



## **REDOX, eine vielversprechende Speichertechnologie für Wasserstoff**

**IHK - Treffpunkt Hochschule, 28.01.2025**

**Prof. Dr.-Ing. Belal Dawoud**

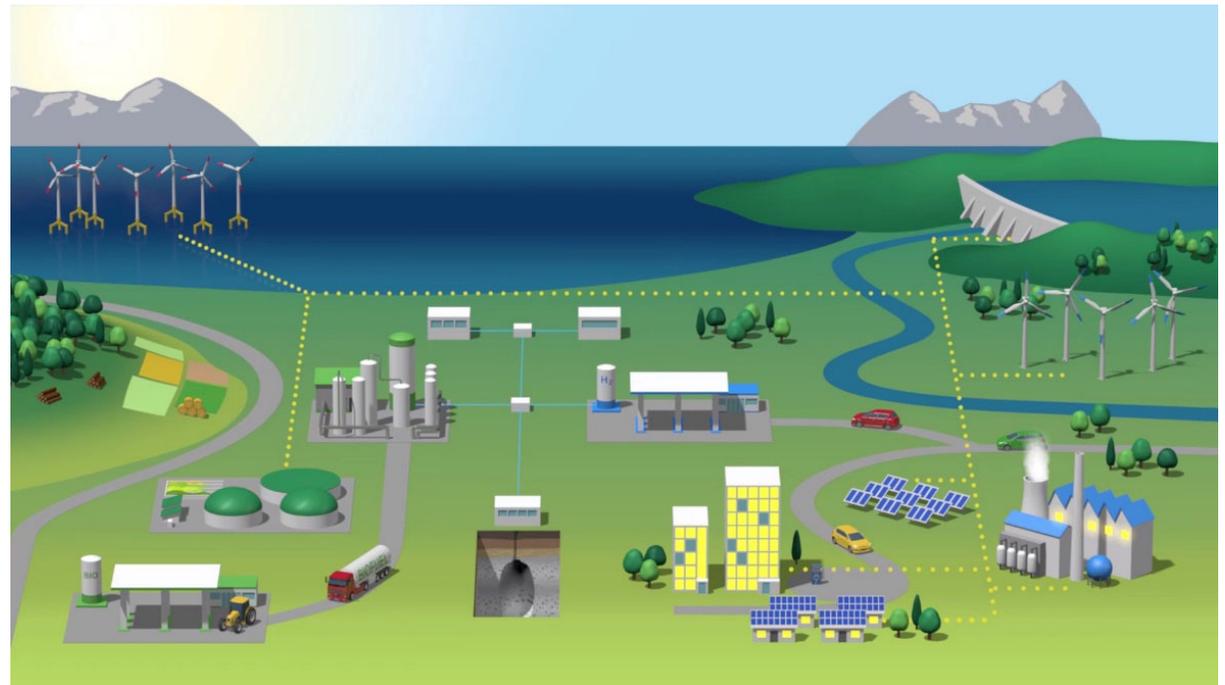
Leiter der Labore:

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

# Nachhaltige Energiesysteme;

Eine Herausforderung, die innovativen Lösungen und Kooperation erfordert

- Reduktion der CO<sub>2</sub>-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

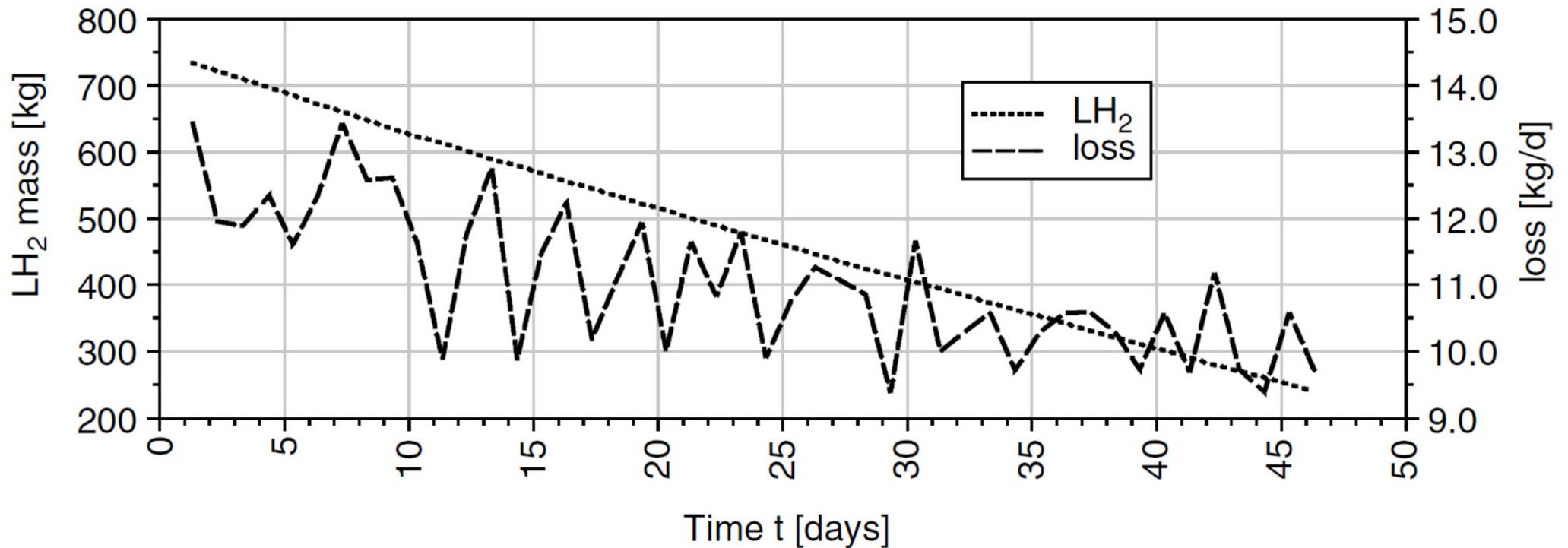
# Wasserstoff-Speichertechnologien; einen Überblick

