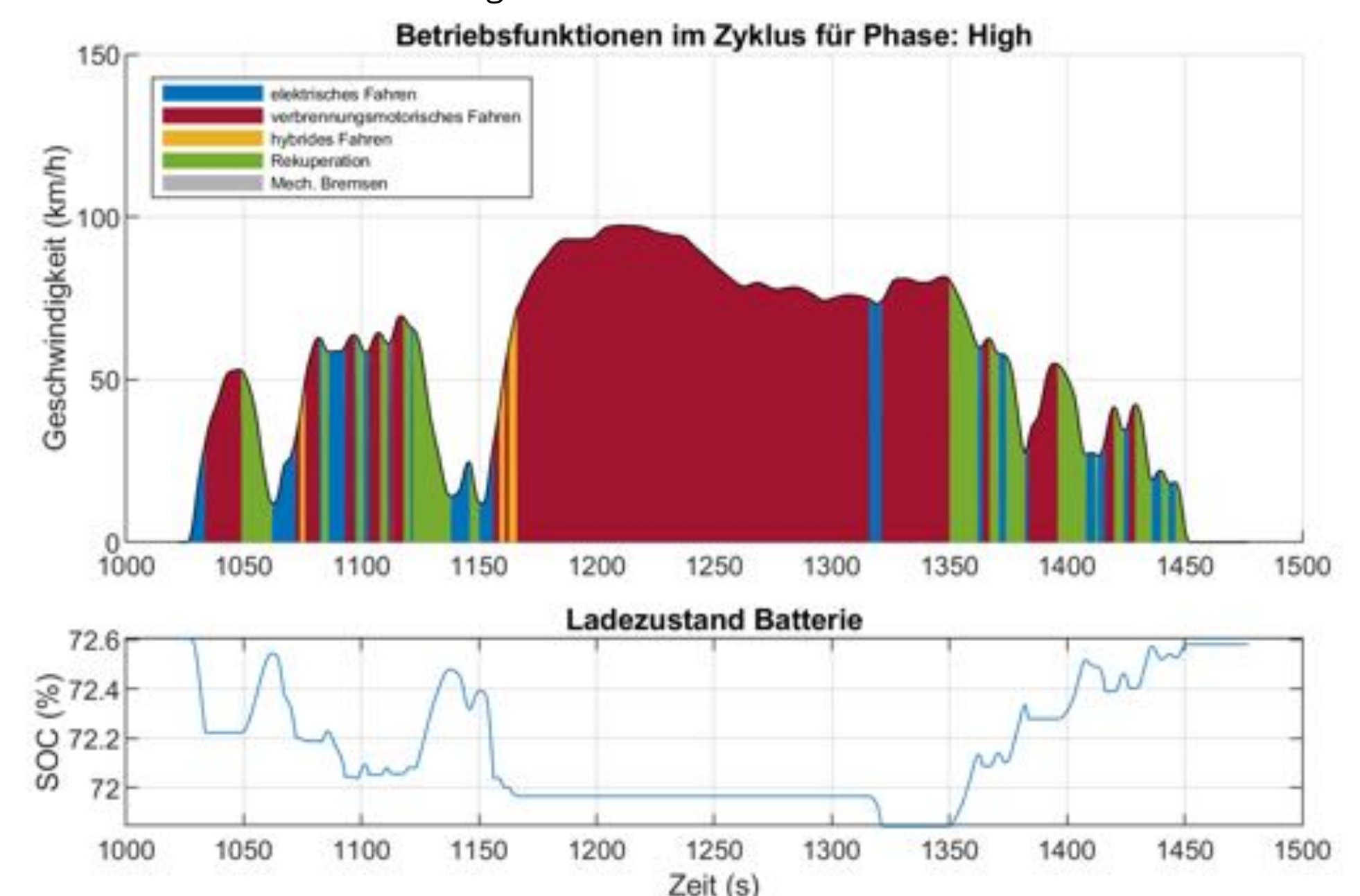
**Bild 1** – Schematische Darstellung: Modellierter Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs der Mittelklasse mit P2-Architektur. P2: Die Verbrennungskraftmaschine und elektrische Maschine sind durch eine Kupplung voneinander getrennt.

Das **Bild 2** zeigt den benutzten Prüfstand eines hybriden Antriebsstrangs am Department F&F, mit dem u.a. die berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Simulation validiert werden. Bei der Entwicklung des Prüfstands steht die Umsetzung der Betriebsstrategie im Vordergrund, die eine zusätzliche Regelung der Antriebsmaschinen voraussetzt. Nach dem entwickelten Verfahren werden auch die Validierungsdaten nach dem obigen Schema ausgewertet. Ein Vorteil bei der Validierung mit dem entwickelten Verfahren liegt darin, dass Fehler in der Simulation zeitlich und thematisch zuverlässig zugeordnet werden können, wie in der letzten Darstellung gezeigt wird.



**Bild 2** – Links: Schematische Darstellung des Prüfstandaufbaus eines hybriden Antriebsstrangs. Unten rechts: Prüfstand eines hybriden Antriebsstrangs am Department F&F. Dieser dient der Validierung der Simulation und der Durchführung von Versuchen für die Lehre.

Die grafische Aufbereitung der Daten zur Verifikation und Validierung ist im Entwicklungsprozess von großer Bedeutung, da diese eine verständliche Kommunikationsgrundlage für die verschiedenen Abteilungen bieten muss. Eine beispielhafte Darstellung ist in **Bild 3** dargestellt. Mithilfe dieser Darstellung kann die Betriebsstrategie bereichsweise analysiert und verifiziert werden. Hier wird beispielsweise die High-Phase des Testzyklus WLTP betrachtet. Oben wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit der farblich markierten Betriebsfunktion gezeigt und unten ist der Ladezustand der Hochvoltbatterie dargestellt. Betriebsfunktionen sind Zustände in der Betriebsstrategie, die sich in antreibende und bremsende Funktionen aufteilen. Eine antreibende Funktion ist beispielsweise das elektrische Fahren, bei dem das Fahrzeug nur mit der elektrischen Maschine angetrieben wird. Analog dazu verhält sich das verbrennungsmotorische Fahren. Beim hybriden Fahren sind sowohl die elektrische Maschine als auch die Verbrennungskraftmaschine aktiv und treiben das Fahrzeug an. Die bremsenden Funktionen sind die Rekuperation und das mechanische Bremsen. Erstere ist wie das elektrische Fahren, nur wird hier die elektrische Maschine als Generator betrieben und lädt die Hochvoltbatterie auf. Beim mechanischen Bremsen wird das Fahrzeug mit den Scheibenbremsen entschleunigt.



**Bild 3** – Grafische Analyse der Betriebsstrategie des simulierten Antriebsstrangs.

Eine beispielhafte Auswertung der grafischen Verifikation würde wie folgt aussehen. Das beobachtete Verhalten wird mit dem physikalischen Gesetzen verglichen und es wird überprüft, ob die gezeigte Betriebsstrategie realistisch umsetzbar ist. Die Physik besagt, dass der Ladezustand der Batterie sinkt sobald die elektrische Maschine am Antrieb des Fahrzeugs beteiligt ist und steigt sobald rekuperiert oder das Fahrzeug an der Steckdose geladen wird. Mit Hinblick auf die Abbildung wird im untersuchten Bereich die Betriebsstrategie richtig umgesetzt und die Physik korrekt abgebildet. Jedoch wird ein häufiger Wechsel zwischen den Betriebsfunktionen beobachtet, was in Verbindung mit realen und unterschiedlich reaktionsträgen Komponenten untersucht werden muss.

### KONTAKT



# Design and performance analysis of a tubular PEM electrolysis cell

Armin Laube<sup>1,2)</sup>, Antonio Chica Lara<sup>2)</sup>, Thorsten Struckmann<sup>1)</sup>

1) Hamburg University of Applied Sciences (HAW), Heinrich Blasius Institute for Physical Technologies, Hamburg, Germany

2) Instituto de Tecnología Química, UPV-CSIC, València, Spain

## Tubular PEM electrolysis cell design

The growing share of volatile energy resources in the electric grid create a need for energy storage systems. A promising candidate to store energy is hydrogen that can be produced in polymer electrolyte membrane (PEM) electrolyzers with electric energy. Currently, PEM electrolysis cells are based on a planar design as shown in Figure 1. A tubular cell design, as shown in Figure 2, enables a fabrication with co-extrusion, reduces sealing length and promises higher power densities [3] This design will be developed and investigated within the research project Tubulyze at the HAW Hamburg in cooperation with several project partners.

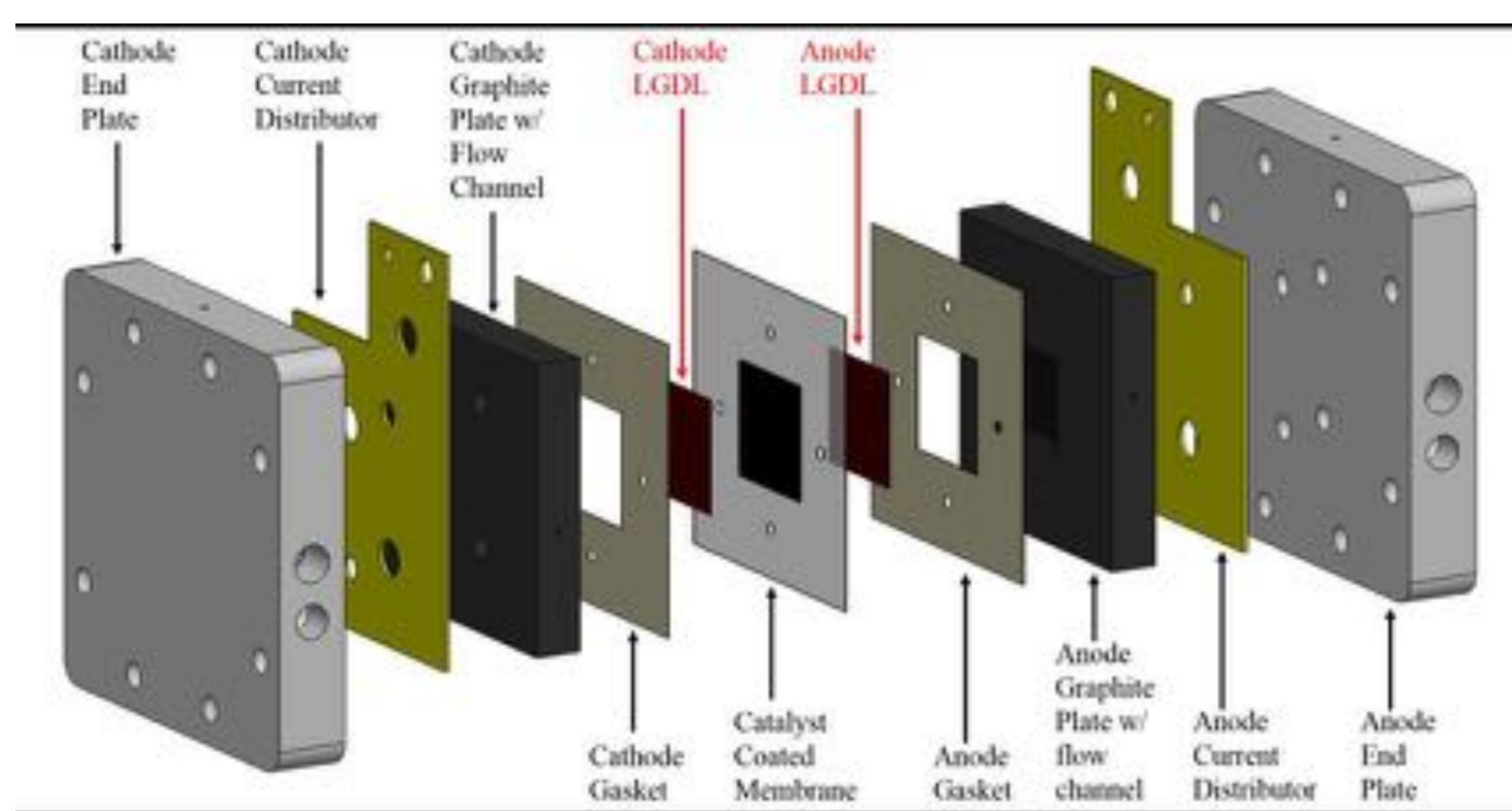


Fig 1: Schematic of a planar proton exchange membrane electrolyzer cell [4]

