

EISEN ALS LANGZEIT- ENERGIESPEICHER

PROF. DR. ANDREAS DREIZLER
PROF. DR. CHRISTIAN HASSE
DR. MARIUS SCHMIDT

FACHBEREICH MASCHINENBAU



INHALT



- 1** Iron Fuel: Der Eisen-Energie-Kreislauf
- 2** Wissenschaftliche Fragen zur Eisenstaubverbrennung

KERNAUSSAGEN



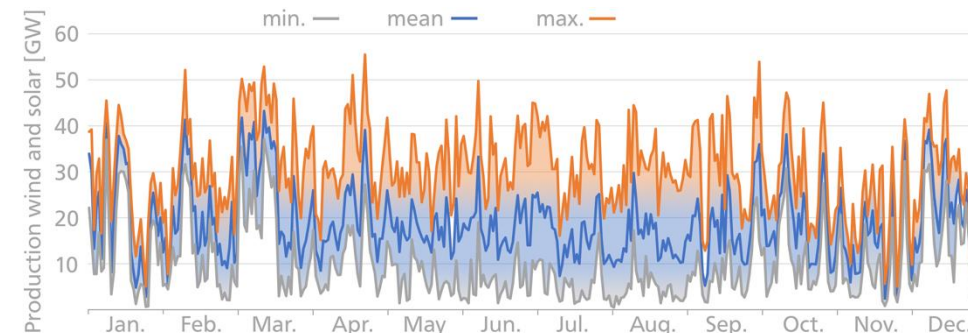
- 1** Das Energiesystem der Zukunft braucht unterschiedliche **Energiespeicher**.
- 2** **Metalle** sind für die Langzeitspeicherung großer Energiemengen geeignet.
- 3** **Klimaneutrale Umrüstung** von bestehenden Infrastrukturen ist wichtig für die Energiewende.
- 4** **Grundlagenforschung** und **Scale-up** innovativer Energieumwandlungssysteme müssen Hand-in-Hand vorangetrieben werden.

WARUM ENERGIE SPEICHERN?

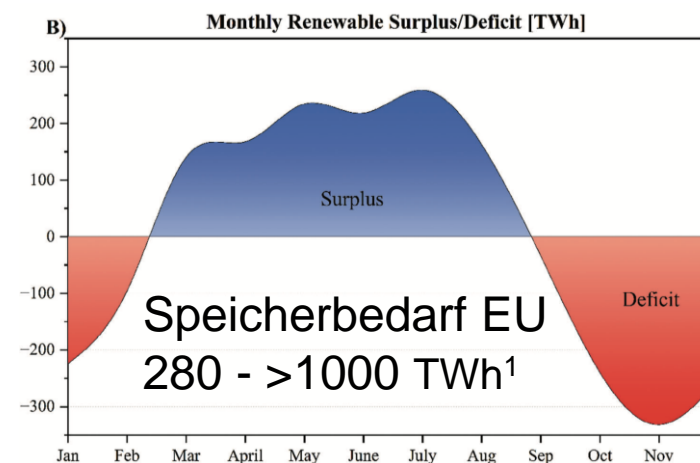


SPEICHERUNG:

- Erneuerbare Energien sind sehr volatil und das Potenzial ist weltweit ungleich verteilt.
- Viele Länder inklusive Deutschlands werden auch zukünftig auf Energieimporte angewiesen sein.
- Einspeicherung, Transport und zeitversetzte Nutzung (Ausspeicherung) an anderem Ort sind notwendig.
- Direkte langfristige (saisonale) Speicherung von Elektrizität ist im TWh-Maßstab nicht möglich.
- **FAZIT:** „Moleküle statt Elektronen“, **chemische Energiespeicher** sind von entscheidender Bedeutung.



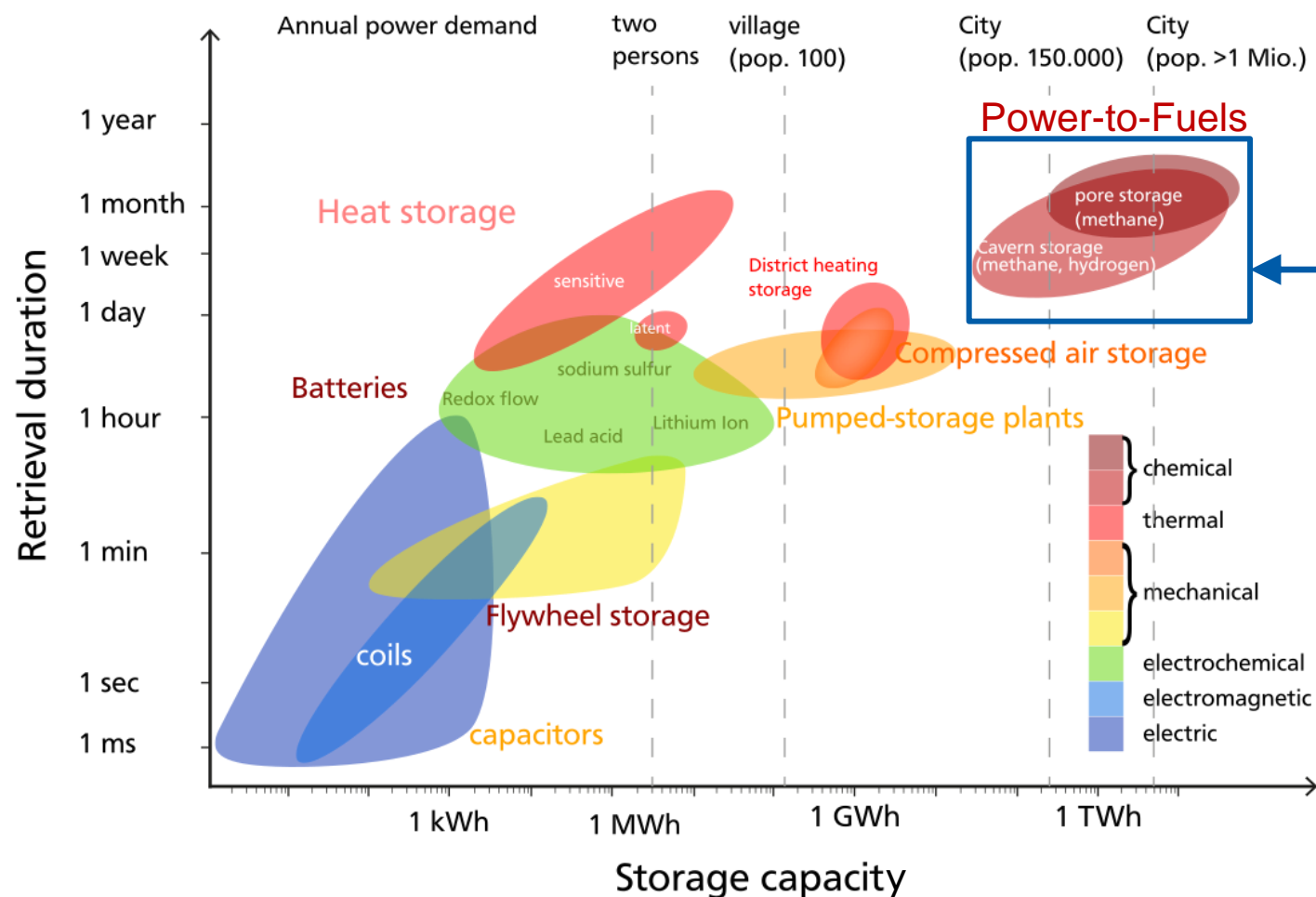
Quelle: Dreizler, A. et al., *Applications in Energy and Combustion Science*, **2021**, 7:100040



Quelle: Barelli et al. 2024, *Advanced Materials Technologies*

¹Quelle: Fraunhofer ISI www.langzeitspeicher.de; Passerini et al. Adv. Material Technol. 2302206 [2024]

SPEICHERN, ABER WIE?



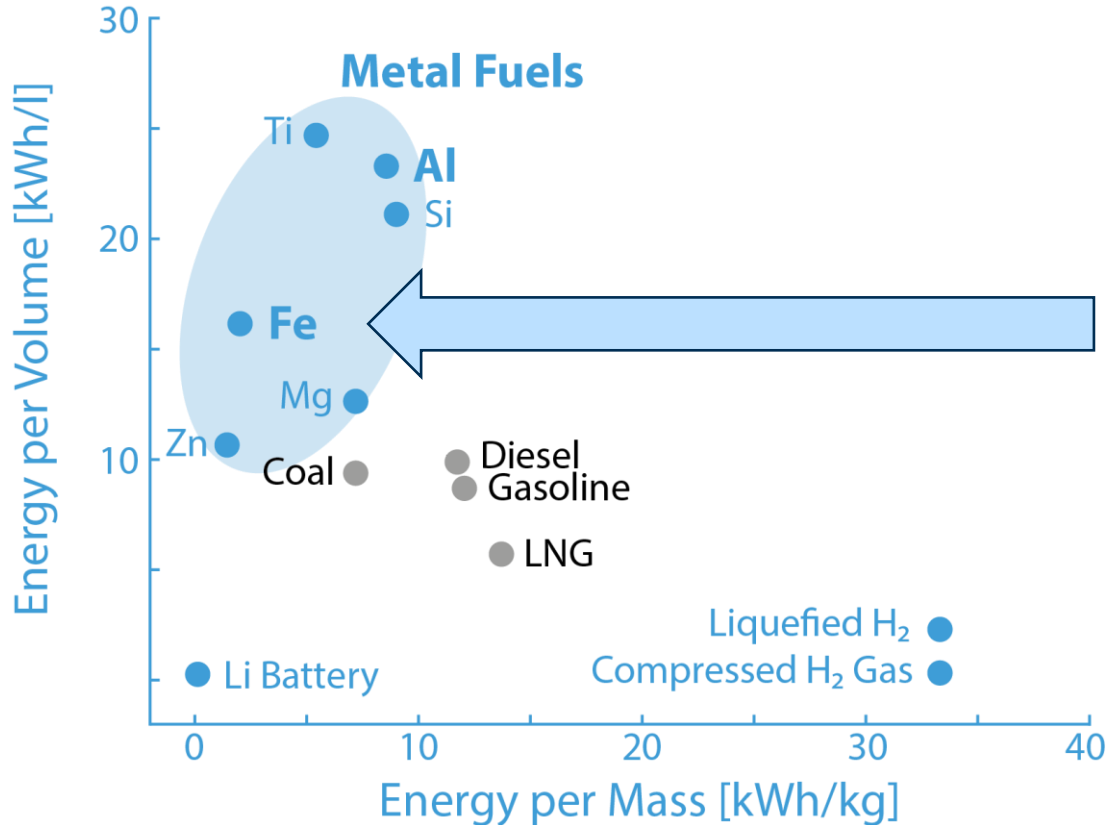
CHEMISCHE ENERGIESPEICHER:

- Hohe Speicherkapazität
- Hohe Ausspeicherdauer

CHEMISCHE ENERGIESPEICHER



CHEMISCHE ENERGIESPEICHER



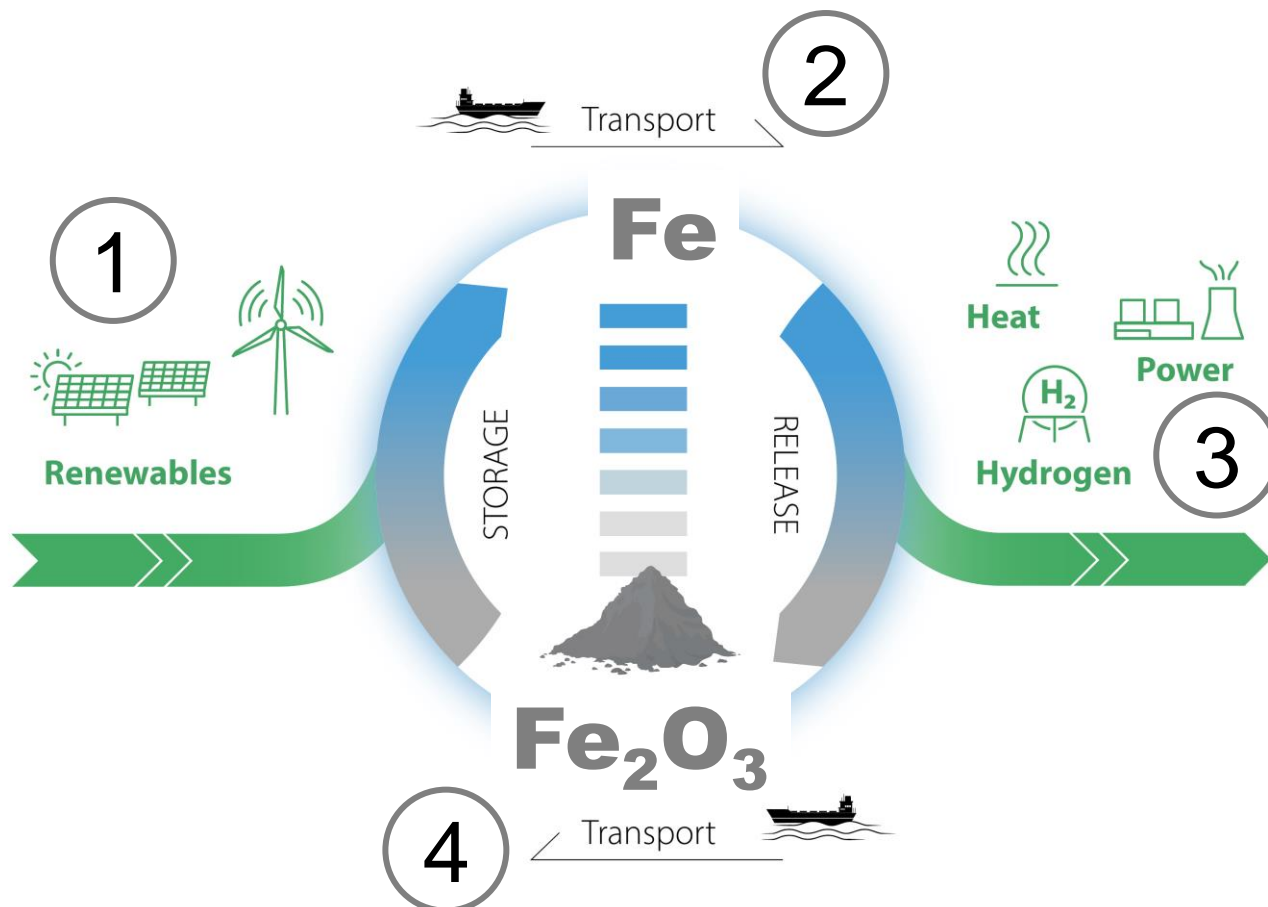
EISEN

- Hohe Energiedichte
- Kontrolliert oxidierbar mit Luft oder Wasser
- Nicht toxisch
- Skalierbar in den TWh-Bereich
- Kein kritischer Rohstoff und recycelbar

