



REDOX, eine vielversprechende Speichertechnologie für Wasserstoff

IHK - Treffpunkt Hochschule, 28.01.2025

Prof. Dr.-Ing. Belal Dawoud

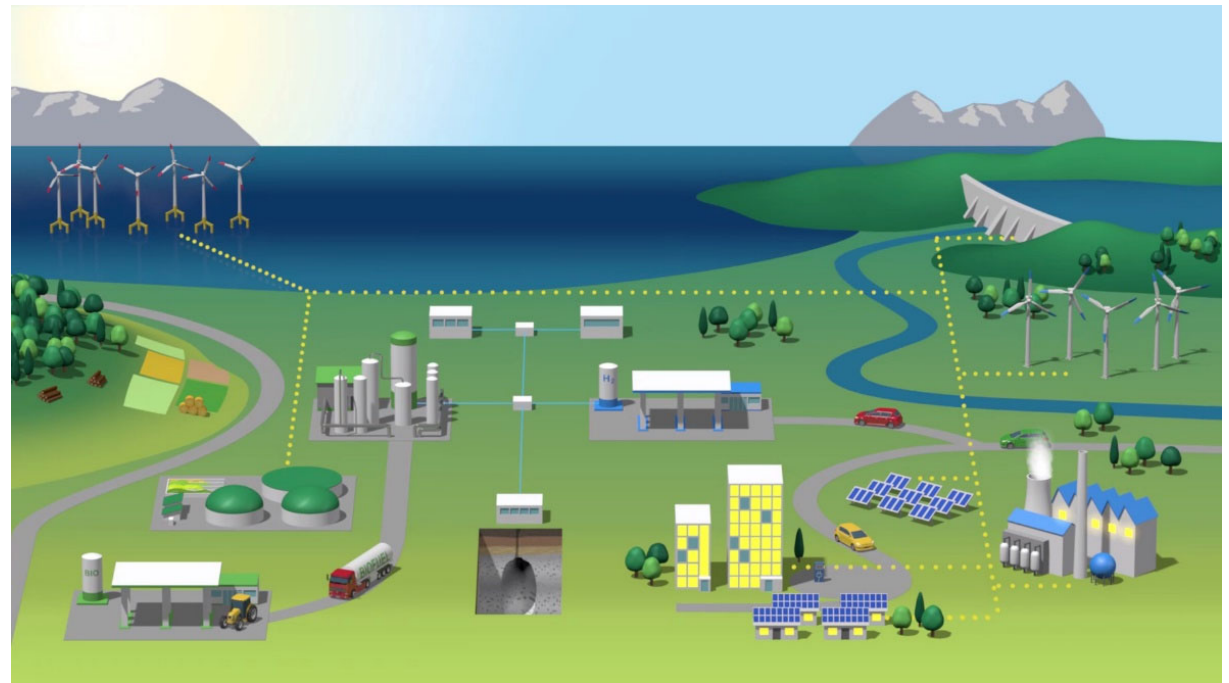
Leiter der Labore:

- Sustainable Energy and Hydrogen Processes
- Smart Energy and Hydrogen Systems

Nachhaltige Energiesysteme;

Eine Herausforderung, die innovativen Lösungen und Kooperation erfordert

- Reduktion der CO₂-Emissionen
- Steigerung der Anteile der erneuerbaren Energien
- Flexibilität and Resilienz
- **Sektorenkopplung**
- **Innovative Energiespeicher-Lösungen**
- **Smarte Steuerung**



Inhalt

- Wasserstoff-Speichertechnologien; einen kurzen Überblick
- REDOX-Speicherprozess
- Speichermaterial; Herstellung und Charakterisierung
- Einfluss der Prozesstemperatur auf die Reaktions- bzw. Speicherdynamik
- REDOX-Wasserstoffspeicherung; Vorteile und ToDos
- Einige nationale Fördermöglichkeiten

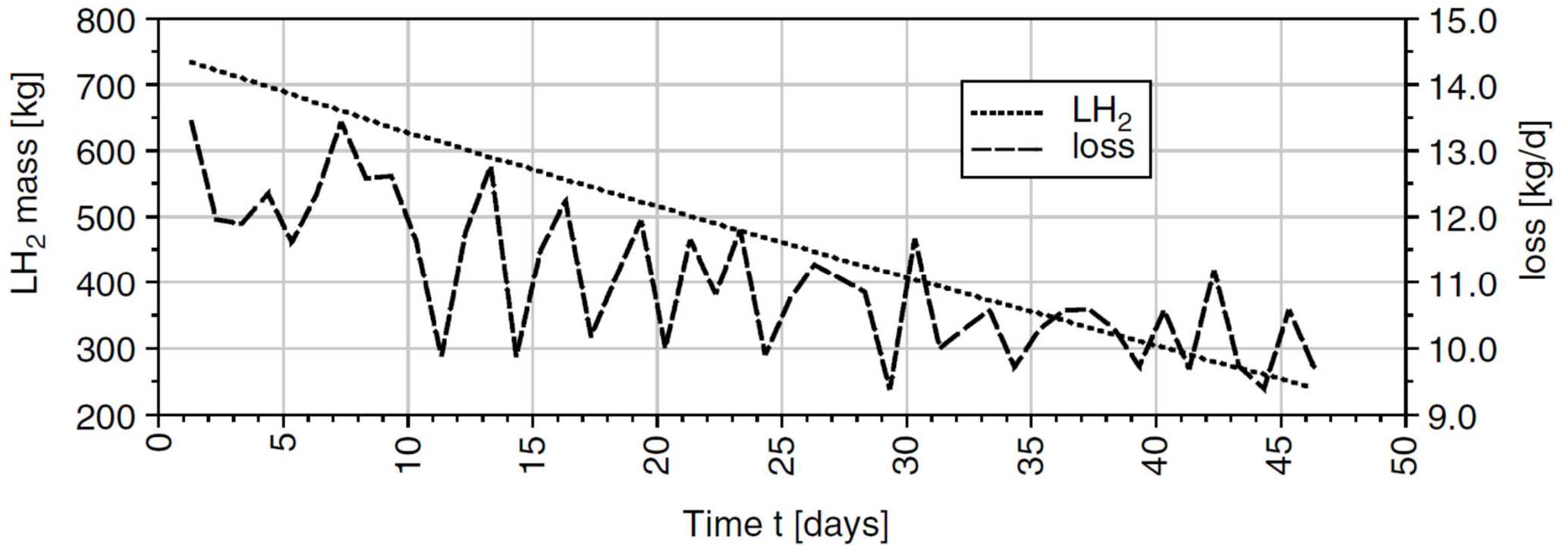
Wasserstoff-Speichertechnologien; einen Überblick

Volumetrische Speicherkapazitäten

Speichertechnologie	Speicherkapazität (tank/system) [kWh/m ³]
CGH ₂ (350 bar)	800/500
CGH ₂ (700 bar)	1300/900

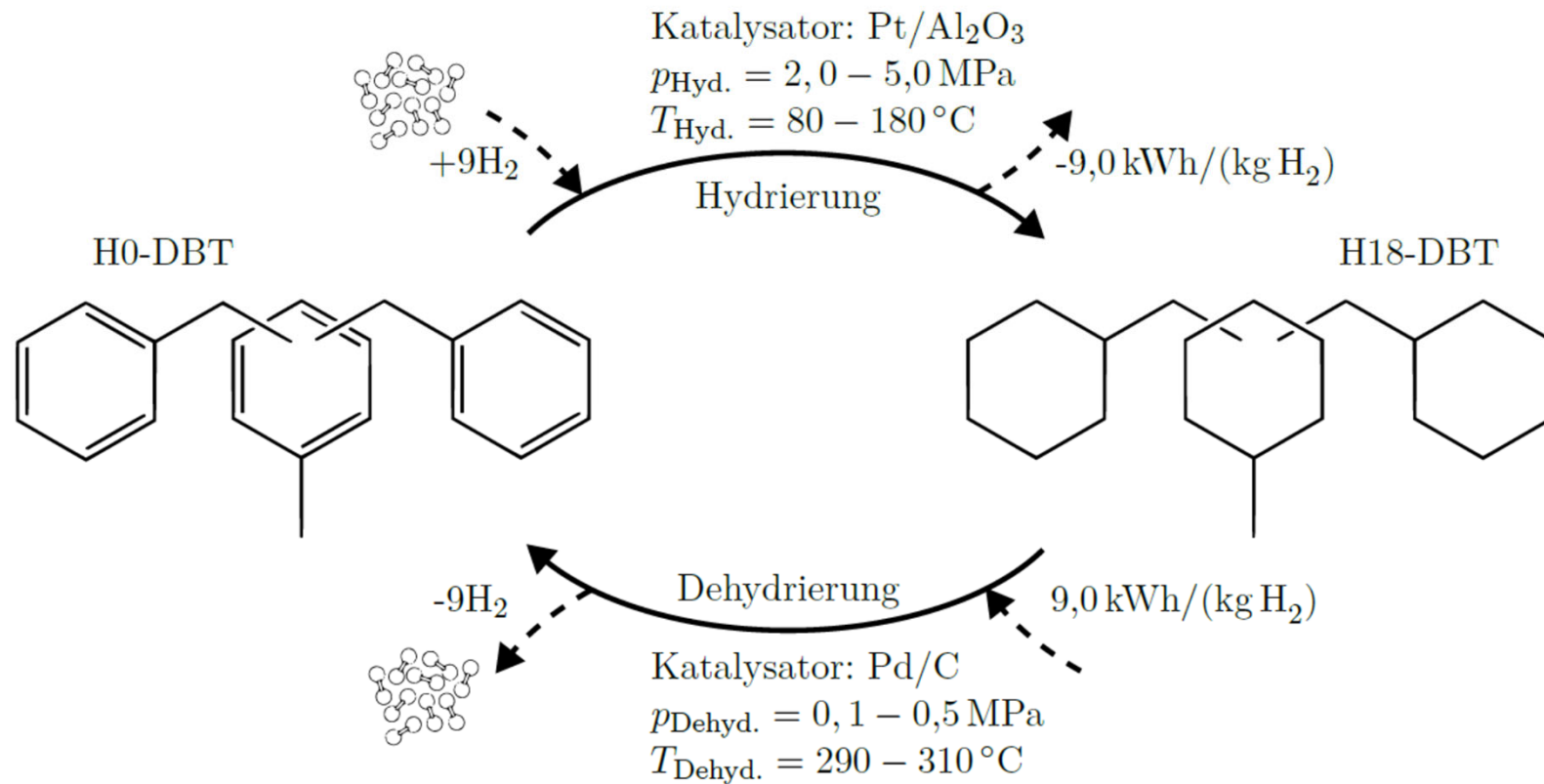
H₂-Speicherung in verflüssigter Form

Boil-off-Verluste



LOHC

Dibenzyltoluol (H0-DBT)/ Perhydro-Dibenzyltoluol (H18-DBT)