## Volumetrische Speicherkapazitäten

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

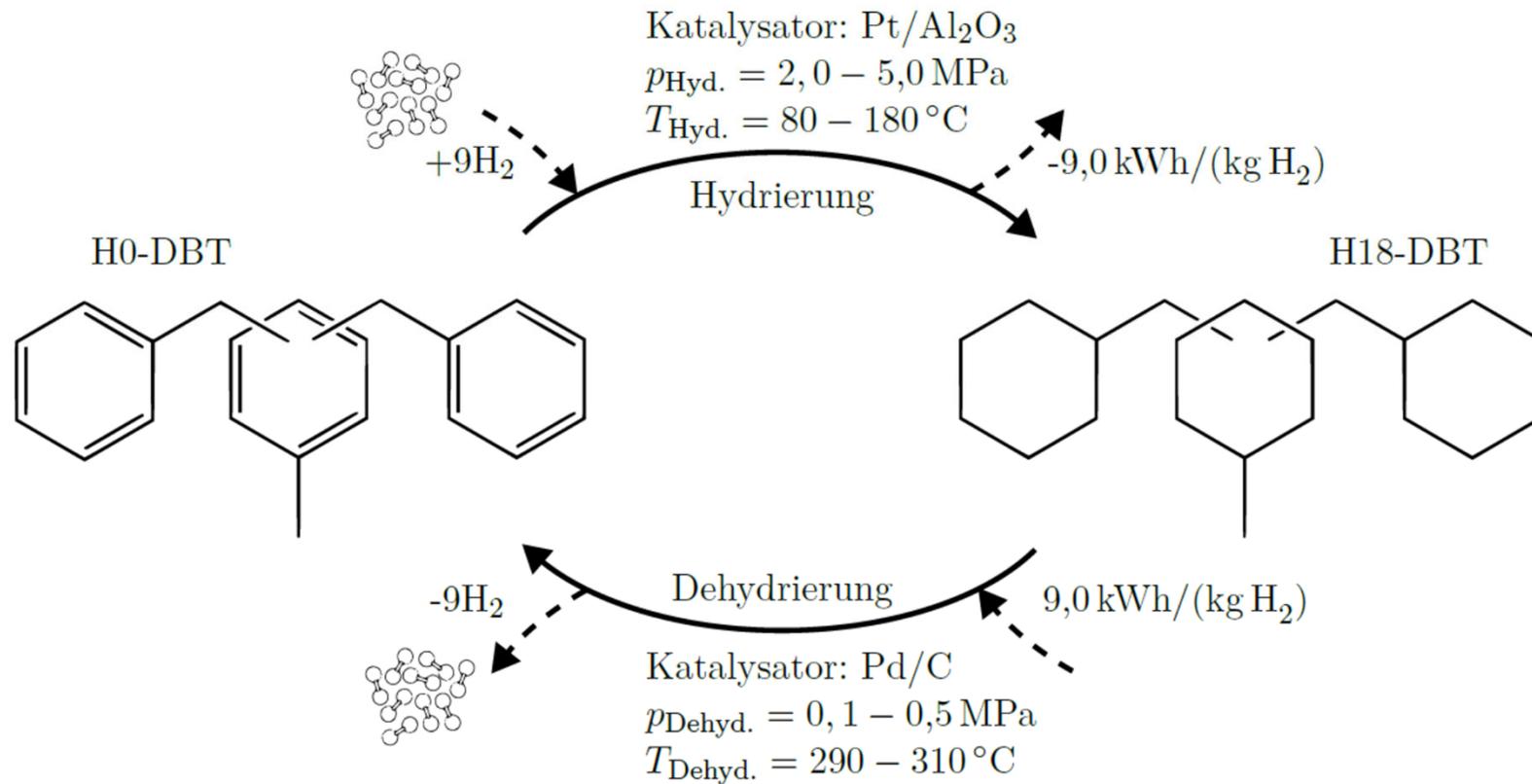
# H<sub>2</sub>-Speicherung in verflüssigter Form

## 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

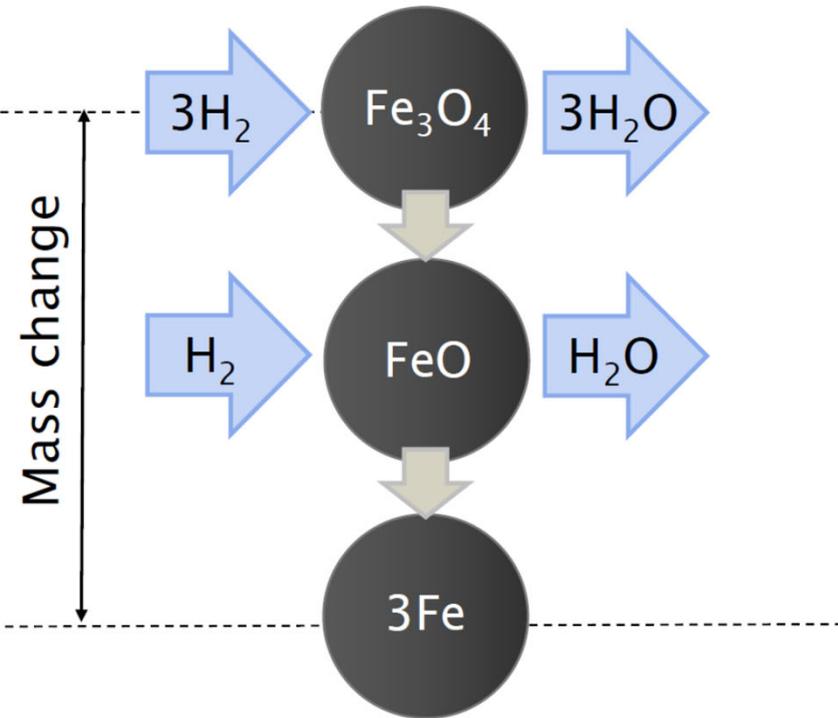
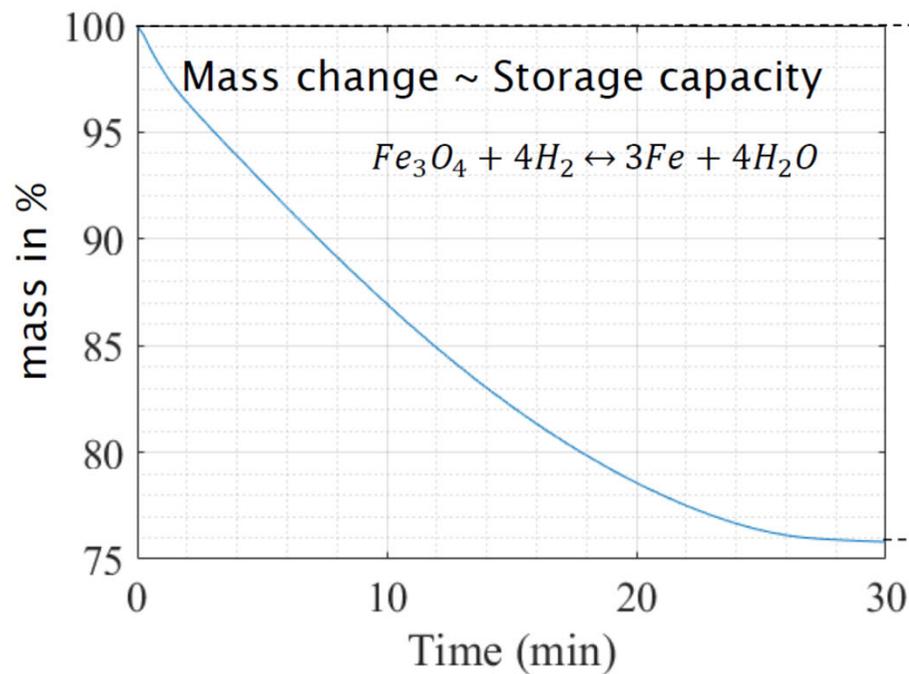
## Reduktion des Eisenoxids mit H<sub>2</sub>