ENERGIESPEICHER IM KREISLAUF

- Energiespeicher muss beladen und entladen werden können wie eine Batterie
- Kein Verbrauch, 100% Recycling
- Entladung: CO₂-freie Oxidation
- Beladung: CO₂-freie chemische Reduktion

CO₂-FREIE – KREISLAUFWIRTSCHAFT



CO₂-FREIER KREISLAUF:

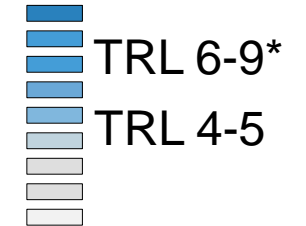
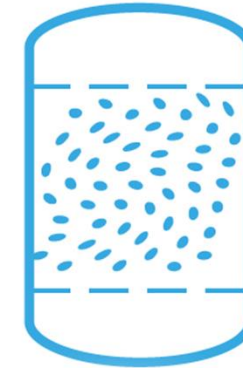
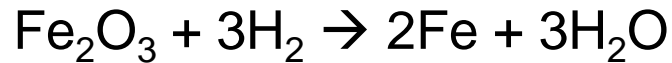
1. **Einspeichern** durch Reduktion
2. Lagerung/ Transport
3. **Ausspeichern** durch Oxidation
4. Recycling

1. REDUKTION



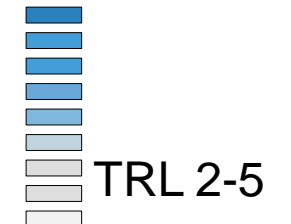
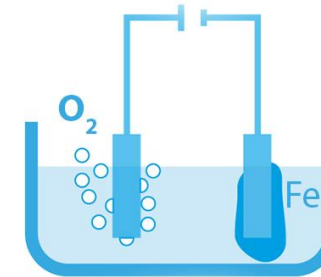
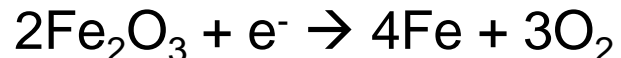
THERMOCHEMISCHE REDUKTION

- Reduktion mit grünem Wasserstoff (aus Elektrolyse)
- In Wirbelschicht- und Flugstromreaktoren
- H₂ wird lokal recycled, kein Export von H₂/Wasser
- Synergien mit grüner Stahlproduktion



ELEKTROCHEMISCHE REDUKTION

- Gelöstes Eisenoxid
- Direkte Reduktion durch Elektrolyse
- Mit erneuerbarem Strom
- Potential für höhere Effizienz
- „Higher risk, high gain“



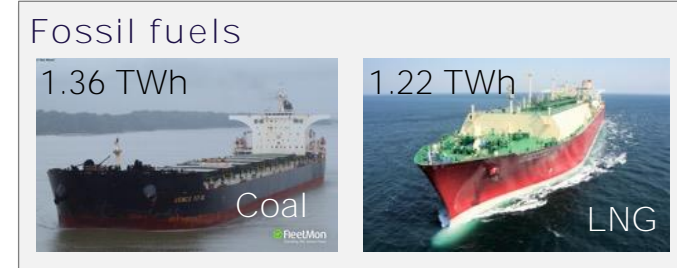
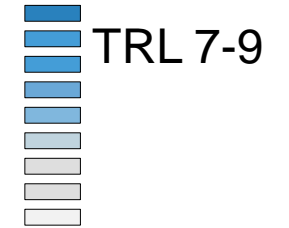
*Technology in commercial use for non-“Iron Power” applications.
Roland Berger: *Iron Power* 09.2023

2. TRANSPORT



PER SCHIFF UND SCHIENE

- Etablierte Transportmethoden für Schüttgüter
 - Sicherheitsrichtlinien für reduziertes Eisen existieren
 - Inertialisierung in N_2 -Atmosphäre
 - Dünne Passivierungsschicht mit NH_3 [1]
- Aktuell weitere Forschung zu Standardisierung und Sicherheitsaspekten



[1] Ma, Y., Bae, J. W., Kim, S.-H., Jovičević-Klug, M., Li, K., Vogel, D., Ponge, D., Rohwerder, M., Gault, B., Raabe, D., *Reducing Iron Oxide with Ammonia: A Sustainable Path to Green Steel*. Adv. Sci. 2023, 10, 2300111. <https://doi.org/10.1002/adv.202300111>

*Pilotship *Suiso Frontier*, performance will increase

3. OXIDATION – DRY-CYCLE

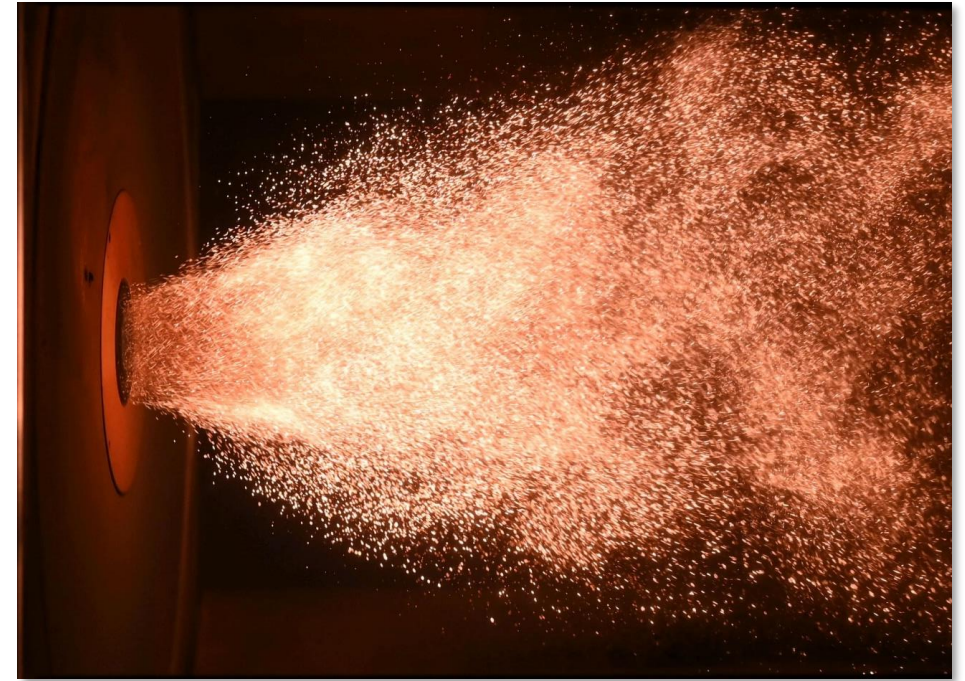
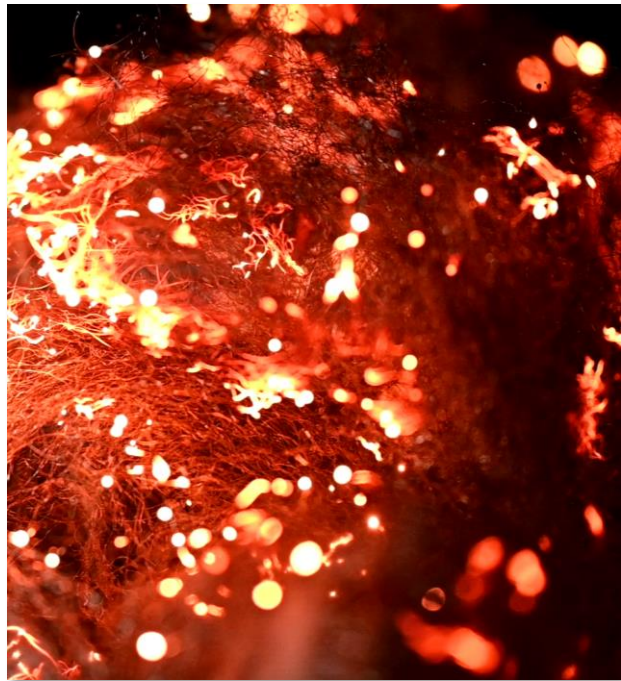


EISEN BRENNT – CO₂ FREI!



3. OXIDATION – DRY-CYCLE

EISEN BRENNT – CO₂ FREI!



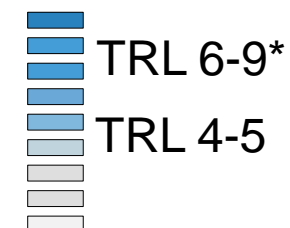
3. OXIDATION – DRY-CYCLE



EISEN BRENNT – CO₂ FREI!



- Eisenpulver < 50 µm
- Gespeicherte Energie wird in turbulenter Staubflamme freigesetzt
- Speist Hochtemperaturprozesse oder Dampfturbine für die Erzeugung von Strom



Für wissensbasierte Auslegung Vielzahl offener wiss. Fragen



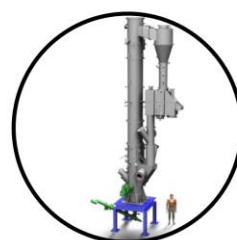
**Partikel-
Flammen**



**Laminare
Flammen**



**Turbulente
Flammen**



**Semi-
industriell**

1 MW_{th}

*Technology in commercial use for non-“Iron Power” applications. Roland Berger: *Iron Power* 09.2023

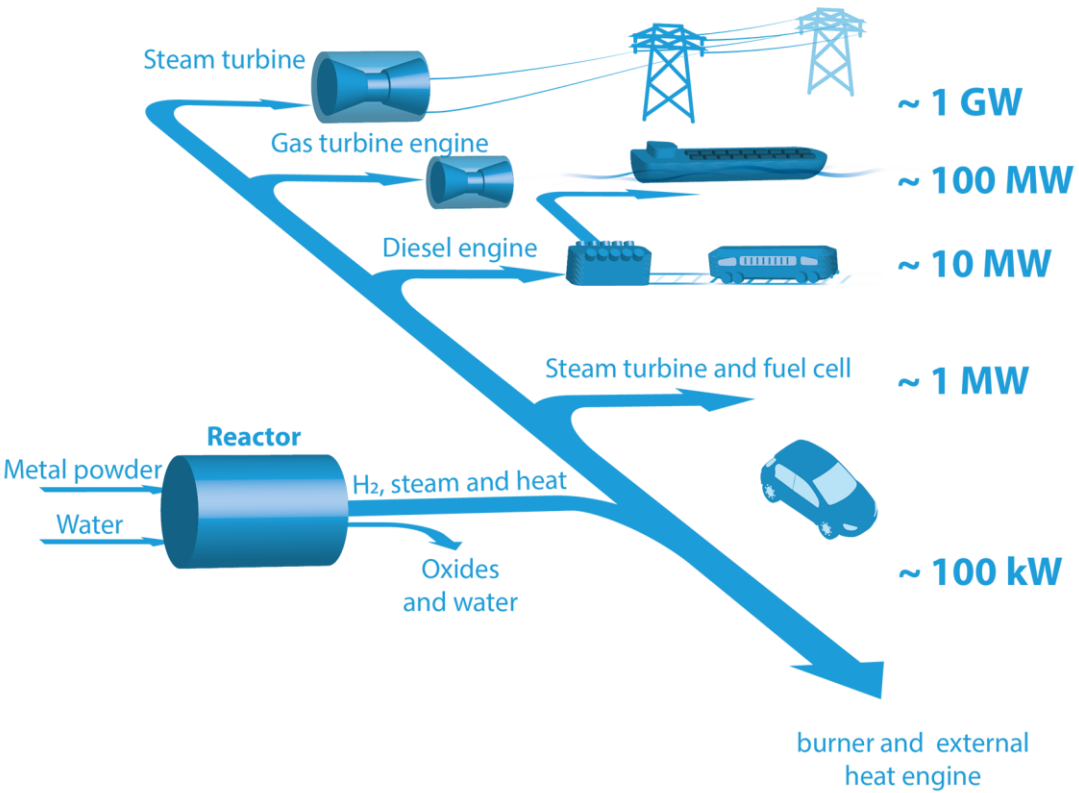
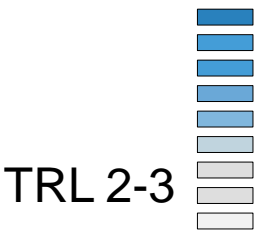
3. OXIDATION – WET-CYCLE



- Niedrig- und Hochtemperaturoxidation von Metallen in Wasser/Wasserdampf
- Potential für hohe Effizienz: Produktion von **Wärme** und **H₂**



