

CLEAN CIRCLES



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



MAX PLANCK INSTITUTE
FOR SUSTAINABLE MATERIALS



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386



Iron as energy carrier in a carbon-free circular energy economy



IRON IS THE NEW COAL

IRON AS ENERGY CARRIER IN A CARBON-FREE CIRCULAR ENERGY ECONOMY

KERNAUSSAGEN



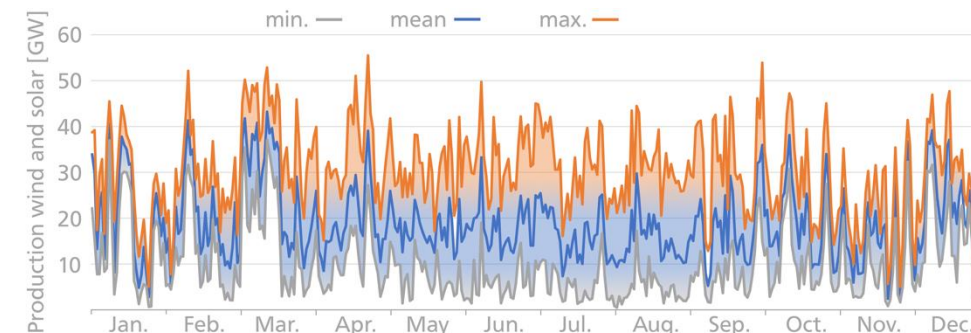
- 1** Das Energiesystem der Zukunft braucht unterschiedliche **Energiespeicher**.
- 2** **Metalle** sind für die Langzeitspeicherung großer Energiemengen geeignet.
- 3** **Klimaneutrale Umrüstung** von Infrastrukturen ist wichtig für die Energiewende.
- 4** **Grundlagenforschung und Demonstratoren** treiben gemeinsam den Fortschritt voran. Scale-up und Transfer durch Zusammenarbeit.

WARUM ENERGIE SPEICHERN?

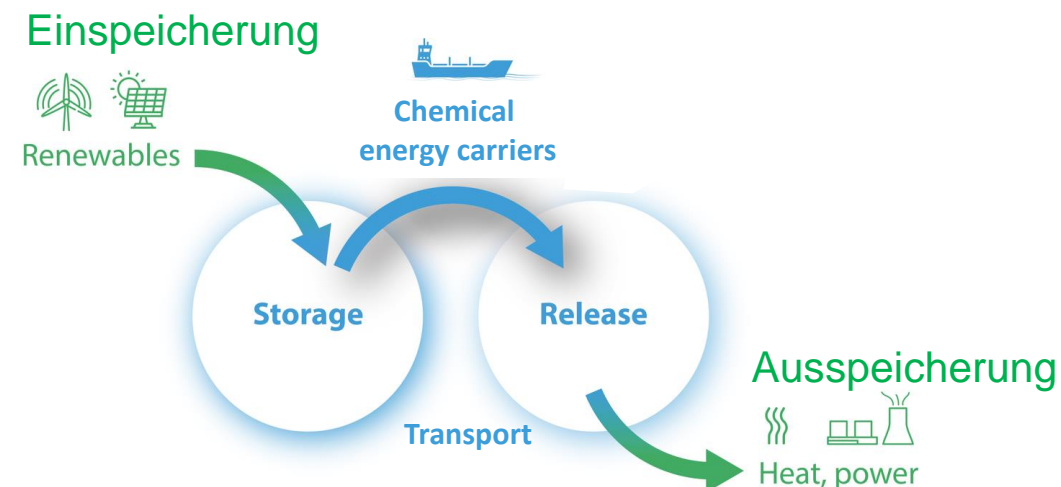


SPEICHERUNG:

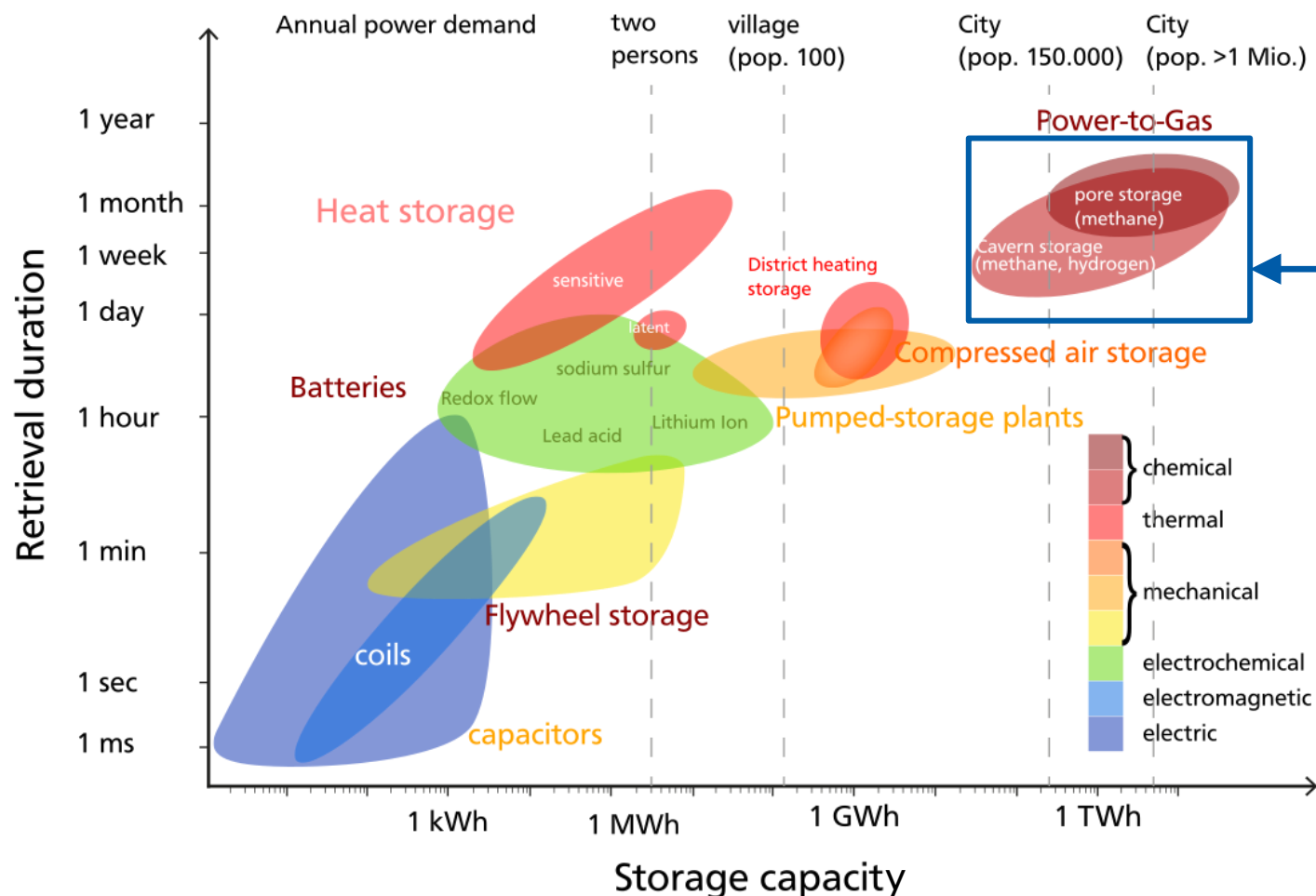
- Erneuerbare Energien sind sehr volatil und das Potenzial ist weltweit ungleich verteilt.
- Viele Länder inklusive Deutschlands werden auch zukünftig auf Energieimporte angewiesen sein.
- Einspeicherung, Transport und zeitversetzte Nutzung (Auspeicherung) an anderem Ort sind notwendig.
- Direkte langfristige (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



SPEICHERN, ABER WIE?