Matthias Niermann u. a. „Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*

REDOX: Einspeicherung

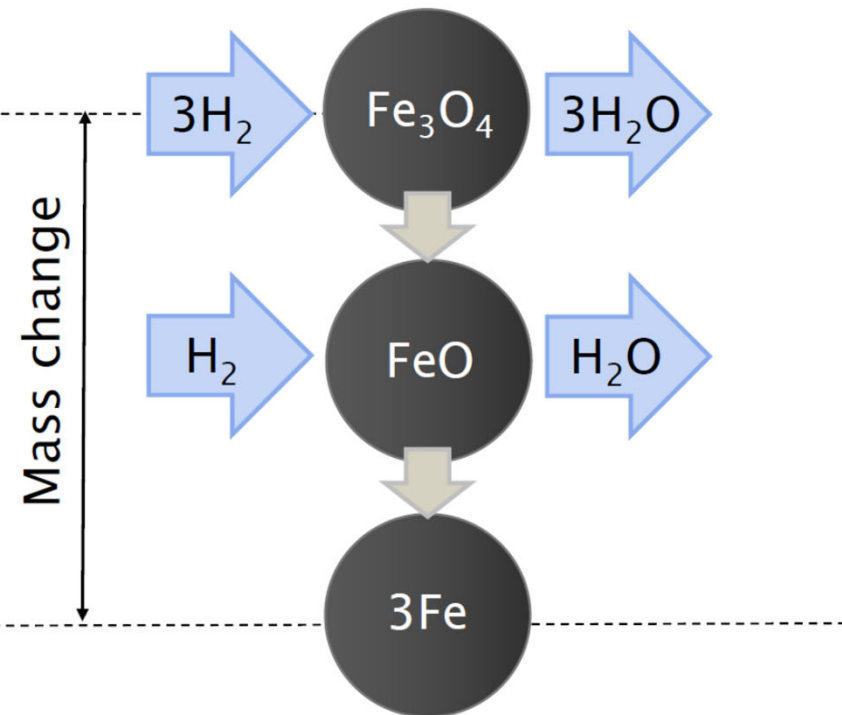
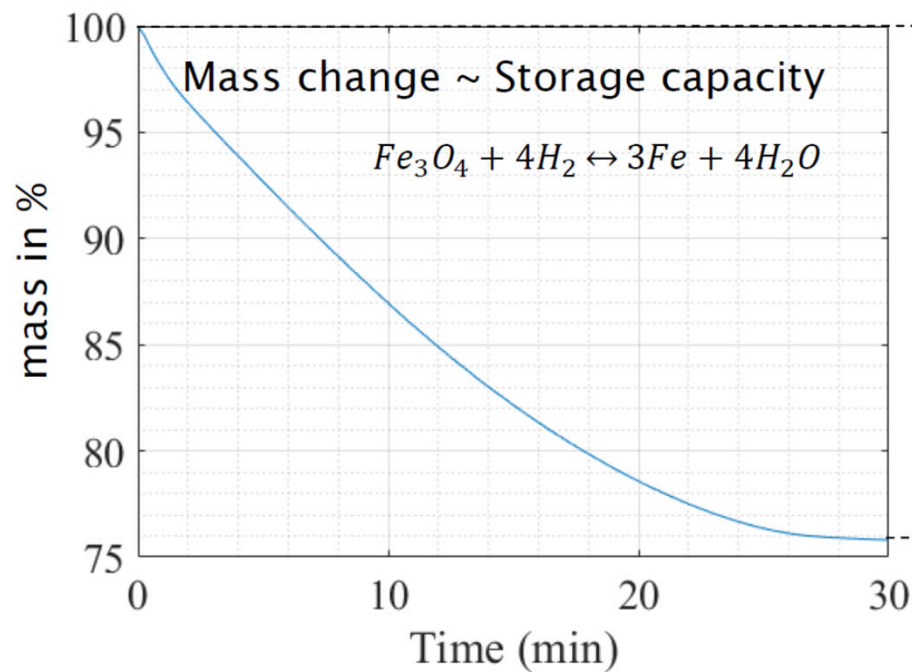
Reduktion des Eisenoxids mit H₂