- Geeignete Metalle: **Al**, **Mg**, **Si**, **Fe**

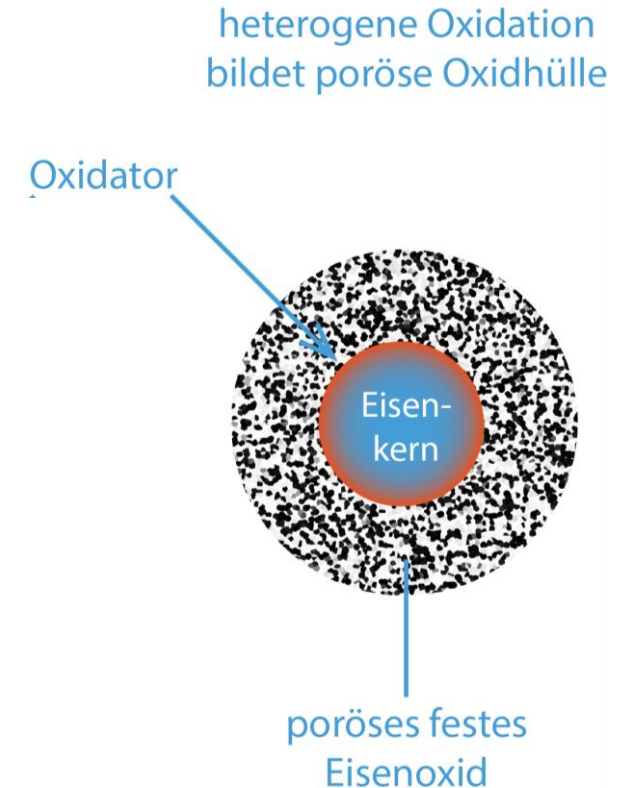


adapted from Bergthorson PECS 2018

4. RECYCLEN-SCHLIEßEN DES KREISLAUFS



- Primär heterogene Oberflächenreaktionen
- Fe-Partikel oxidieren zu Fe_xO_y -Partikel
- Herausfiltern der Partikel ist abhängig vom Durchmesser, mittels Zyklone und Tuchfilter

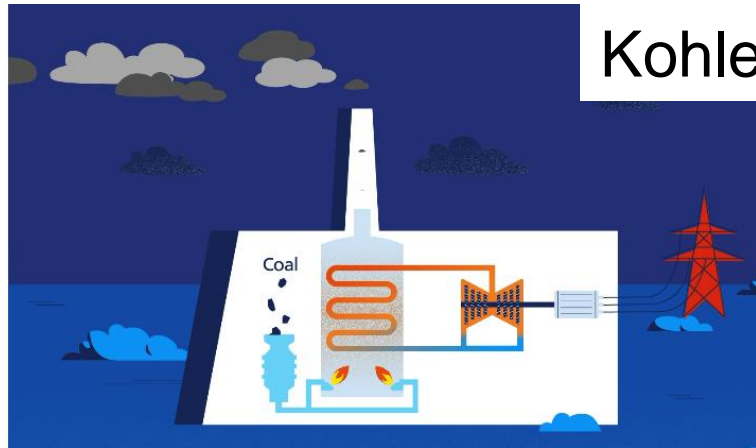


Quelle: J. Bergthorson, 2018

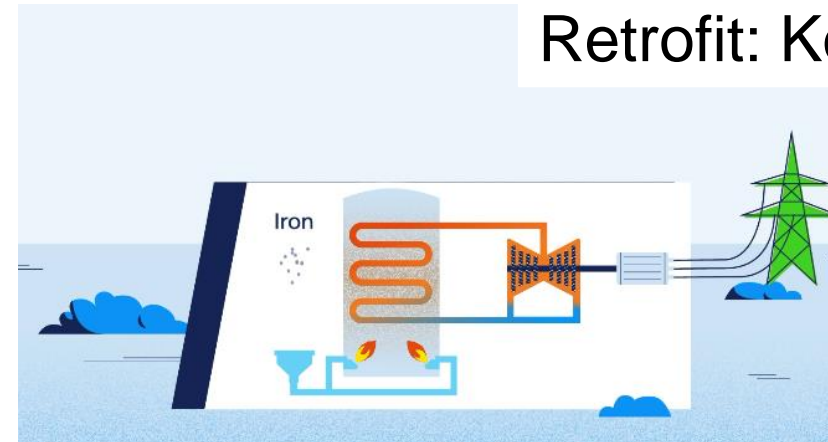
KLIMANEUTRALE UMRÜSTUNG



CO₂-freie Stromerzeugung nach Bedarf (Reserve- und Grundlastkraftwerke)



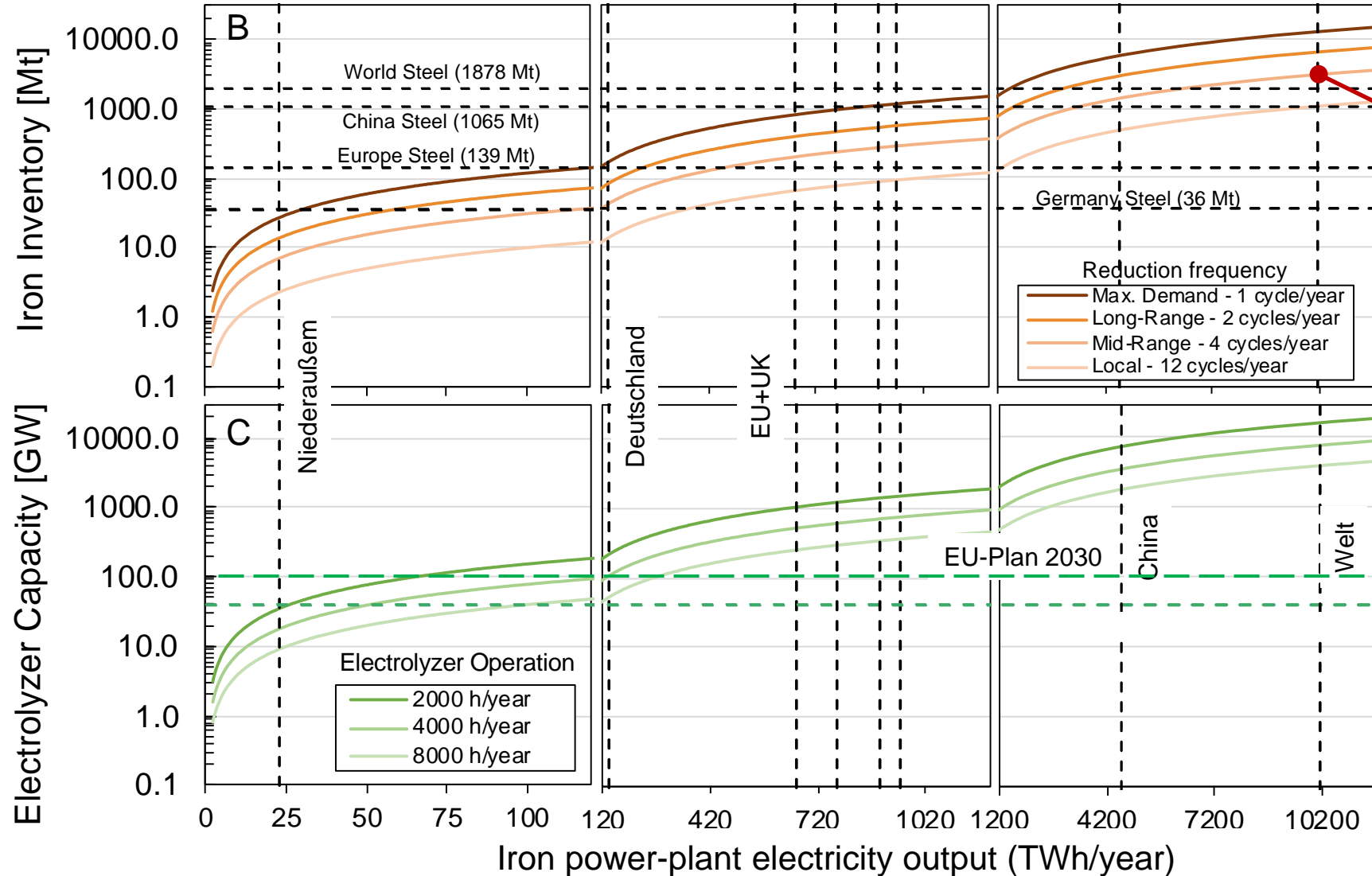
Kohlekraftwerk



Retrofit: Kohle → Eisen

- Weiternutzung bestehender Kraftwerke und Transportinfrastruktur ist möglich.
- Thermische Wirkungsgrade sind vergleichbar mit Kohle – weiteres Optimierungspotenzial.
- Anpassungen für Brennstoffzufuhr, Kessel und Abgasreinigung/Entstaubung ist notwendig.
- Dampferzeuger und Turbinen können weitergenutzt werden.

HABEN WIR GENUG EISEN?



Weltweite Umrüstung aller Kohlekraftwerke:

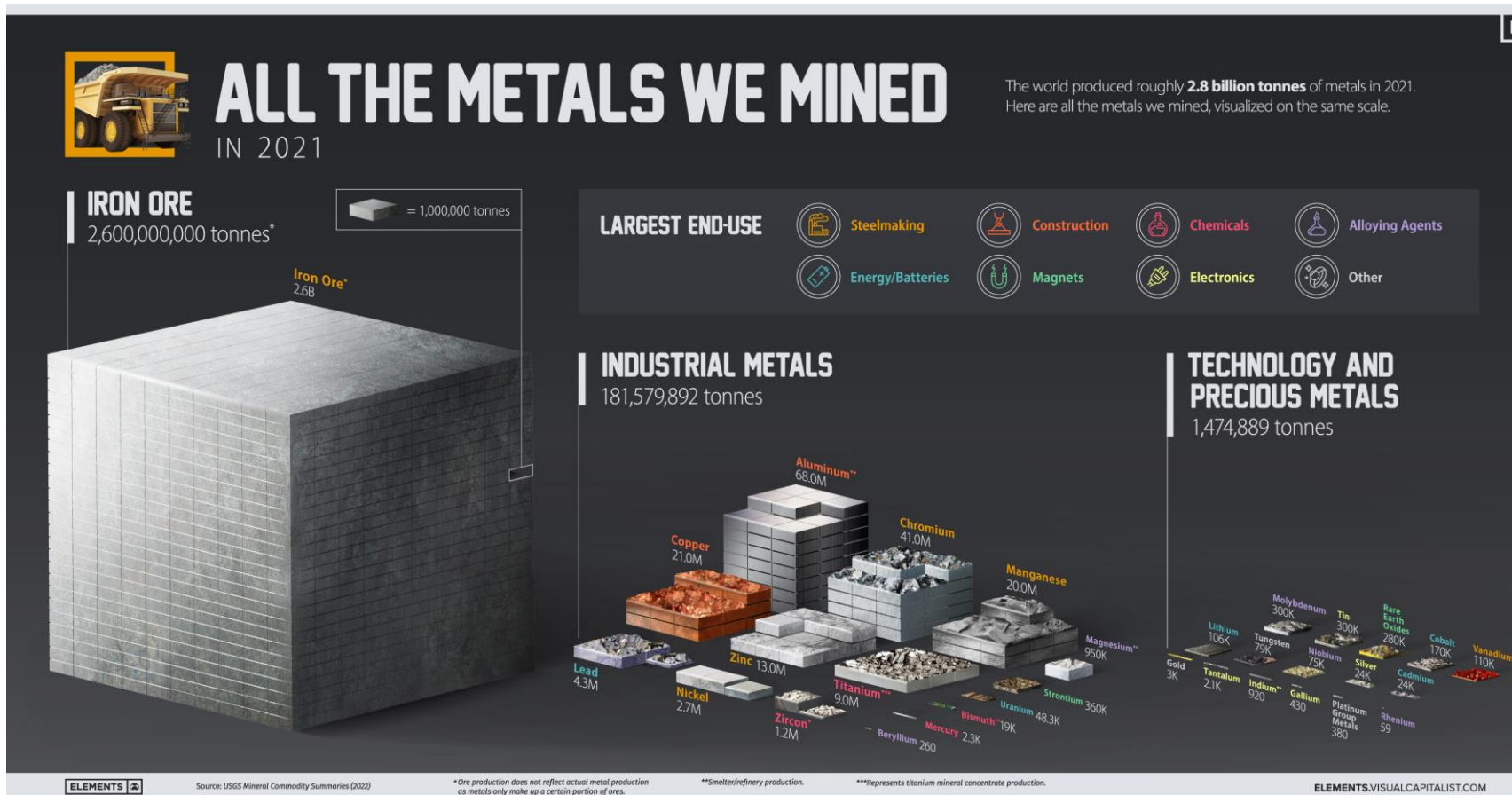
- 4 Zyklen/Jahr: ~2.5 Gt Eiseninventar nötig

P. Debiagi, R. C. Rocha, A. Scholtissek, J. Janicka, and C. Hasse, "Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, p. 112579, Sep. 2022, [10.1016/j.rser.2022.112579](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112579).