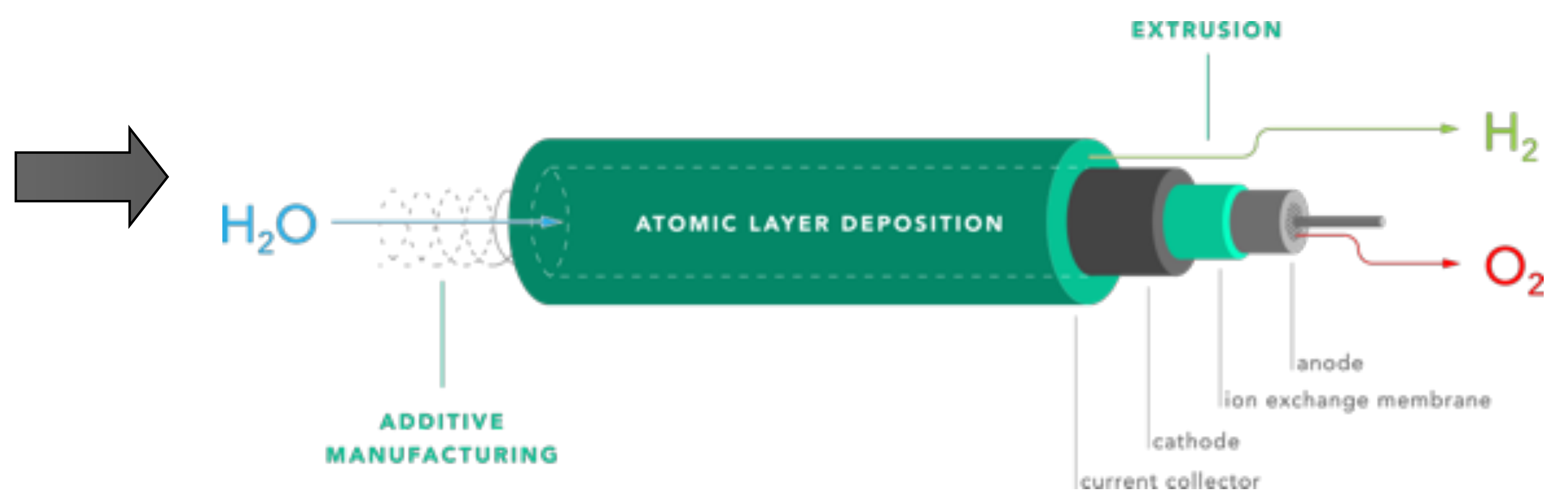


Fig 2: Schematic of a tubular proton exchange membrane electrolysis cell [5]

## Cell design and fabrication

The PEM electrolysis cell has two half cells (anode and cathode) that are separated by the polymer electrolyte membrane. The components in each half cell have several functions as for example the conduction of current, transport of water and gas and acceleration of the reaction by catalysts. Multiphysics and numeric models are used to support the design of tubular porous transport electrodes with catalyst coating by atomic layer deposition[1,2].

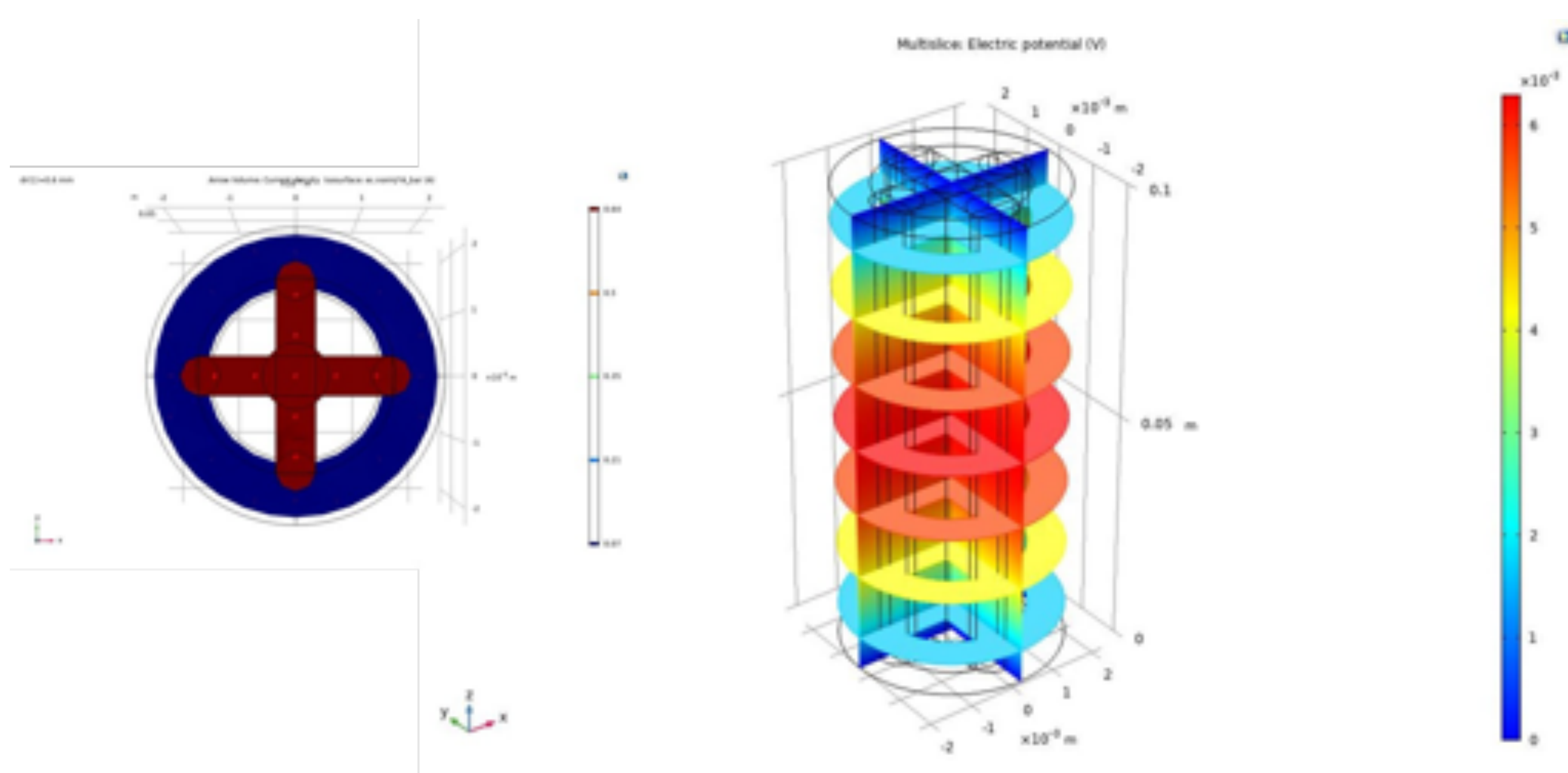


Fig 3: Simulation of potential gradients inside the anode electrode for a homogeneous current density in COMSOL.

To investigate the performance of the tubular cells, demonstrators with different cell designs and catalyst loadings are fabricated.



Fig 4: Fabrication of a tubular PEM electrolysis cell

## Tubular test cell

The tubular cells are operated in a test rig where the cell potential, half cell potentials, electric current, temperatures and pressures are monitored to analyze the cell performance and efficiencies.

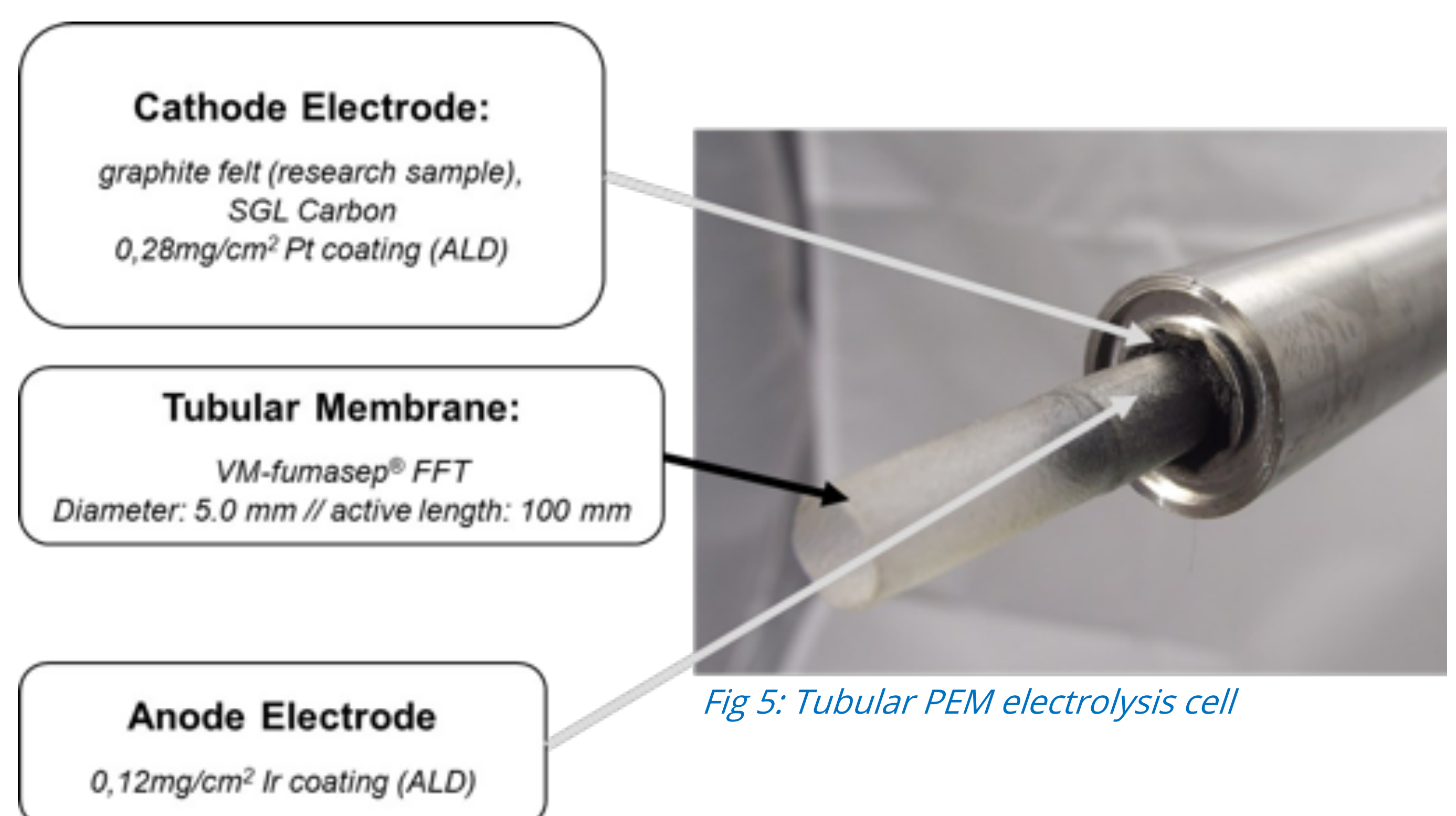


Fig 5: Tubular PEM electrolysis cell

## Cell performance:

- Current density:  
 $i @ 1.7V = 55mA/cm^2$
- Ohmic resistance:  
 $ASR_{EIS} = 0.76 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}^2$   
 $ASR_{CI} = 1.2\text{Ohm}\cdot\text{cm}^2$
- Mass activity  
 $i @ 1.7V = 460 \text{ A/g}$

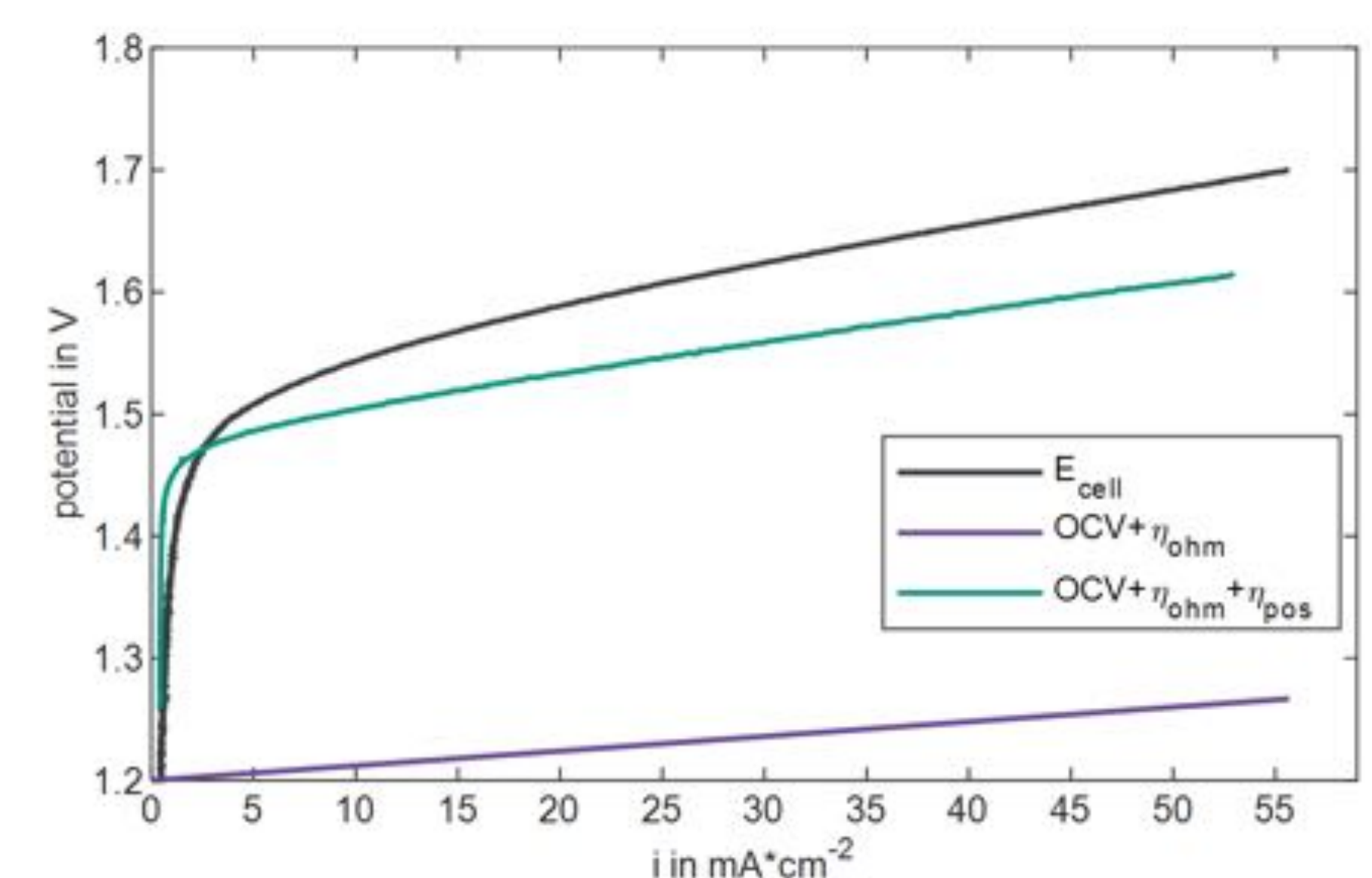


Fig 6: Polarization curve of the tubular PEM electrolysis cell

## Acknowledgements

This work is done within the research project Tubulyze and is funded by the Federal ministry of Education and Research (BMBF FKZ:03FS0564B).