Prozesstemperatur > 570 °C

Unter Abwesenheit der Luftsauerstoff

Endothermische Reaktion,

$$q_{Red} = 2,32 \frac{kWh_{th}}{kg_{H_2}}$$



ICON: Lea Huber

REDOX: Einspeicherung

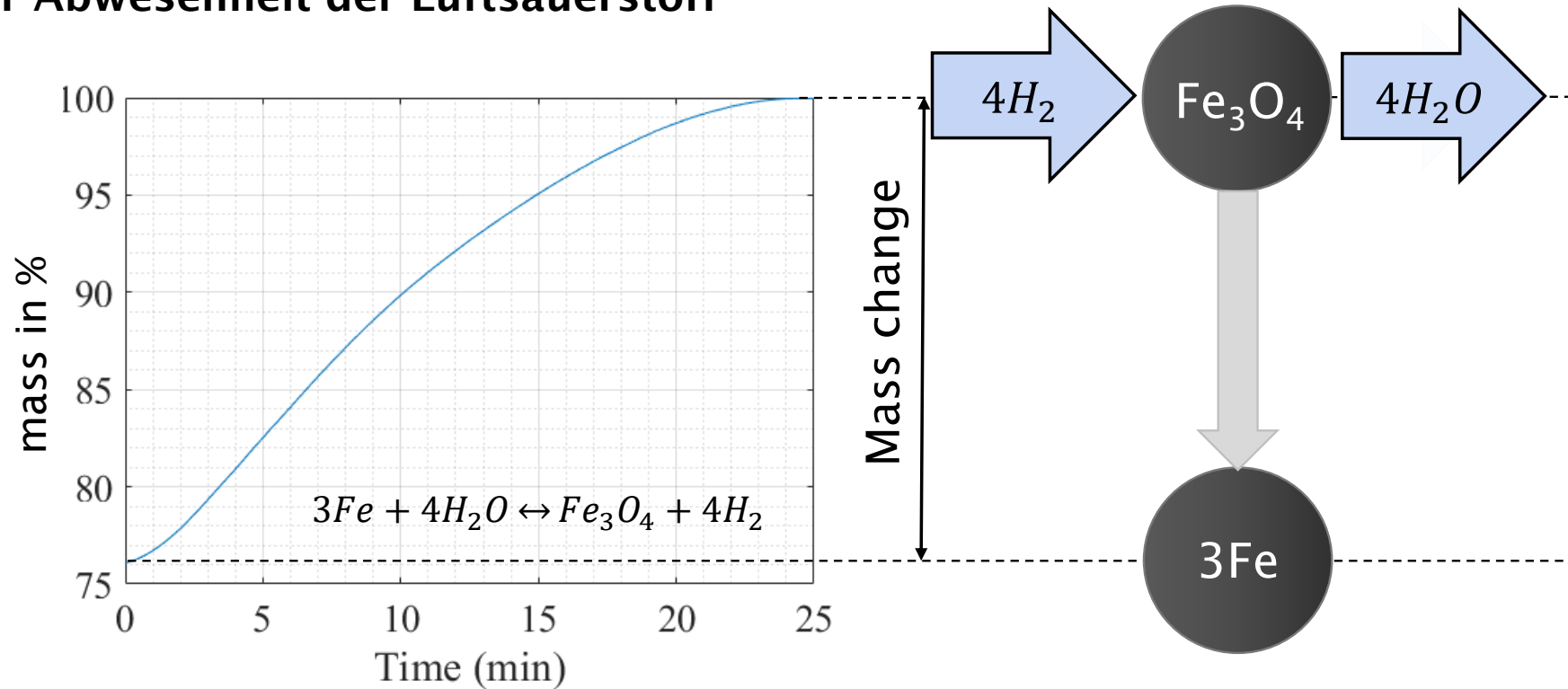
Reduktion des Eisenoxids mit H₂

Prozesstemperatur < 570 °C

Unter Abwesenheit der Luftsauerstoff

Endothermische Reaktion,

$$q_{Red} = 2,32 \frac{kWh_{th}}{kg_{H_2}}$$



ICON: Le: er

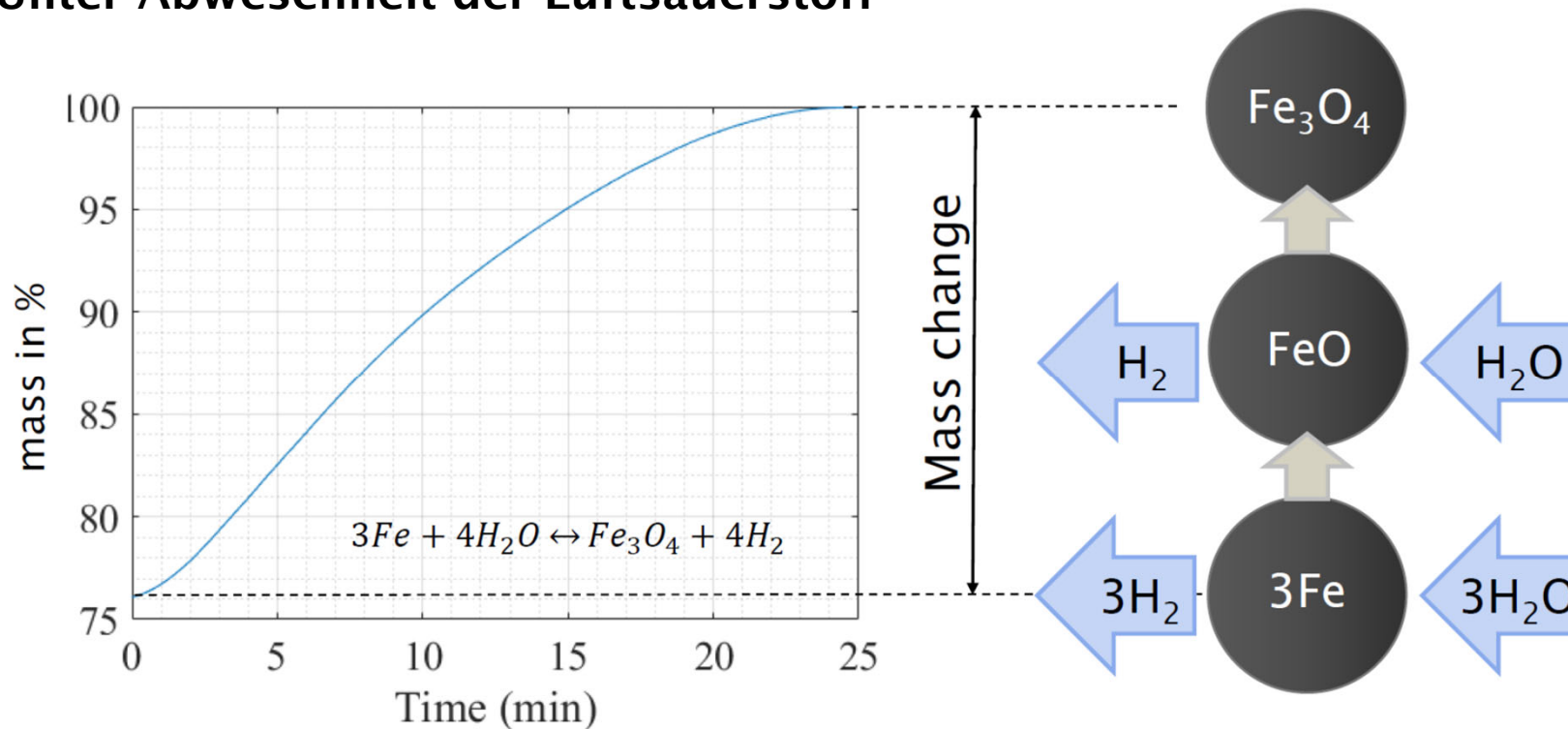
REDOX: Ausspeicherung

Oxidation des Eisens mit Wasserdampf

Prozesstemperatur > 570 °C
Unter Abwesenheit der Luftsauerstoff

Exothermische Reaktion,

$$q_{ox} = -2,32 \frac{kWh_{th}}{kg_{H_2}}$$



ICON: Lea Huber

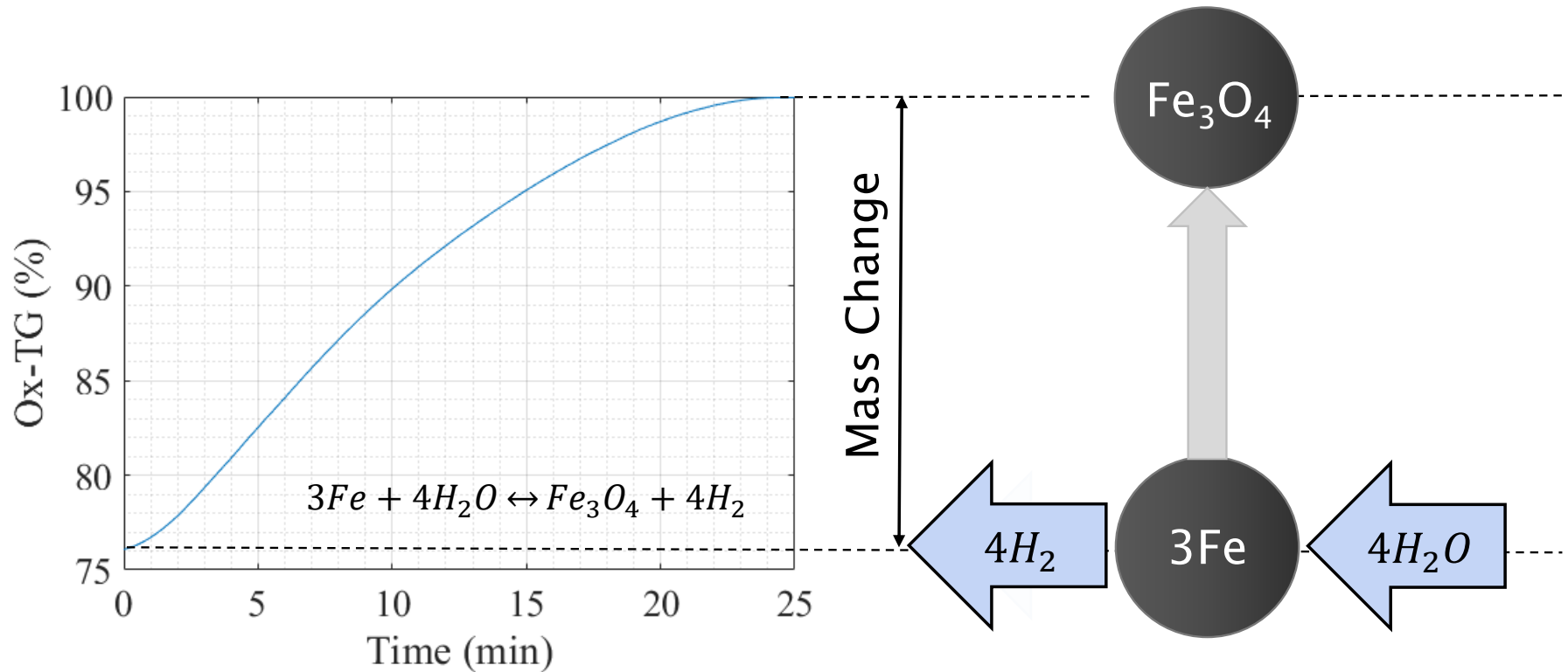
REDOX: Ausspeicherung

Oxidation des Eisens mit Wasserdampf

Prozesstemperatur < 570 °C
Unter Abwesenheit der Luftsauerstoff

Exothermische Reaktion,

$$q_{ox} = -2,32 \frac{kWh_{th}}{kg_{H_2}}$$



Wasserstoff-Speichertechnologien; einen Überblick

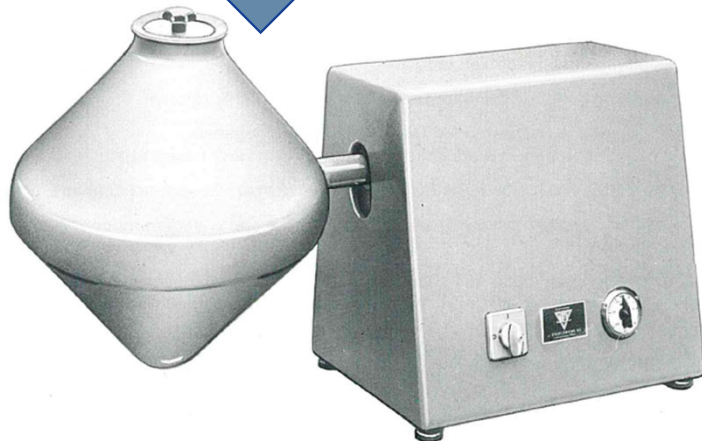
Volumetrische Speicherkapazitäten

Speichertechnologie	Speicherkapazität (tank/system) [kWh/m ³]
CGH ₂ (350 bar)	800/500
CGH ₂ (700 bar)	1300/900
LH ₂ (20 K bzw. -253 °C))	2200/1200
LOHC	2256-1900
Metal Hydride	2600/800
Lithium Batterie	450/270
Eisen-REDOX	3770 / 2000