Prozesstemperatur > 570 °C

Unter Abwesenheit der Luftsauerstoff

Endothermische Reaktion,

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



ICON: Lea Huber

# REDOX: Einspeicherung

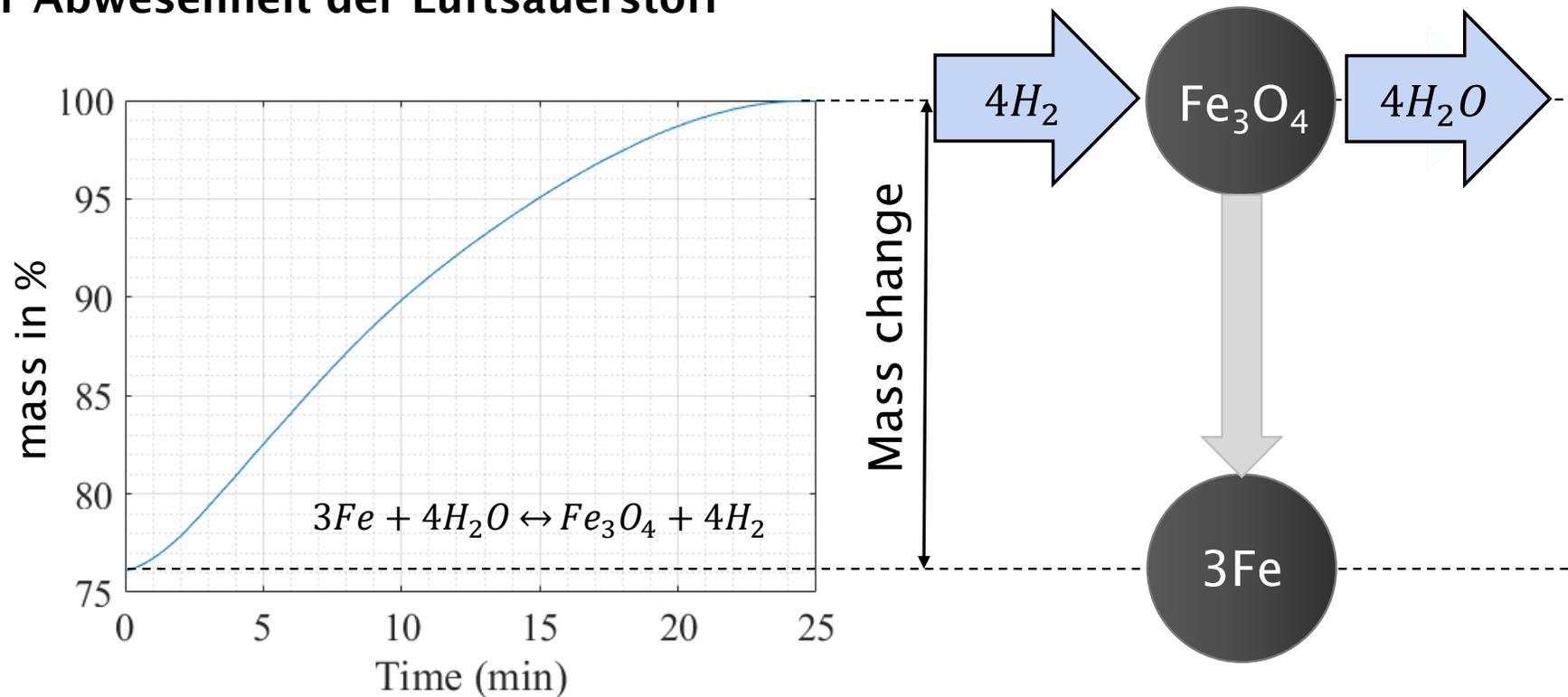
Reduktion des Eisenoxids mit H<sub>2</sub>