<https://tubulyze.de/>

## CONTACT

e-mail: armin.laube@haw-hamburg.de

phone: +49 40 42872 8719

[AG-Homepage](#)

## REFERENCES

- [1] A. Laube et al., PEM water electrolysis cells with catalyst coating by atomic layer deposition, International Journal of Hydrogen Energy 46 (79) (2021) 38972-38982, DOI:10.1016/j.ijhydene.2021.09.153
- [2] A. Hofer et al., Properties, performance and stability of iridium-coated water oxidation electrodes based on anodized titanium felts, Sustainable Energy and Fuels 5 (2021) (478-485), DOI: 10.1039/d0se01577f
- [3] A. Laube et al., Tubular membrane electrode assembly for PEM electrolysis, in preparation
- [4] Mo et al., Investigation of Titanium Felt Transport Parameters for Energy Storage and Hydrogen/Oxygen Production, 13th International Energy Conversion Engineering Conference, DOI: 10.2514/6.2015-3914
- [5] <https://tubulyze.de/>

SPONSORED BY THE





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
 für Wirtschaft  
 und Klimaschutz  
 aufgrund eines Beschlusses  
 des Deutschen Bundestages

# Entwicklung von Vorhersagealgorithmen für Ausfälle in komplexen leistungselektronischen Systemen in der Photovoltaik

## ENTWICKLUNG EINES RESERVOIR COMPUTING ANSATZES ZUR ZEITREIHENPROGNOSE IN PHOTOVOLTAIKSYSTEMEN

Im Rahmen des Forschungsprojektes Digital Twin Solar @HAW werden digitale Zwillinge für die Abbildung von Photovoltaik-Komponenten und deren Kopplungen entwickelt. Kern des Teilvorhabens, welches hier vorgestellt wird, ist die Untersuchung ob und wie moderne Datenanalyseverfahren, speziell Reservoir Computing, das Erkennen, Vorhersagen und insbesondere das Modellieren von Photovoltaik-Komponenten ermöglichen.

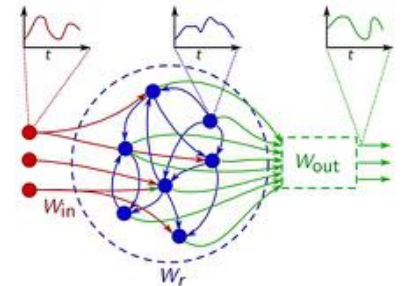


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Reservoir Computing Systems [3]



Abbildung 1: SMA Solar Technology SUNNY CENTRAL [1]

### Motivation

Einer der wichtigsten Faktoren für den Betrieb einer Photovoltaikanlage ist die Wirtschaftlichkeit. Unser Ziel ist die Entwicklung von Vorhersagealgorithmen, die es ermöglichen durch prädiktive Wartungskonzepte Betriebs- und Wartungskosten zu reduzieren und die Wirtschaftlichkeit zu fördern. Untersuchungen zeigen, dass die meisten Ausfälle von Photovoltaikanlagen durch Ausfälle von Invertern verursacht werden. Insbesondere kritische Bauelemente wie Kondensatoren und Halbleiterschalter wie IGBTs und MOSFETs werden hierfür als Ursachen aufgeführt. [2] Da die Komponenten einer Photovoltaikanlage nicht nur in ihrer Einzelwirkung untersucht werden dürfen, sondern auch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Komponenten berücksichtigt werden müssen, ist eine möglichst umfassende datentechnische Erfassung notwendig.

### Dimensionsreduktion

Aufgrund der hohen Anzahl von etwa 200 Parametern für jeden Inverter, wird eine Hauptkomponentenanalyse für alle numerischen Parameter, mit dem Ziel der Dimensionsreduktion bei minimiertem Informationsverlust durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für einen Inverter. Es lässt sich ablesen, dass sich bereits mit einer Anzahl von 20 Hauptkomponenten nahezu 100% der Varianz erklären lassen. Zusätzlich liefert eine Rücktransformation der Hauptkomponentenanalyse die für die Gesamtvarianz des Datensatzes wichtigsten Variablen. Folgende Analysen können somit auf den transformierten sowie den ursprünglichen Datensatz angewendet werden.

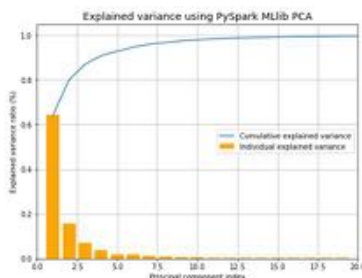


Abbildung 2: Hauptkomponentenanalyse

### Reservoir Computing

Reservoir Computing ist ein Algorithmus des maschinellen Lernens, der sich besonders gut für die Prognose von dynamischen Systemen eignet. Es gibt vielversprechende Ergebnisse bei der Zeitreihenprognose von chaotischen Systemen sowie realen Größen. [4, 5]

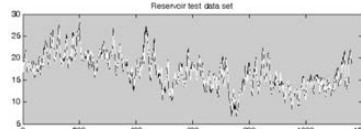


Abbildung 4: Zeitreihenprognose mit Reservoir Computing [5]

Abbildung 3 zeigt die schematische Darstellung eines Reservoir Computing Systems. Die Kernidee besteht darin, dass die Eingangszeitreihe an ein hochdimensionales, dynamisches System, dem sogenannten Reservoir, gekoppelt wird. Das Reservoir besteht aus einem rekurrenten neuronalen Netz, das nach dem Zufallsprinzip konstruiert wird und dessen Gewichte unverändert bleiben. Durch diesen Aufbau ist es in der Lage, Informationen zu speichern und komplexe Aufgaben zu bewältigen. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass lediglich das Output Layer so trainiert wird, dass die Differenz zwischen der Eingangszeitreihe und der prognostizierten Zeitreihe minimiert wird. Der Trainingsaufwand lässt sich dadurch meist auf eine lineare Regression reduzieren.

### Erweiterung Rechnerinfrastruktur

Für die Verarbeitung der von SMA Solar Technology bereitgestellten realen Messdaten wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine Rechenclustererweiterung beschafft und installiert. Insgesamt stehen damit 672 Prozessorkerne sowie ein Arbeitsspeicher von 3,6 TB zur Verfügung. Die Erweiterung erlaubt es, die Analysen auf den gesamten Datensatz auszuweiten.

### Ausblick

Im weiteren Verlauf der Forschung wird der Reservoir Computing Ansatz auf den dimensionsreduzierten Datensatz der Photovoltaik Inverter angewendet. Die prognostizierten Zeitreihen sollen mit Fehlervorhersagealgorithmen



Abbildung 5: Forschungsausblick

verbunden werden, um potentielle Ausfälle frühzeitig zu erkennen. Darüber hinaus werden weitere Methoden zur Zeitreihenprognose, wie beispielsweise long short-term memory (LSTM) Netzwerke untersucht, und mit dem Reservoir Computing Ansatz verglichen.

### Quellen

- [1] SMA Solar Technology: SUNNY CENTRAL <https://www.sma.de/produkte/solar-wechselrichter/sunny-central-2200-2475-2500-ev-2750-ev-3000-ev.html> – Eingesehen am 06.06.2021.
- [2] The Effect of Inverter Failures on the Return on Investment of Solar Photovoltaic Systems. T. J. Formica, H. A. Khan, und M. G. Pecht (2017)
- [3] Forecasting chaotic systems with very low connectivity reservoir computers. Griffith, Aaron, Andrew Pomerance, und Daniel J. Gauthier (2019)
- [4] Model-Free Prediction of Large Spatiotemporally Chaotic Systems from Data: A Reservoir Computing Approach. Pathak, Jaideep, et al. (2018)
- [5] Using reservoir computing for forecasting time series: Brazilian case study. Ferreira, Aida A., und Teresa B. Ludermir (2008)



## MOTIVATION

Our goal is to detect anomalies in data records of solar inverters in order to predict failures of these devices. This will enable the implementation of various predictive maintenance strategies to reduce the operation and maintenance cost.

## WORKING HYPOTHESIS

Power electronic devices such as solar inverters are complex constructions containing a high number of different components, we propose that such a system can be viewed as a dynamical system and a failure of such a device as a critical transition. Based on the theory of bifurcations in dynamical systems such events could be predicted analysing so called early warning signals. In this contribution we study if and how this scheme is applicable to power electronics.

## MATERIALS & METHODS

Some dynamical systems have more than one stable equilibrium. When the conditions of a system change, those equilibriums can become unstable and force the system to transition to a different state.

A bifurcation is an event that happens when external influence causes the systems behaviour to change. This phenomenon has been studied for a variety of systems and is illustrated here base on content from [1,3]. Compare figure a to figure d where the gradient around the ball flattens out. This in turn can cause the "Basin of attraction" to shrink. This means when a system is far away from a bifurcation as in figure a, random perturbations on the system lead to a rapid return to equilibrium. This can be observed in a low variance of the state variable see figure b. As well as in the low correlation of the amplitude of fluctuation (figure c). Once a bifurcation is immanent the system becomes unstable. Perturbations are not decaying as fast as before. Which means that they have a bigger influence on the system. This can be observed by an increase in the variance of the state variable (figure e) and an increase of the correlation the amplitude of fluctuation seen in figure f. [1,3]

## EARLY WARNING SIGNALS

In a variety of systems (see [1,3]) critical transitions were announced by early warning signals visible in time-series of measurements from the systems. Common methods to detect these early warning signals are an increase in sliding window-variance and auto-correlation before the onset of the transitions. Studying mathematical models for critical transitions [4] revealed that the ability to detect CTs can depend on the choice of feature estimated from the time series.