Pellet-Herstellung

| Pelletisierung

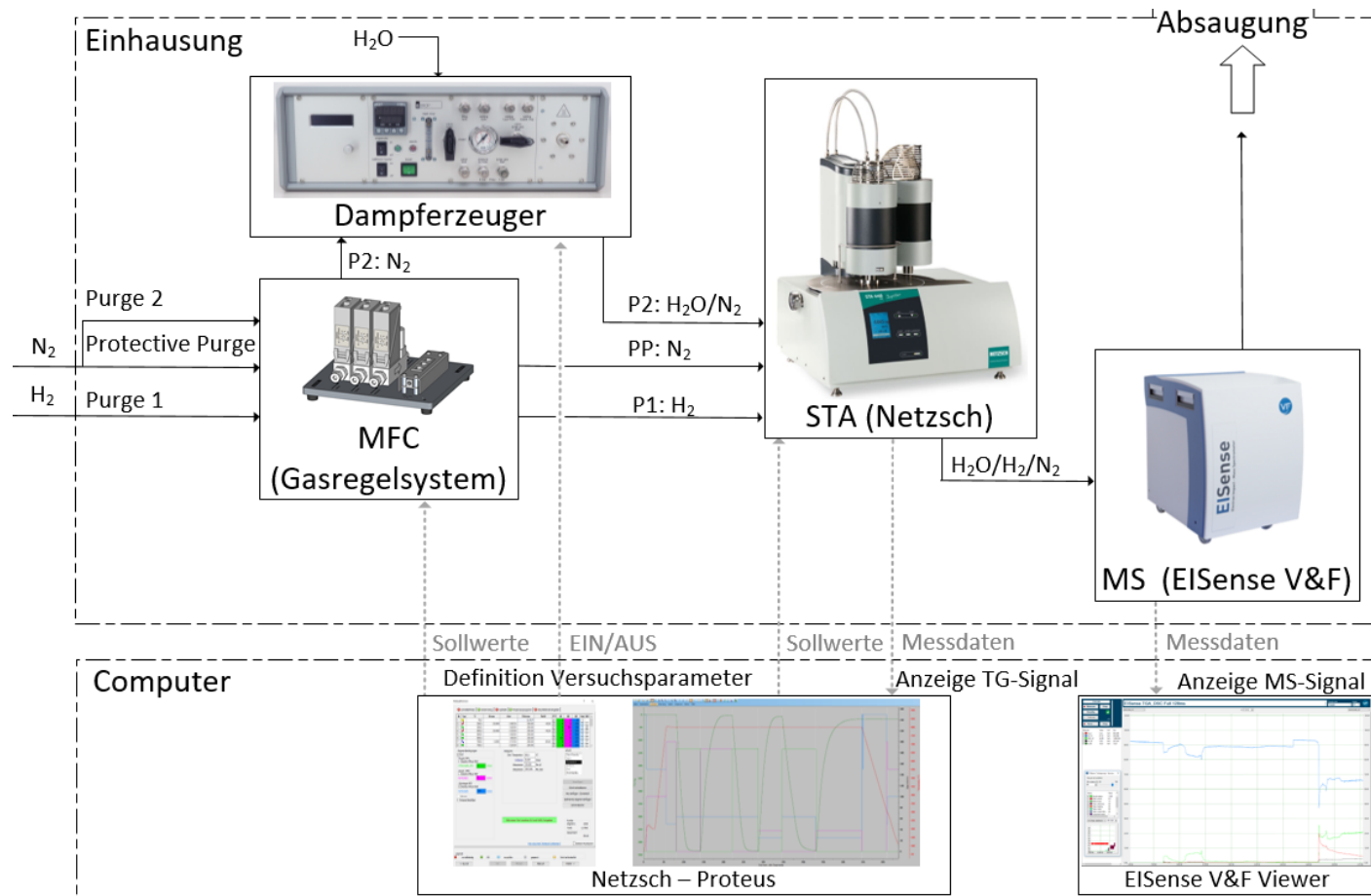
Stützmaterial



ICONS: Lea Huber

Untersuchung der Reaktionskinetik von Einzelpellets

Kernkomponenten: STA and MS

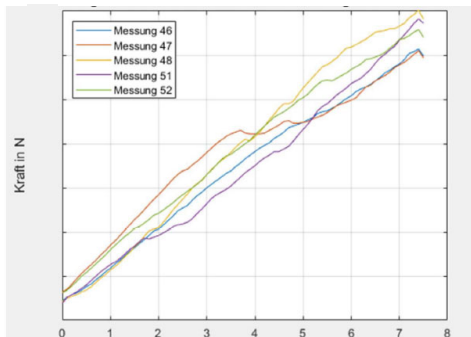
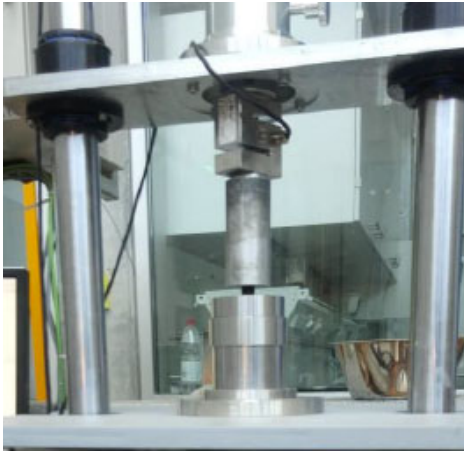


ICON: Bernd Gamisch & Lea Huber

Weitere Untersuchungen der Speichermassen

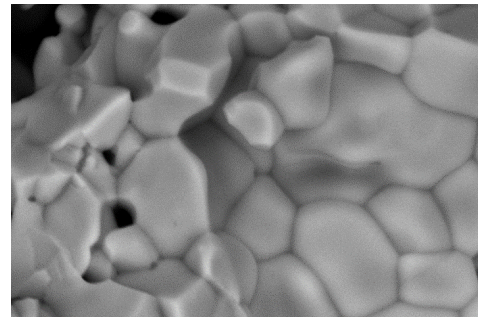
Zur Absicherung der Stabilität der Pellets

Mechanische Stabilität



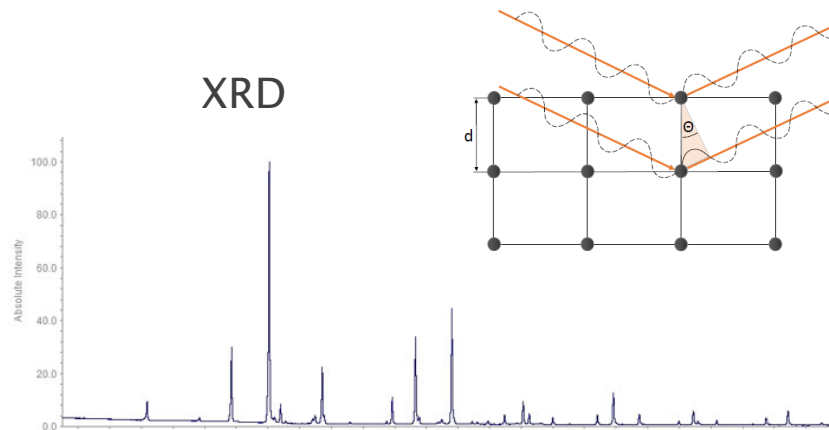
ICONS: Lea Huber

Chemische Zusammensetzung

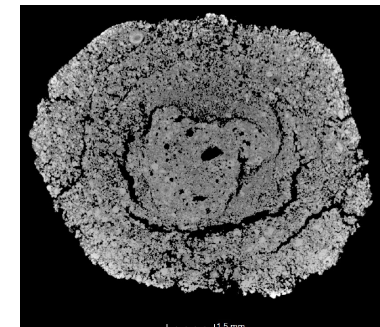
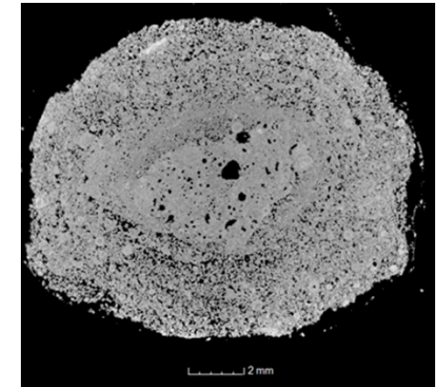


REM

XRD

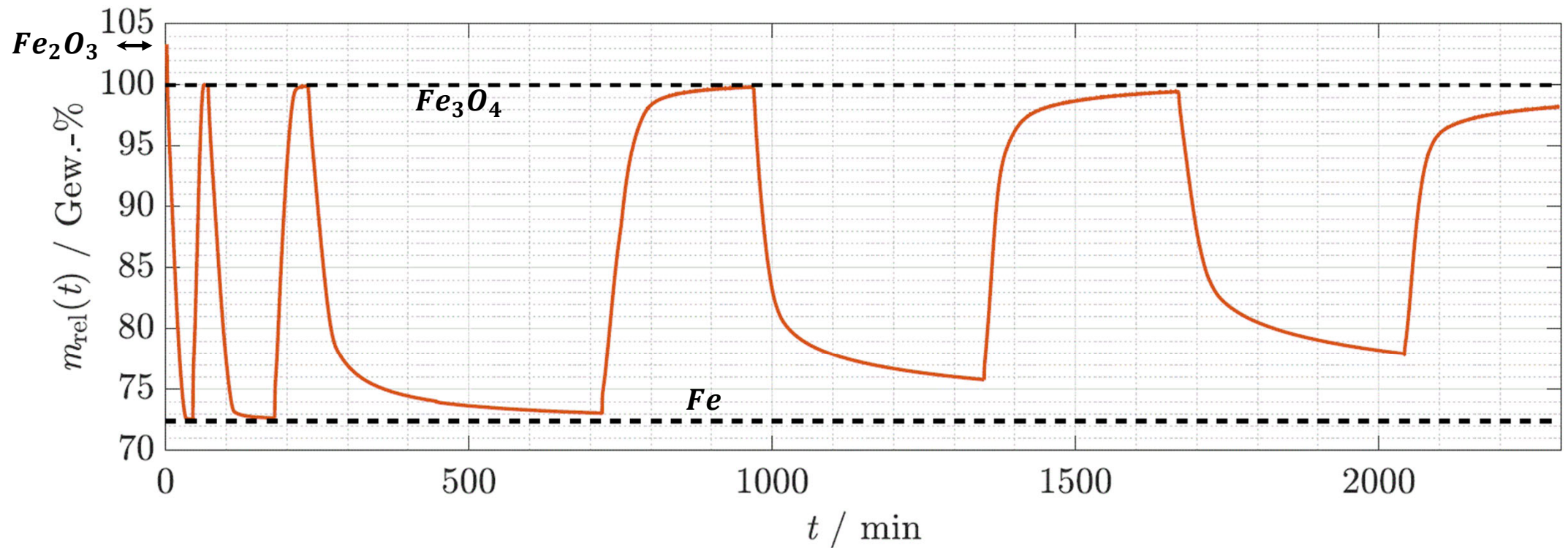


Strukturänderung (μ CT)