CHEMISCHE ENERGIESPEICHER:

- Hohe Speicherkapazität
- Hohe Ausspeicherdauer

Dreizler, A. et al., *Applications in Energy and Combustion Science*, 2021; adaptiert von Sterner und Stadler 2014

CHEMISCHE ENERGIESPEICHER

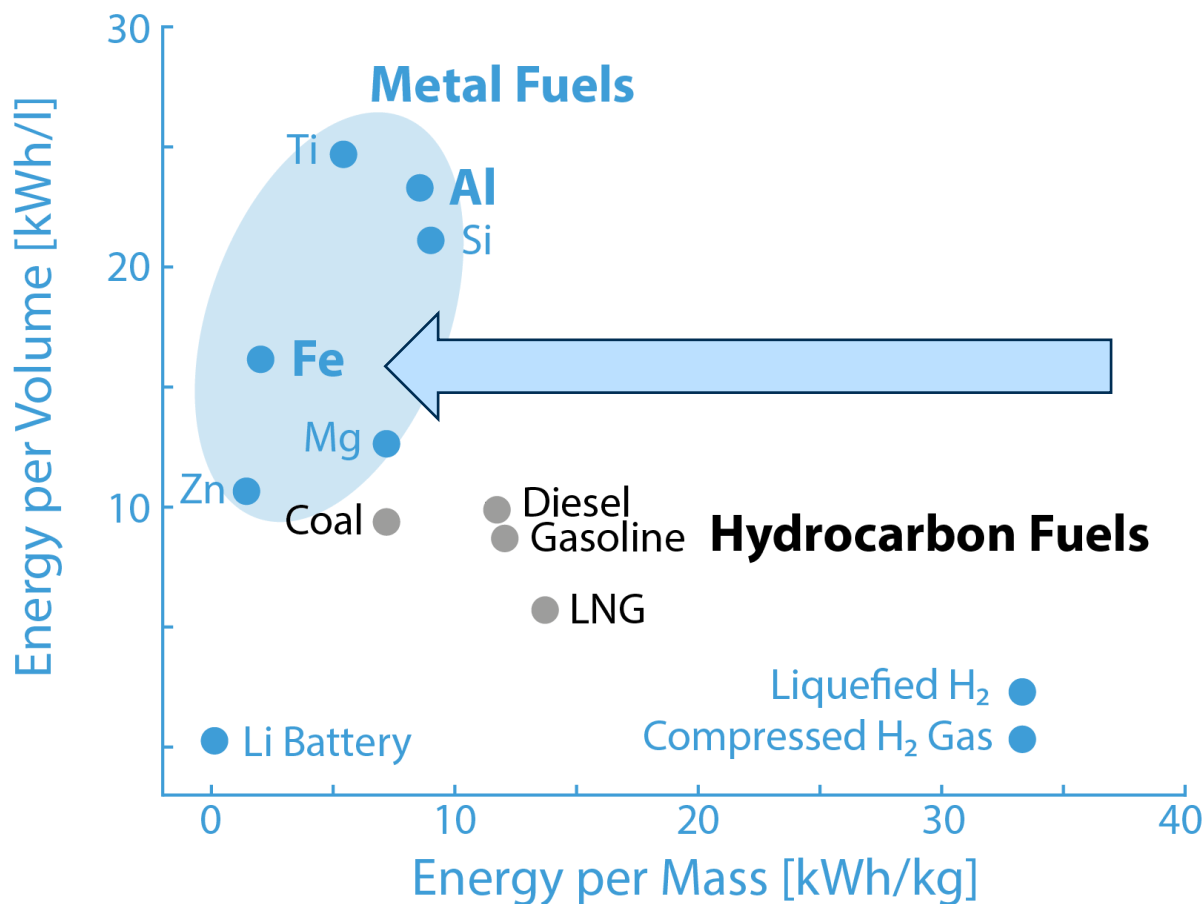


Einliterflaschen

*Herkunftsabhängig: 0,7-0,9 kg, 1,9-5,0 kWh

**Herkunftsabhängig: 1,2-1,6 kg, 8,3-15,8 kWh

CHEMISCHE ENERGIESPEICHER



EISEN

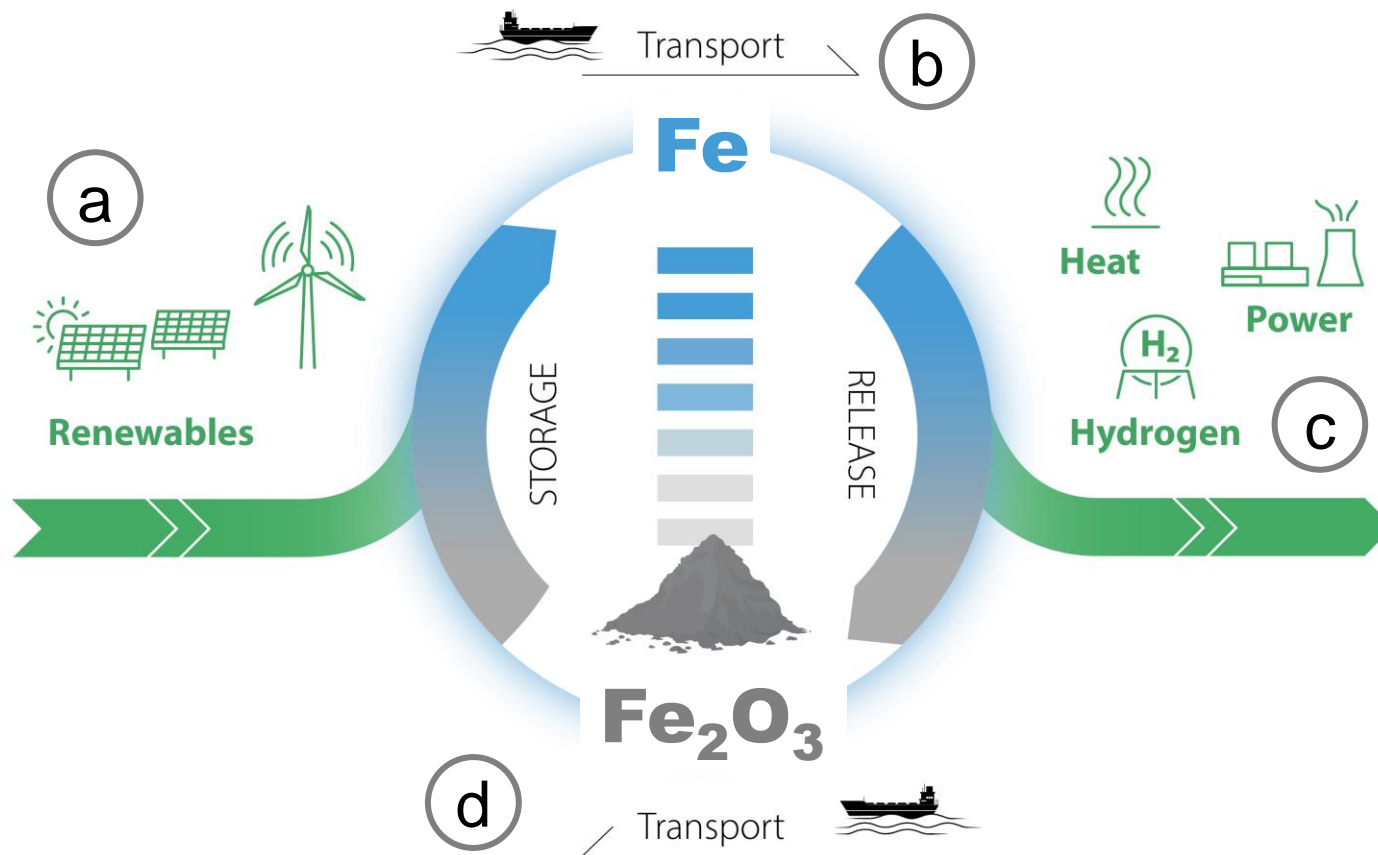
- Hohe Energiedichte
- Kontrolliert umsetzbar mit Luft und Wasser
- Nicht toxisch
- Kein kritischer Rohstoff
- Hochverfügbar und abbaubar
- Skalierbar in den TWh-Bereich

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

Debiagi, P., Rocha, R.C., Scholtissek, A., Janicka, J., Hasse, C. 2022: *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, 165:112579

CO₂-FREIE – KREISLAUFWIRTSCHAFT



CO₂-FREIER KREISLAUF:

a. Aufladen

Erneuerbare Energie wird durch Reduktion von Eisenoxid (Fe₂O₃) zu Eisen (Fe) eingespeichert.

b. Lagerung/ Transport

Das energiereiche Eisen wird gelagert bzw. an den Bestimmungsort transportiert.

c. Energiefreisetzung

Die Energie wird bedarfsgerecht durch Oxidation für die Strom-, Wärme- und H₂-Erzeugung wieder freigesetzt.

d. Recycling

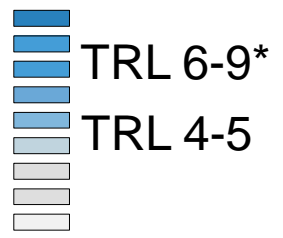
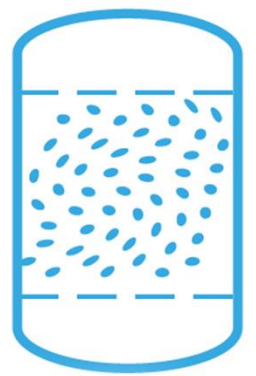
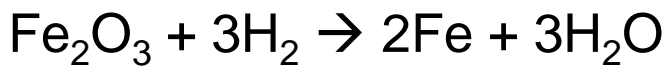
Das Produkt ist festes Eisenoxid, dieses wird zurücktransportiert für das Recycling, d.h. die Reduktion.