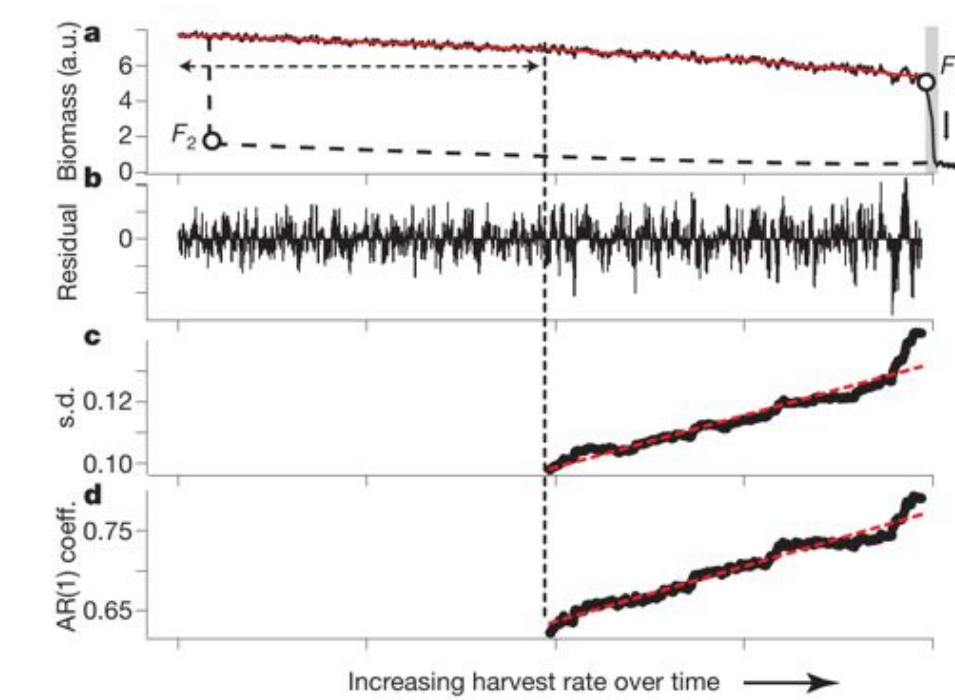
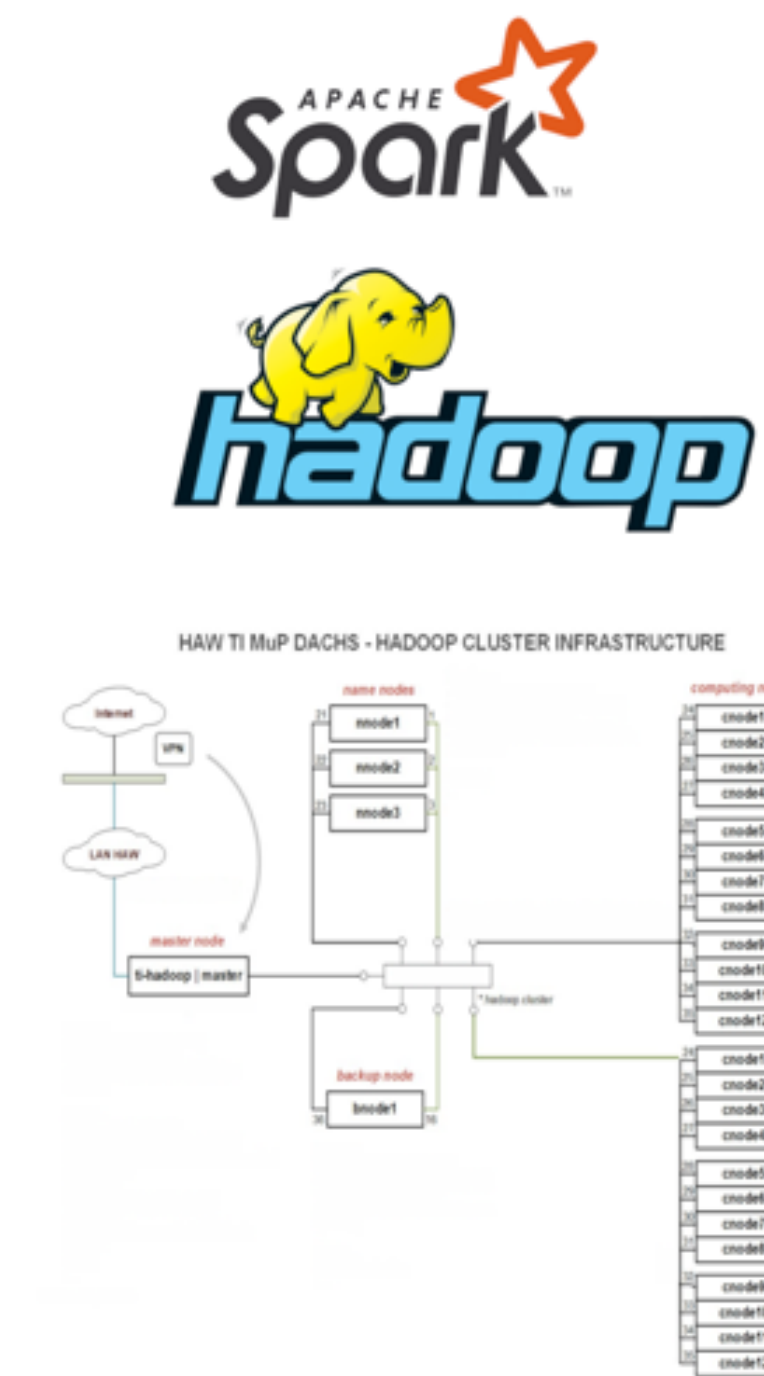


Figure 2: taken from [1]

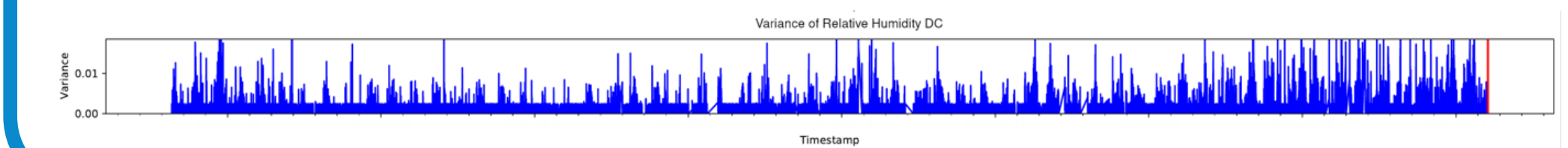
## BUILDING THE INFRASTRUCTURE

The underlying dataset of inverter sensors is in the Terabyte range. Therefore distributed computing is a must. Through the funding of this BMBF project (FKZ: 03EI6024F) we were able to extend the existing cluster. This extension includes 14 HPC - Servernodes with a total of 672 CPU Cores and a combined RAM of 3.6 TB. Data is stored using HDFS. Calculation run Apache Spark.



## SLIDING WINDOW VARIANCE

This figure shows the window variance of the relative Humidity in the DC compartment of a inverter. Approaching a failure we can detect a small increase of variance.



## OUTLOOK

We aim on identifying onsets of critical transitions in a high-dimensional dataset of terra-byte size. Having completed studies for dimensionality reduction, we now focus on identifying variables that reveal the onset of critical transitions in the most prominent ways. Additionally we combine these approaches with time-series modelling through ANNs and detection of anomalies through model deviations.

Furthermore we are going to combine the developed classification algorithm with a prediction model to get a working predictive maintenance tool which will enable SMA to detect failure of inverters in the future.

## FINDING POSSIBLE EWS

To find suitable candidates for an Early Warning Signal. We performed a Principal Component Analysis (PCA) of all numerical data in our dataset. After performing a reverse operation we calculated the significance of each sensor signal of the entire dataset. The figure shows the composition of the four most important features for every inverter and their respective count inside the entire dataset. These calculation are the base for calculating the various early warning signals discussed earlier.

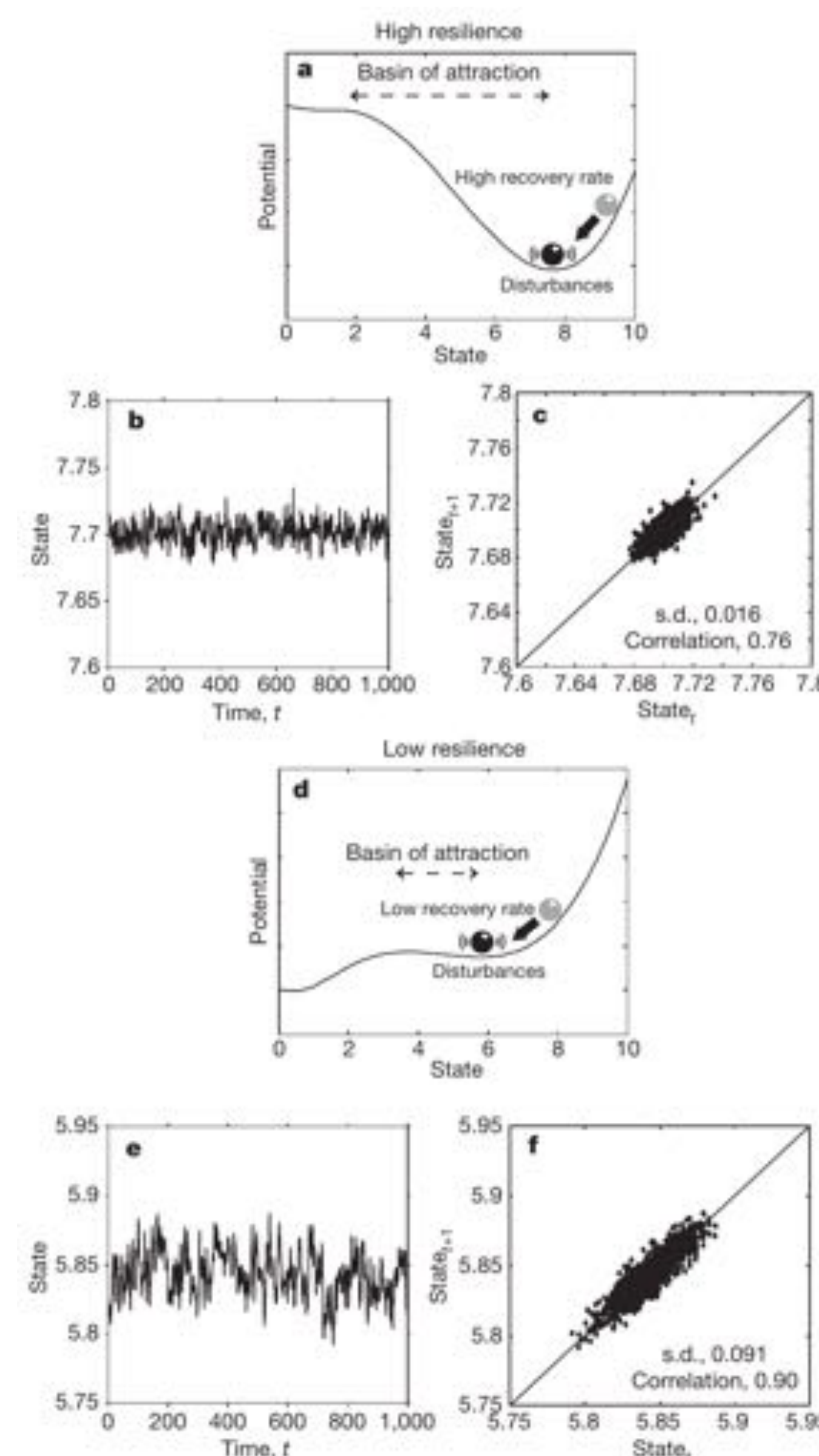
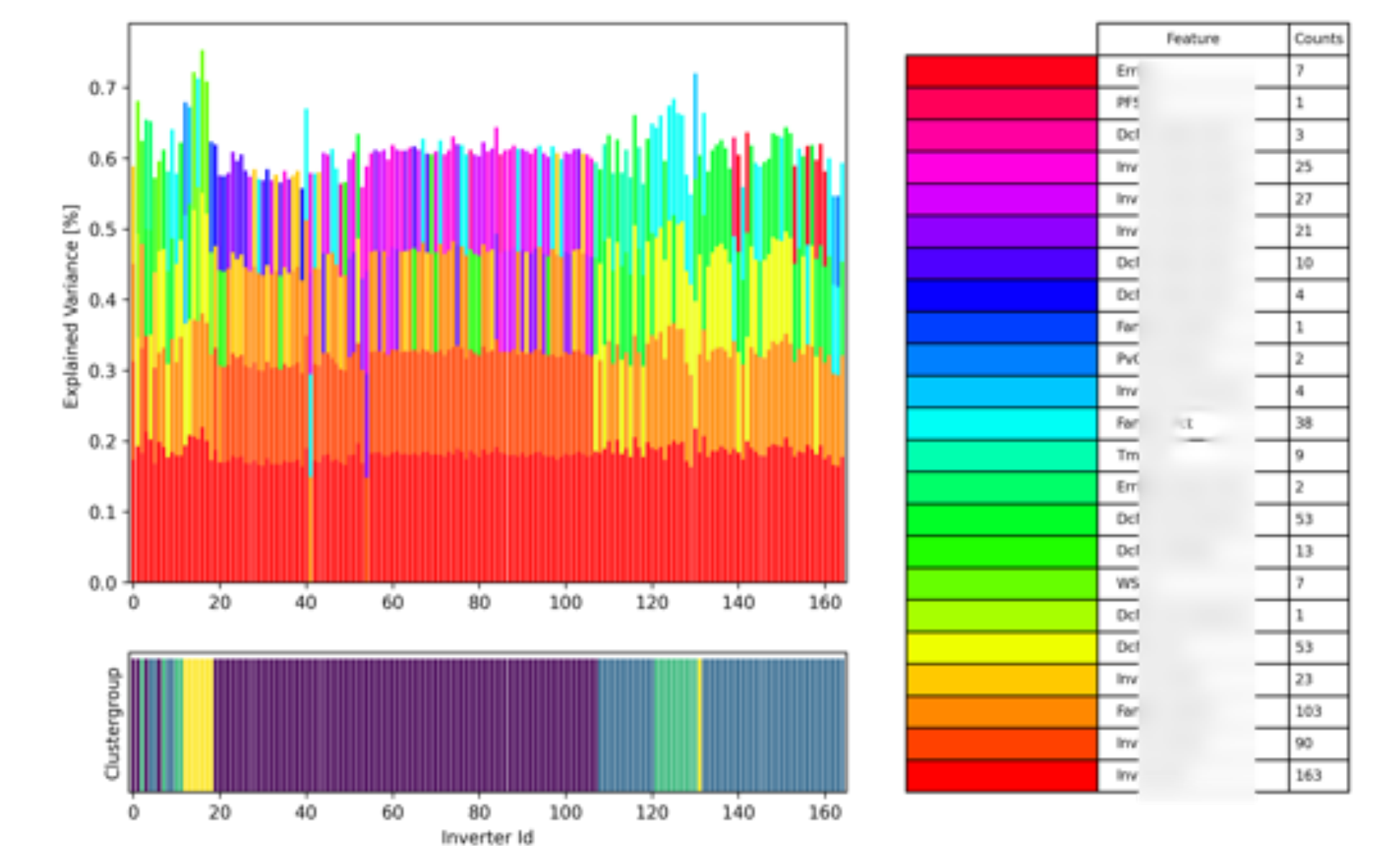