Prozesstemperatur < 570 °C

Unter Abwesenheit der Luftsauerstoff

Endothermische Reaktion,

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



ICON: Le: er

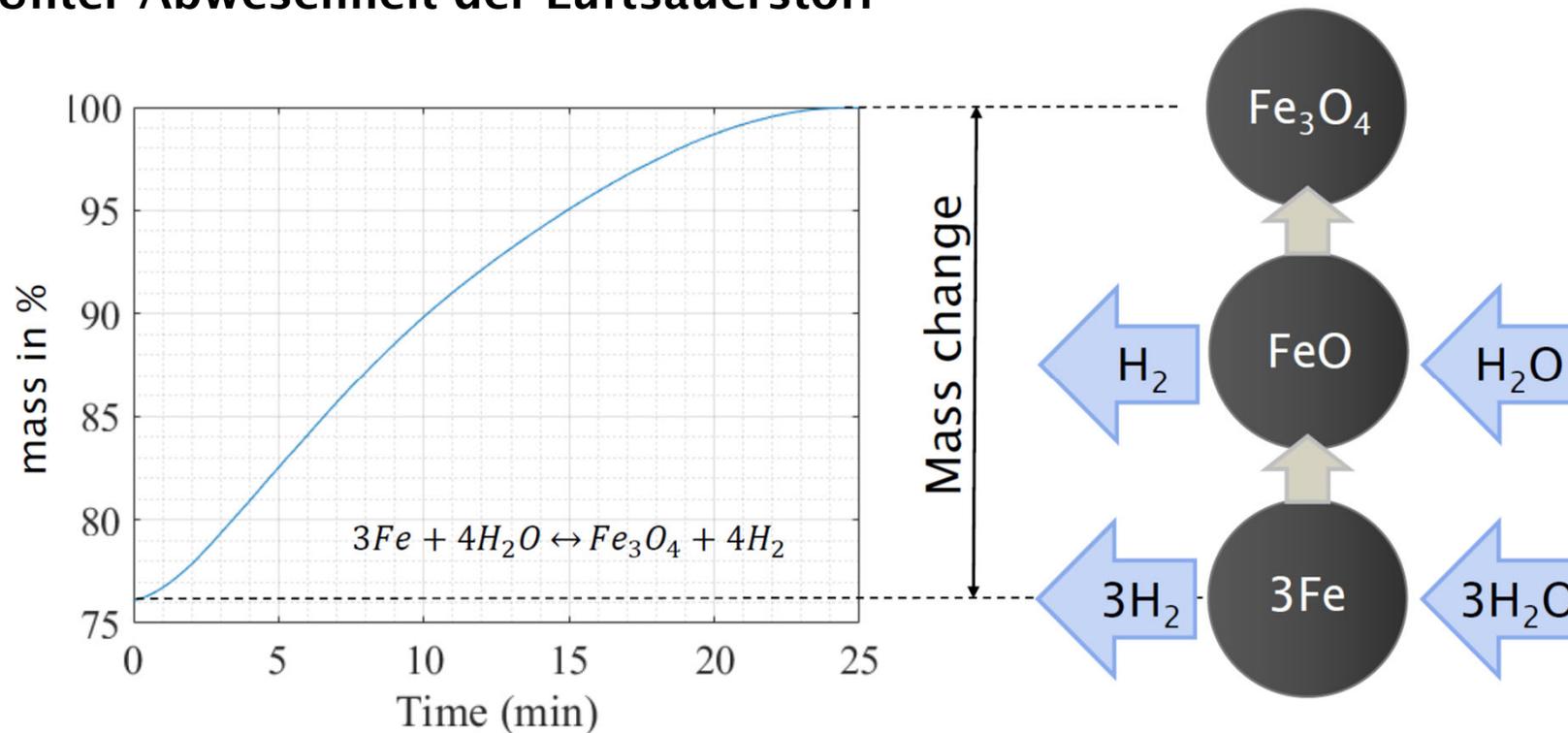
# REDOX: Ausspeicherung

## 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

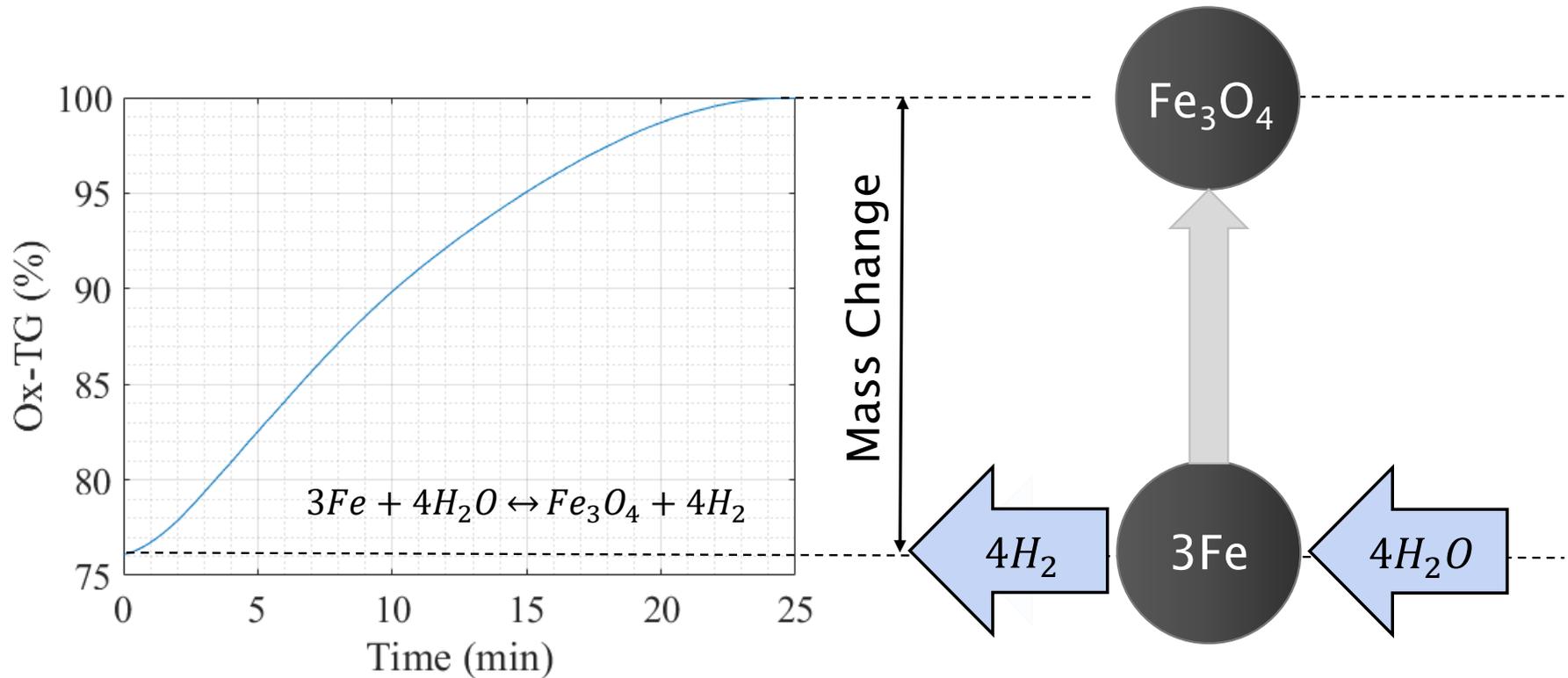
# REDOX: Ausspeicherung

## 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

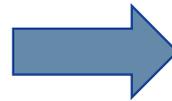
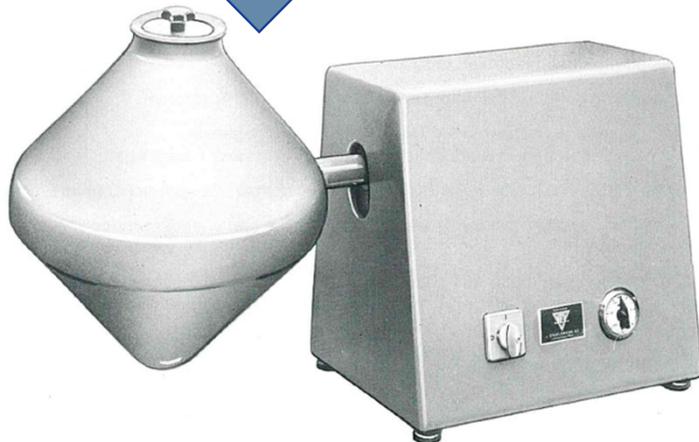
## Volumetrische Speicherkapazitäten

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

# Pellet-Herstellung

## | Pelletisierung

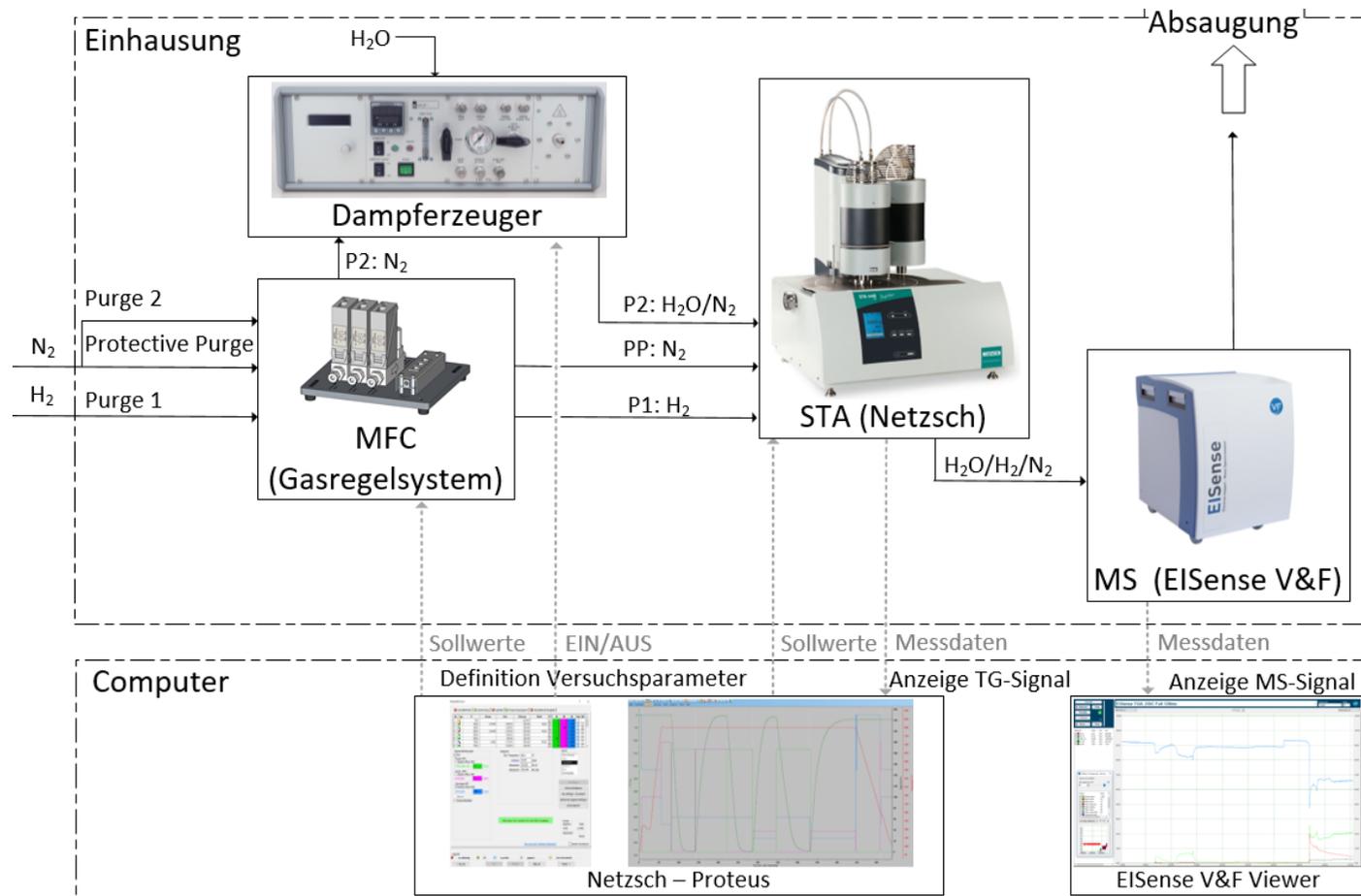
Stützmaterial



ICONS: Lea Huber

# Untersuchung der Reaktionskinetik von Einzelpellets

## Kernkomponenten: STA and MS

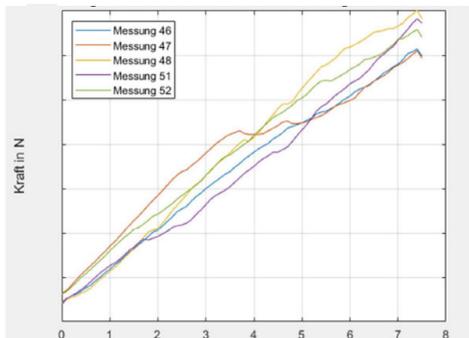
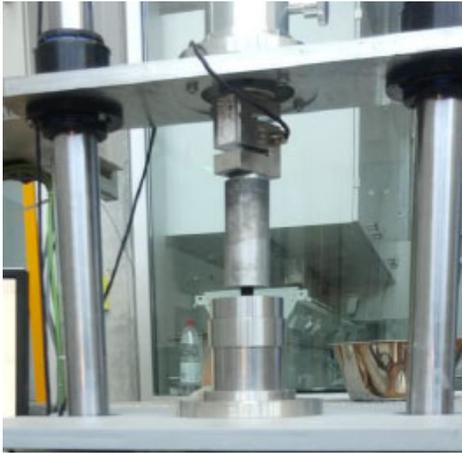