Stabilität von Pellets aus reinem Eisenoxid

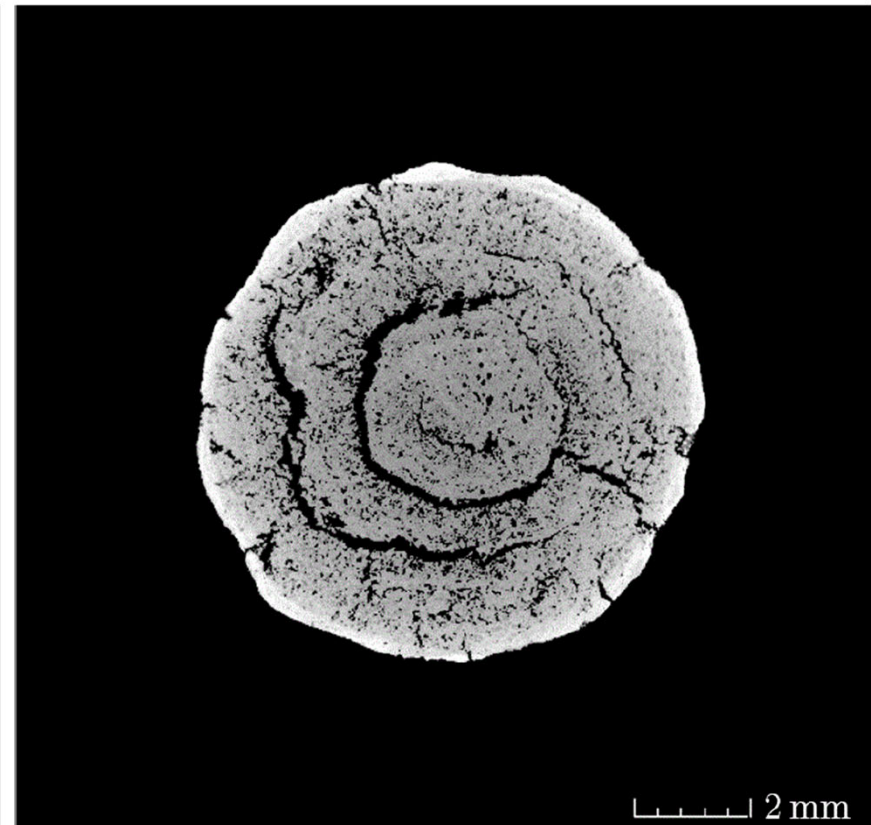
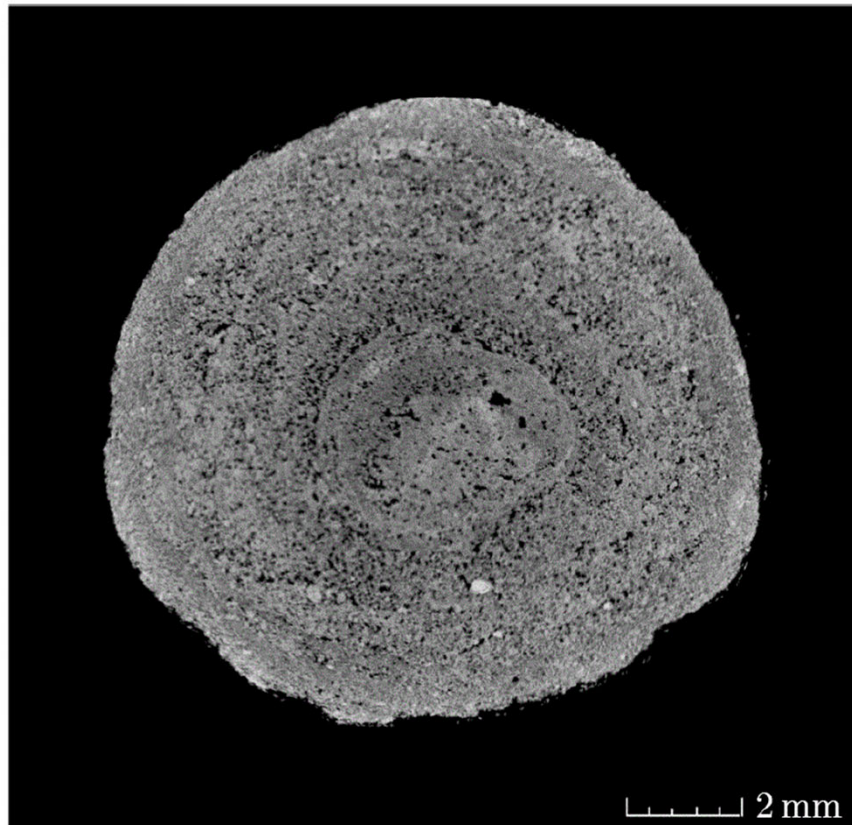
Über fünf REDOX-Zyklen