ES GIBT GENUG EISEN



Berechnung des Eisenbedarfs für eine weltweite Umrüstung von Kohlekraftwerken

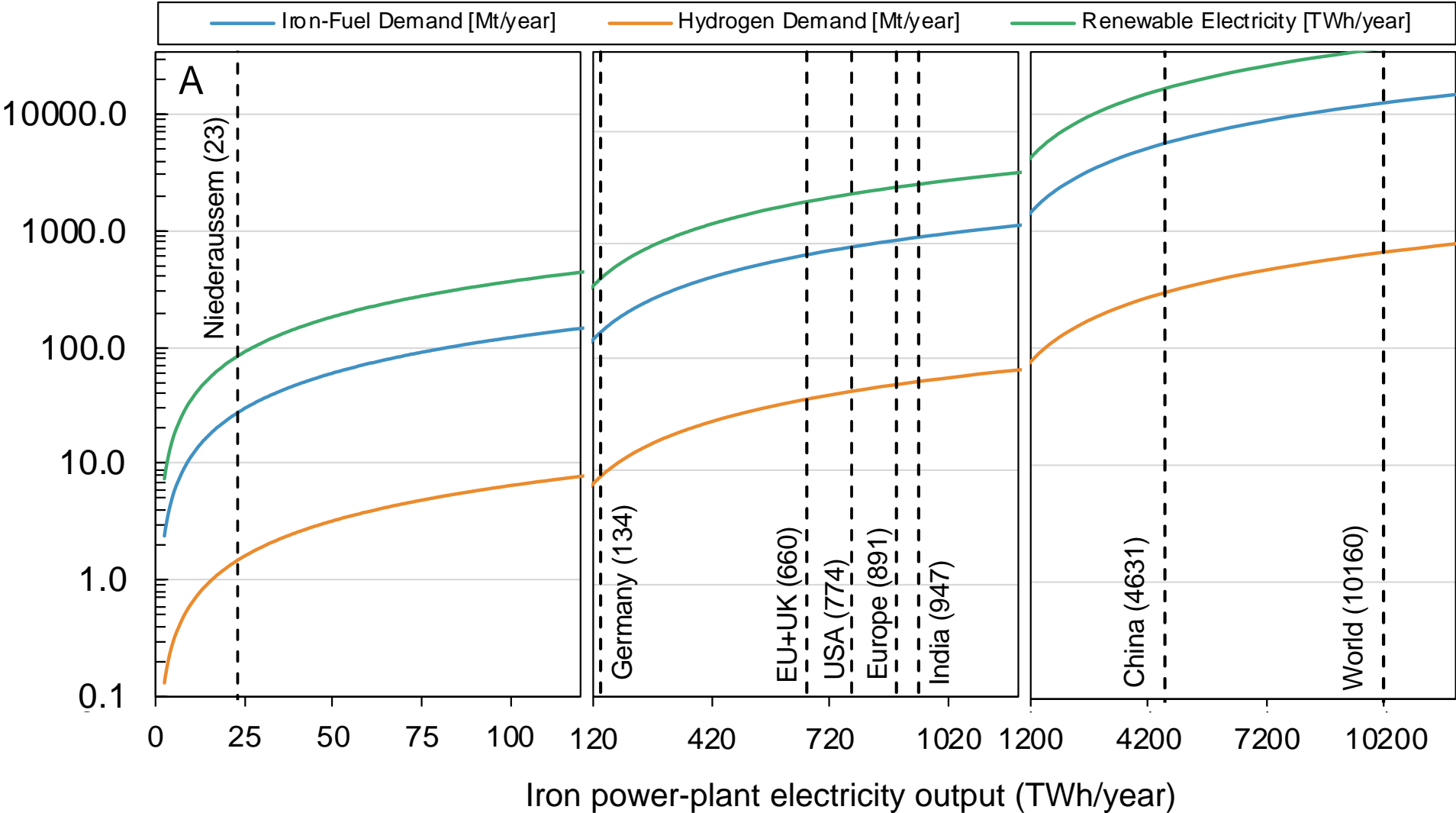


- ~2.5 Gt Eiseninventar nötig (4 Zyklen/Jahr)
- 20 Jahre Übergangszeit
- Eisenproduktion muss einmalig um 5-6% steigen (und dann auf konstantem Level bleiben)

NACHFRAGE NACH H₂, ERNEUERBAREN ENERGIEN UND EISEN IM KREISLAUFSYSTEM

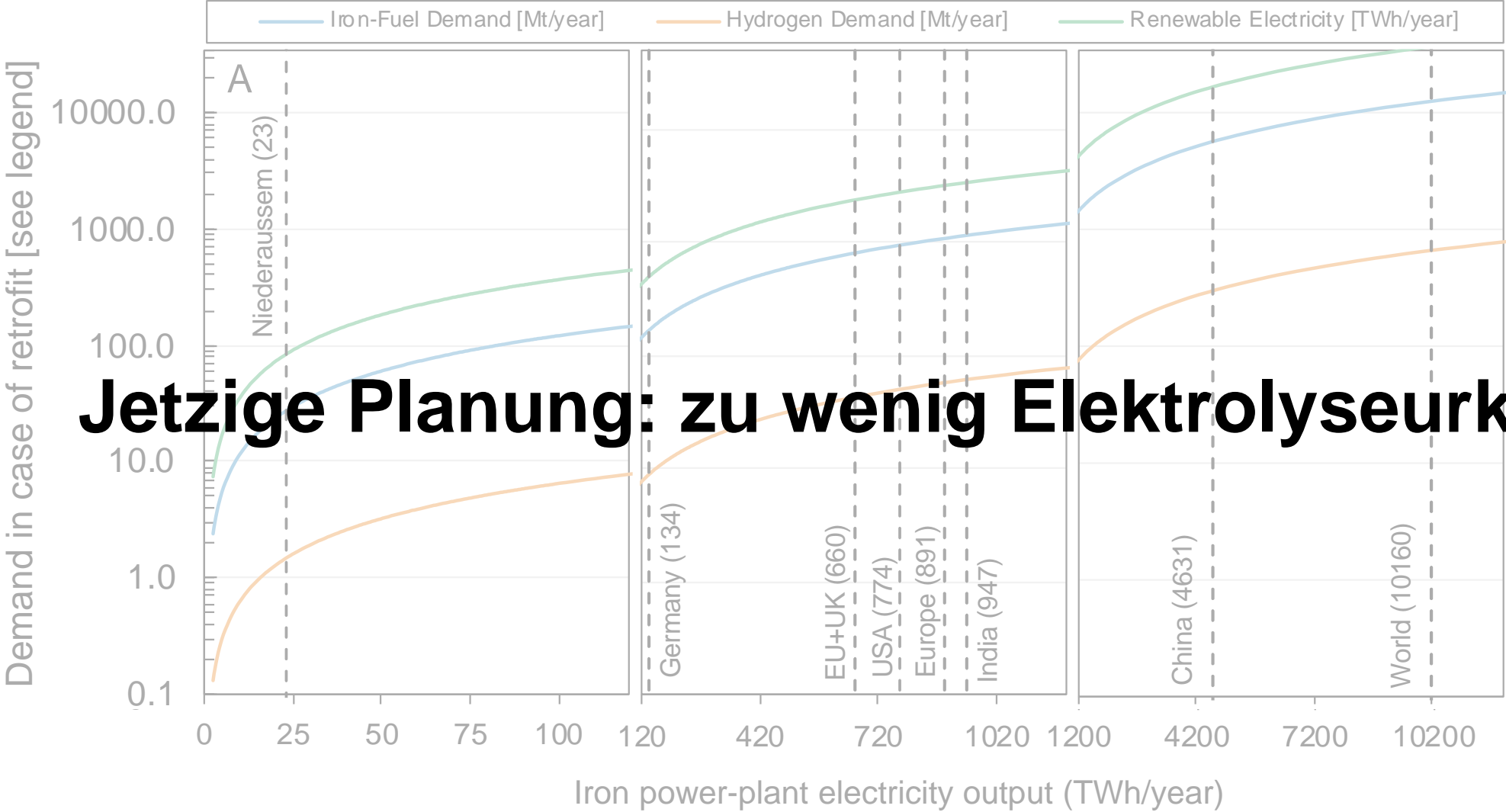


Demand in case of retrofit [see legend]



P. Debiagi, R. C. Rocha, A. Scholtissek, J. Janicka, and C. Hasse, "Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, p. 112579, Sep. 2022, [10.1016/j.rser.2022.112579](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112579).

NACHFRAGE NACH H₂, ERNEUERBAREN ENERGIEN UND EISEN IM KREISLAUFSYSTEM



P. Debiagi, R. C. Rocha, A. Scholtissek, J. Janicka, and C. Hasse, "Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, p. 112579, Sep. 2022, [10.1016/j.rser.2022.112579](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112579).

BEISPIEL NIEDERAUßEM

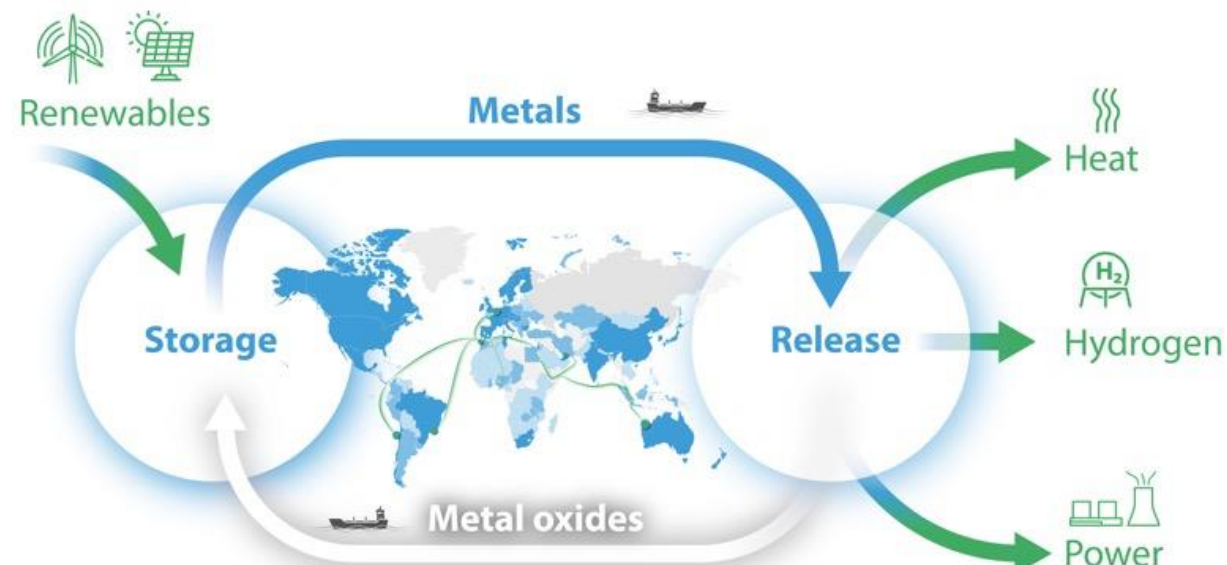


Beispiel Retrofit:

- Niederaußem Kohlekraftwerk: 3.6 GW | 23 TWh/a
- H₂ Bedarf zur Fe₂O₃-Reduktion: 1.5 Mt/a
- Elektrolyseur-Kapazität¹: **17.9 GW**
- Bedarf erneuerbarer Energien: 71.6 TWh

¹ 4000 h/a

EU 2030
target: 100GW



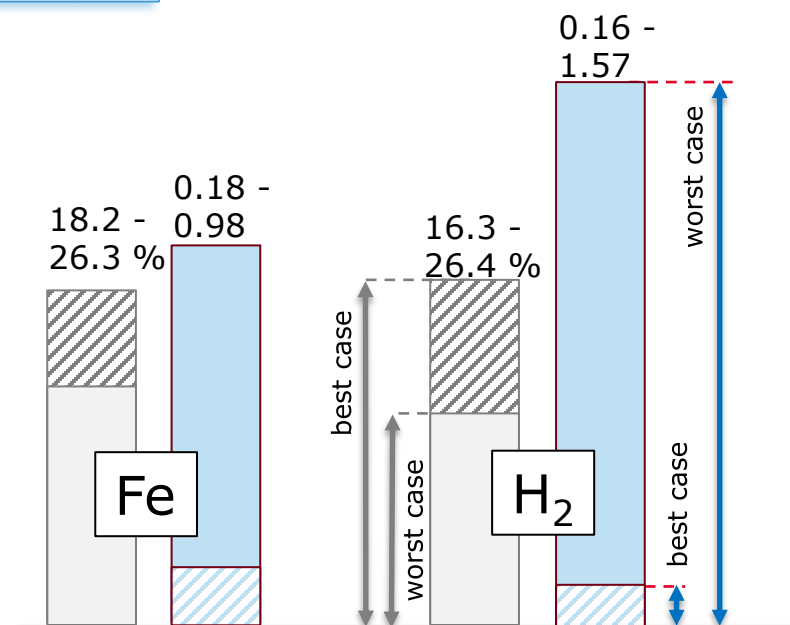
Transport ist nicht die Hürde

- Der Transport von Eisen von Marokko nach Mitteleuropa benötigt ~3 % der gespeicherten Energie
- Eisen kann gegenüber H₂ wettbewerbsfähig sein
→ Die höheren Produktionskosten und der höhere Energiebedarf werden durch günstige Lager-, Transport- und Umrüstungsmöglichkeiten überkompensiert.

EFFIZIENZ UND KOSTEN



Port Hedland – Hamburg



VERGLEICHSGRÖßEN

- Power to Power – round trip efficiency
- Stromgestehungskosten inkl. Erzeugung EE, Einspeicherung, Transport, Ausspeicherung, Rücktransport



Effizienz Power to Power

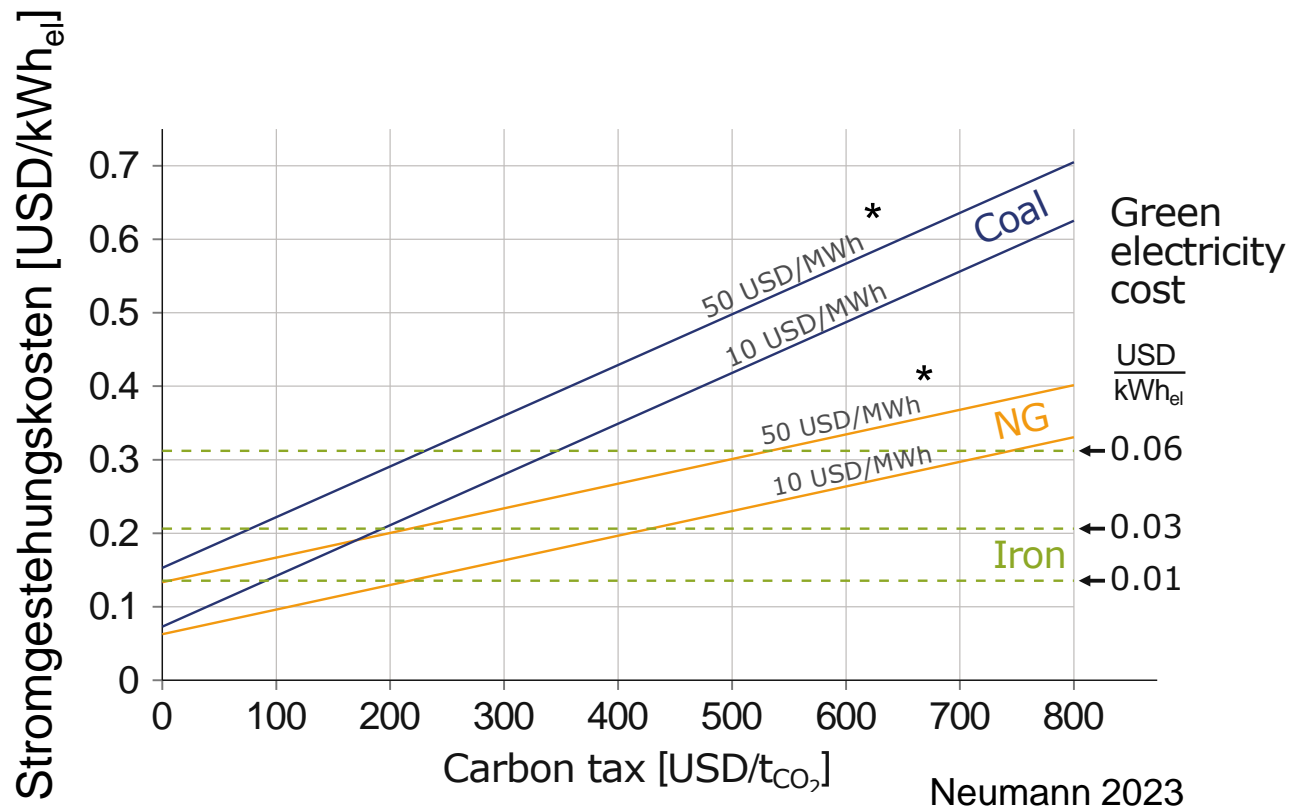


Stromgestehungs-
kosten USD/kWh_{el}

EISEN UND WASSERSTOFF SIND KOMPLEMENTÄR

- Eisen kann über lange Zeiträume gelagert und über weite Distanzen transportiert werden.
- Vorhandene Infrastruktur kann mit Eisen für Reservekapazität und Grundlast umgerüstet werden.