1. REDUKTION



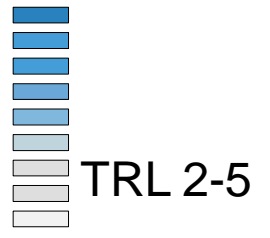
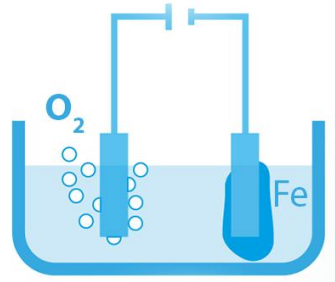
THERMOCHEMISCHE REDUKTION

- Reduction mit grünem Wasserstoff (aus Elektrolyse)
- In Durchfluss- und Wirbelschichtreaktoren
- 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“



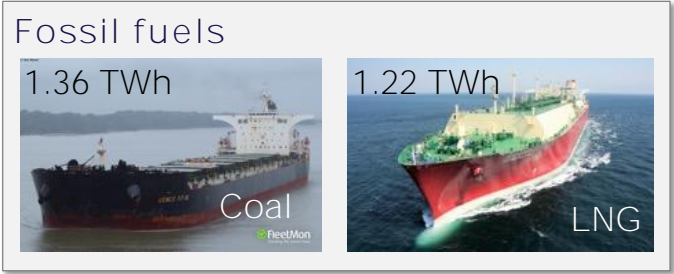
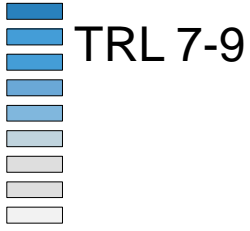
*Technology in commercial use for non-“Iron Power“ applications.
Roland Berger: *Iron Power* 09.2023

2. TRANSPORT



PER SCHIFF UND SCHIENE

- Etablierte Transportmethoden für Schüttgüter
 - Sicherheitsrichtlinien für reduziertes Eisen existieren
 - Inertialisierung in N₂-Atmosphäre
 - Dünne Passivierungsschicht mit NH₃ [1]
- Aktuell weitere Forschung zu Standardisierung und Sicherheitsaspekten



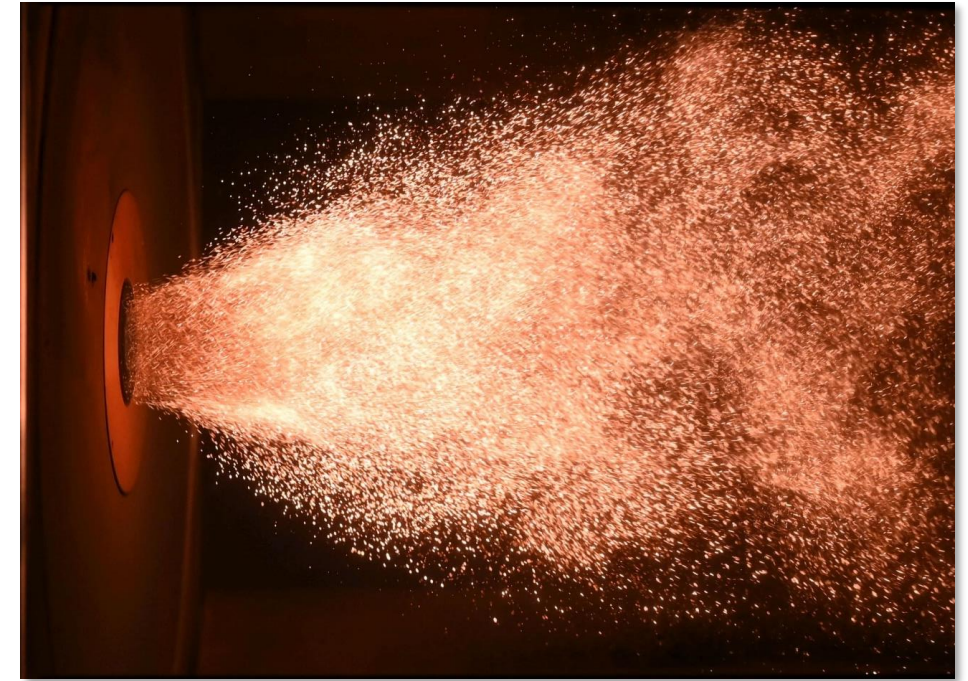
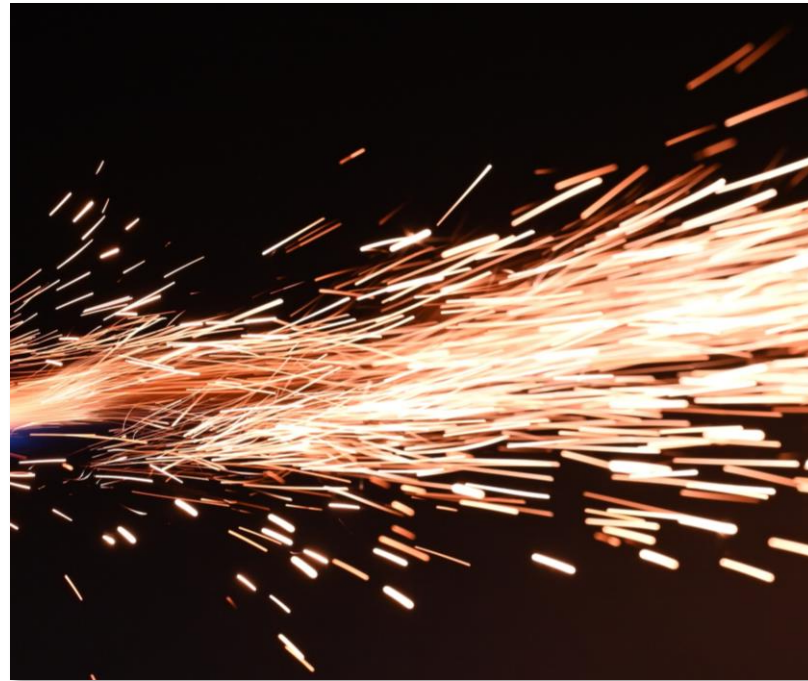
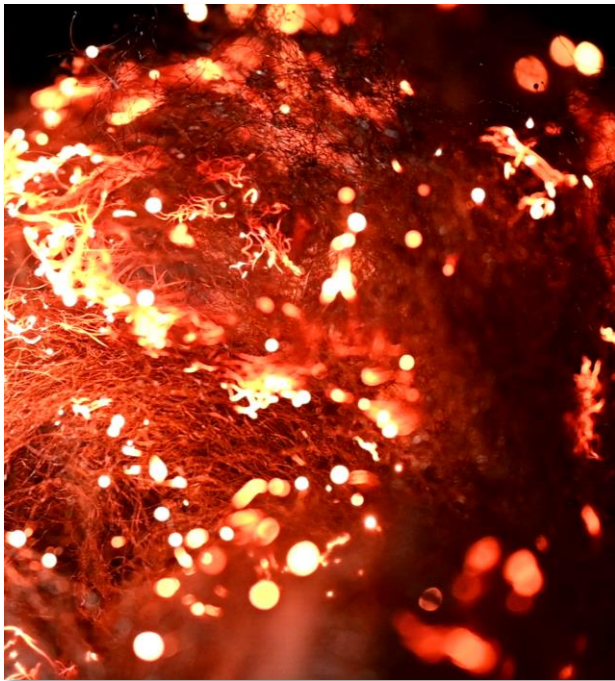
*Pilotship *Suiso Frontier*, performance will increase

[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>

3. OXIDATION – DRY-CYCLE



EISEN BRENNT – CO₂ FREI!



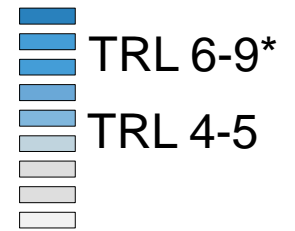
3. OXIDATION – DRY-CYCLE



EISEN BRENNT – CO₂ FREI!