ICONS: Lea Huber

Stabilität von Pellets aus reinem Eisenoxid

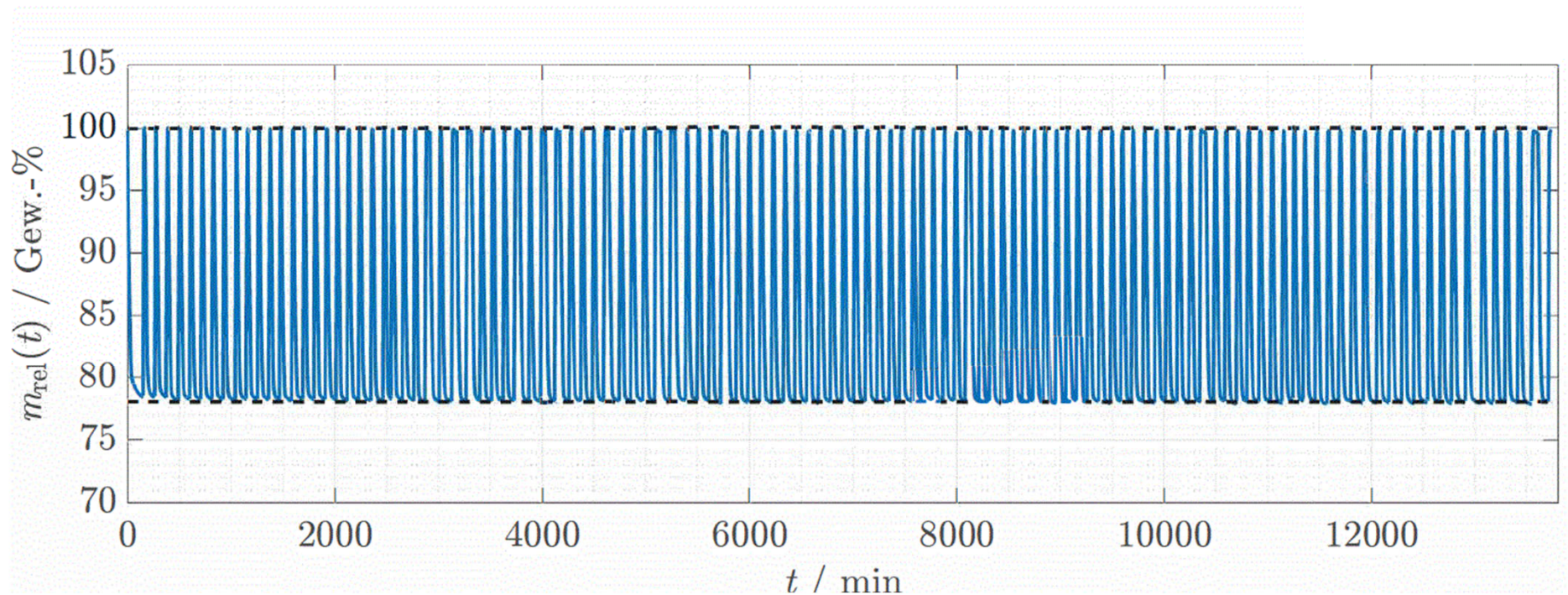
REM vor und nach den fünf REDOX-Zyklen



ICONS: Lea Huber

Stabilität der an der OTHR entwickelten Pellets

Keine Alterung über 120 REDOX-Zyklen bei 700 °C

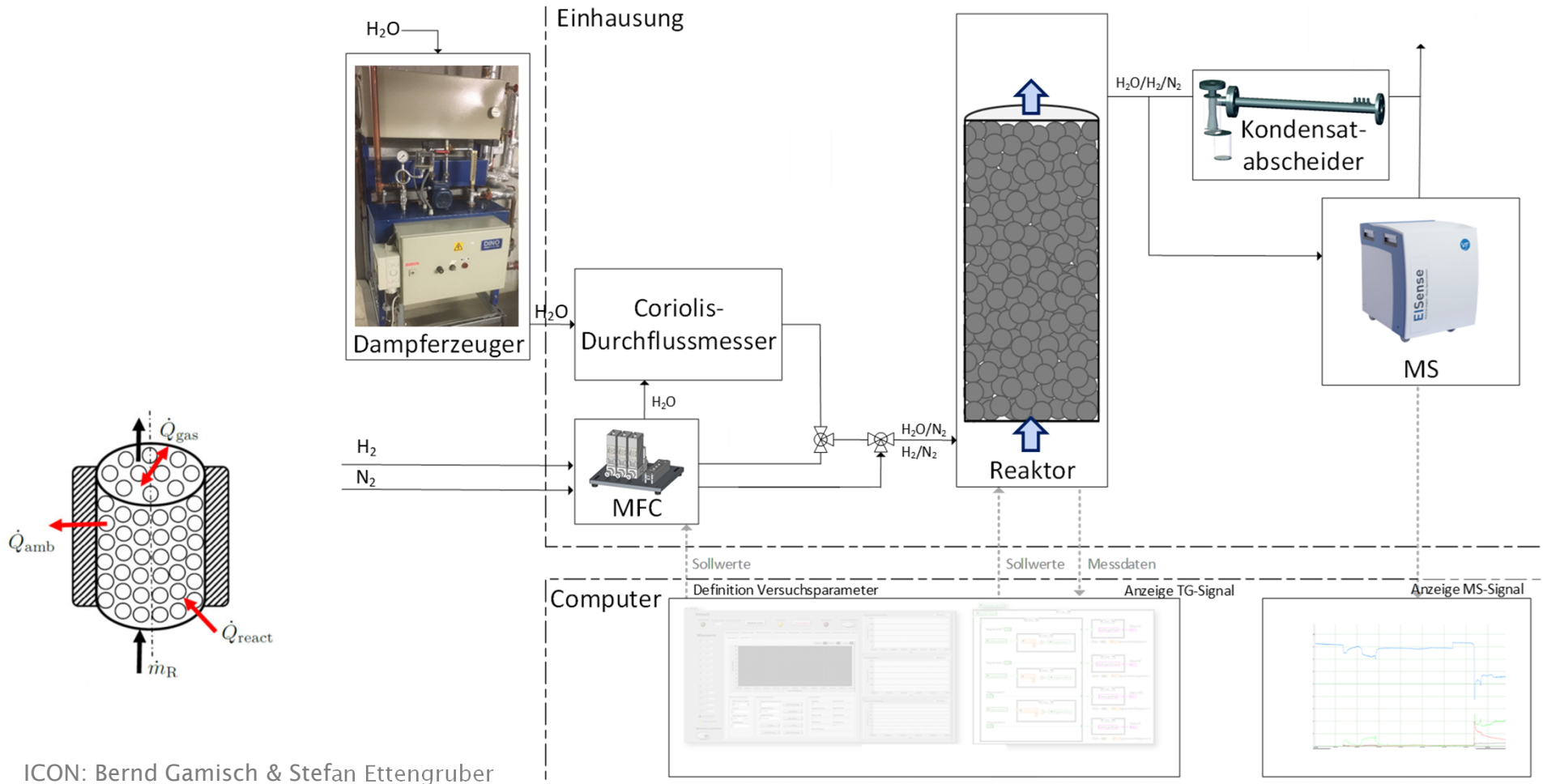


Fazit: Die entwickelten Pellets können ab jetzt hochskaliert und in saisonale Speichersysteme untersucht und optimiert werden.