EINFLUSS DES CO₂-PREISES



1. Die Kosten der erneuerbaren Energien sind entscheidend
2. Bei sehr wettbewerbsfähigen Preisen (0,01 USD/kWh, z. B. Saudi-Arabien) ist Eisen mit ~100 USD/t_{CO₂} im Vergleich zu Kohle im Vorteil.
3. Bei moderaten Preisen (0,03 USD/kWh_{el}), bei ~200 USD/t_{CO₂}
4. Die Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu Erdgas erfordert einen doppelt so hohen CO₂-Preis.

CO₂-Abgabe in Deutschland (2024): 45 €/t_{CO₂} (ab 2025 55 €/t_{CO₂})

1 **ZUSAMMENFASSUNG – EISEN ALS ENERGIETRÄGER**



VORTEILE

- Langfristige Speicherung und Transport von Energie
- Relativ einfache Lagerung und Transport
- Wärme für Hochtemperaturprozesse (bis zu $>1500^{\circ}\text{C}$)
- Emissionen: Kein CO_2 und SO_x , wenig NO_x
- Weiternutzung existierender Infrastruktur (Retrofit)
- Wettbewerbsfähige Effizienz
- Weitere Sektorkopplung möglich (Wet Cycle: H_2 + Wärmeproduktion)
- Kein Export von Wasser (H-Atomen) aus trockenen Regionen nötig
- Ungiftig, nicht umweltgefährdend

NACHTEILE

- Kapazität der (H_2) Elektrolyseure ist Engpass für die grüne thermochemische Reduktion
- Globale Energiewirtschaft mit einem internationalen Netzwerk an Partnern erforderlich

OFFENE FORSCHUNGSFRAGEN

- Verbrennungsführung und –Design in technischen Feuerungen
- Kreislauffähigkeit
- Realisierung der elektrochemischen Reduktion
- Sicherheitsbedenken im Zyklus im industriellen Maßstab (Explosivität, Nanopartikel)

Die Umsetzung des Eisenkreislaufs ist herausfordernd, aber möglich

CLEAN CIRCLES



Gefördert vom Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst (HMWK), dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

- Förderung 15 Mio. €
- 4 Jahre Laufzeit 04/2021-03/2025
- 30 Teilprojekte & PIs
- 60 Doktorand:innen & PostDocs
- 7 Orte & Institutionen



Spokesperson

Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse
Simulation of reactive Thermo-Fluid Systems
 Technical University of Darmstadt
hasse@stfs.tu-darmstadt.de



Spokesperson

Prof. Dr. Andreas Dreizler
Reactive Flows and Diagnostics
 Technical University of Darmstadt
dreizler@rsm.tu-darmstadt.de



Managing director

Dr.-Ing. Marius Schmidt
Simulation of reactive Thermo-Fluid Systems
 Technical University of Darmstadt
schmidt@rsm.tu-darmstadt.de



MAX-PLANCK-INSTITUT
 FÜR EISENFORSCHUNG GmbH



UNIVERSITÄT
 HEIDELBERG
 ZUKUNFT
 SEIT 1386

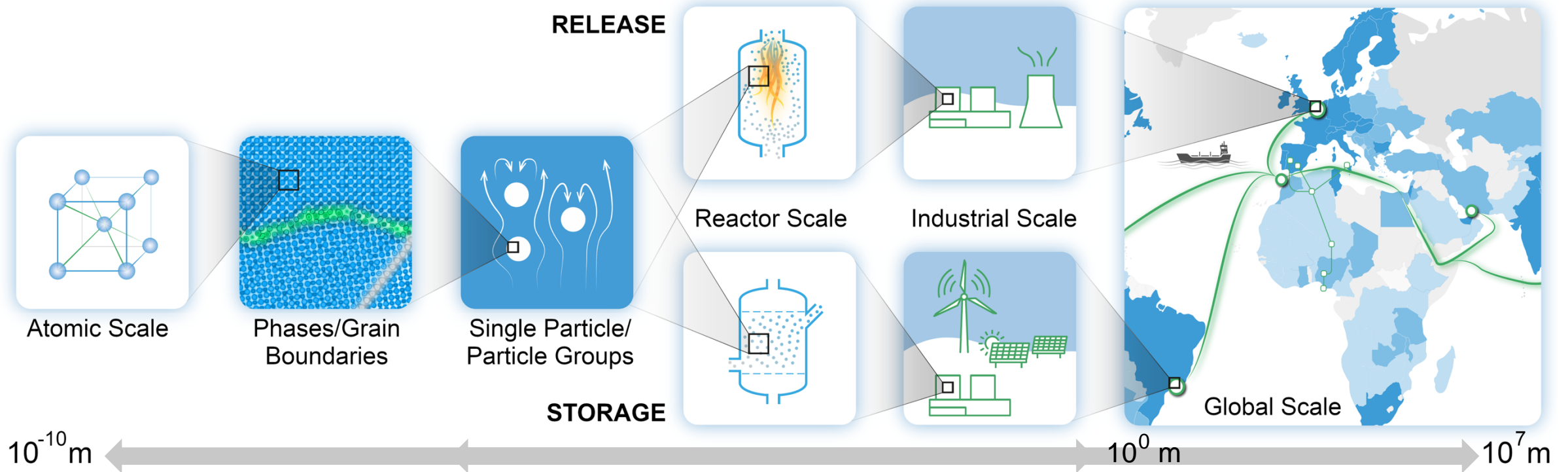


VOM ATOM ZUM SYSTEM



Forschungsverbund **Clean Circles**

Skalenübergreifender Ansatz – vom Atom bis zur globalen Energiewirtschaft



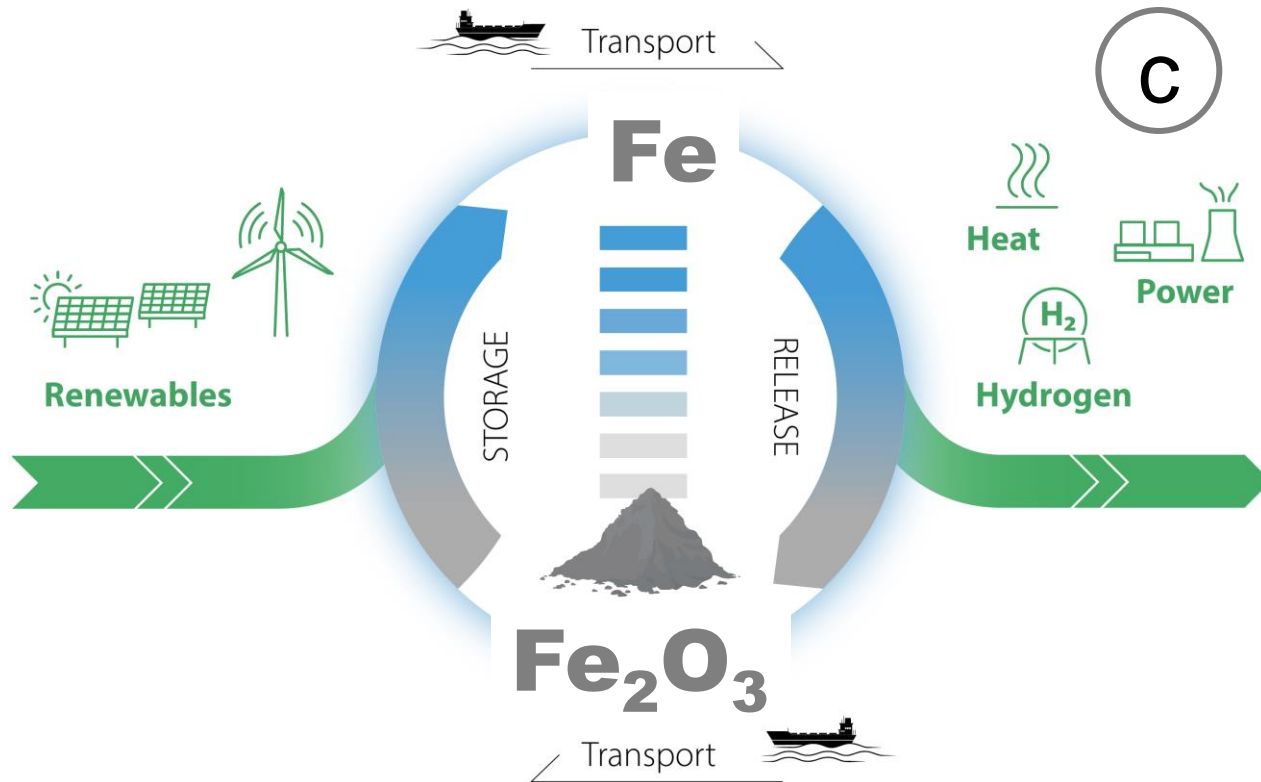
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR EISENFORSCHUNG GmbH



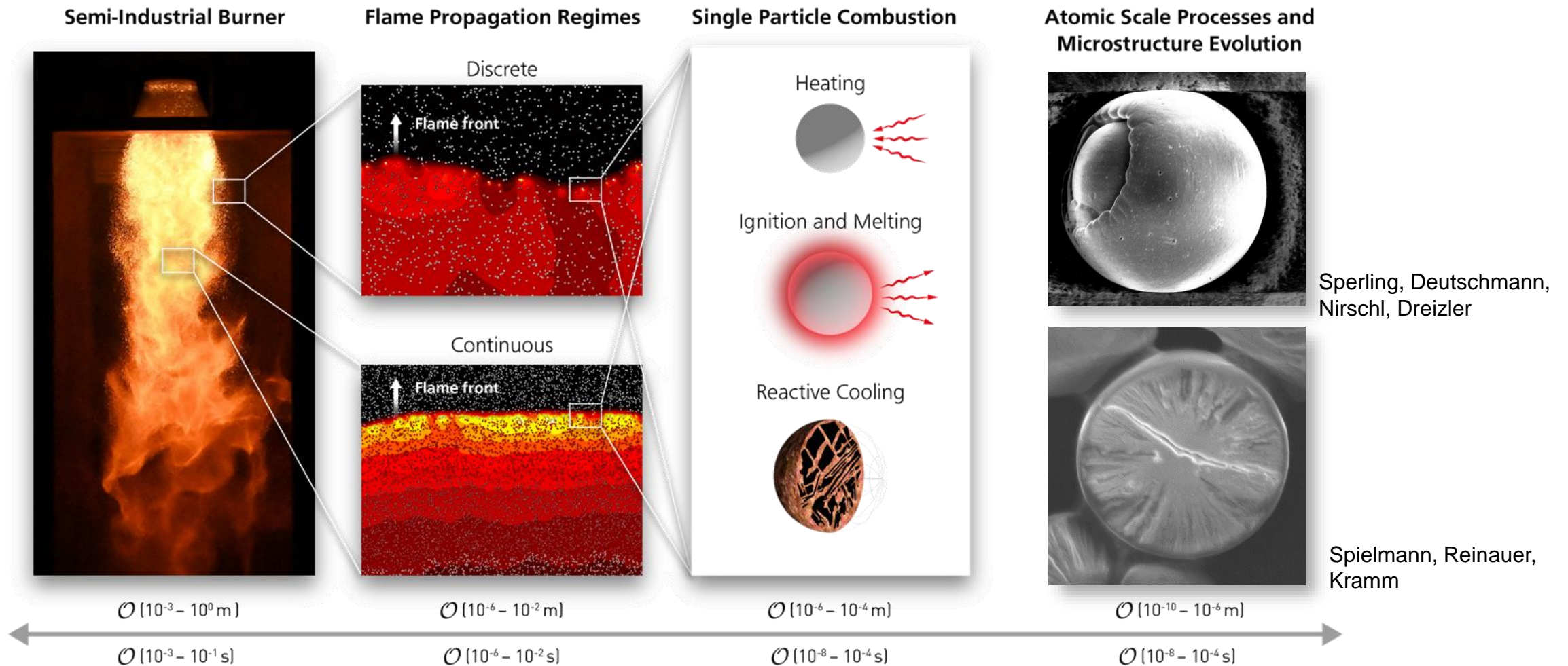
CO₂-FREIE – KREISLAUFWIRTSCHAFT



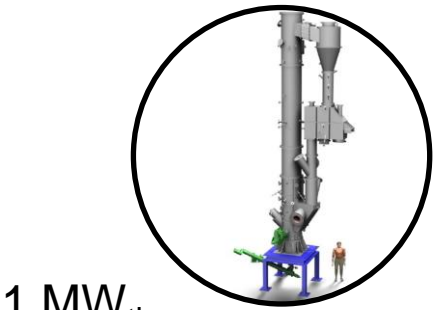
CO₂-FREIER KREISLAUF:

- a) Einspeichern durch Reduktion
- b) Lagerung/ Transport
- c) **Ausspeichern durch Oxidation**
- d) Recycling