Figure 1: taken from [1]

## REFERENCES

- [1] Early-Warning Signals for Critical Transitions, Scheffer et al. (2009)
- [2] Critical slowing down as a biomarker for seizure susceptibility, Maturana et al. (2020)
- [3] Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change, Dakos et al. (2008)
- [4] Predictability of critical transitions, X. Zhang, C. Kühn, S. Hallerberg (2015)



# *The industrial design of an autonomous vehicle*

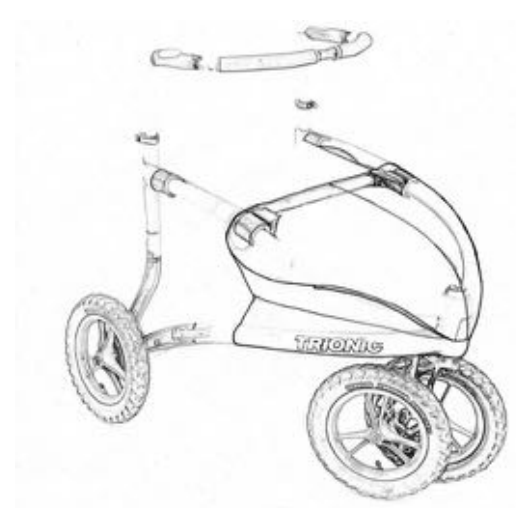
## DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF AN ENCLOSURE FOR THE ROBOTICS PROJECT 'SHARED GUIDE DOG 4.0'.

**Industrial design is the creative act of determining the physical shape and style of a product or device. Just like any other man-made object, robots, as well as vehicles, need industrial design. This sub-project of the 'Shared Guide Dog 4.0' (SGD4.0) was in charge of developing a bodywork that, based on the existing chassis, was both functional and aesthetic.**



A digital drawing of the bodywork, which was used as a reference for the CAD model.

A product's design process consists of multiple phases, each one building upon the previous one and incorporating different parts of the design going from general ideas to the very details. The design process is a guideline that changes according to a project's needs. This document describes the design process followed to develop the chassis of the SGD4.0.



### ANALYSIS PHASE

The first step is to determine the purpose and use of the product as well as to set the requirements from an engineering perspective. These requirements could include parameters such as weight, durability, or dimensional restrictions. Also, deciding upon specific features, in this case, if the bodywork should be able to withstand collisions or weight placed on it or even if it should be waterproof, or just weatherproof. Finally, the placement of sensors, lights, or any other specific requirements should be decided beforehand. Once the goals are clear, one can start taking inspiration for a design that fulfills such requirements.



Above, a sketch of the bodywork design. Below, an image of the CAD model.

### DESIGN CONCEPT

The brainstorming of ideas occurs in this phase, where the most general design challenges are approached. During this phase, multiple sketches are drawn before deciding for the most suitable design. Subsequently, a more appealing digital drawing of the selected sketch is made and colored before making a final decision. The design concept is more art-oriented, where the main focus is on the style and appearance of the bodywork, leaving engineering decisions to the next phase.

### DESIGN DEVELOPMENT

This is the part where art meets engineering. Here, the design concept is taken to the CAD design where decisions about dimensions, thickness, structure, etcetera have to be made

according to parameters such as a stress-strain analysis, manufacturing techniques, and safety factors.

Since the chassis has a complex design that can hardly be manually measured; in order to get precise dimensions of the bodywork, the chassis was 3D-scanned by using photogrammetry. Once a precise 3D model of the chassis was available, the bodywork was designed in CAD by using 3D splines, free forms, and surface modeling.

It is important to note that during this phase, all the requirements discussed in the analysis phase are implemented; for instance, the dimensions, durability, weight, etc. It is also important to consider the assembly, as it should be relatively easy to mount or even unmount, according to the requirements set in the analysis phase. The location of sensors and lights require holders that should also be incorporated in this phase to allow an easy installation. Furthermore, details such as the size of the screws, needed in different parts on the mounts, should be here defined.

Finally, another relevant consideration is the manufacturing technique chosen, so the product can be designed accordingly. There are important differences in the creation of a design depending on whether it will be manufactured by injection molding, 3D printing, additive manufacturing, etcetera.

### MANUFACTURING PHASE

In this phase, the product goes from intangible to tangible by fabricating the design created in the previous steps. As only one bodywork is initially needed, the design has not been considered for mass production yet. Therefore, this first prototype can be manufactured by using rapid prototyping technologies, in this case, 3D printing.

As 3D printers are not typically large enough to print the bodywork in one piece, it was designed

to be printed in multiple parts and to be assembled afterward. In order to obtain a smooth surface, the bodywork was subjected to multiple post-processing steps that include filling, sanding, and painting. The resulting product is finally assembled on the robot.



Picture of the physical version as presented at the ITS World Congress 2021.

### TEST, OPTIMIZE, REITERATE

As a final step in most engineering design processes, it is important to identify the elements that can be improved. Such elements are usually detected during the testing of the prototype. This process can be repeated until having achieved the desired result. As the SGD4.0 itself is being developed, a final version has not been reached and therefore, the list of changes for a new version of the bodywork is not yet complete. Thus, this optimization process has been momentarily postponed; however, a separate work is focusing on potential manufacturing techniques that could make it possible to mass-produce this bodywork.



# Fast design of repairs to carbon fiber reinforced plastic components in civil aviation (FastRepair)

Phd Student: Lalitkumar Savaliya; Supervisors: Markus Linke and Juan Antonio García-Manrique

Doctoral Program: Programa de Doctorado en Diseño, Fabricación y Gestión de Proyectos Industriales

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) bonded repairs are problematic from a certification point of view. With bonded repairs, it must be proven that the interface between the joining partners does not fail or adhesive layer damage (adhesive layer detachment, cracks and weakening) does not lead to the repaired structure falling below the limit load. The FastRepair project, therefore, aims to design a process in which typical repairs to load-bearing CFRP structures can be validly designed in an automated and rapid manner.

## INITIAL SITUATION

In aviation, the safety requirements for repairs of structural components are very high. Typical repairs are based on riveting or bolt connections.

Bonded repairs are potential technology to replace the bolted repairs in the case of CFRP.

Figure 1 shows a typical bonded patch repair procedure.

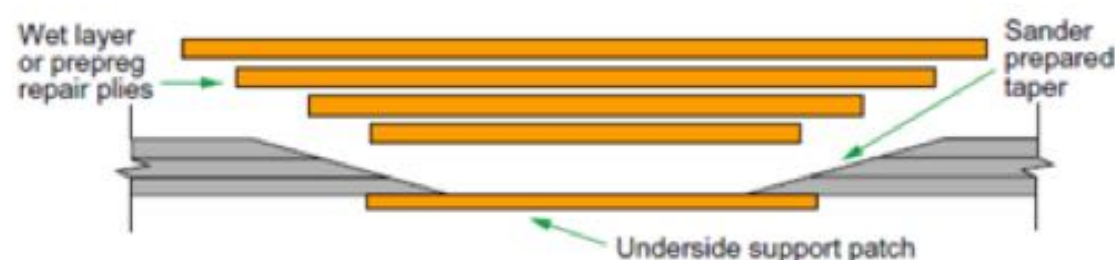


Figure 1: Composite bonded repair

However, bonded repairs are problematic from a certification point of view.

For certification of CFRP bonded repairs, it must be demonstrated that initial damage to the bond can only grow to the point where the ultimate load-carrying capacity of the repair is still assured.

Additionally, currently available numerical analysis methods for bonded joints are more complex and computationally expensive.

## OBJECTIVE

The project aims to demonstrate that the analytical-numerical method can be used to quickly establish validated models that can reliably predict the bond behavior (e.g., crack growth) in CFRP bonded repairs.

If this information is known, it is also possible to estimate after what period of use an inspection of the repairs must take place or when inspection intervals must be set.

## SOLUTION Approach

A simulation and repair process needs to be demonstrated that fulfils the approval-related framework conditions for CFRP repairs.

The development of a rapid design methodology is based on the numeric-theoretical procedure.

The verification procedure is based on the consideration of the typical failure behavior of CFRP components as well as suitable repair concepts.

Finally, the obtained results will be evaluated for their transferability and scalability to other materials, processes and Industries (e.g., wind or shipping).

## METHODOLOGY

In the case of CFRP patch repair, the boundary layer between the joining partners is interpreted or idealized as an adhesive layer.

A special-purpose interface element is being developed to predict the bonded joint behavior (e.g., shear stress and peel stress at a bondline) faster and efficiently for an adhesive joint.

Figure 2 illustrates the graphical representation of an interface (adhesive) element at bonded joints or interfaces.

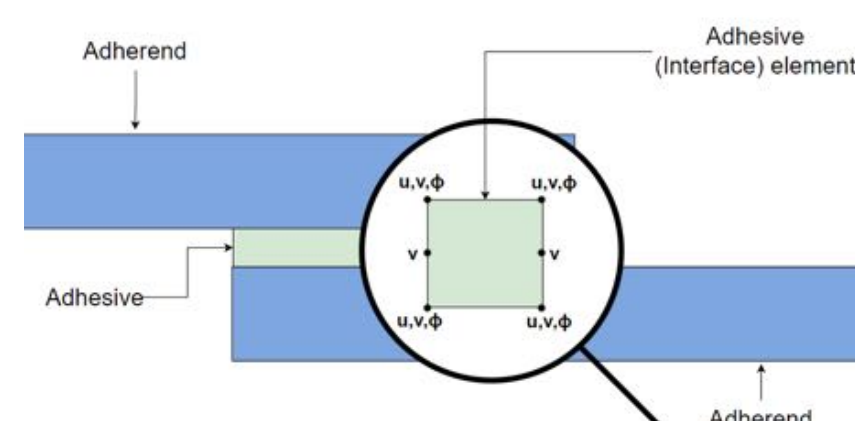


Figure 2: schematic diagram of single lap shear joint with an interface element

This element is 2-dimensional with two face sheets where the adhesive layer or core is connected to the face sheets or face surface.

The formulation is on the plane stress condition.

## FIRST RESULTS

Using the Interface element, a single lap shear joint as shown in figure 3 was analyzed and shear stress results at bondline were evaluated.

Below figure 3 presents the shear stress results over the bondline for a single lap shear joint.

It can be seen that using the least number of elements, the reliable prediction of shear stress at the adhesive layer or bondline can be achieved.

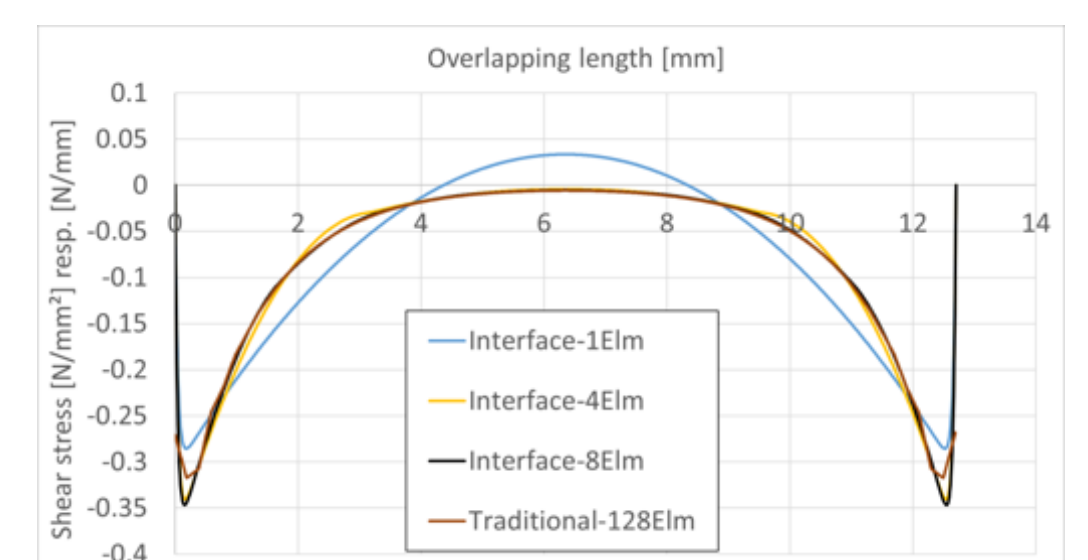


Figure 3: Shear stress along the bondline of a single lap shear joint

## FUTURE DIRECTION

Automization and optimization of the developed models and processes are to be carried out.