ICONS: Lea Huber

Untersuchung eines Pellet-Reaktors

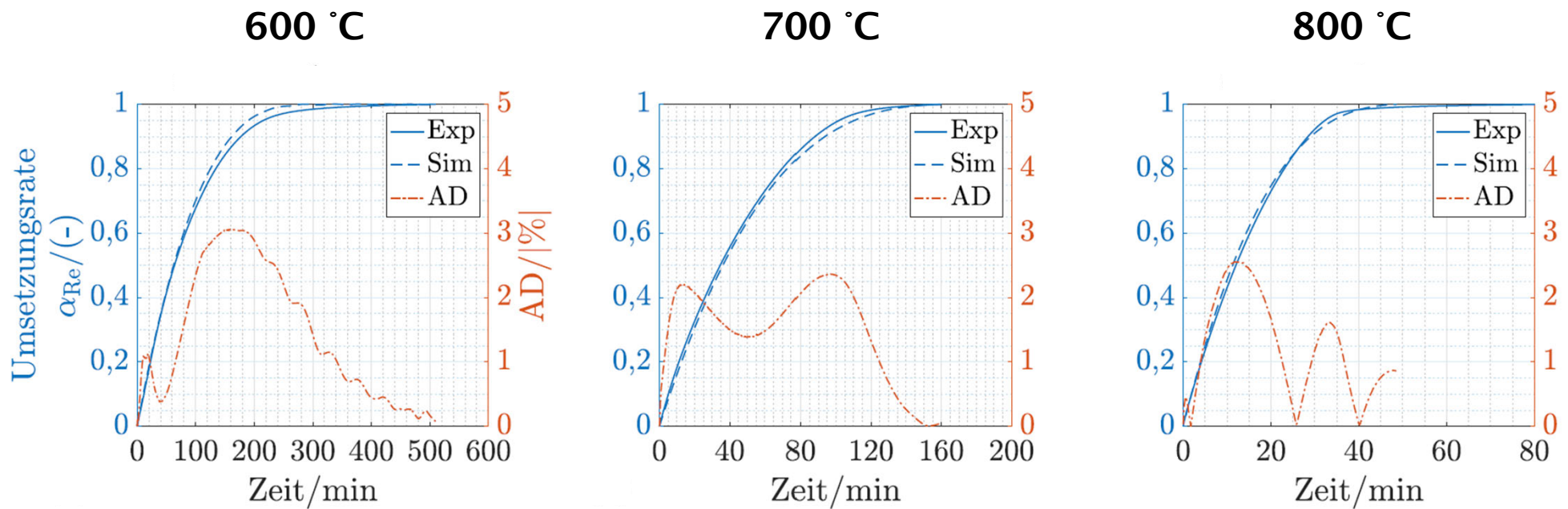
Volumen des Reaktors 3 Liter



ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

Einfluss der Prozesstemperatur

Reduktion von Eisenoxid: H₂/N₂-Gemisch mit 50% H₂-Anteil

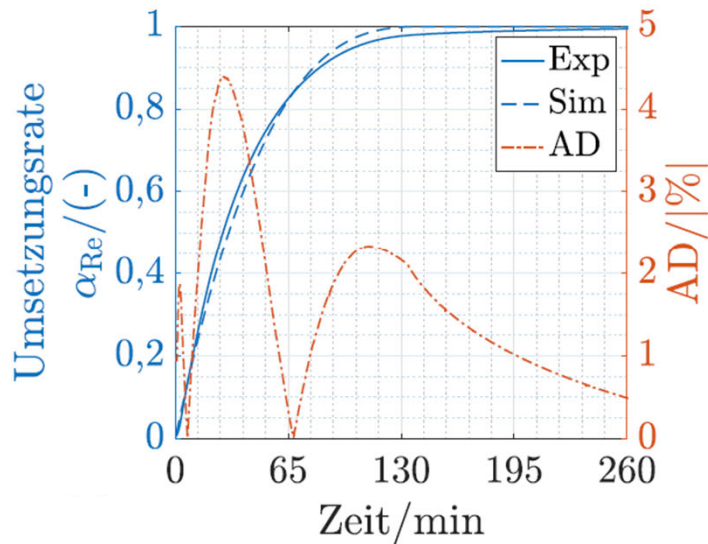


ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

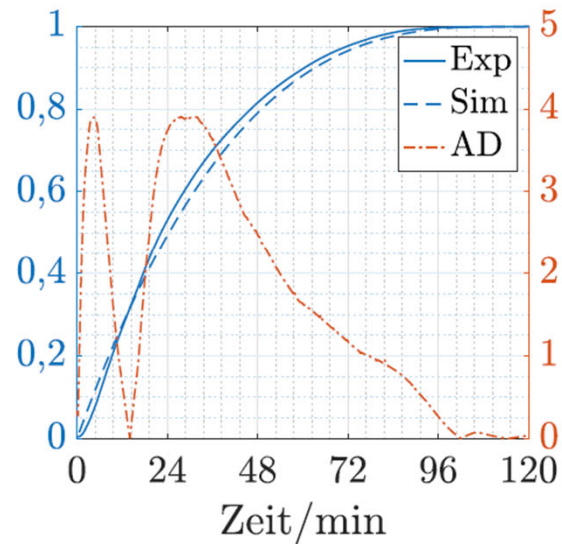
Einfluss der Prozesstemperatur

Oxidation der Eisenpellets; H₂O/N₂-Gemisch mit 33% H₂O

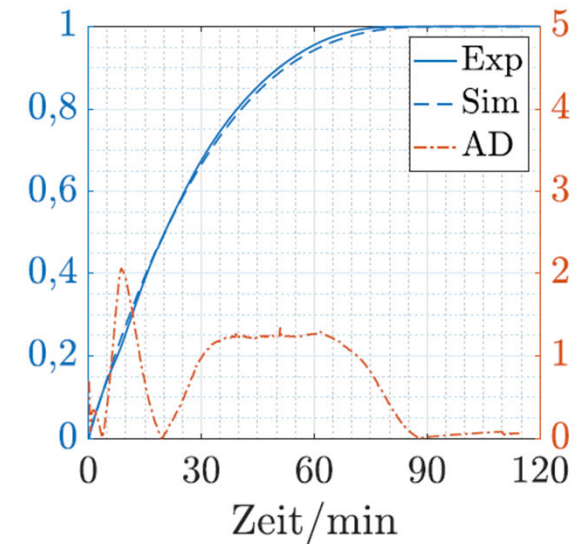
600 °C



700 °C



800 °C

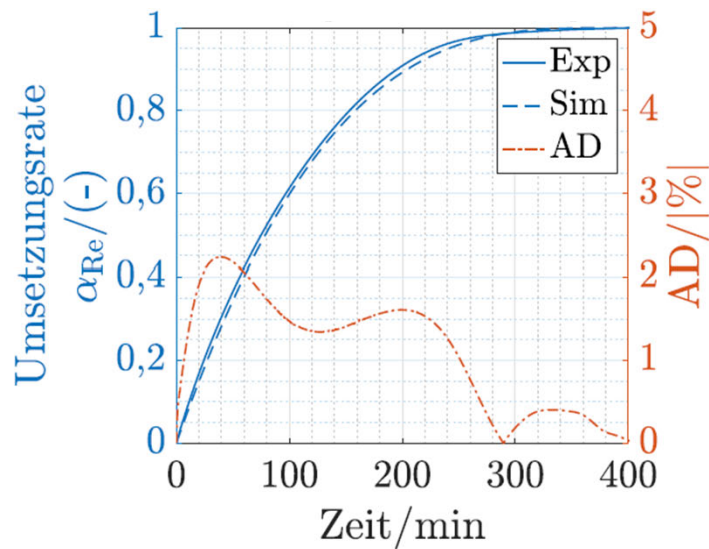


ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

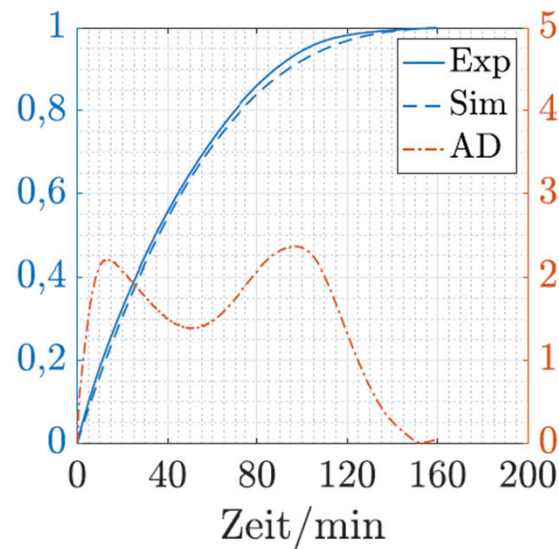
Einfluss der Konzentration des reaktiven Gases

Reduktion von Eisenoxid bei 700 °C

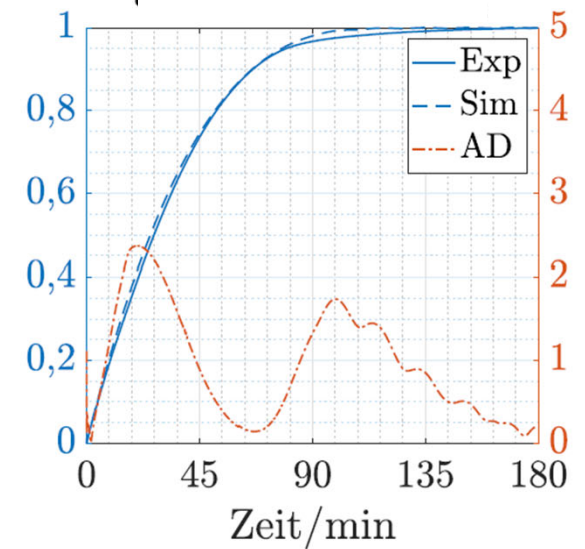
H₂-Konzentration
25%



H₂-Konzentration
50%



H₂-Konzentration
80%

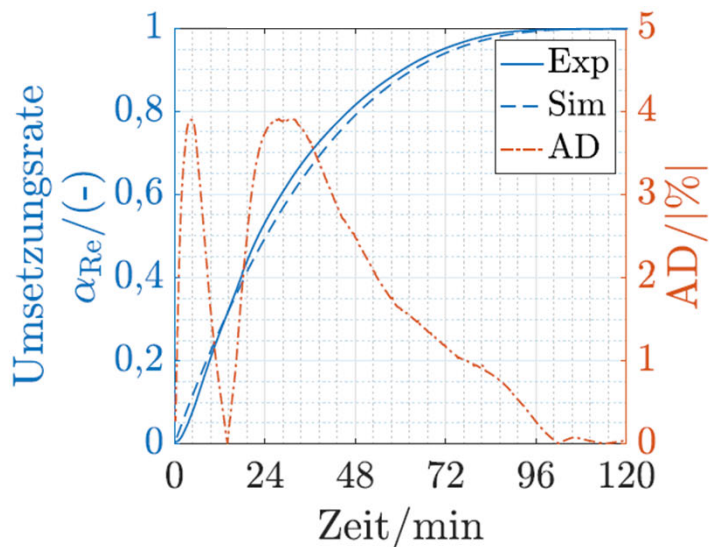


ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

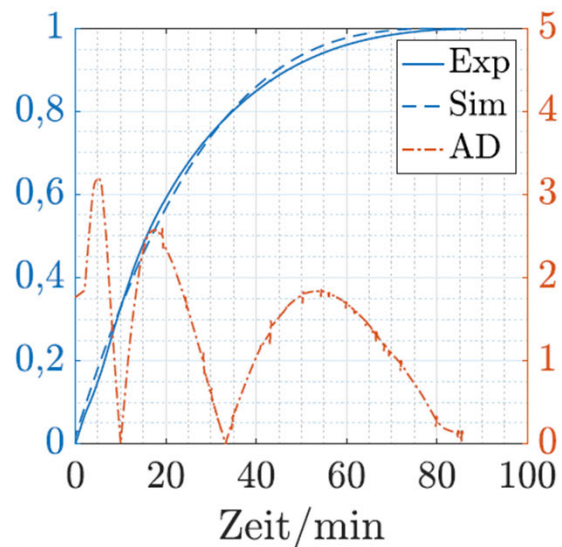
Einfluss der Konzentration des reaktiven Gases

Oxidation der Eisenpellets bei 700 °C

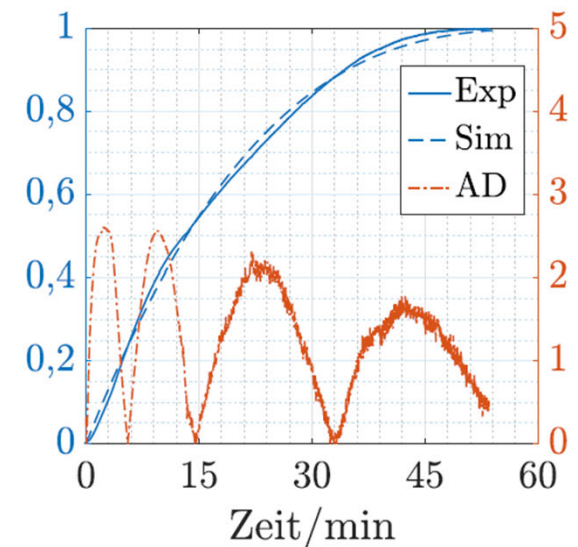
H₂O-Konzentration
33%



H₂O-Konzentration
50%



H₂O-Konzentration
80%



ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

REDOX-Wasserstoffspeicherung

Vorteile und ToDos

- **Keine seltenen Materialien**
Speichermaterial basiert auf **Eisenerz**, was **reichlich vorhanden** und **kostengünstig** ist
- **Sicheres Speichersystem, sehr gut geeignet für langzeitige bzw. saisonale Speicherung**
Während der Speicherphase **kein H₂** sondern **Eisen-Pellets** im Reaktor
Atmosphärische Betriebsbedingungen (keine H₂-Kompression erforderlich)
- **Hohe volumetrische Speicherkapazität (2.0 MWh/m³)**
- **Extrem hohe Reinheit des ausgespeicherten Wasserstoffs**
- **Das thermische und Wasser-Management benötigen zielgerichtete und optimierte Prozessintegration**

Fördermöglichkeiten für die Zusammenarbeit

8. EFP; zur angewandten Energieforschung, BMWK, 25. April 2024

2.2.3 Wasserstoffspeicherung und -transport:

- In Zukunft wird eine resiliente, leistungsfähige, gut durchdachte Infrastruktur benötigt, um Wasserstoff und seine Derivate bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen.
- Die Bandbreite **förderfähiger Themen** umfasst den **leitungsgebundenen** wie auch den **mobilen Transport per Bahn, Lkw oder Schiff** und die **Speicherung in Tanks oder anderen Medien** bis hin zur **saisonalen, großvolumigen Speicherung**, beispielsweise im Untergrund.
- Dabei stehen die **Optimierung der Materialien, Komponenten** und **Anlagen** bis hin zu **Betriebskonzepten** im Fokus.
- Für die **systemische Infrastrukturplanung** sind **Simulations- und Optimierungsmodelle** als zusätzliche Aspekte in Projekten förderfähig.
- Sie sollen die **Bedarfe**, aber auch **Nutzungskonkurrenzen** der **Sektoren** berücksichtigen.
- **Relevante Standorte** und die internationale Anbindung für Im- und Exporte sind dabei wichtige Faktoren, ebenso wie **Naturverträglichkeit und soziale Akzeptanz**.