GROßE SKALEN WERDEN DURCH PROZESSE AUF KLEINEN SKALEN BESTIMMT



VOM EINZELPARTIKEL ZUR STAUBFLAMME



1 MW_{th}

**Semi-
industriell**



**Turbulente
Flammen**



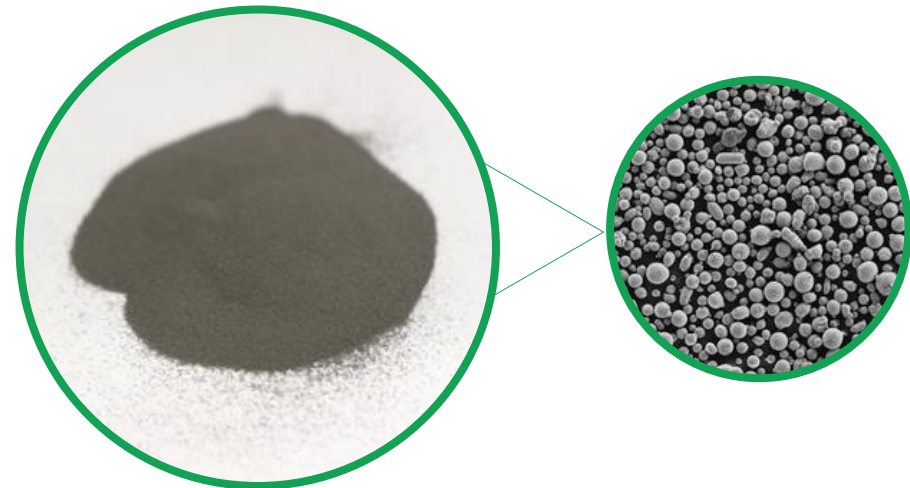
**Laminare
Flammen**



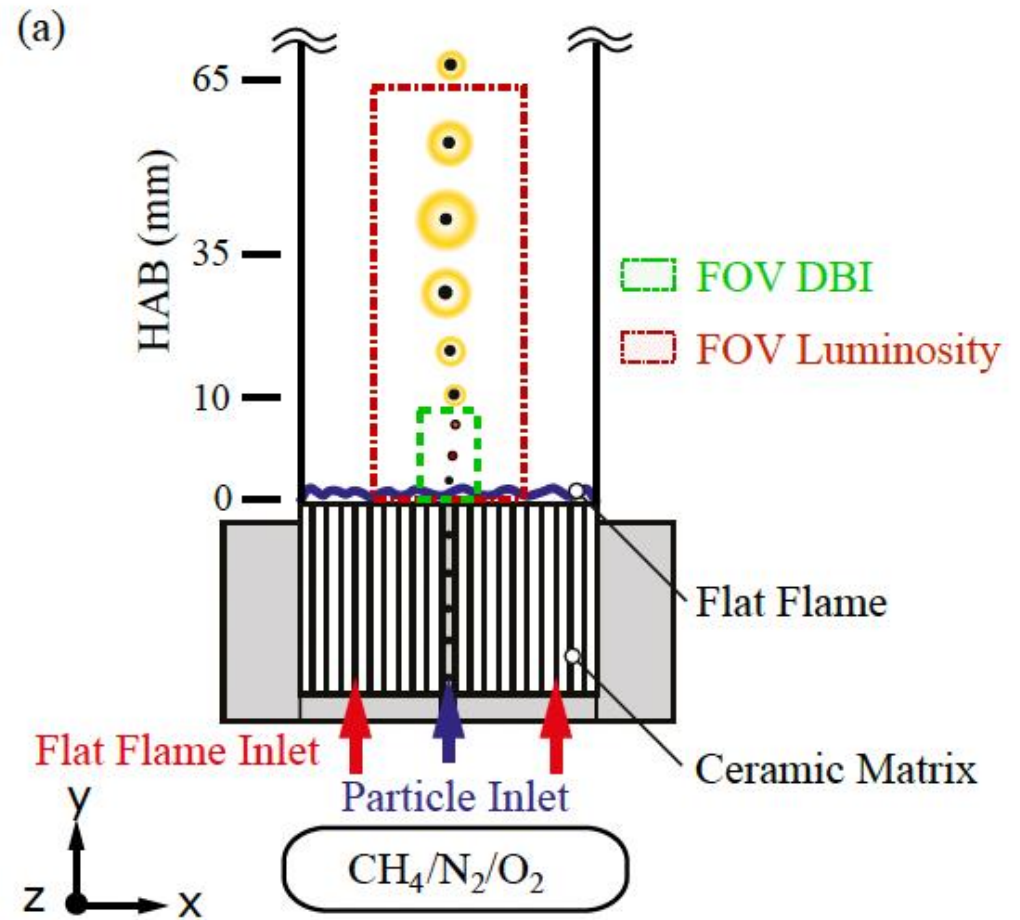
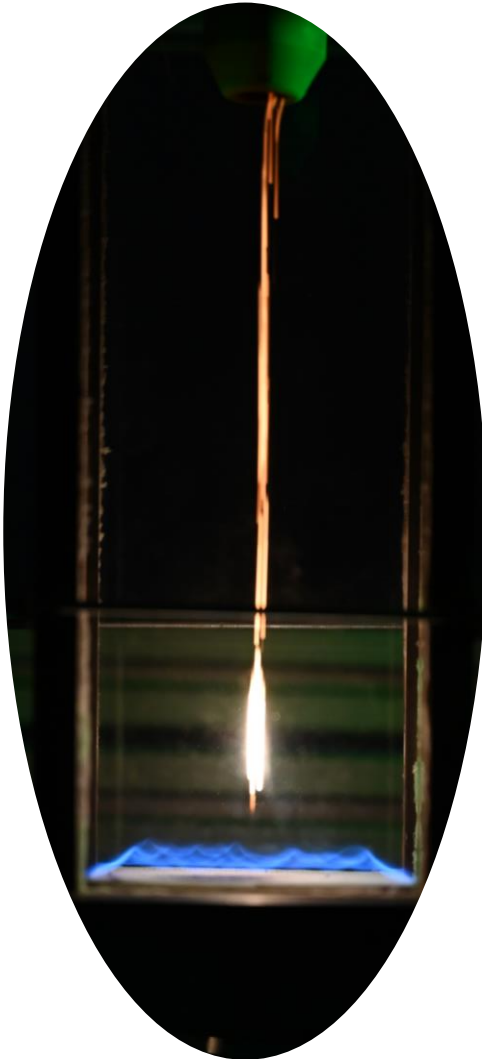
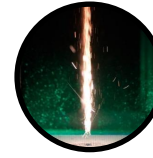
**Partikel-
Flammen**



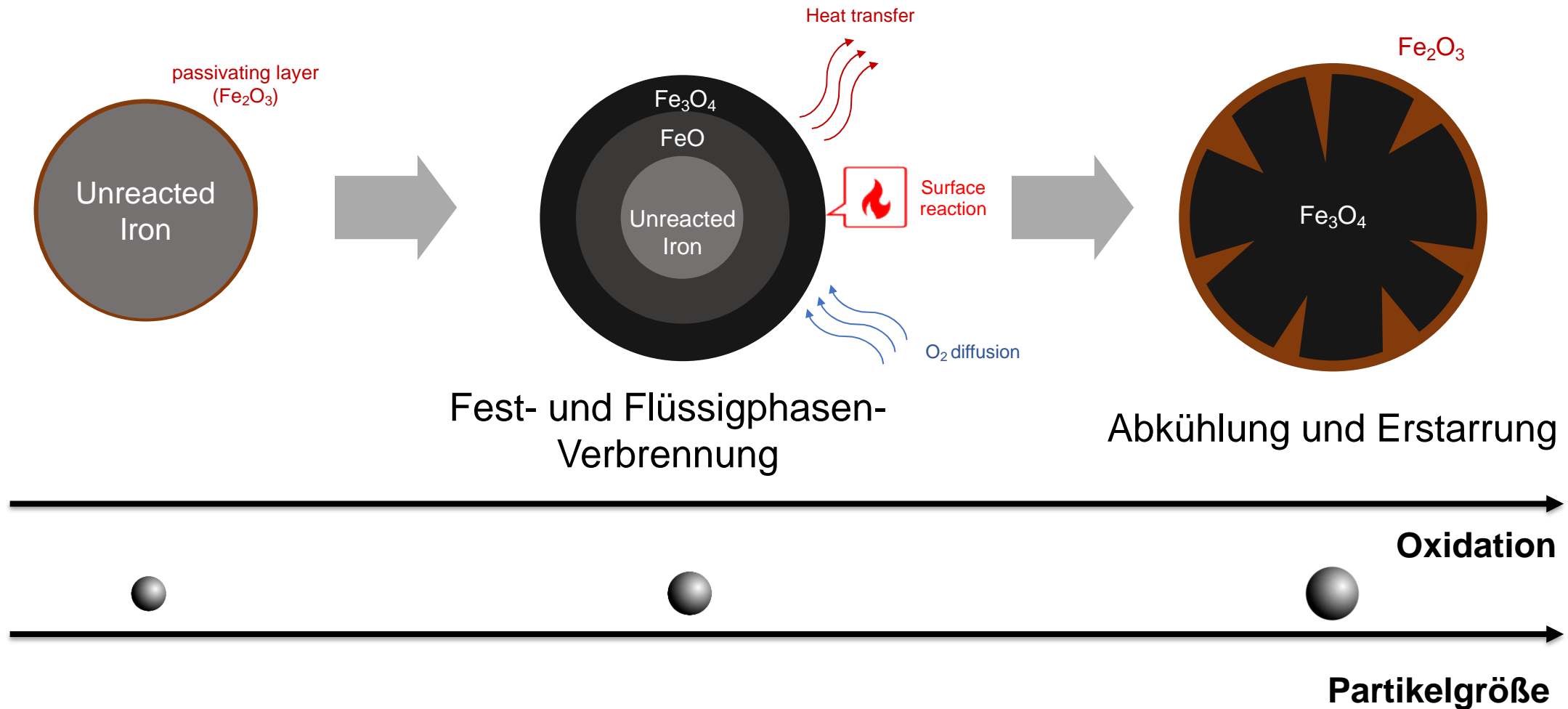
- Eisenpulver $< 50 \mu m$
- Staubfeuerung