The applicability of the developed models and processes for adhesive-like joined repair patches will be demonstrated using realistic CFRP components.

## ACKNOWLEDGMENT

The Project FastRepair is funded by Joachim Herz Stiftung. Its support is very much appreciated by the authors.



# Electro-mechanically coupled multiscale models for multifunctional composite materials

## CHARACTERIZATION OF FORCED HEAT CONVECTION UNDER AIRCRAFT ICING CONDITIONS

**The characteristics of heat convection, which is the thermal heat transfer from a solid to its environment, depend on the environmental conditions. A reliable simulation of de-icing processes for multifunctional materials depends on the convection model. It should be related to application based environmental conditions. In the latest study, the convection of a multifunctional composite panel is characterized by an in-situ test in an aviation de-icing test-bed.**

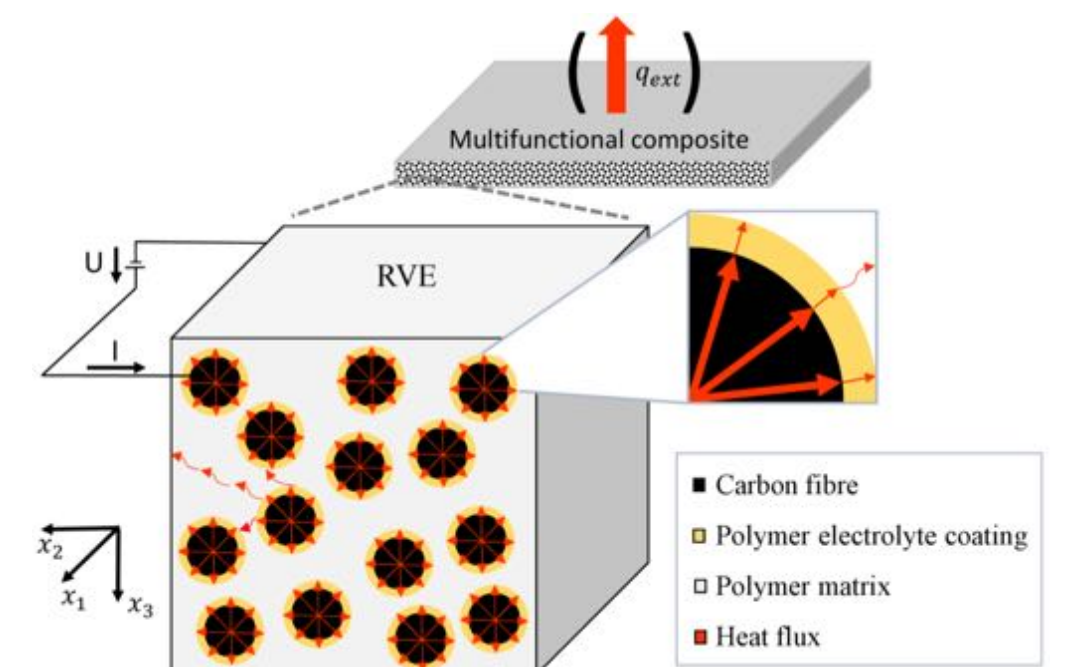


Figure 1: Schematic of multiscale model for thermal heat transfer within the multifunctional composite material [3]

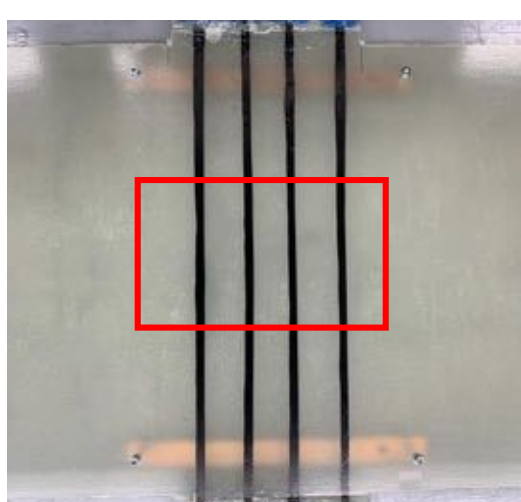


Figure 2: Carbon fibre rovings for active heating embedded in glass fibre laminate, red: control surface area, captured by thermographic camera (shot at HAW Hamburg)

In many engineering applications materials are designed to provide one function, e.g. structural load transfer. Especially in lightweight design, this is commonly optimised towards low component weight. Multifunctional materials instead are able to provide multiple functions e.g. structural load transfer and directed thermal heating (in this case). With this general recognition, multifunctional materials can realise system-level functions, such as de-icing of aircraft wings, while reducing the amount of monofunctional materials and the installation and design effort. The enhanced weight saving potential on a system level is valuable for mobility platforms aiming at an overall reduction of energy need. Nevertheless, this requires also knowledge about the multiphysically coupled behaviour of the material under mechanical and electro-thermal loads.

### Computational efficient by microscale homogenization

The multifunctional material under consideration is a three-phase carbon fibre reinforced plastic (CFRP), where the carbon fibres are covered by a polymer-electrolyte coating (see figure 1). Originally developed for structural batteries, this material joins structural stiffness and directed electrical current conduction [1]. „Directed“ means that the coating functions as electrical insulator and that the carbon fibre can be applied as insulated current conductor. This micro-scale architecture enables current conduction and, simultaneously by joule effect, a directed thermal heating. The thermal heating results in electro-thermo-mechanically coupled behaviour, which is characterized in this study-series [1-3].

Numerical modelling enabled the development of mechanical and thermal homogenization of the composite material on the micro-scale. Homogenization is needed to find effective material properties which are applied to macro-scale models. With this method, computational cost is reduced by 95%. Furthermore, experimental evaluation revealed that the material mechanics is directly dependant on the local temperature, leading to efforts for a reliable model of the spatial temperature field [1-3].

One perspective for the application of a multifunctional composite material is the de-icing

of aerodynamic surfaces of aircraft. Typically wing leading edges are subject to icing conditions during flight and need to be de-iced to assure the aerodynamic function of the wing. Classical systems operate with hot air taken from the engine (bleed air), which reduces the engines' efficiency. The hot air is then directed by a complex pipe system towards the critical wing surfaces. This system only operates during less than 10 % of a regular commercial flight, but is a permanent part of the aircraft. This additional mass causes an increase of fuel-consumption and thus an increase of emissions.

### Proof of concept by convection characterization

The potential for multifunctional materials in de-icing systems is expected to be great, but the evaluation of heat convection under application related icing conditions (temperature, moisture and airflow) is critical for the evaluation. The present experimental study solves this issue. In thermal simulation heat convection is usually represented by Robbins' boundary condition:

$$\dot{q} = h \cdot A \cdot (T - T_{ext})$$

The heat dissipation per time unit  $\dot{q}$  at a free surface is assumed to be proportional to the temperature difference of environment  $T_{ext}$  and local temperature  $T$ , to the convective surface area  $A$  and to the convection coefficient  $h$ . The convection coefficient is very sensitive to the setup (material, environment, geometry). In addition, the heat dissipation at the surface of a multifunctional material directly influences the resulting temperature field inside the solid, thus influencing the mechanical behaviour. Accordingly, the knowledge about the heat convection coefficient is essential to conclude about the in-situ behaviour of multifunctional materials, especially under forced convection condition, which is the case for de-icing of aircraft surfaces.

In a collaboration with the Institute of Adaptronics and Function Integration at TU Braunschweig and the DLR Institute of Composite Structures and Adaptive Systems, it was possible to conduct convection characterization in a de-icing test-bed. This is designed to apply environmental conditions comparable to in-flight icing conditions with low temperature down to  $-20^{\circ}\text{C}$ , airflow of up to 35 m/s and water drops injection. The test-bed is

compatible to wing sections or derivatives of wing structures.

For this study a glasfibre laminate was used as structural support and the top layer was made from glas fibre fabric and carbon fibre rovings (see figure 2). The plate is designed to suite to the test chamber of the de-icing test-bed. Furthermore, the setup comprises a thermographic camera to capture the control-surface temperature and a electrotechnical amplifier circuit to control and adapt the heating power (see figure 3). The electrotechnical solution was developed by Thorben Strübing (B.Sc. Mechatronics), Student in MA Automation Technology at HAW Hamburg [4].

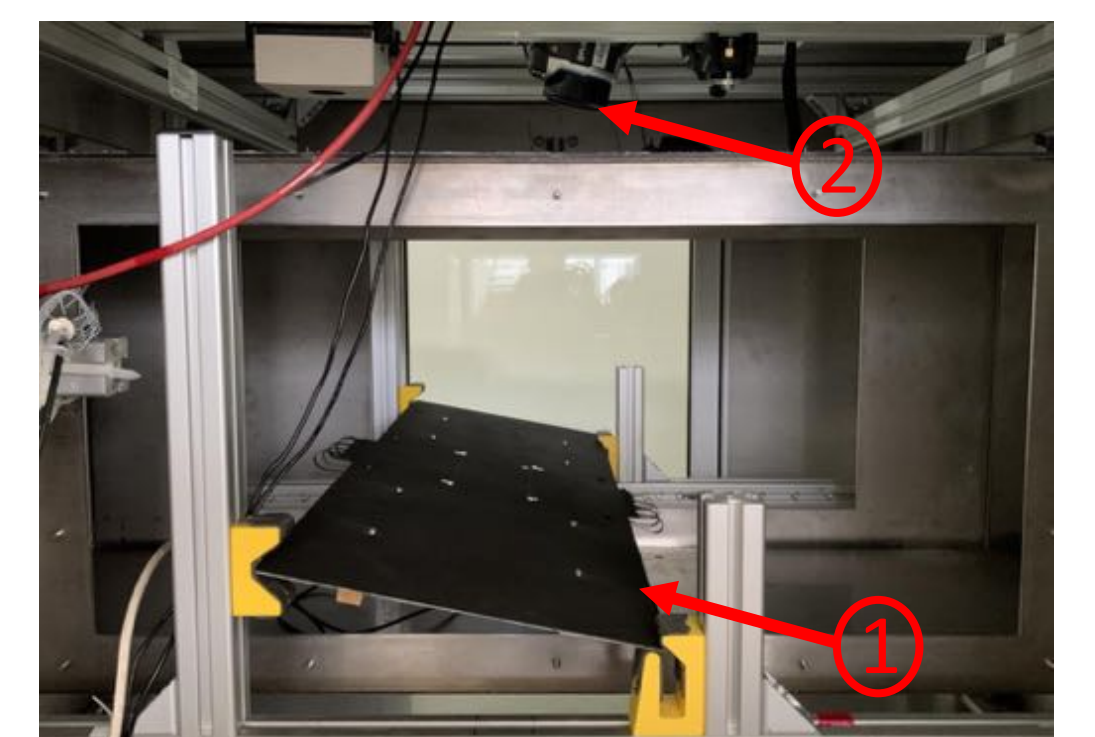


Figure 3: Experimental test setup in de-icing test-bed at TU-Braunschweig: 1) Specimen plate coated with high emissivity black paint, 2) Thermographic camera, adjusted to capture surface temperature within the control surface area (both from HAW Hamburg) [4]

The study continues now by the help of a virtual twin of the laminate, where the convection is modelled by Robbins' boundary condition. A direct comparison with measured results from the experimental setup enables the identification of specific convection coefficients, which can be applied to future benchmarking simulations for de-icing systems. In addition, the optimization of the geometric architecture of a multifunctional structure will depend on realistic boundary conditions.

The present work is part of a doctoral study by Maximilian Schutzeichel (M.Sc.), supervised by Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Kletschkowski (HAWHH) and Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Monner (DLR).