- Eisenpulver < 50 μm
- Gespeicherte Energie wird in turbulenter Staubflamme freigesetzt
- Speist Hochtemperaturprozesse oder Dampfturbine f\u00fcr die Erzeugung von Strom



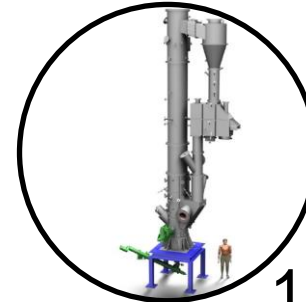
Partikel-Flammen



Laminare Flammen



Turbulente Flammen



Semi-industriell

1 MW_{th}



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

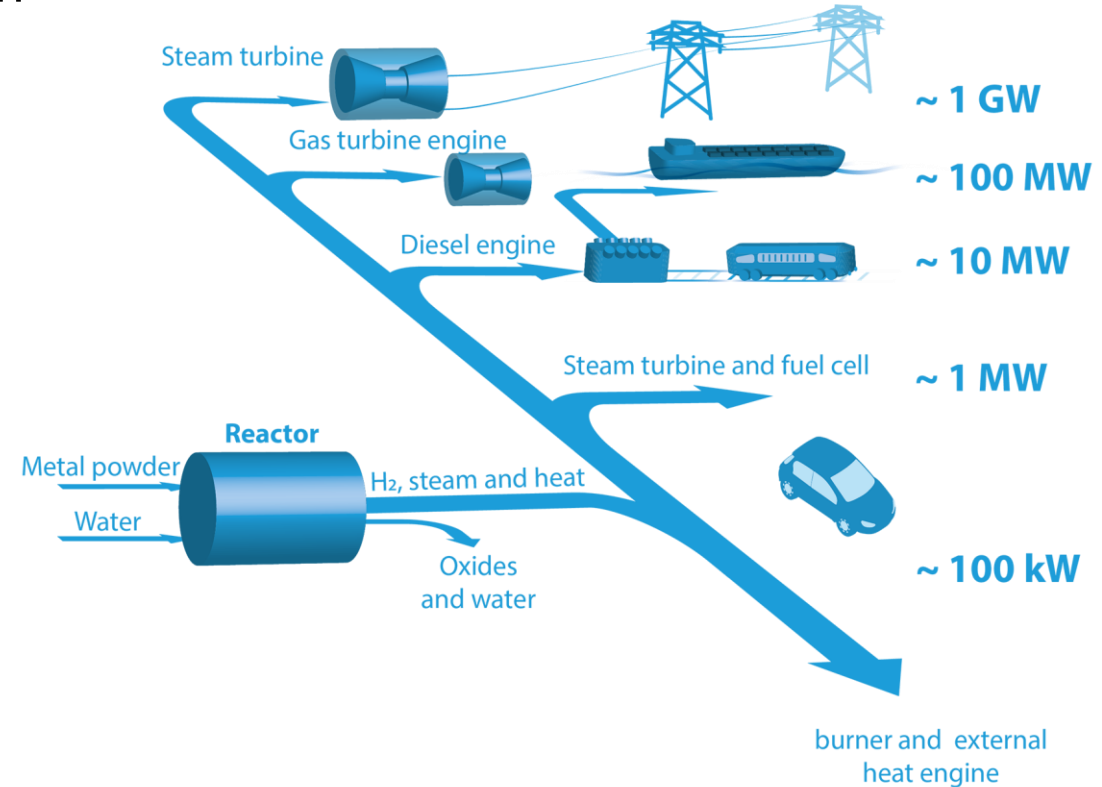
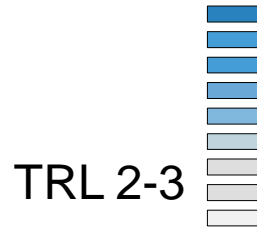
3. OXIDATION – WET-CYCLE



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



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

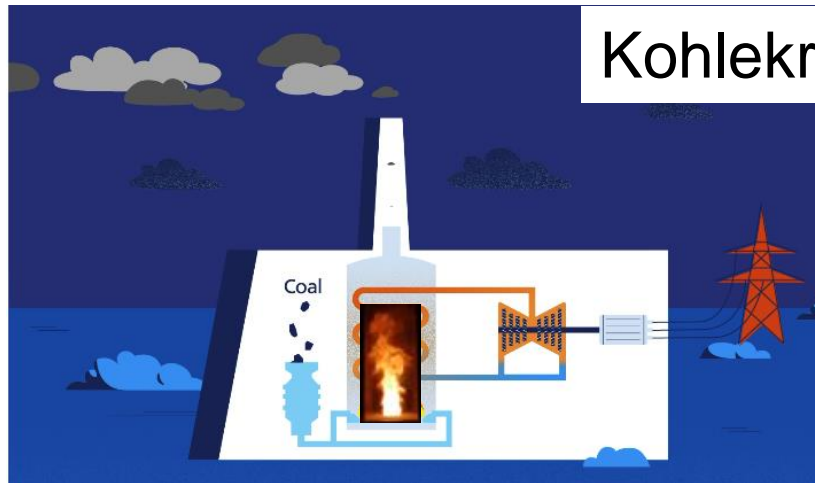


adapted from Bergthorson PECS 2018

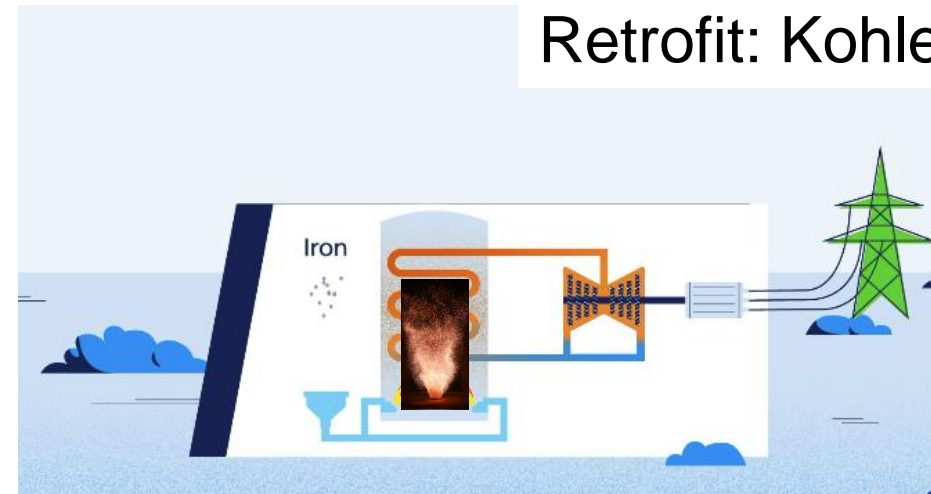
KLIMANEUTRALE UMRÜSTUNG



CO₂-freie und grundlastfähige Kraftwerke nach Ausstieg aus Kohleverstromung



Kohlekraftwerk



Retrofit: Kohle → Eisen

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

J. Janicka , P. Debiagi, A. Scholtissek, A. Dreizler, B. Epple, R. Pawellek, A. Maltsev, C. Hasse: [The potential of retrofitting existing coal power plants: A case study for operation with green iron](#), Applied Energy 339 (2023) 120950

RETROFIT DETAILS



Wiederverwendbarkeit von Bauteilen:

- Wichtige Komponenten wie der Dampferzeuger und der Dampfkreislauf können mit moderaten Modifikationen wiederverwendet werden.
- Bestimmte Elemente, wie die Zufuhr des Brennstoffes, die Brenner und das Entstaubungssystem, müssen neu konzipiert werden.

Steigerung des Wirkungsgrads:

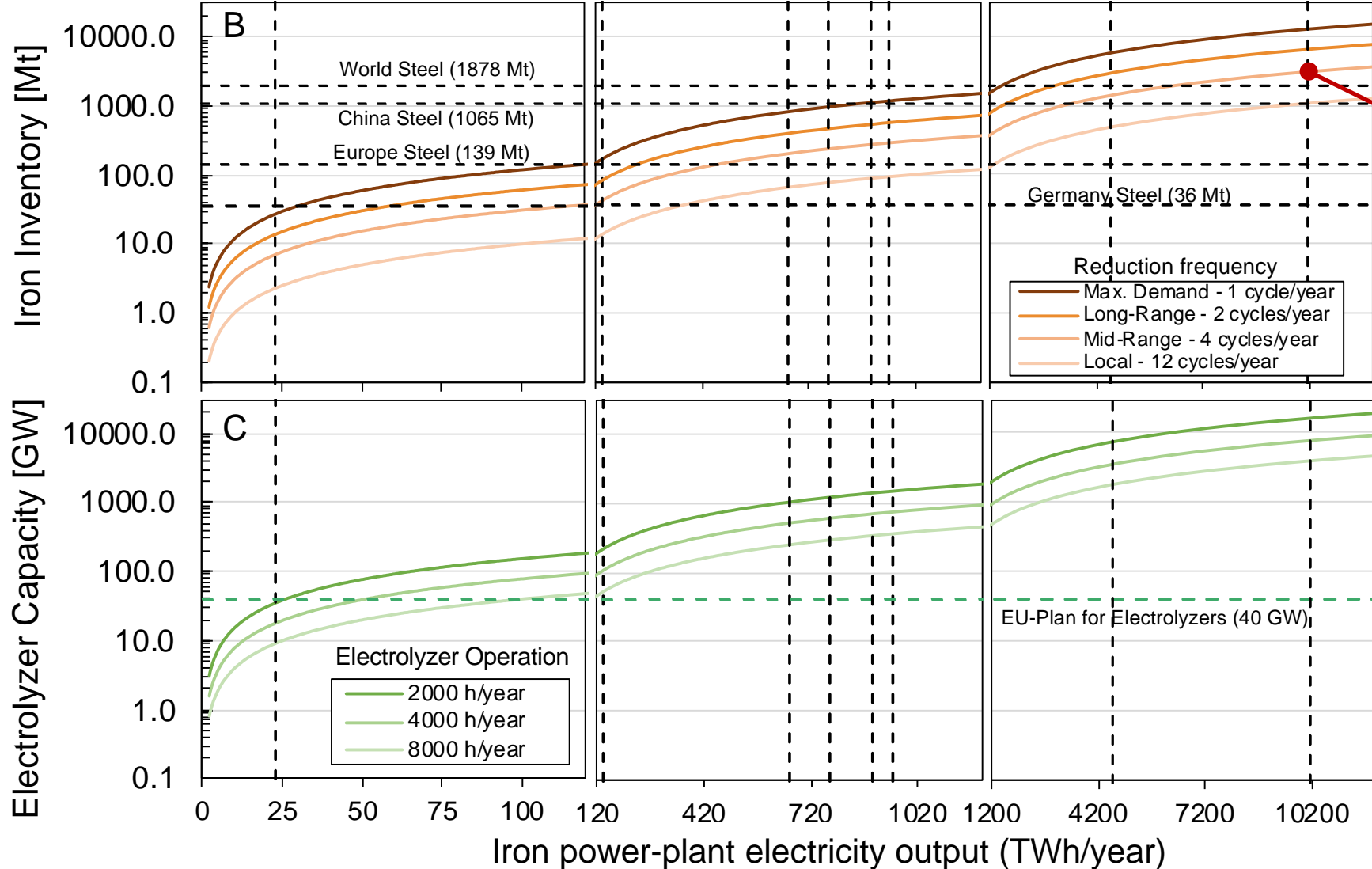
- Das umgerüstete Kraftwerk weist im Vergleich zu seinem kohlebefeuernten Pendant eine Effizienzsteigerung von etwa 1–2 % auf.
- Diese Verbesserung ist in erster Linie auf den geringeren internen Energieverbrauch der Hilfssysteme zurückzuführen. Für Geräte wie Mahl- und Entschwefelungsanlagen gibt es keinen Bedarf mehr und es besteht die Möglichkeit, auf die Entstickungsanlage zu verzichten.
- Aufgrund der stärkeren Wärmestrahlung der Partikel deutlich höhere Wärmeübergangskoeffizienten. Infolgedessen sinken die Abgastemperaturen, was zu einem höheren Wirkungsgrad des Kessels führt.

Überwindung von Beschränkungen:

- Durch konstruktive Änderungen können wir bisherige Beschränkungen umgehen, wie z. B. Taupunktunterschreitungen von Schwefeldämpfen im Abgasbereich und die Einhaltung von Höchsttemperaturen an den Mühlen im Luftbereich. Folglich können höhere Luftvorwärmtemperaturen in Betracht gezogen werden, was dem Gesamtwirkungsgrad der Anlage zugute kommt.

J. Janicka , P. Debiagi, A. Scholtissek, A. Dreizler, B. Epple, R. Pawellek, A. Maltsev, C. Hasse: *The potential of retrofitting existing coal power plants: A case study for operation with green iron*, Applied Energy 339 (2023) 120950 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112579>

HABEN WIR GENUG EISEN?



Weltweite Umrüstung aller Kohlekraftwerke:

- ~2.5 Gt Eiseninventar nötig (4 Zyklen/Jahr)

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



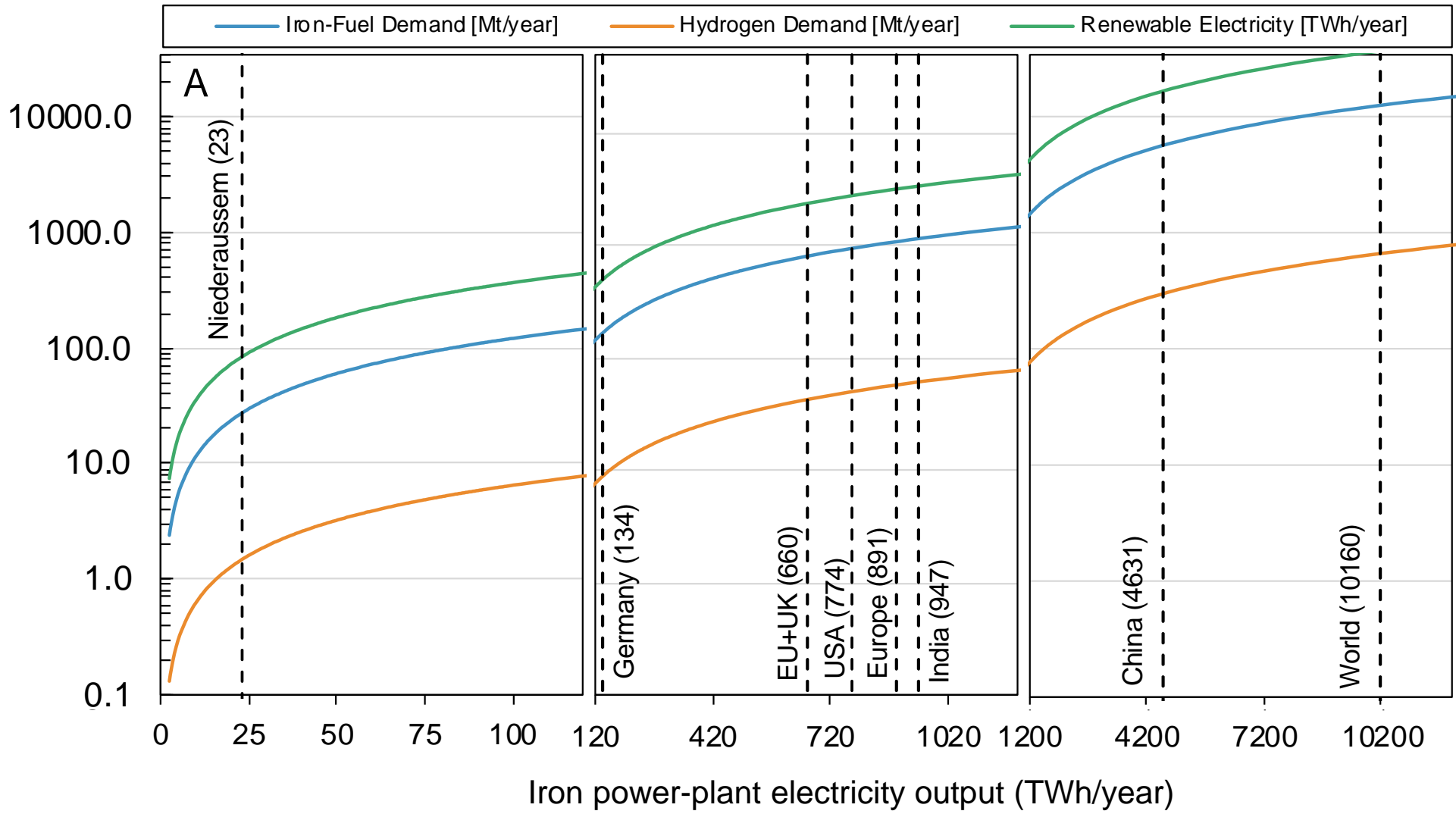
- ~2.5 Gt Eiseninventar nötig (4 Zyklen/Jahr)
- 20 Jahre Übergangszeit
- Eisenproduktion muss einmalig um 5-6% steigen (und dann auf konstantem Level bleiben)

<https://www.visualcapitalist.com/wp-content/uploads/2022/10/all-the-metals-mined-2021-full.html>

NACHFRAGE NACH H₂, ERNEUERBAREN ENERGIEN UND EISEN IM KREISLAUFSYSTEM

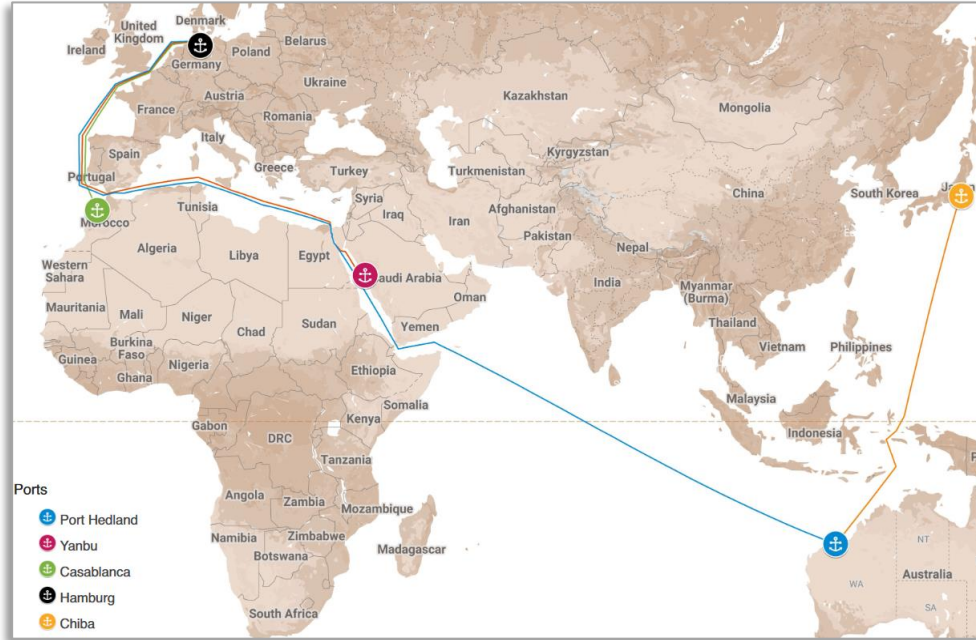


Demand in case of retrofit [see legend]



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).