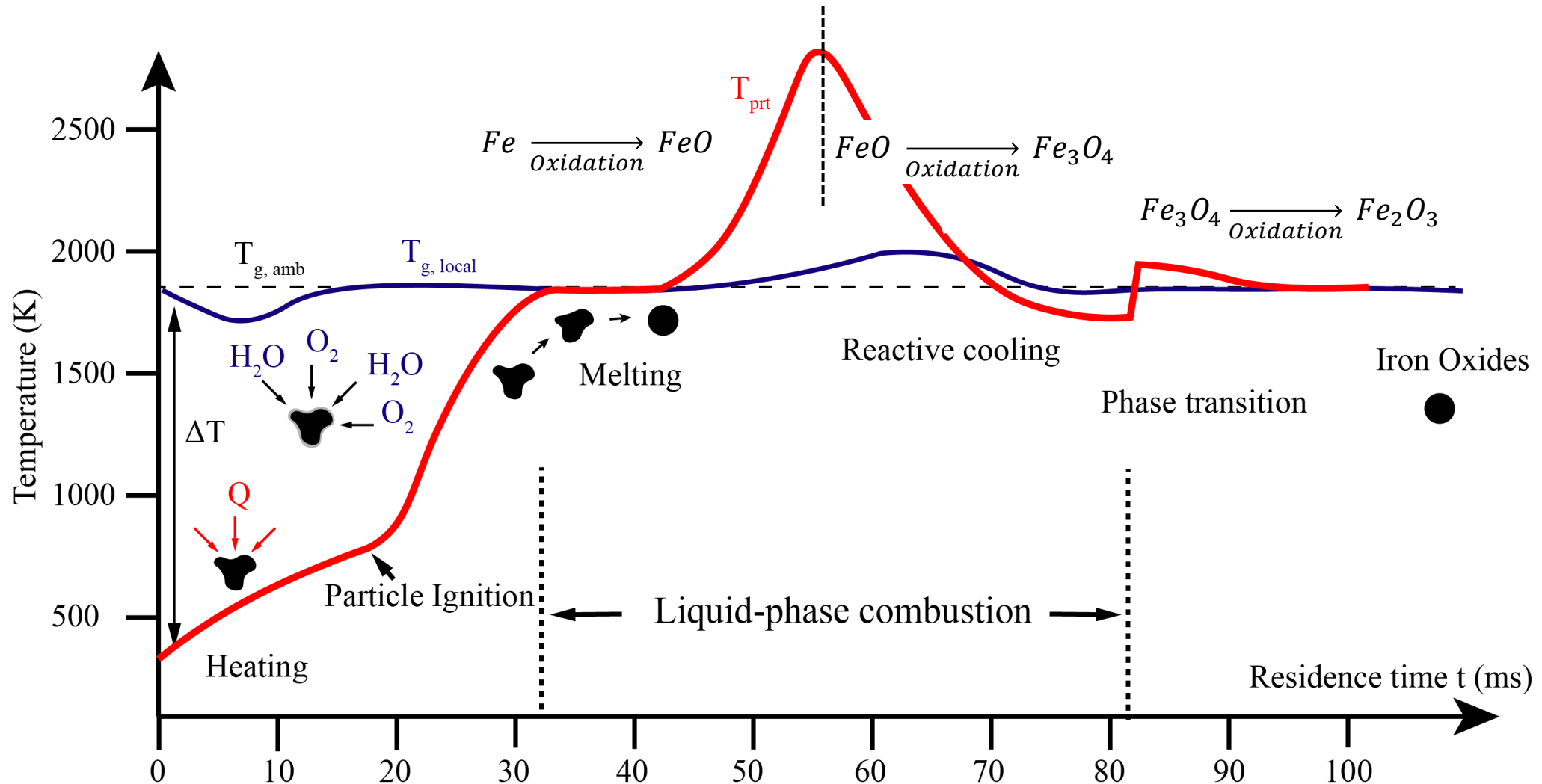
EINZELPARTIKELVERBRENNUNG



PHASEN DER EISENSTAUBVERBRENNUNG



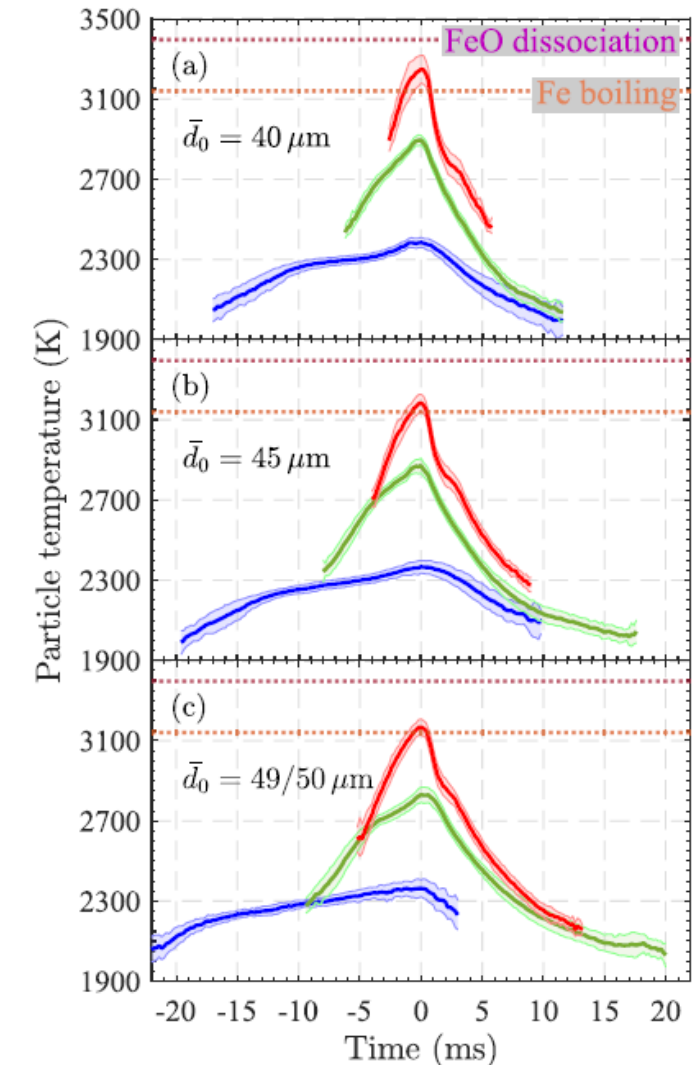
ZEITLICHER ABLAUF DER EISENVERBRENNUNG



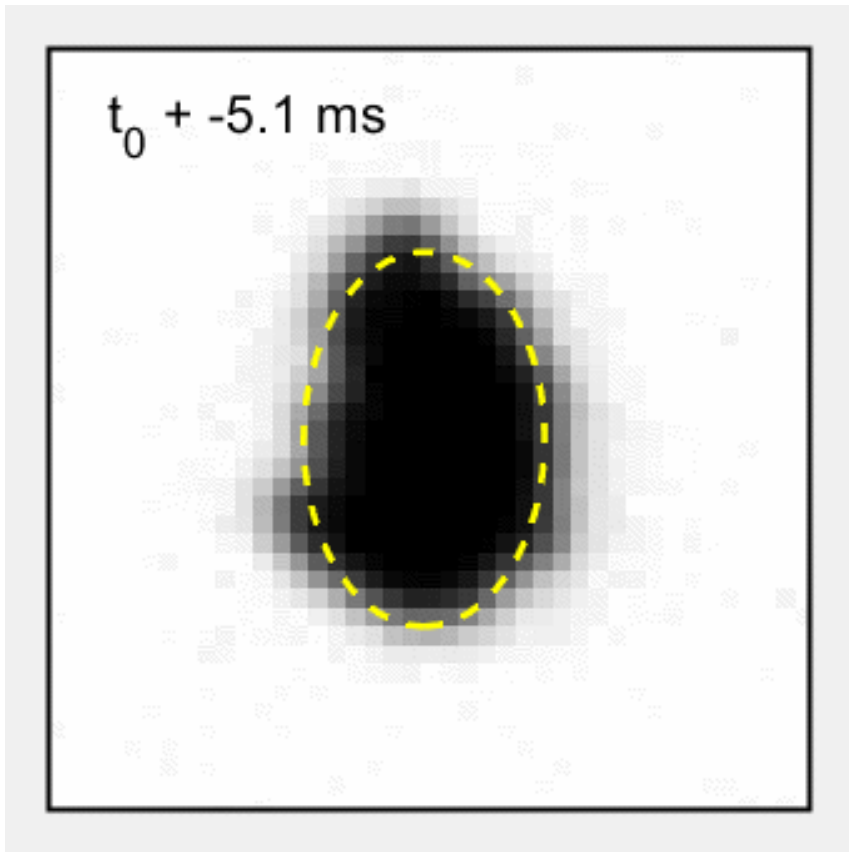
ZEITLICHER ABLAUF DER EISENVERBRENNUNG



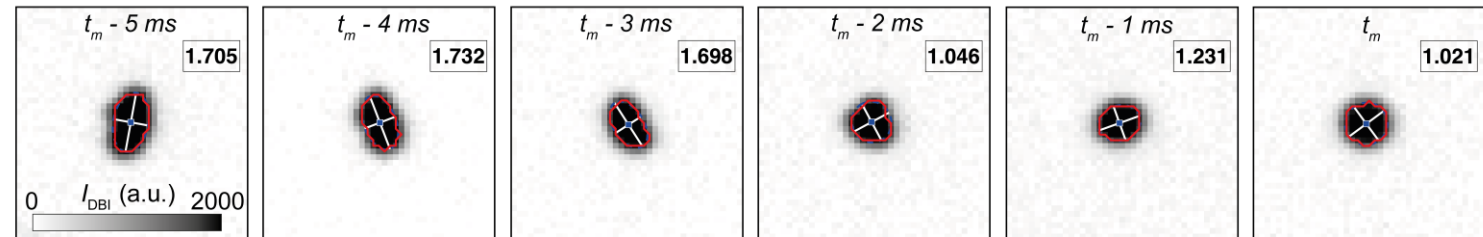
- Partikeltemperatur (T_p): Zwei-Farben Pyrometrie
- Zeit relativ zu $T_{p,max}$
- 3 Partikeldurchmesser (in-situ gemessen)
- 3 O_2 -Gaskonzentrationen (10, 20, 30 vol%; blau, grün rot)
 - Starke O_2 -Abhängigkeit
 - Geringe Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser



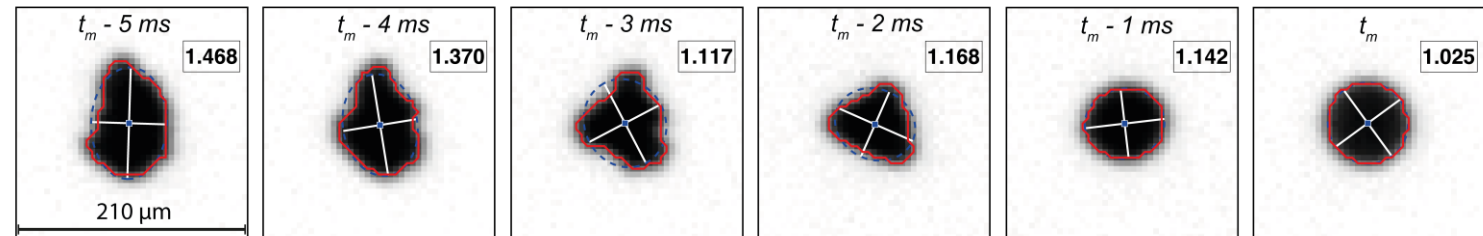
AUFHEIZEN UND SCHMELZEN



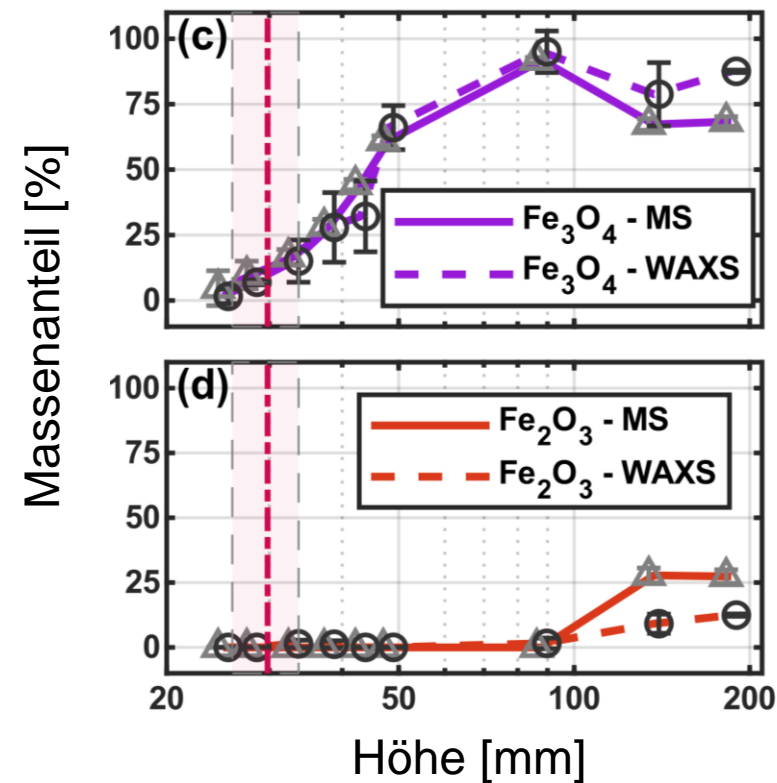
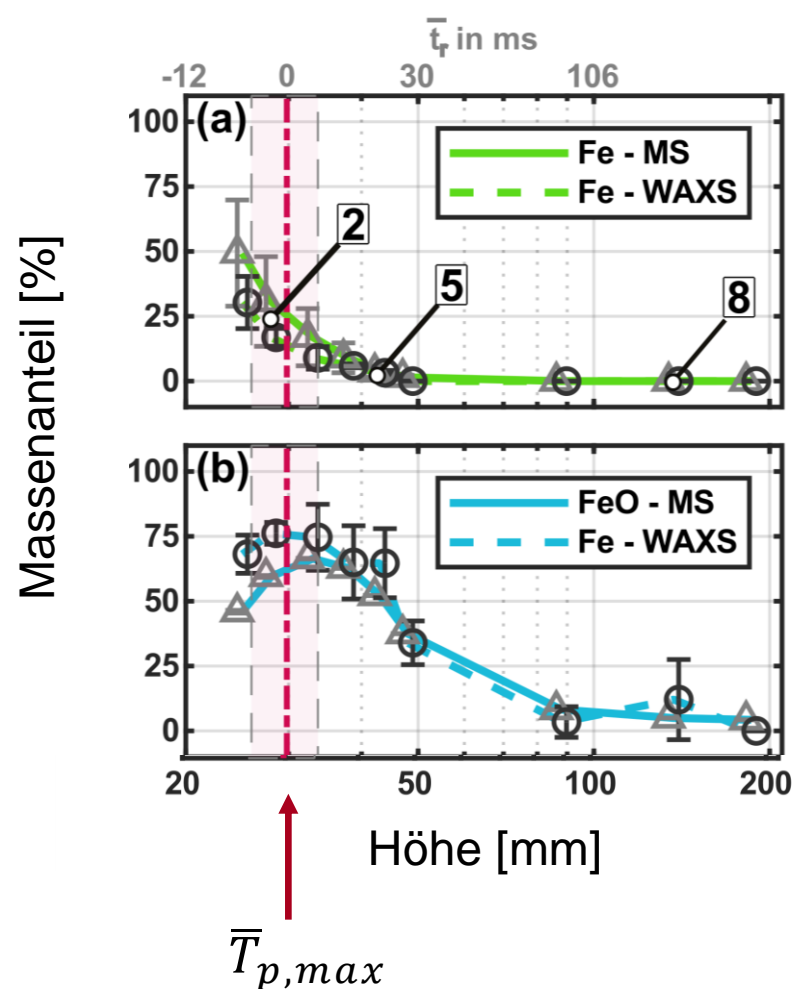
A
 $d_p = 39 \mu\text{m}$