[1] Schutzeichel, M.O.H. et al.: Experimental characterization of multifunctional polymer electrolyte coated carbon fibres; Functional Composites and Structures, Vol. 1, Nr. 025001 (2019)

[2] Schutzeichel, M.O.H.; Kletschkowski, T. and Monner, H.P.: Effective stiffness and thermal expansion of three-phase multifunctional polymer electrolyte coated carbon fibre composite materials; Functional Composites and Structures, Vol. 3, Nr. 015009 (2021)

[3] Schutzeichel, M.O.H.; Kletschkowski, T. and Monner, H.P.: Microscale Thermal Modelling of Multifunctional Composite Materials Made from Polymer Electrolyte Coated Carbon Fibres Including Homogenization and Model Reduction Strategies; Applied Mechanics, Vol. 2, 739-765 (2021)

[4] Strübing, T.: Systementwurf und -integration einer ortsdiskreten thermographischen Temperaturmessung in ein adaptives Heizsystem für multifunktionale Leichtbaupaneele, Masters' Thesis under preparation, HAW Hamburg 2022



### KONTAKT

Forschungs- und Transferzentrum  
Future Air Mobility

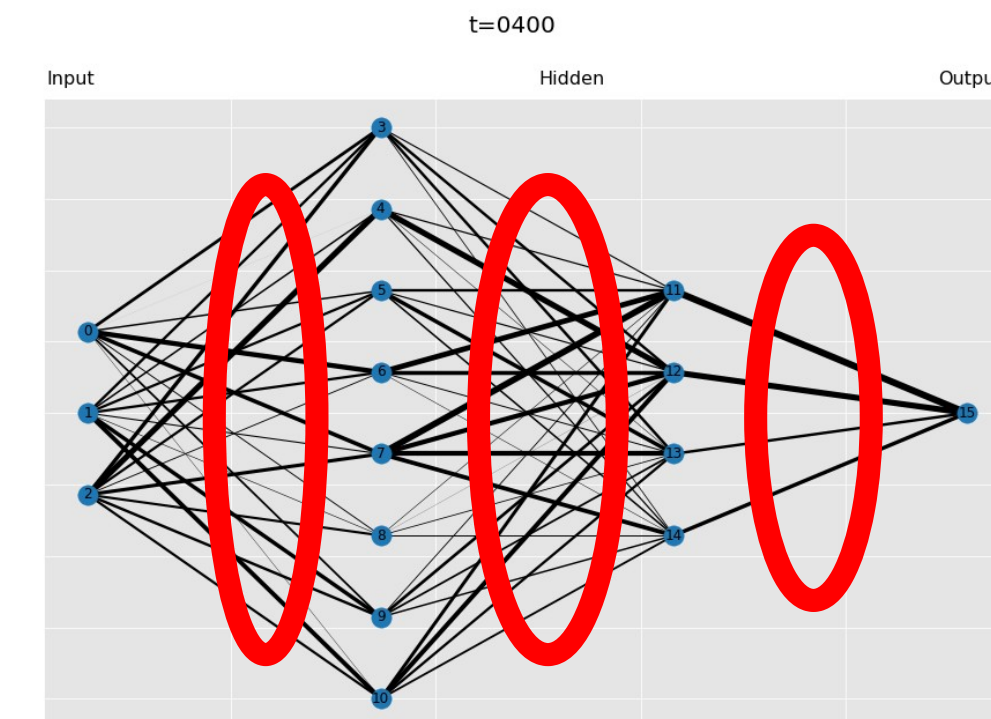
Maximilian Schutzeichel, M.Sc., C212 b  
maximilian.schutzeichel@haw-hamburg.de



### MOTIVATION

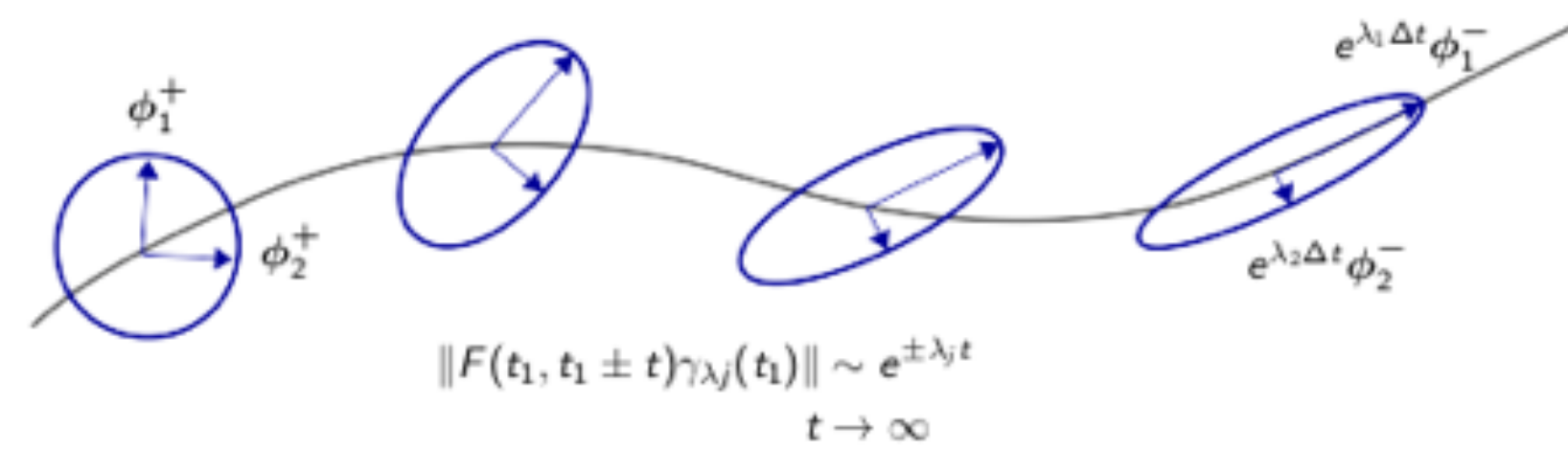
We examine the learning process in Artificial Neural Networks from a dynamical systems perspective. We probe the changes in the weights of the networks and look for the directions of stability in the dynamical system that consists of all the weights in the network. We aim to determine how the learning process of a high-dimensional dynamical system changes if the system is perturbed along its stable and unstable directions during the

learning process. Through this we will gain a better insight into the process of learning.

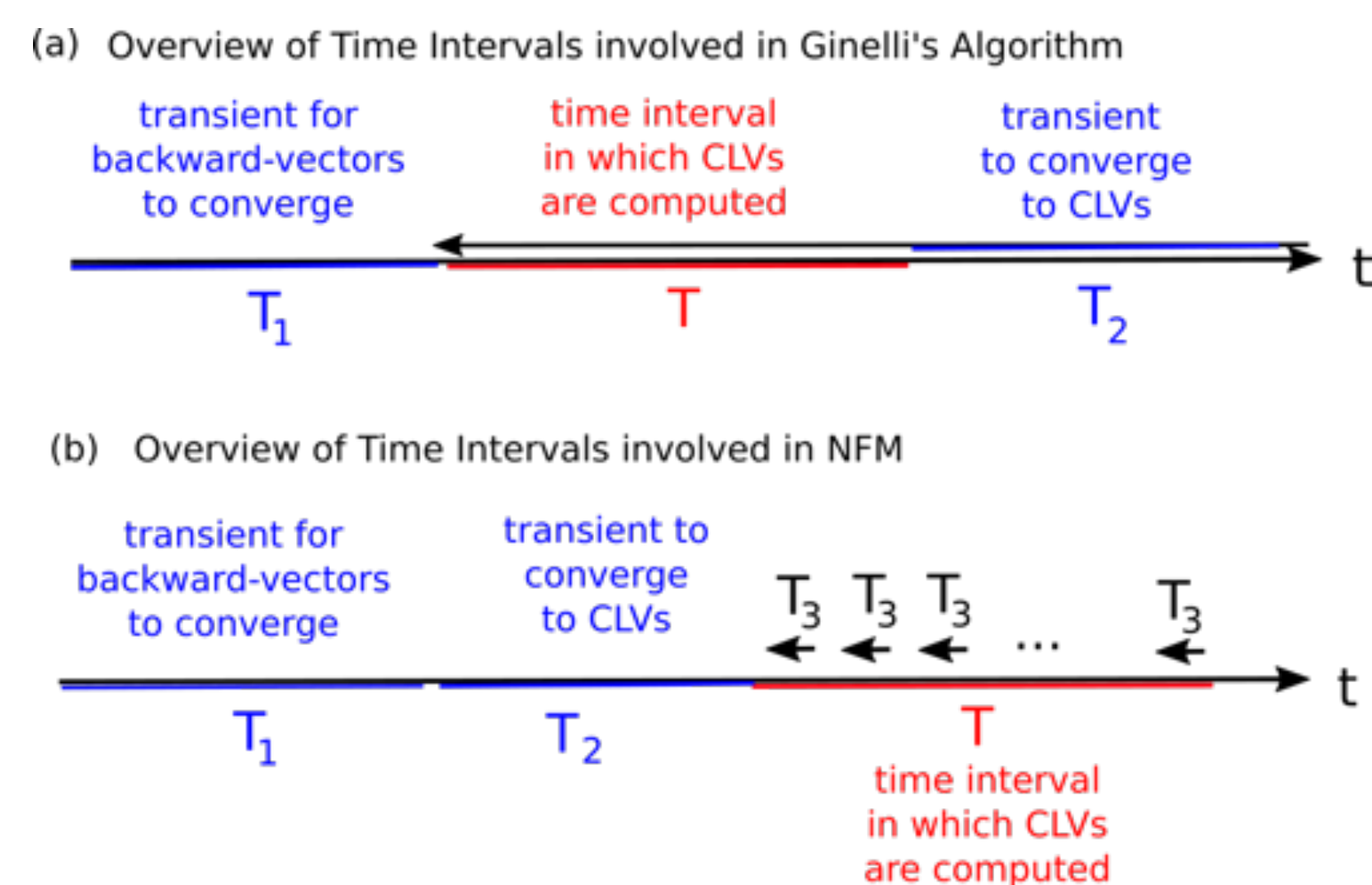


### MATERIALS & METHODS

To examine the directions of stability in a dynamical system we use the concept of covariant Lyapunov vectors (CLVs). Covariant Lyapunov vectors characterize the directions along which perturbations in dynamical systems grow.

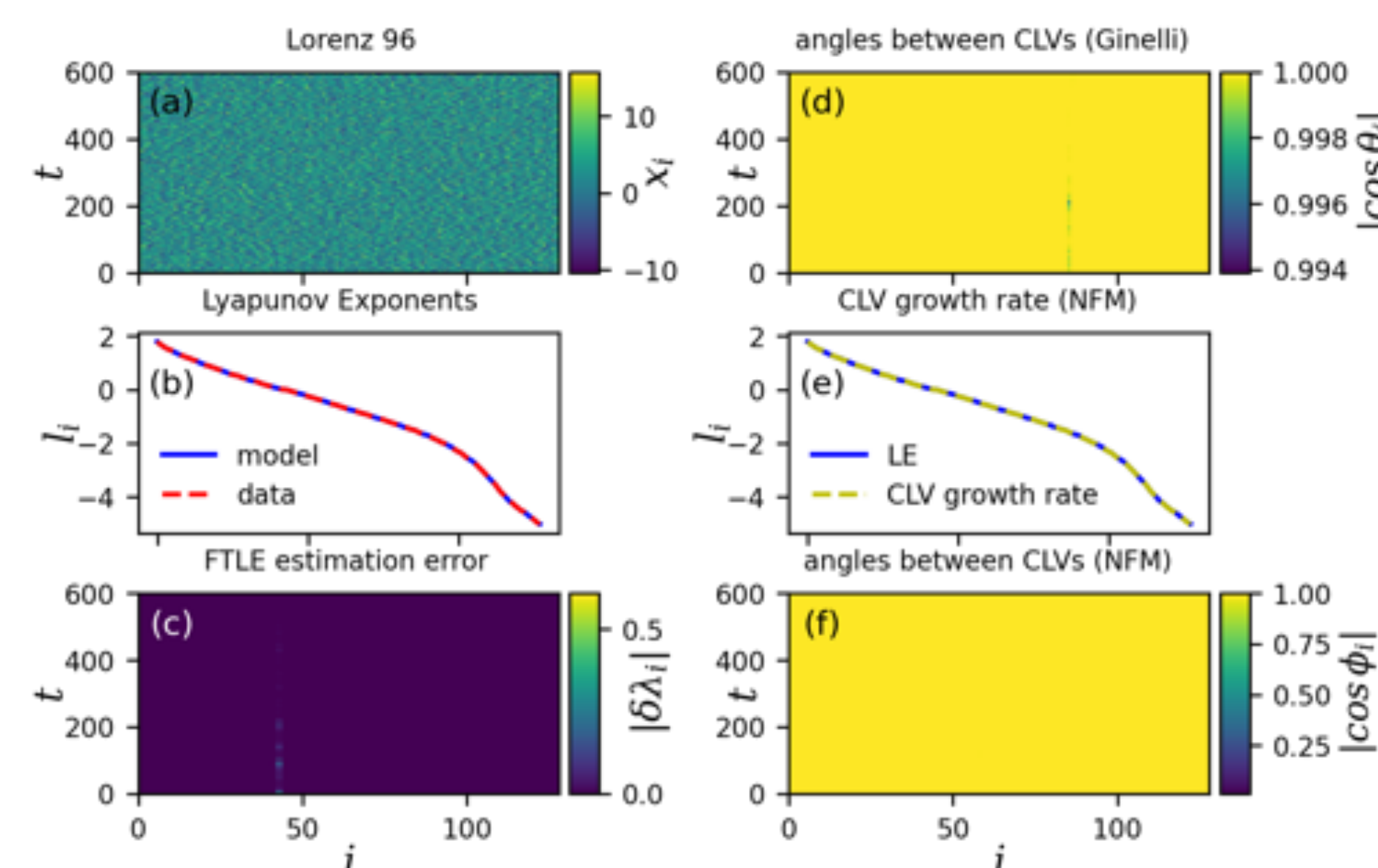
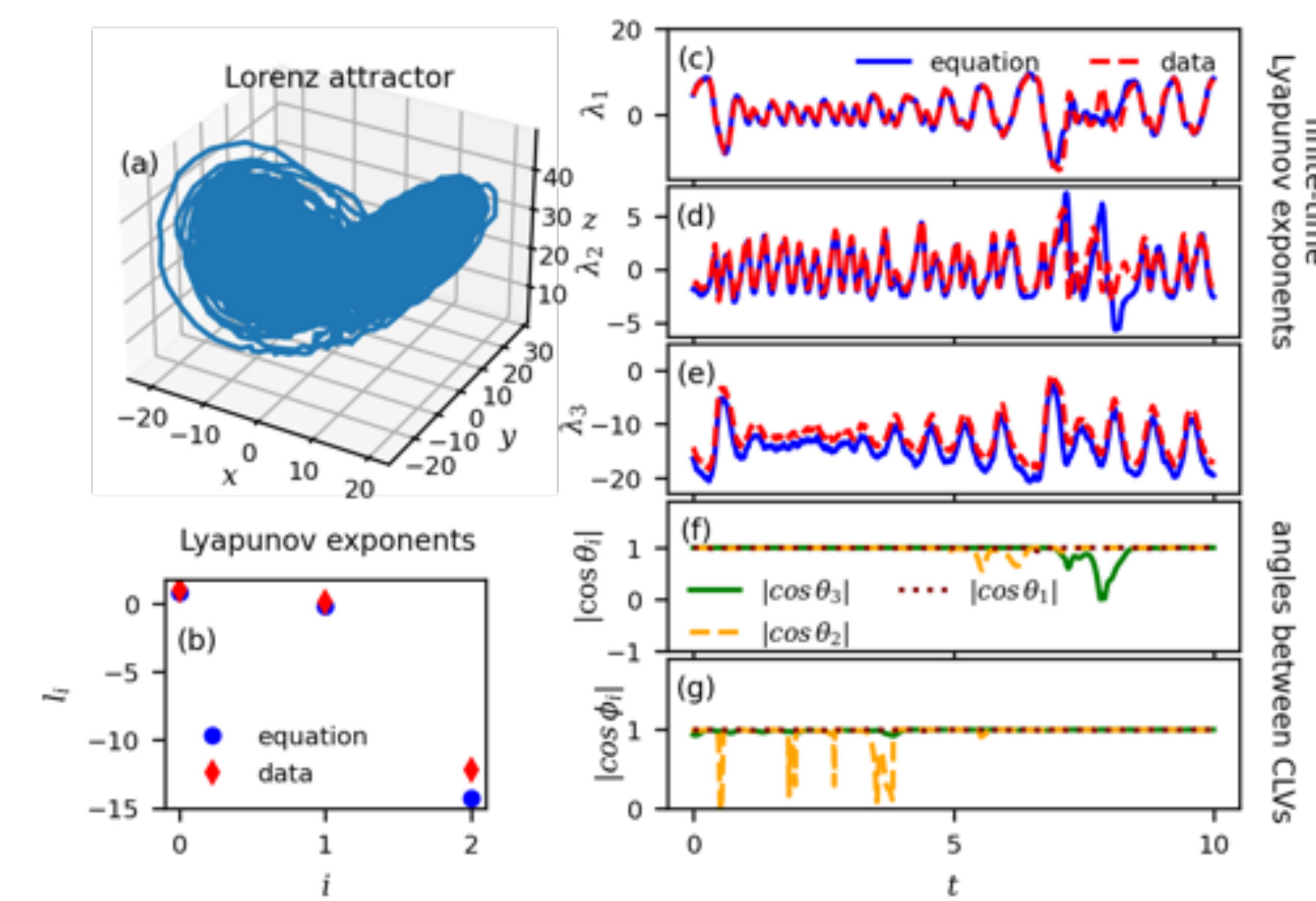