ICON: Bernd Gamisch & Lea Huber

# Weitere Untersuchungen der Speichermassen

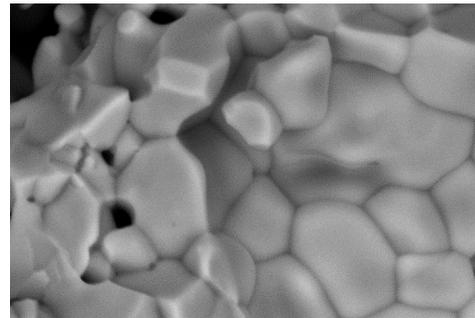
## Zur Absicherung der Stabilität der Pellets

### Mechanische Stabilität



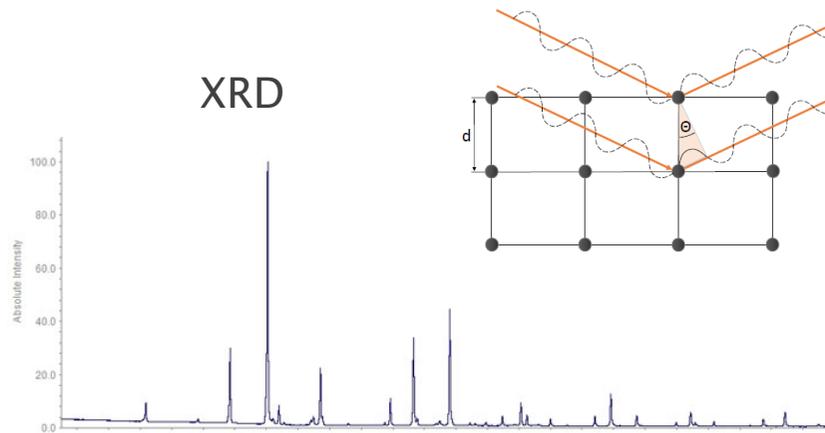
ICONS: Lea Huber

### Chemische Zusammensetzung

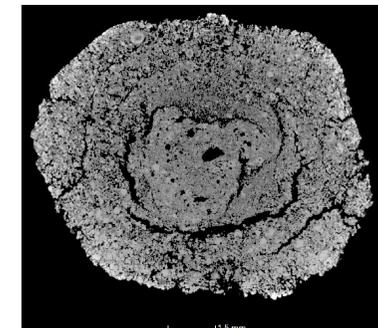
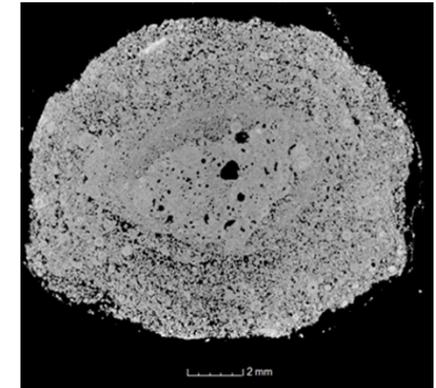