Fördermöglichkeiten für die Zusammenarbeit

8. EFP; zur angewandten Energieforschung, BMWK, 25. April 2024

2.3.3 Industrie und Gewerbe (1/2)

- Als einer der wesentlichen Verbrauchssektoren weist der **effiziente Energieeinsatz** in **Industrie, Gewerbe, Handel und bei Dienstleistungen (IGHD)** ein entscheidendes Potenzial bei der globalen Senkung der THG-Emissionen und der **Erreichung der Klimaziele** auf.
- **Industrieprozesse in allen Branchen** und Technologiebereichen **müssen, unter Beibehaltung der Wirtschaftlichkeit und Prozesssicherheit**, an die sich verändernde Energiebereitstellung **angepasst** werden.
- Forschungsziele sind: **Umstellungen auf die Nutzung erneuerbarer Energien** (insbesondere **Strom und Wasserstoff**, aber **auch erneuerbare Wärme** aus Geothermie und Solarthermie), die **Senkung des Energie- und Ressourcenverbrauchs**, die **Steigerung der Gesamteffizienz** sowie die **Erhöhung der Flexibilität und der Resilienz der Industrieproduktion**.
- Damit kann **die Industrie als Energieverbraucher und -lieferant** auch **systemdienlich** zur **Sicherheit und Resilienz des Energiesystems** beitragen.

Fördermöglichkeiten für die Zusammenarbeit

8. EFP; zur angewandten Energieforschung, BMWK, 25. April 2024

2.3.3 Industrie und Gewerbe (2/2)

- Ein wichtiger Aspekt ist die **Deckung des Wärme- und Kältebedarfs in industriellen Prozessen** sowohl im Hochtemperaturbereich als auch bei mittleren und niedrigen Temperaturen.
- **Wärmespeicher** und deren **komplexe Systemintegration** sowie **intelligente Prozessführung** und **Abwärmenutzung** kommen hinzu.
- Dies erfordert **Forschung und Entwicklung** sowohl auf **Komponenten- als auch auf Anlagen- und Prozessebene**.
- Unvermeidbare **Abwärme** kann hingegen direkt **im Prozess, im Unternehmen** oder durch **Einspeisung in Nah- und Fernwärmenetze** sowie **thermische Speicher** genutzt werden.
- Hier sind **weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten** notwendig, um **Bereitstellung und Bedarf, Temperaturniveaus** und **weitere Parameter aufeinander abzustimmen** und **entstehende Abhängigkeiten in der Wärmeversorgung resilient** zu steuern.

Fördermöglichkeiten für die Zusammenarbeit

8. EFP; zur angewandten Energieforschung, BMWK, 25. April 2024

2.4 Energiesystem und Systemintegration

2.4.1 Energiesystemanalyse, *sektorübergreifende Systemmodellierung und -planung*

- Kern der Forschungsförderung ist die **Neu- und Weiterentwicklung systemanalytischer Werkzeuge und Methoden** sowie **deren exemplarische Anwendung**.
- Ein Anliegen des BMWK ist es, die Ergebnisse der Energiesystemanalyseforschung möglichst **schnell und zielgerichtet** der **Gesellschaft, Wirtschaft, Politik und Verwaltung** zur Verfügung zu stellen.
- Ziel ist es, bisher **nicht beantwortbare systemanalytische Fragestellungen der Energiewende lösen zu können** und die **Qualität** beziehungsweise die **Effizienz** systemanalytischer **Untersuchungen deutlich zu verbessern**.
- Dabei werden **neue Erkenntnisse, Handlungsempfehlungen und neues Orientierungswissen generiert**.
- Mögliche Themen sind **Modellkopplungen, -vergleiche und -validierungen** sowie **Methoden zur Sektorenkopplung** und zur Berücksichtigung von **Stakeholder-Verhalten**.

Fördermöglichkeiten für die Zusammenarbeit

EU; HORIZON Europe

Topics in Cluster 4: Digital, Industry & Space

Destination 1: Achieving global leadership in climate-neutral, circular and digitized industrial and digital value chains –opening 22.05.2025

Topic Code	Topic Title	Type	End TRL	Approx. Grant (Mil. €)	Exp. Grants	Deadline
HORIZON-CL4-INDUSTRY-2025-01-TWIN-TRANSITION-33	Integrated use of renewable energy carriers in industrial sites (Processes4Planet partnership) – energy intensive industry	RIA	5/6	6-8	3	23.09.2025
HORIZON-CL4-INDUSTRY-2025-01-TWIN-TRANSITION-37	Solving issues in carbon-neutral iron and steel making processes with diverse input materials of varying quality (Clean Steel Partnership)	RIA	6	14	2	23.09.2025

Fördermöglichkeiten für die Zusammenarbeit

EU; Clean Hydrogen – Joint Undertaking; Annual Working Plan 2025

Technical Committee 7 – Hydrogen Valleys

TC7-01: Large-scale Hydrogen Valley

IA; at least 4000 tonnes of clean H₂ per year using new hydrogen production capacity

TRL 6 → 8

Up to an EU contribution of around EUR 20 million

Deadline for proposals: 17.04.2025

Technical Committee 7 – Hydrogen Valleys

TC7-01: Small-scale Hydrogen Valley

IA; at least 500 tonnes of clean H₂ per year using new hydrogen production capacity

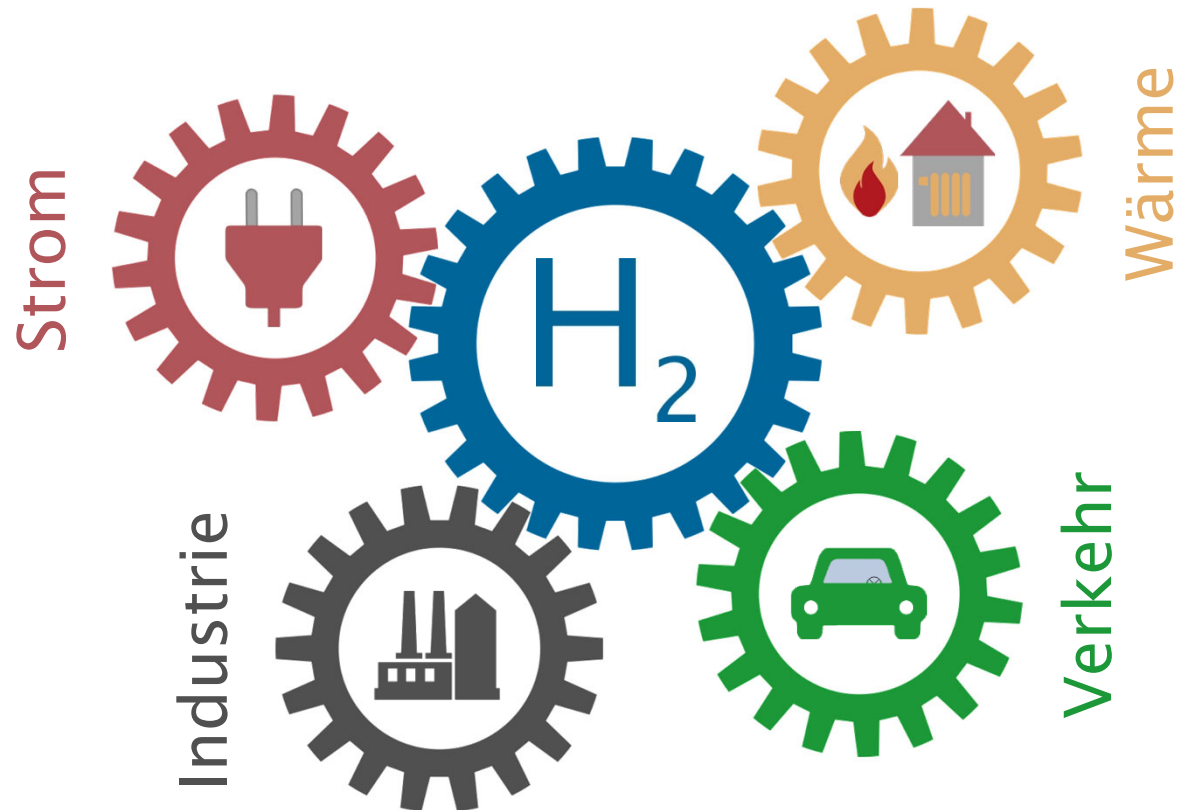
TRL 6 → 8

Up to an EU contribution of around EUR 9 million

Deadline for proposals: 17.04.2025

Wasserstoff – Wie können KMU davon profitieren?

Sektorenkopplung



ICON: Michael Heberl

Prof. Dr.-Ing. Belal Dawoud

Please contact me for any support, national or international cooperations

OTH REGENSBURG

KONTAKT



+49-941-943-9892



Seybothstraße 2
93053 Regensburg



Belal.dawoud@oth-
regensburg.de

Laboratory of Sustainable Energy
and Hydrogen Processes

Laboratory of Smart Energy and
Hydrogen Systems