EFFIZIENZ UND KOSTEN

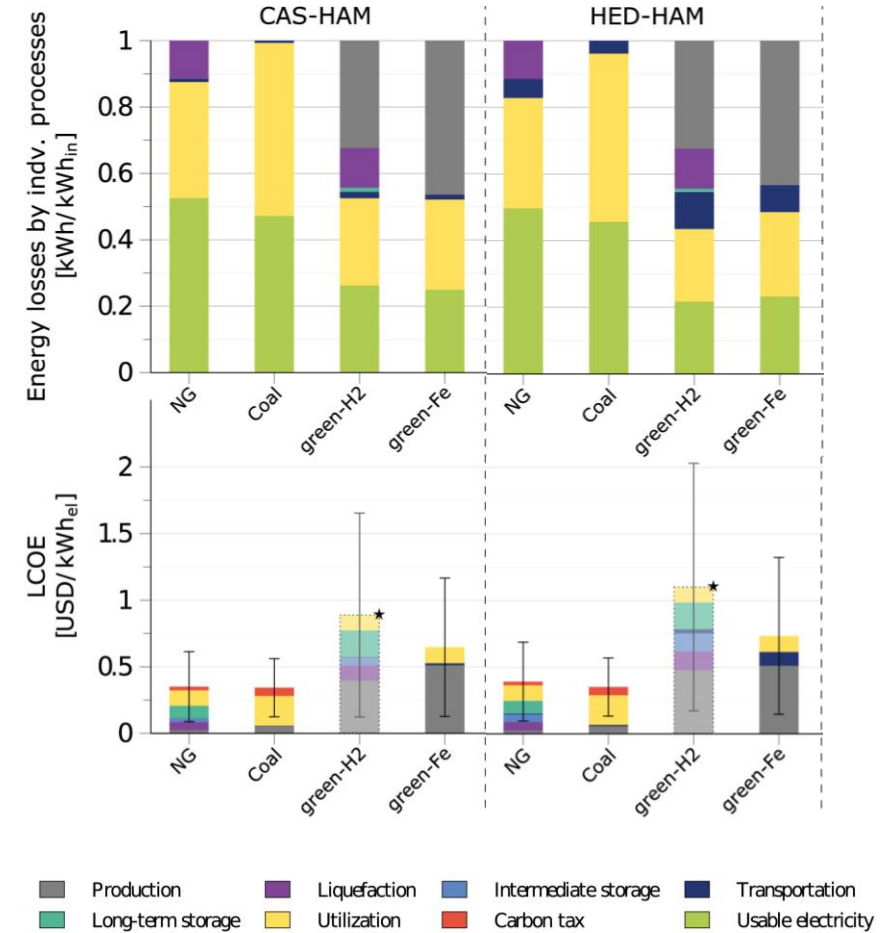


REAKTIVE METALLE ERGÄNZEN H₂

- Bessere Langzeitspeicherung
- Besser für Transport über große Distanzen
- Retrofit/Erhalt bestehender Infrastruktur für Grundlastbereitstellung

HÖHERE UNSICHERHEITEN BEI WASSERSTOFF

- Technologie weniger ausgereift
- Gute Eignung für den Transport per Pipeline



Neumann, Rocha, Debiagi, Scholtissek, Dammel, Stephan, Hasse: [Applications in Energy and Combustion Science 14 \(2023\) 100128](#)

NACHFRAGE IN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT



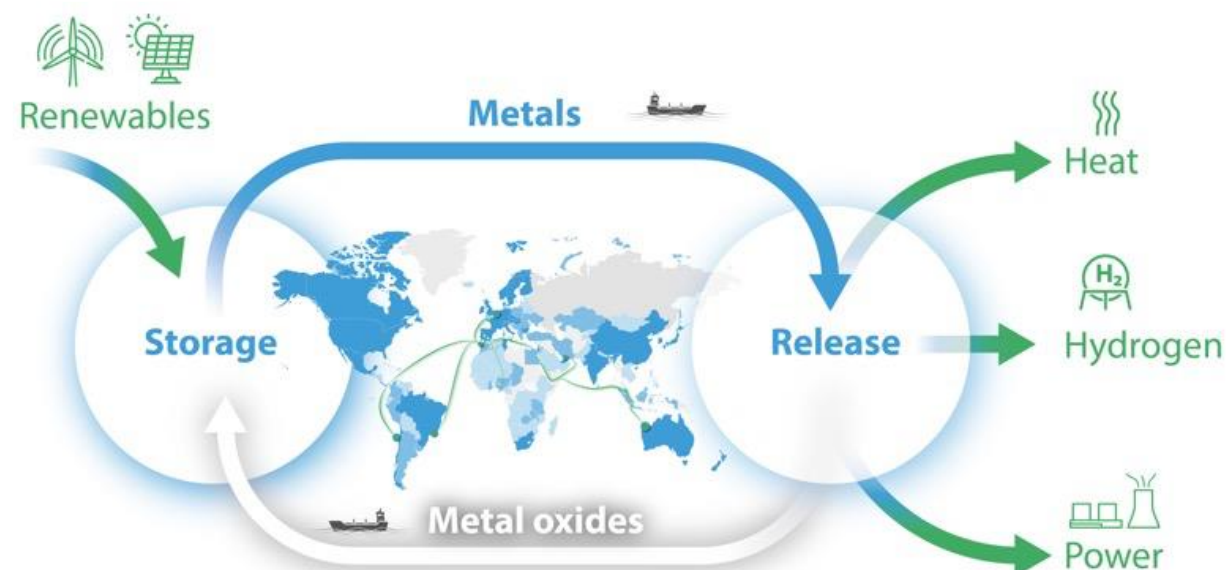
Die Umsetzung des Eisenkreislaufs ist herausfordernd, aber möglich

Beispiel Retrofit:

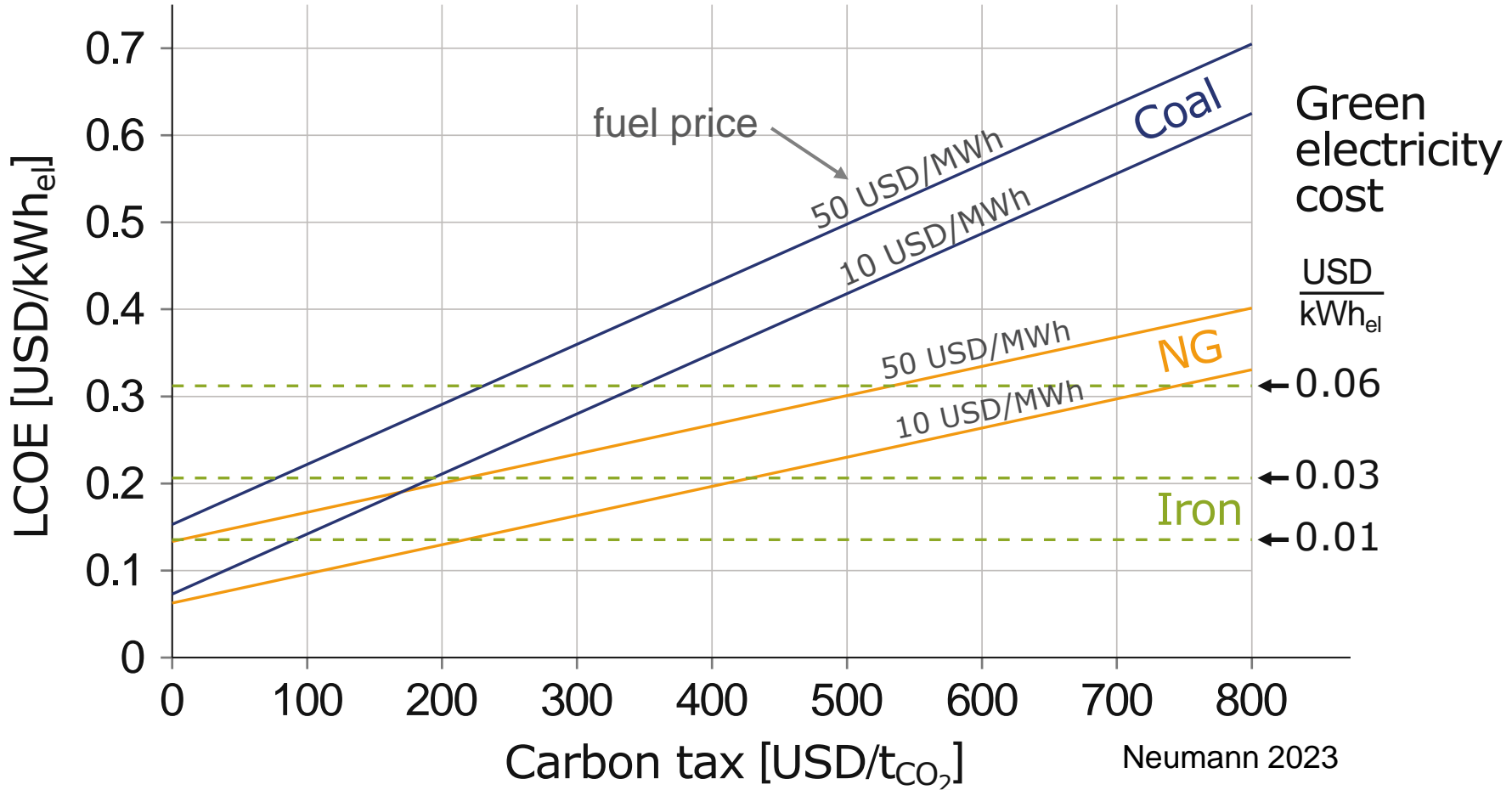
- Niederaußem Kohlekraftwerk: 3.6 GW | 23 TWh/a
- H₂ Nachfrage: 1.5 Mt/a
- Elektrolyseur-Kapazität : **17.9 GW** EU 2030 target: 100GW
- Bedarf erneuerbarer Energien: 71.6 TWh/a