REM

XRD

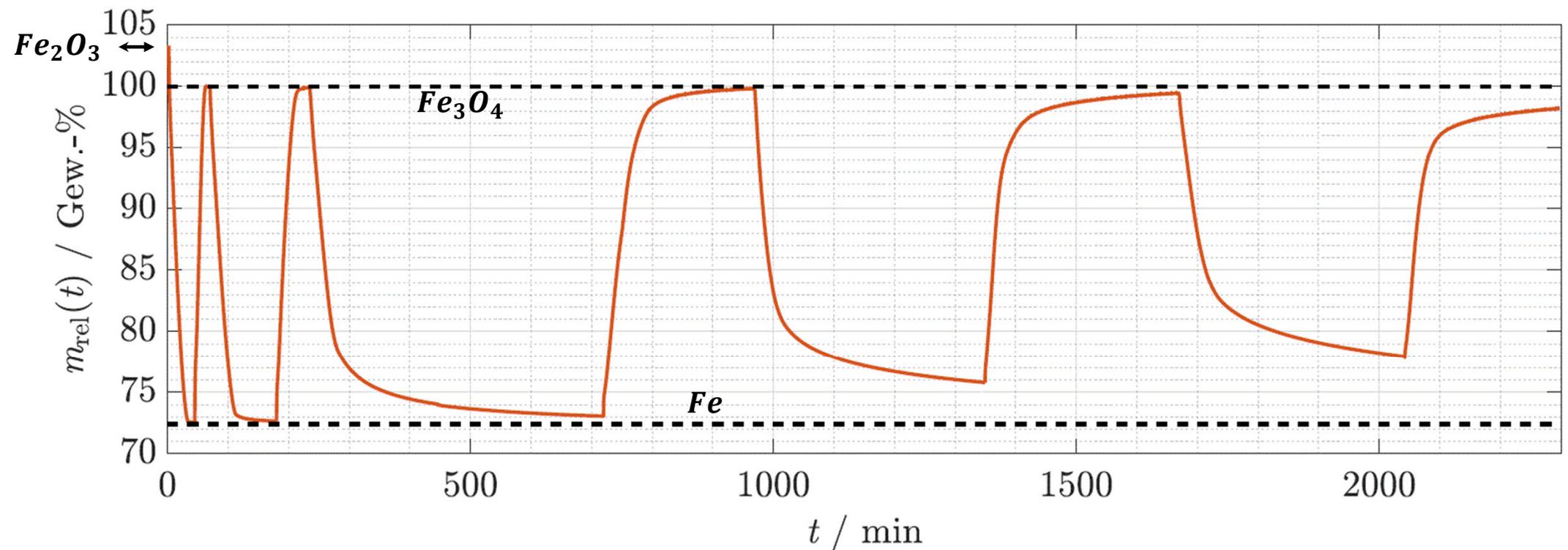


### Strukturänderung ( $\mu$ CT)



# Stabilität von Pellets aus reinem Eisenoxid

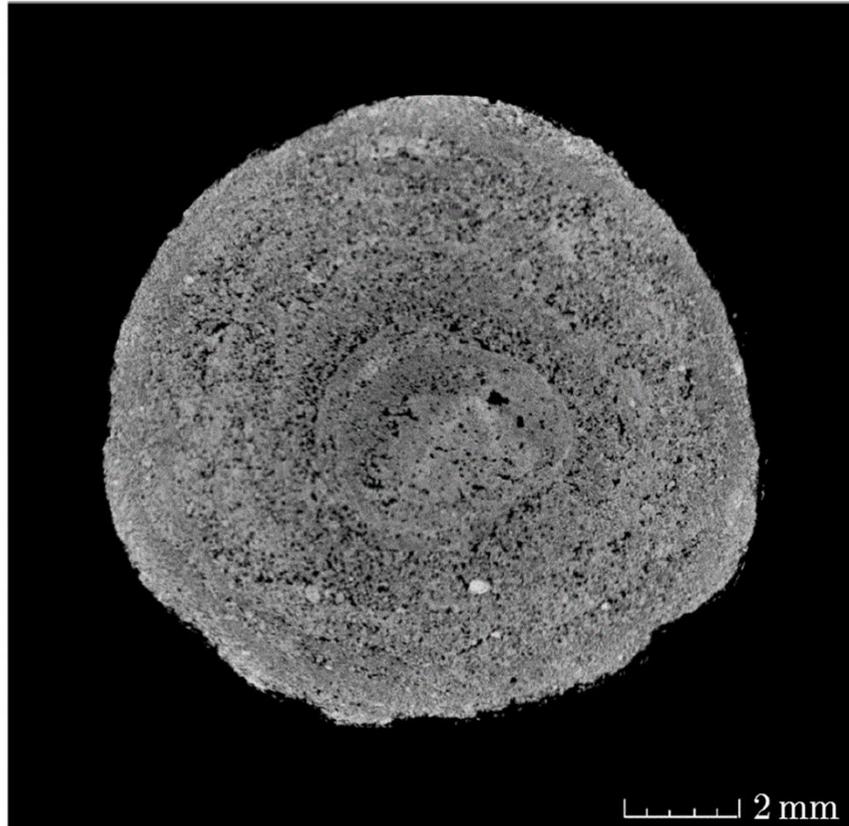
Über fünf REDOX-Zyklen



ICONS: Lea Huber

# Stabilität von Pellets aus reinem Eisenoxid

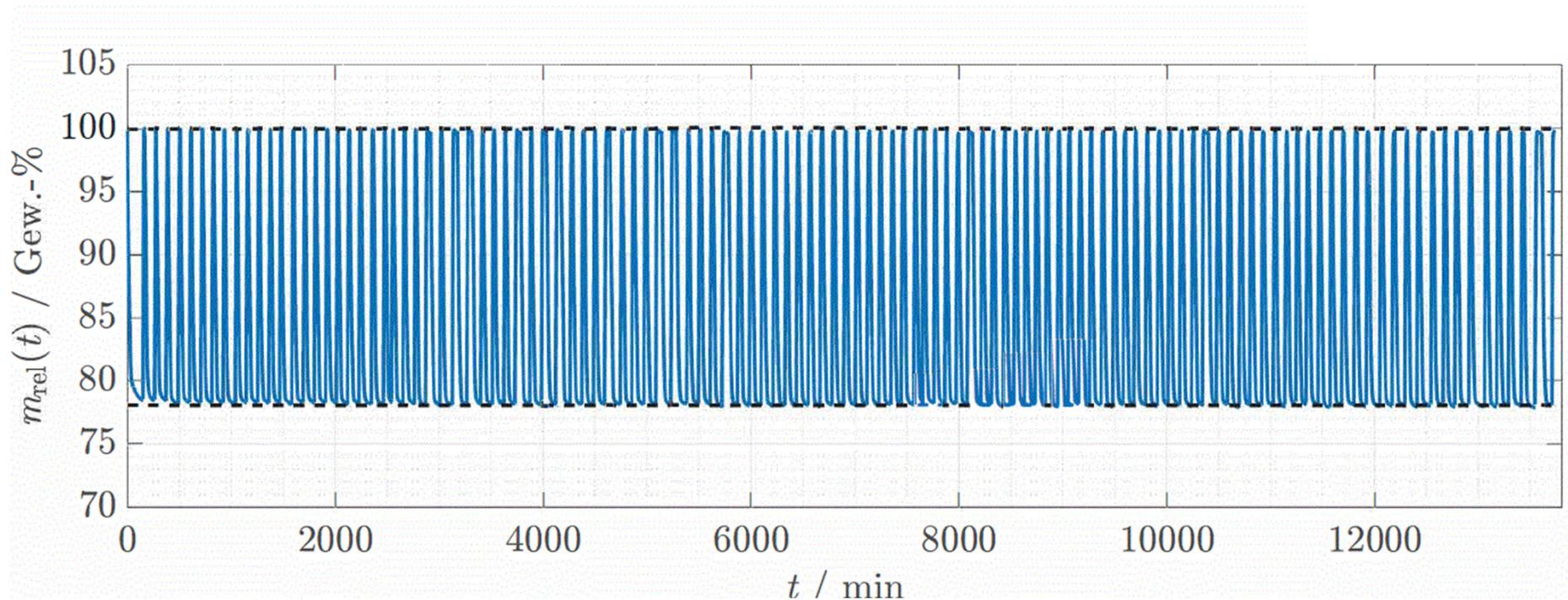
REM vor und nach den fünf REDOX-Zyklen



ICONS: Lea Huber

# Stabilität der an der OTHR entwickelten Pellets

Keine Alterung über 120 REDOX-Zyklen bei 700 °C

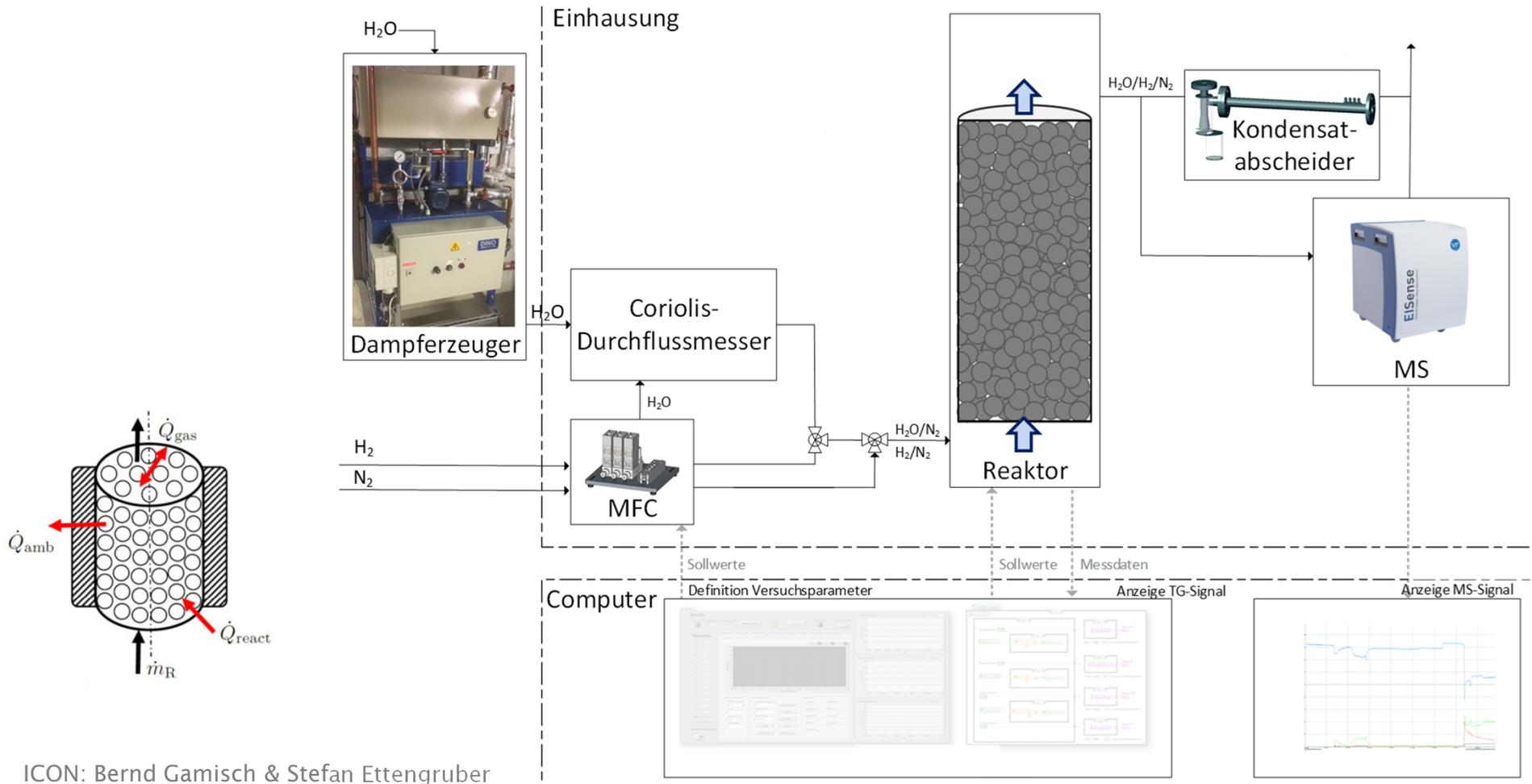


**Fazit: Die entwickelten Pellets können ab jetzt hochskaliert und in saisonale Speichersysteme untersucht und optimiert werden.**

