

Eisen als Energieträger

*Lösung für CO₂-freie
Kohlekraftwerke?!*



1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	2
2	Management Summary	5
3	Beruflicher Lebenslauf	6
4	Qualifikationsprofil	7
5	Projektinitialisierung.....	9
5.1	Pflichtenheft.....	9
5.2	Organigramm	14
5.3	Zielscheibe	15
5.4	Stakeholder-Analyse.....	16
6	Projektplanung.....	17
6.1	Projektstrukturplan	17
6.2	Projektablaufplan	18
6.3	Ressourcenplan	19
6.4	Kommunikationsplan	19
7	Projektrealisierung.....	20
7.1	Ausgangslage.....	20
7.1.1	Stromerzeugung Global & Europa	20
7.1.2	Kohleausstieg Deutschland.....	21
7.1.3	Herausforderungen und Chancen.....	21
7.2	Eisen als Energieträger	22
7.3	Eisen-Redox-Zyklus.....	25
7.3.1	Oxidation von Eisen	26
7.3.1.1	Prozessbedingungen und Partikeleigenschaften.....	26
7.3.1.2	Herausforderungen bei der Oxidation	27
7.3.1.3	Effizienz der Oxidation	27
7.3.2	Transport von Eisenoxid.....	28
7.3.2.1	Transportmethoden	28
7.3.2.2	Transportmasse.....	28
7.3.3	Reduktion von Eisenoxid.....	29
7.3.3.1	Elektrochemische Reduktion	29
7.3.3.2	Thermochemische Reduktion mit Kohlenmonoxid.....	30
7.3.3.3	Thermochemische Reduktion mit Wasserstoff	30
7.3.3.4	Prozessbedingungen	31

7.3.3.5	Herausforderungen bei der Reduktion	31
7.3.3.6	Effizienz der Reduktion.....	31
7.3.4	Transport von Eisen	32
7.3.4.1	Explosionsgefahr	32
7.3.4.2	Transportmethoden	32
7.3.4.3	Transportmasse.....	32
7.4	Machbarkeitsanalyse	33
7.4.1	Wirkungsgrade.....	33
7.4.1.1	Wirkungsgrad der Oxidation	33
7.4.1.2	Wirkungsgrad der Reduktion mit Wasserstoff	33
7.4.1.3	Wirkungsgrad der Wasserstoffherstellung.....	33
7.4.1.4	Wirkungsgrad des Transports.....	33
7.4.1.5	Gesamtwirkungsgrad	34
7.4.2	Benötigte Infrastruktur	35
7.4.3	Retrofitting Kohlekraftwerke	37
7.4.3.1	Modifikationen für ein Retrofitting	38
7.4.4	Benötigtes Eisen.....	40
7.4.4.1	Weltweiter Bedarf.....	40
7.4.4.2	Bedarf Deutschland.....	40
7.4.4.3	Bedarf für eine Grossstadt	40
7.4.5	SWOT-Analyse	41
7.4.5.1	SWOT.....	41
7.4.5.2	Schwächen	42
7.4.5.3	Risiken	42
7.4.6	Umrüstung nach SMART	43
7.4.6.1	SMART -Methode.....	43
7.4.6.2	Das Ziel nach SMART.....	43
7.5	Bereits realisierte Anlagen	44
7.5.1	Brauerei Royal Swinkels	45
7.6	Geplante Projekte	46
7.7	Besuch TU-Darmstadt «Clean Circles».....	48
7.7.1	«Clean Circles».....	48
7.7.2	Offene Fragen	49
7.7.3	Einblicke.....	52

8	Abschluss	55
8.1	Projektüberwachung.....	55
8.2	Evaluation der Zielerreichung	55
8.3	Reflexion Weg zum Ziel	55
8.4	Lessons learnt	56
8.5	Ausblicke	56
8.6	Danksagung.....	56
8.7	Nutzung von KI	57
8.8	Eigenständigkeitserklärung	57
9	Verzeichnisse	58
9.1	Literaturverzeichnis.....	58
9.2	Abbildungsverzeichnis.....	60
9.3	Tabellenverzeichnis	61
9.4	Abkürzungen	61
9.5	Grössentabelle	61
9.6	Berechnungen	62