We propose a purely data-driven method for estimating the CLVs. To this end we employ sparse identification of nonlinear dynamics (SINDy), to estimate the Jacobian matrices of dynamical systems from data. We then use the obtained jacobians to compute the CLVs with two different methods. One of the methods (Ginelli) involves iterating the system back from the far future, the other is based on information from the immediate future and we refer to it as the near future method (NFM).



### COMPUTING CLVs

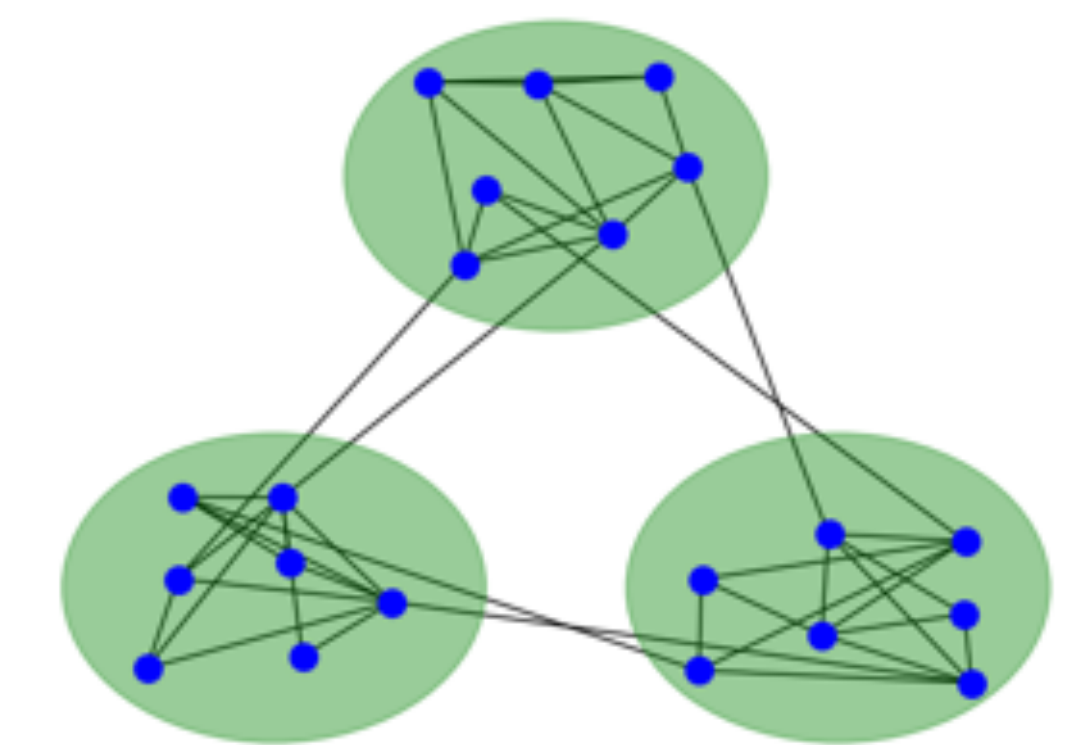
To verify the effectiveness of our approach we compared the CLVs derived from data to CLVs derived using model equations in several different dynamical systems. Here we present the results of a Lorenz attractor and a Lorenz-96 model of dimension 128. We added a stochastic term to the variables of the Lorenz attractor to test the robustness of our approach against noise.



### ADAPTIVE DECOMPOSITION

Motivated by column generation for solving huge optimization problems, new decomposition-based successive approximation methods for machine learning (ML) are developed in this project. These so-called *generate-and-solve* methods solve complex ML problems by generating an ensemble model (master problem) defined by a convex combination of base learners, which is improved by solving easier DNN sub-learning-problems. Since it is easier to understand sub-learning-problems than a given complex learning problem, this approach helps to understand and explain deep learning systems. Moreover, it is possible to solve sub-problems in parallel using deterministic global optimization methods. This increases

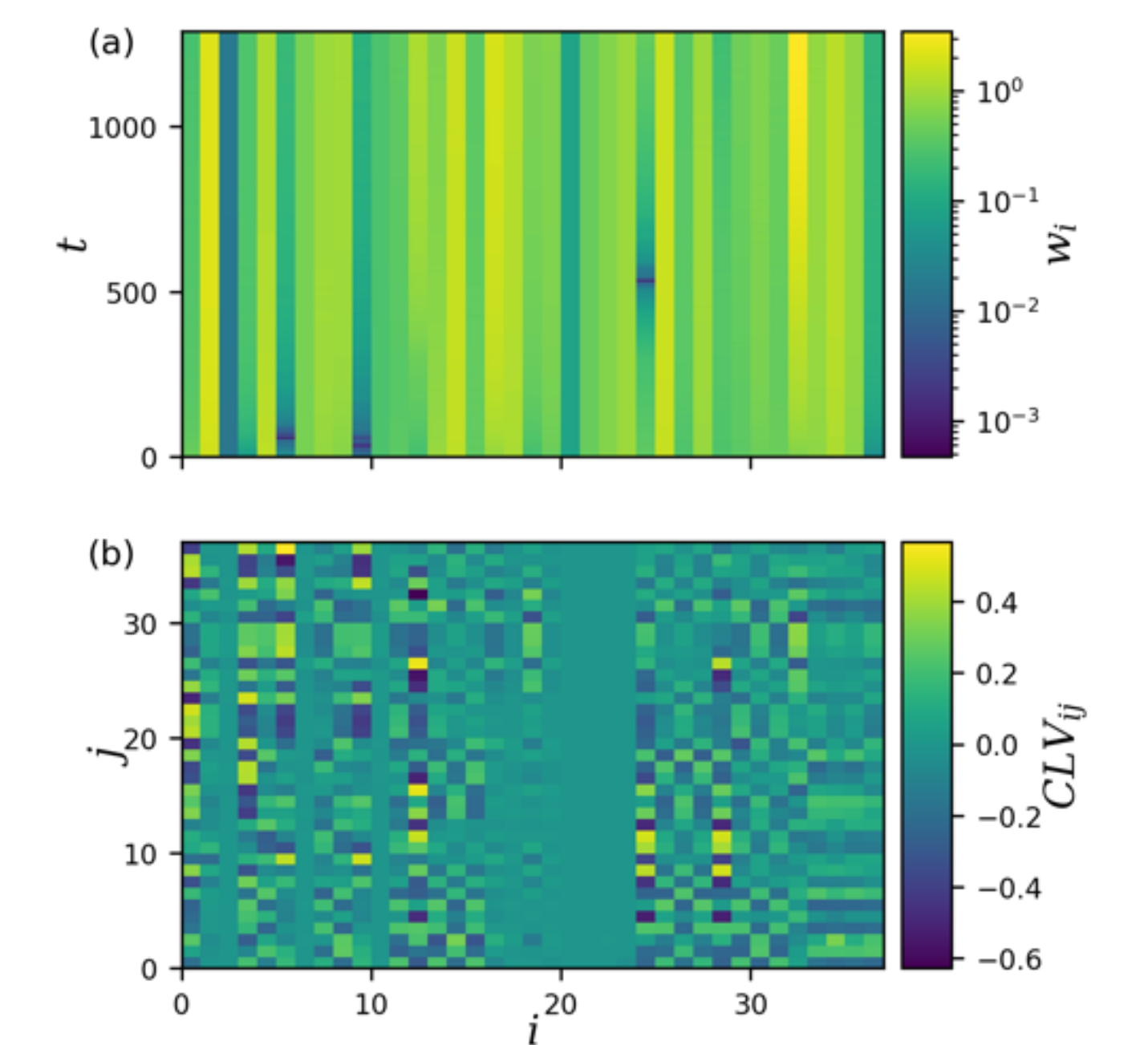
the efficiency of the approach. We use standard ML benchmark problems and complex reinforcement learning and design optimization problems for testing the new methods.



### PRELIMINARY RESULTS ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Henceforward we are equipped with the right tool to potentially estimate CLVs for different dynamical systems. We are currently applying this method to the weights of artificial neural networks and computing the CLVs of the weights as they change during learning. Here we present the trajectory and the CLVs of a small artificial neural network with 37 weight components.

Our next step is to better understand the role of the directions of stability in the process of learning. We will probe the effect of perturbing the system along the directions of the CLVs and investigate its effect on the efficiency of the learning process.



### ACKNOWLEDGMENT

The authors of this study are grateful to the BMBF for financial support within the project DADLN (01|S19079) and to the Landesforschungsförderung Hamburg for financial support within the project LD-SODA (LFF-FV90).

Thanks to BMBF we now have extended our cluster. The new computing cluster has a total of: - 672 Cores / 1344 Threads (14x2x24/48) - 3584 GB of RAM (14x16x16) The GPU Node has a total of 5 RTX A6000 GPU units, with a combined memory of 240GB.

### REFERENCES

- [1] Ch. Martin, N. Sharafi, and S. Hallerberg. *arXiv preprint arXiv:2107.08925*, 2021.
- [2] P. Muts, S. Bruche, I. Nowak, O. Wu, E. Hendrix, and G. Tsatsaronis. *Optimization and Engineering*, 2021.
- [3] N. Sharafi, M. Timme, and S. Hallerberg. *Physical Review E*, 2017.
- [4] F. Ginelli, P. Poggi, A. Turchi, H. Chaté, R. Livi, and A. Politi. *Physical review letters*, 2007.
- [5] S. Brunton, J. Proctor, and N. Kutz. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2016.