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.



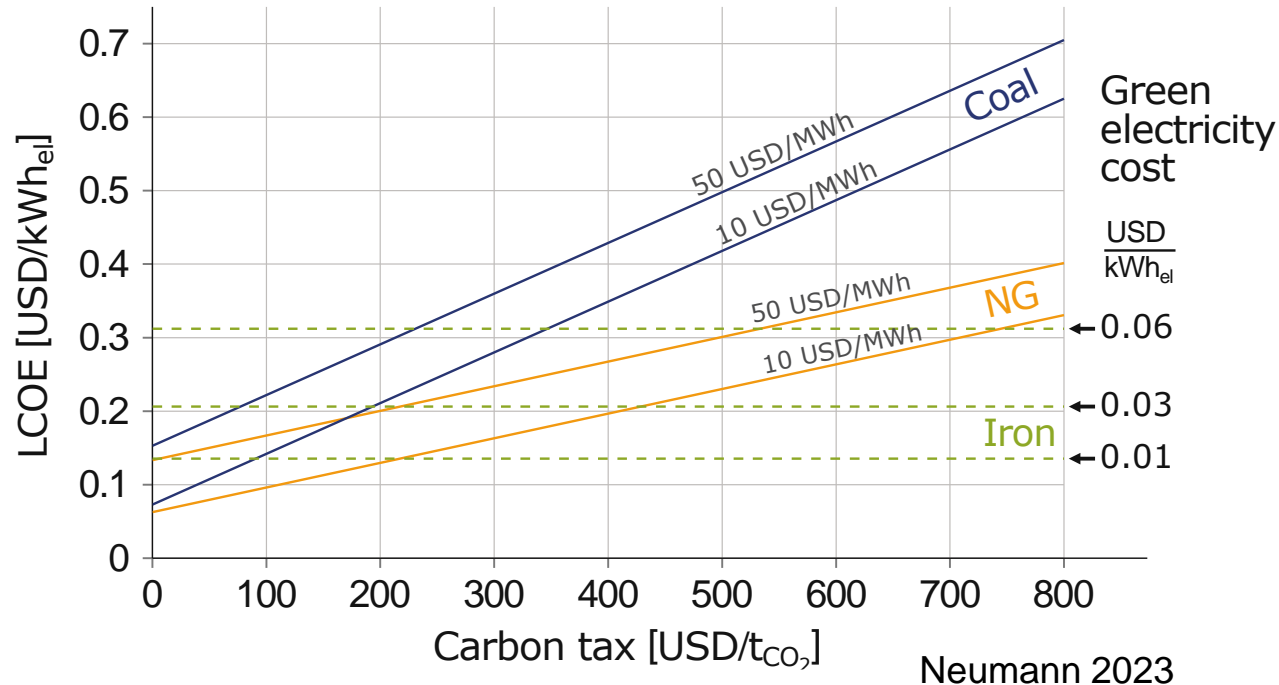
EINFLUSS DES CO₂-PREISES



Annahmen:

- Analyse für 8000 km Transportdistanz
- Ausgereifte Eisernenergie-Technologie vorausgesetzt
- Aktueller Preis von Kohle und Gas: 15-20 USD/MWh

EINFLUSS DES CO₂-PREISES



SCHLUSSFOLGERUNG

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.

WEITERE QUELLEN



clean-circles.de - Circular Economy

Debiagi et al. [Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants](#), 2022.

→ **Analysis of the (global) retrofit and key demands**

Neumann et al. [Techno-economic assessment of long-distance supply chains of energy carriers: Comparing hydrogen and iron for carbon-free electricity generation](#), 2023

→ **Comparison and analysis of transport and levelized cost of electricity**

Janicka et al. [The potential of retrofitting existing coal power plants: A case study for operation with green iron](#), 2023

→ **Detailed analysis of an exemplary retrofit of a 800 MW coal power plant**

ZUSAMMENFASSUNG – EISEN ALS ENERGIETRÄGER



VORTEILE

- Langfristige Speicherung und Transport von Energie
- Einfache Lagerung und Transport
- Wärme für Hochtemperaturprozesse (bis zu $>1500^{\circ}\text{C}$)
- Keine CO_2 , niedrige/keine NO_x and SO_x Emissionen
- 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 Kraftwerken
- Einflüsse auf Kreislauffähigkeit
- Realisierung der elektrochemischen Reduktion
- Sicherheitsbedenken im Zyklus im industriellen Maßstab (Explosivität, Nanopartikel)
- Politikberatung: bewährte Praktiken und Beratung

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



MAX PLANCK INSTITUTE
FOR SUSTAINABLE MATERIALS



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386



h_da
HOCHSCHULE DARMSTADT
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



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



Designated Spokesperson

Prof. Dr. Olaf Deutschmann
Institute of Chemical Technology and Polymer Chemistry
Karlsruhe Institute of Technology
deutschmann@kit.edu



Designated Spokesperson

Prof. Dr. Michèle Knodt
Institute for Political Sciences
Technical University of Darmstadt
knodt@pg.tu-darmstadt.de



Managing director

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

CLEAN CIRCLES



ZUKÜNFTIGE FÖRDERUNG

- Öffentlich-gefördertes Projekt für *semi-industriellen Demonstrator* (1 MW thermisch)
 - Mögliche Unterstützung vom Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (HMWEVW), Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und Projektträger Jülich (PtJ)
 - Weiterhin auf der Suche nach industriellen Partnern und Know-How
 - Benötigte Förderung: 5 Mio. €



MAX PLANCK INSTITUTE
FOR SUSTAINABLE MATERIALS



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386



CLEAN CIRCLES: NEXT STEPS



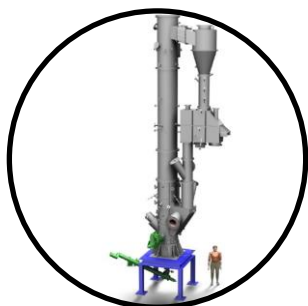
TOWARDS THE APPLICATION

bis 2027

1 MW Demonstrator



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



bis 2031

> 10 MW Demonstrator



bis 2035

Retrofit of coal power-plant



Die Geschwindigkeit der Transformation wird stark vom industriellen und politischen Interesse beeinflusst (siehe Nationale Wasserstoffstrategie 2020)