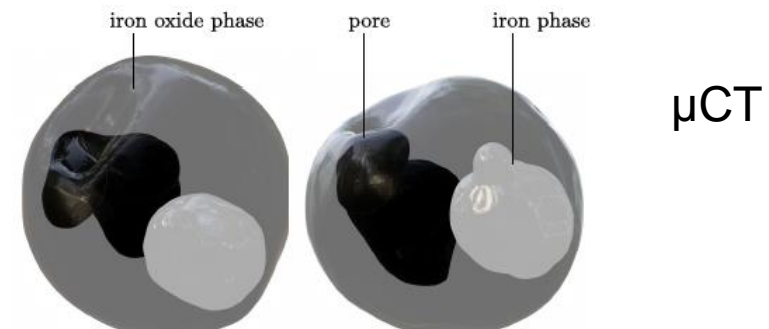
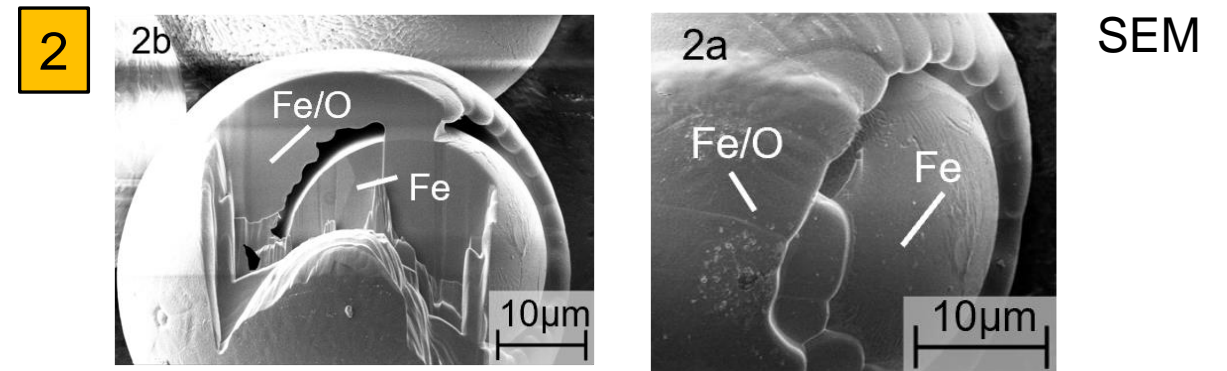
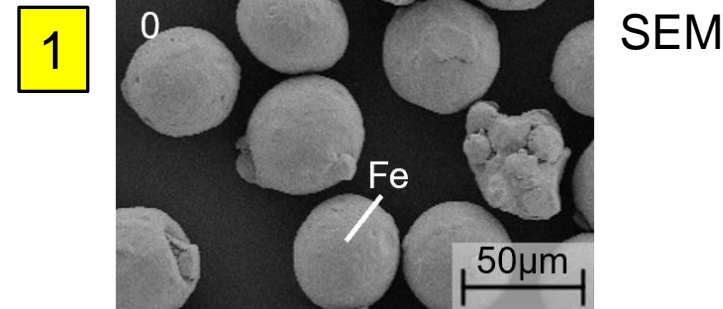
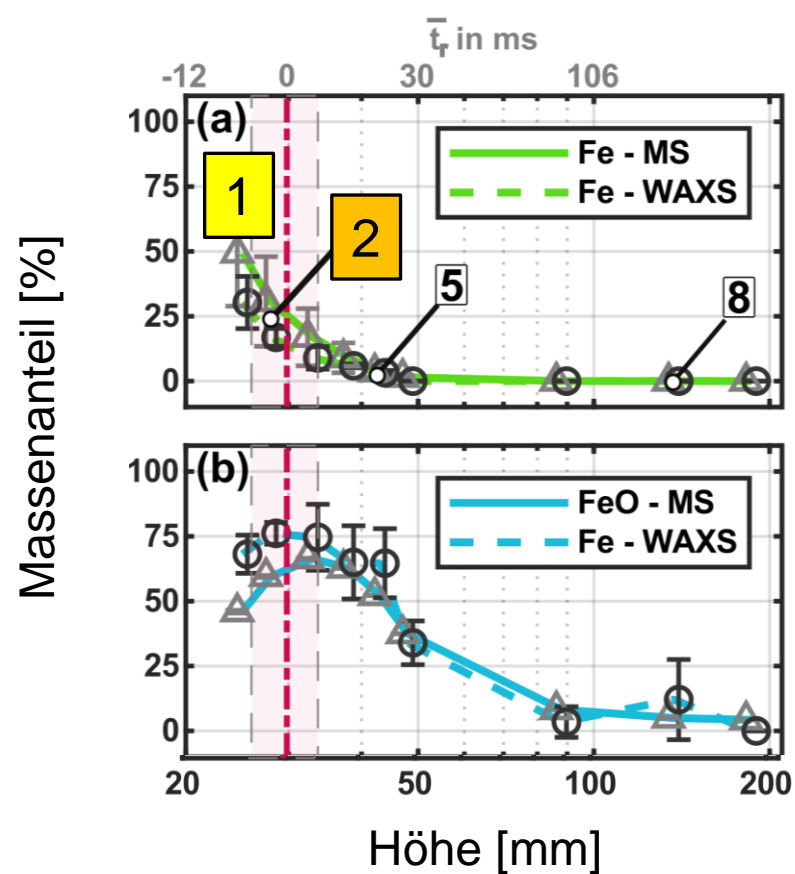
B
 $d_p = 75 \mu\text{m}$



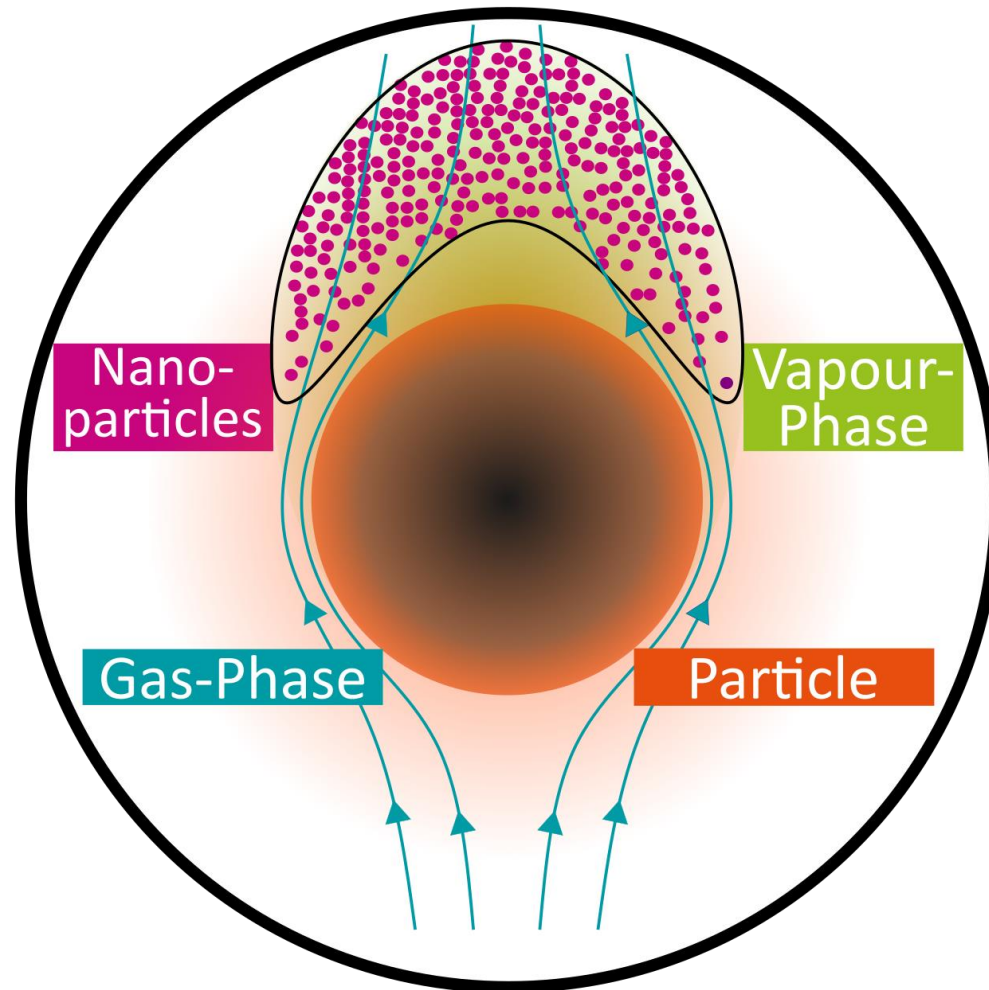
ZEITLICHE ENTWICKLUNG VON EISEN UND SEINEN OXIDEN



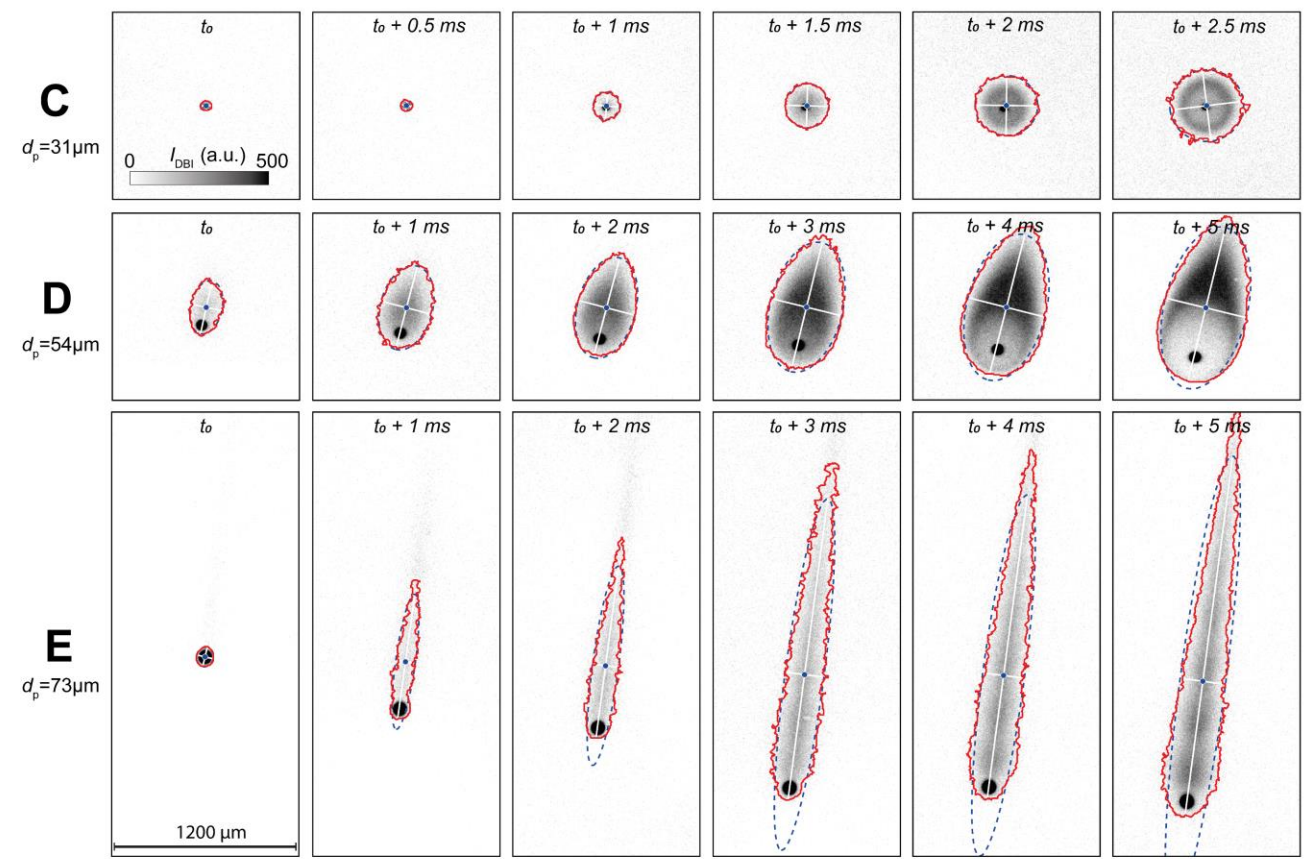
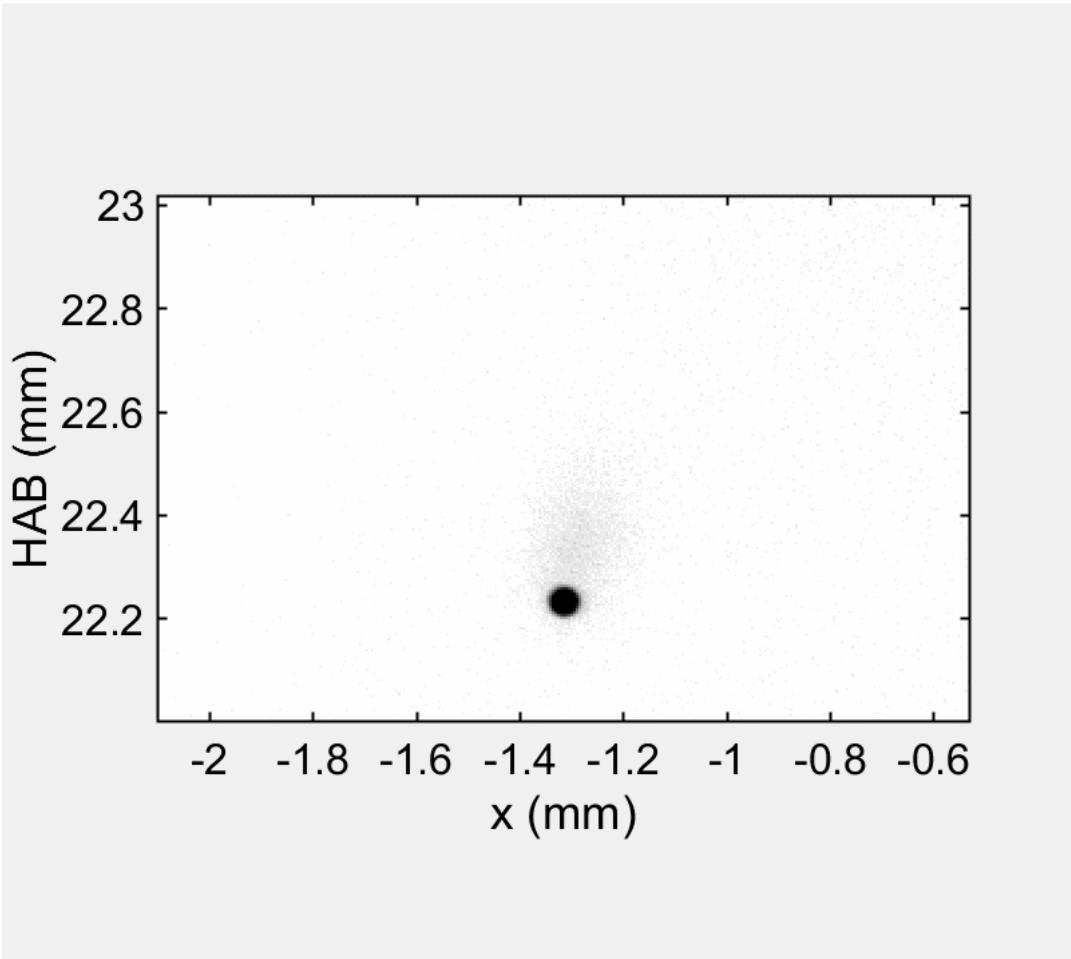
ZEITLICHE ENTWICKLUNG VON EISEN UND SEINEN OXIDEN



UNERWÜNSCHTE NANOPARTIKELBILDUNG



UNERWÜNSCHTE NANOPARTIKELBILDUNG



- 1** Iron Fuel: Der Eisen-Energie-Kreislauf
- 2** Wissenschaftliche Fragen zur Eisenstaubverbrennung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