ICONS: Lea Huber

# Untersuchung eines Pellet-Reaktors

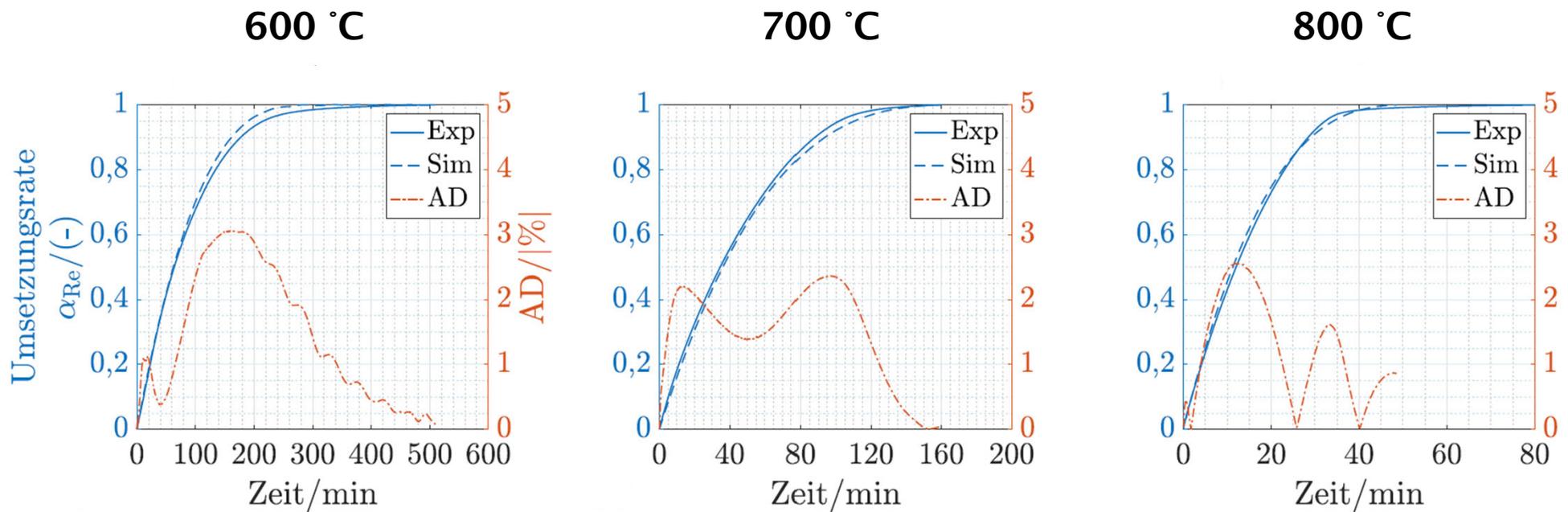
Volumen des Reaktors 3 Liter



ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

# Einfluss der Prozesstemperatur

Reduktion von Eisenoxid: H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-Gemisch mit 50% H<sub>2</sub>-Anteil

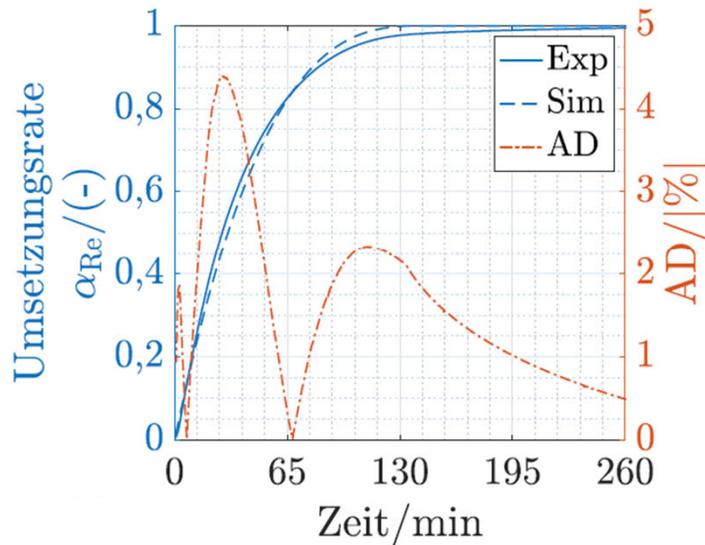


ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

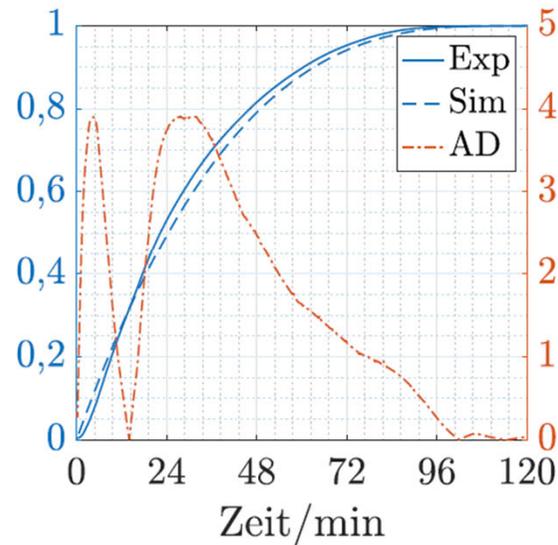
# Einfluss der Prozesstemperatur

Oxidation der Eisenpellets; H<sub>2</sub>O/N<sub>2</sub>-Gemisch mit 33% H<sub>2</sub>O