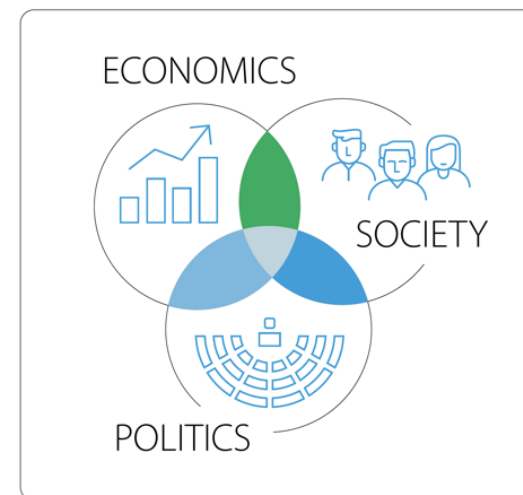
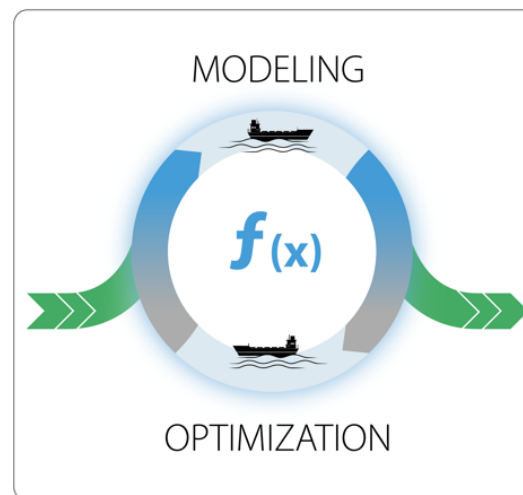
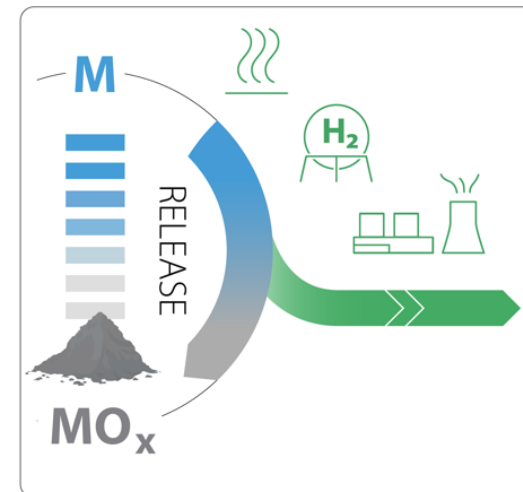
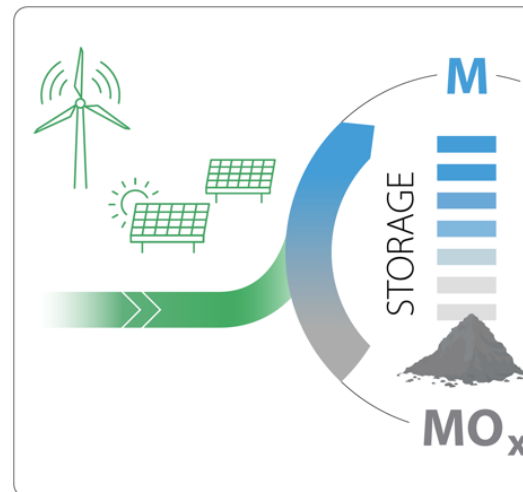
→ Parallele Grundlagenforschung zur zunehmend wissenschaftsbasierten Auslegung von Eisenkraftwerken

INTERDISZIPLINÄRER ANSATZ

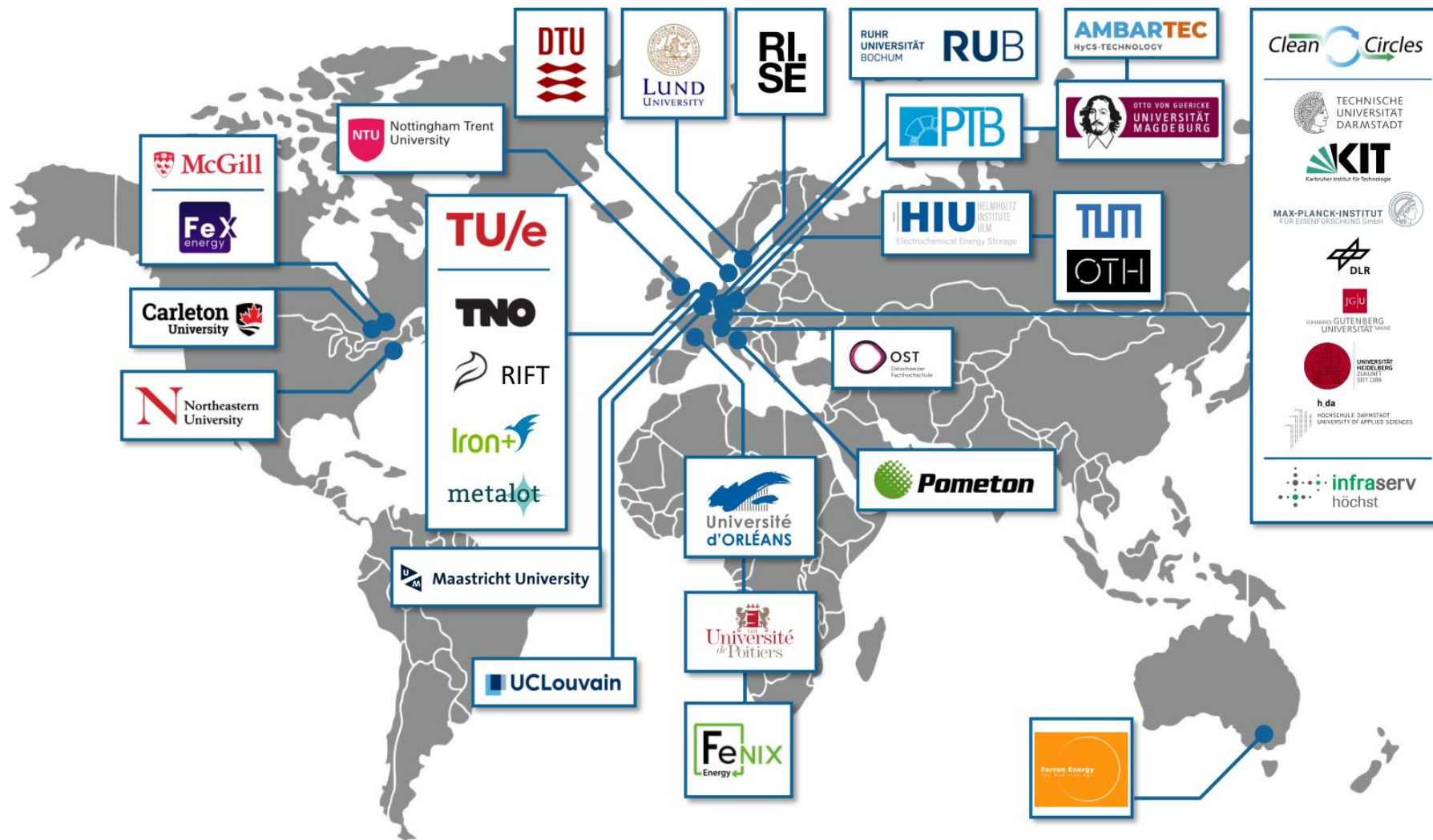


VIER FORSCHUNGSBEREICHE

1. Reduktionsprozesse
2. Oxidationsprozesse
3. Thermodynamisch-mathematisch and techno-ökonomische Modellierung
4. Governance and sozio-ökonomische Modellierung



GLOBAL ACTIVITIES



NEXT STEPS – TU/e, NETHERLANDS



2020	2023	2024	2028	>2030
Lighthouse MP	OPZuid MP	MF & City Plants	MF International	MF on large scales
Swinkels	LaTrappe	Uniper	Uniper & Swinkels	Industry & Energy
0.1 MW	1.0 MW	5 MW	5+5 MW	10-2000 MW

CLEAN CIRCLES IN DEN MEDIEN



- 📰 Handelsblatt 14.05.2024 - [Eisen statt Kohle - So lässt sich in Zukunft Energie speichern](#)
- 📺 Niklas Kolorz 31.03.2024 - [Energie-Speicher der Zukunft: Ist Eisen die neue Kohle?](#)
- 📺 Breaking Lab 15.02.2024 - [Energiespeicher-Revolution: Chemische Speicherung mit Eisen](#)
- 📺 hr "alles Wissen" 30.11.2023 – [Klima und Energie: Strom in Eisen speichern](#)
- 📺 hr "alle Wetter!" 04.10.2023 – [Clean Circles](#)
- 📰 Durchblick N – [Magazin für Nachhaltigkeit 06/2023](#)
- 📰 FAZ 04.04.2023 – [Eisen statt Kohle verbrennen?](#)
- 📰 ZDFheute "Good News" 02.03.2023 – [CO2-freies Bier dank Rost](#)
- 📰 FAZ 29.11.2022 – [Heißes Eisen für das Klima](#)

Internationaler Auszug

- 📰 TU/e, metalot & Roland Berger 05.07.2024 – [Vision Document *Iron Power*](#)
- 📰 IEEE Spectrum 22.06.2023 - [Iron Fuel Shows Its Mettle \(TU/e\)](#)



[Homepage](#)

[Transfer & Outreach](#)



IRON IS THE NEW COAL

IRON AS ENERGY CARRIER IN A CARBON-FREE CIRCULAR ENERGY ECONOMY