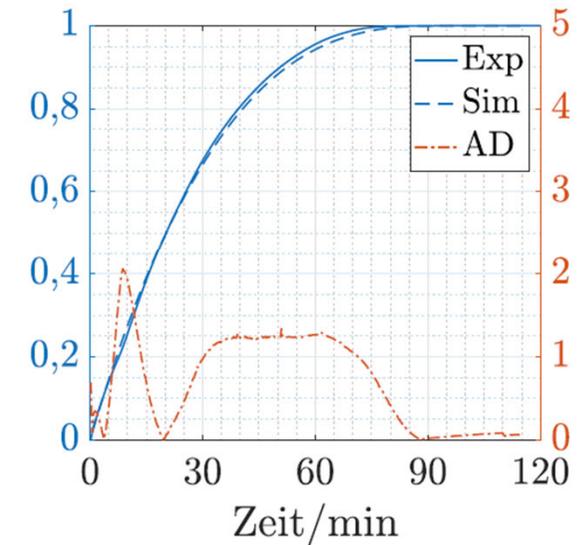
600 °C



700 °C



800 °C

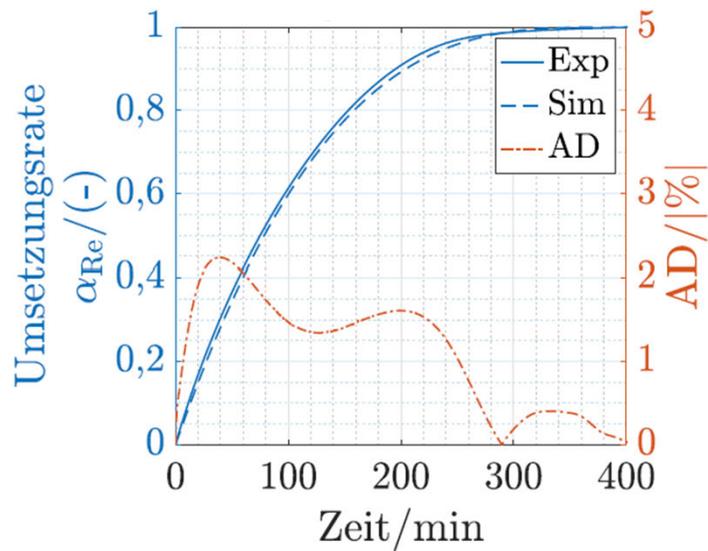


ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

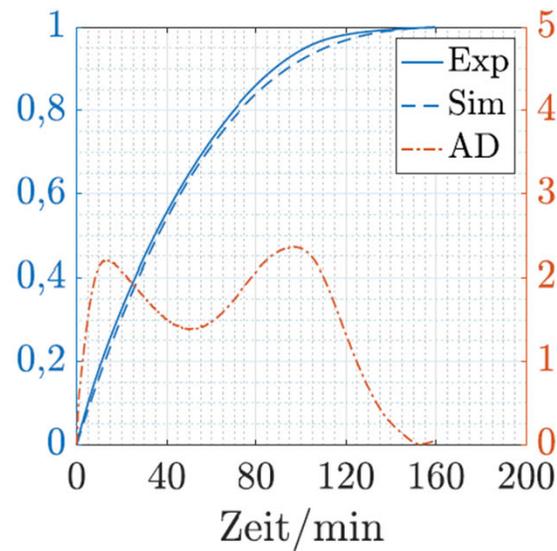
# Einfluss der Konzentration des reaktiven Gases

## Reduktion von Eisenoxid bei 700 °C

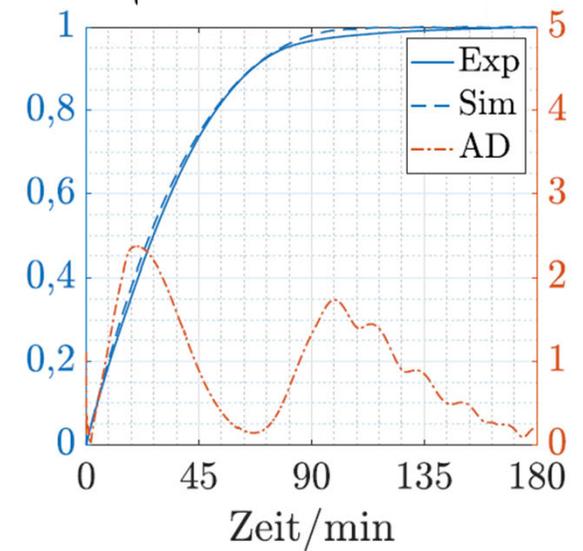
H<sub>2</sub>-Konzentration  
25%



H<sub>2</sub>-Konzentration  
50%



H<sub>2</sub>-Konzentration  
80%

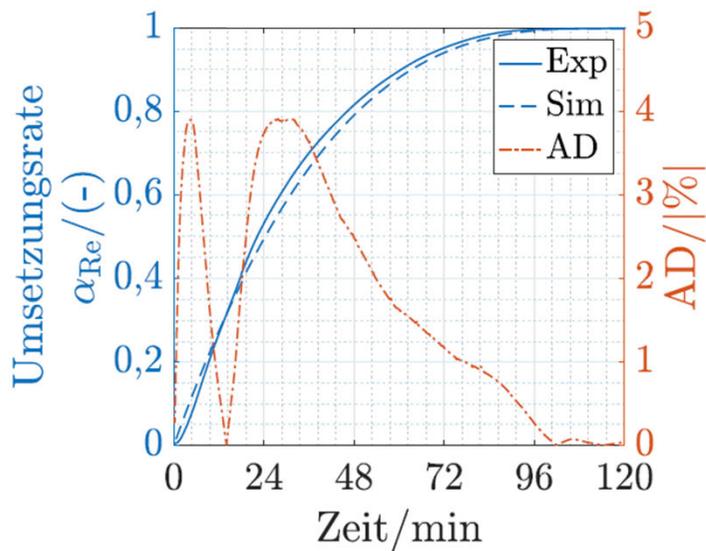


ICON: Bernd Gamisch & Stefan Ettengruber

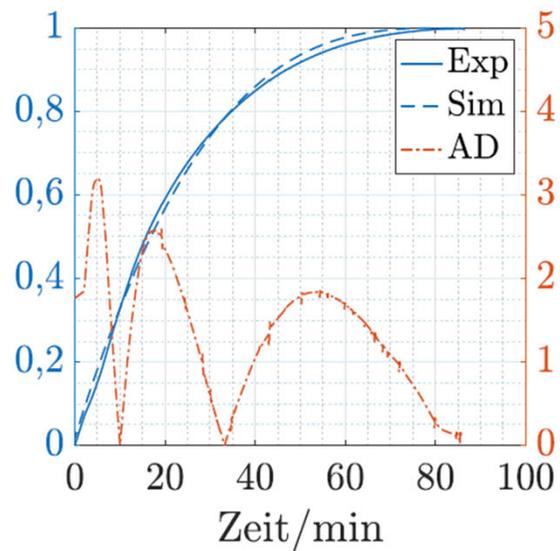
# Einfluss der Konzentration des reaktiven Gases

Oxidation der Eisenpellets bei 700 °C

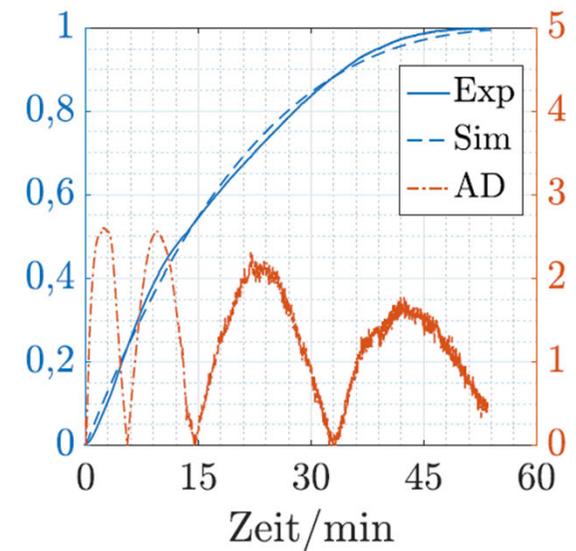
H<sub>2</sub>O-Konzentration  
33%



H<sub>2</sub>O-Konzentration  
50%



H<sub>2</sub>O-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 H<sub>2</sub>** sondern **Eisen-Pellets** im Reaktor  
**Atmosphärische Betriebsbedingungen** (keine H<sub>2</sub>-Kompression erforderlich)
- **Hohe volumetrische Speicherkapazität (2.0 MWh/m<sup>3</sup>)**
- **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) – <b>energy intensive industry</b>	RIA	5/6	6-8	3	23.09.2025
HORIZON-CL4-INDUSTRY-2025-01-TWIN-TRANSITION-37	Solving issues in carbon-neutral iron and <b>steel making processes</b> 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 H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> 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