2 Management Summary

Die vorliegende Diplomarbeit untersucht die technische Machbarkeit der Nutzung von Eisen als CO₂-freien Energieträger. Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, müssen die CO₂-Emissionen drastisch reduziert und der Ausbau Erneuerbarer Energien stark erhöht werden. Erneuerbare Energien haben jedoch das bekannte Speicherproblem. In Zukunft werden grosse Speichertechnologien benötigt, um diese Herausforderung in den Griff zu bekommen. Die geeignete Technologie hierfür ist derzeit noch nicht gefunden. Eine vielversprechende Speichertechnologie ist das vorliegende Konzept des Eisen-Redox-Zyklus. Es ist eine realistische Alternative zu herkömmlichen fossilen Brennstoffen, insbesondere Kohle.

Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, den Eisen-Redox-Zyklus als eine mögliche Lösung für die Energiespeicherung zu bewerten und zu analysieren und die Machbarkeit eines Wechsels von Kohle zu Eisen als Brennstoff in Kohlekraftwerken zu untersuchen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der technischen Machbarkeit, der Effizienz des Systems und den damit verbundenen Herausforderungen.

Kernaussagen

- Der Eisen-Redox-Zyklus basiert auf der Oxidation von Eisenstaub zu Eisenoxid. Da Eisen höherenergetisch als Eisenoxid ist, wird dabei Wärme freigesetzt, die zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Das Eisenoxid wird anschliessend durch grünen Wasserstoff wieder in Eisen umgewandelt. Da hierfür grüner Wasserstoff verwendet wird, gilt der Zyklus als erneuerbar. Im gesamten Kreislauf geht kein Eisen verloren und es wird kein CO₂ freigesetzt.
- Die Speichertechnologie kann unabhängig von Ort und Zeit eingesetzt werden. Dies eröffnet die Möglichkeit für saisonale und internationale Speicherlösungen.
- Erste Forschungsergebnisse ergeben für den gesamten Kreislauf einen Wirkungsgrad von ca. 28.4%. Dies ist für eine Speichertechnologie nicht besonders hoch, wird aber durch die damit verbundenen Vorteile ausgeglichen.
- Ein Retrofitting bestehender Kohlekraftwerke auf Eisen, wäre mit überschaubaren technischen Anpassungen möglich. Dadurch kann die bestehende Infrastruktur weiter genutzt und der CO₂-Ausstoss drastisch reduziert werden.
- Die Verfügbarkeit von Eisen als Rohstoff ist weltweit gesichert und sowohl der Transport als auch die Lagerung sind einfach zu handhaben. Eisenstaub und Eisenoxid sind stabile, feste und ungiftige Materialien, die sicher und ohne Energieverlust gelagert werden können.

Schlussfolgerungen

Die Arbeit kommt zum Schluss, dass der Eisen-Redox-Zyklus eine vielversprechende Technologie zur Langzeitspeicherung von Energie darstellt und einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen leisten kann. Insbesondere das Retrofitting bestehender Kohlekraftwerke zu CO₂-freien Kraftwerken durch den Einsatz von Eisen anstelle von Kohle als Brennstoff ist technisch gut realisierbar. Zu berücksichtigen gilt hierbei, dass grosse Mengen Eisen transportiert werden müssen.

Um ein Retrofitting von Kohlekraftwerken und den gesamten Eisen-Redox-Kreislauf zur Energiespeicherung zu realisieren, sind erhebliche Investitionen in den Ausbau Erneuerbarer Energieerzeuger sowie in die Wasserstoffproduktion erforderlich.

3 Beruflicher Lebenslauf

Personalien:

Name, Vorname: Pfeiffer Marcel
E-Mail: marcelpfeiffer7@gmail.com
Geburtsdatum: 28.08.2000
LinkedIn: Marcel Pfeiffer



Berufserfahrung:

Aug. 2022 – Heute 80% Pensum, Servicetechniker PV & Speicher
Helion Energy AG, Zuchwil
Okt. 2021 – Juli 2022 80% Pensum, Elektroinstallateur
Regio Energie, Solothurn
Aug. 2020 – Sept. 2021 100% Pensum, Elektroinstallateur
Regio Energie, Solothurn
Aug. 2016 – Juli 2020 Lehre als Elektroinstallateur EFZ
Regio Energie, Solothurn

Weiterbildungen/Kurse:

2021 – 2024 Dipl. Techniker HF Energie und Umwelt, TEKO Olten
2024 E3/DC Installationsschulung
2023 Hubarbeitsbühnen Bediener
2023 Messtechnik AC-Seite
2023 Workshop Kommunikation
2023 Sungrow Hybridtraining für Planer und Installateure
2022 Drohnenpilot Kategorie A1/A3
2022 PSA gegen Absturz
2022 Zertifizierungsschulung Inst. und IBN
sonnenBatterie eco 8 & 10 Performance

4 Qualifikationsprofil

Dipl. Energie- und Umwelttechniker HF
Marcel Pfeiffer

<p>A1 Unternehmens- und Führungsprozesse gestalten und verantworten</p>	<p>Ich habe im First-Level-Support mehrere Serviceaufträge nach dem Serviceprozess erfolgreich bearbeitet. Kontaktaufnahme mit dem Kunden Fehleranalyse und Einweisung des Servicetechnikers, Projektabschluss und Rechnungsstellung.</p>
<p>A2 Kommunikation situationsangepasst und wirkungsvoll gestalten</p>	<p>Als Servicetechniker habe ich nach jedem Serviceeinsatz meinem Projektleiter ein schriftliches und mündliches technisches Feedback zum Serviceeinsatz gegeben. Mit den Dingen, die gut gelaufen sind, den Dingen, die schlecht gelaufen sind und den nächsten Schritten.</p>
<p>A3 Die persönliche Entwicklung reflektieren und vorantreiben</p>	<p>Als Servicetechniker bin ich vor Ort immer wieder auf neue Produkte gestossen, die ich nicht kannte. Beim ersten Mal dauerte es dann immer länger, bis ich das Produkt kannte. Da ich mir nicht jeden Schritt und jedes Passwort merken konnte, schrieb ich mir alle wichtigen Dinge im OneNote auf. So konnte ich beim nächsten Mal, darauf zurückgreifen, Fehler vermeiden und Zeit sparen.</p>
<p>B4 Entwicklungsmethoden zur Problemlösung und Innovationsentwicklung in der Umwelttechnik zielführend einsetzen</p>	<p>Ich musste ein Problem an einer Autoladestation beheben, bei dem ich verschiedene Bereiche der Elektrotechnik vernetzen und analysieren musste. Anschliessend konnte ich das Problem beheben. Das Problem lag schlussendlich bei der Teichpumpe, welche einen Isolations-Fehler hatte. Durch das Laden des E-Autos hat sich der Fehlerstrom bei der Teichpumpe erhöht und somit den FI der Teichpumpe/Wohnzimmer ausgelöst.</p>
<p>B5 Projekte planen, leiten und evaluieren</p>	<p>Beim Bau der 12 kWp Photovoltaikanlage bei meinen Eltern habe ich das gesamte Projekt von Anfang bis Ende geleitet. Ich hatte einen Mitarbeiter von Helion, der für die administrativen Arbeiten zuständig war. Auf der Baustelle habe ich die AC-Seite selbst realisiert. Für die DC-Seite haben mir mein Stiefvater und mein Zwillingbruder geholfen, die beide eine handwerkliche Ausbildung haben, aber keine PV-Ausbildung.</p>

B7 Projektierung von Anlagen beauftragen	Als Servicetechniker musste ich eine Boiler-Ansteuerung in einer bestehenden Verteilung einbauen. Somit musste ich anhand der bestehenden Schemas die Verdrahtung analysieren und nachvollziehen. Anschliessend musste ich anhand des Schemas der Boiler Ansteuerung, die neue Verdrahtung einbauen.
B8 Daten erfassen und auswerten	Bei der Wartung von PV-Anlagen habe ich die Produktions- und Verbrauchsdaten mit Hilfe von Monitoring-Portalen oder Schnittstellen der jeweiligen Produkte interpretiert, analysiert und entschieden, ob die Anlage fehlerfrei und ohne gravierende Produktionsausfälle produziert.
B9 Realisierung von Anlagen planen und begleiten	Ich habe mehrere Smartmanager installiert, konfiguriert und in Betrieb genommen. Diese sind für die Vernetzung der PV-Anlage mit der restlichen Gebäudeinstallation zuständig. Um den Eigenverbrauch zu optimieren. Dieser kann unter anderem Ladestationen für das BEV, Warmwasserboiler und Wärmepumpen ansteuern.
B10 Wartung sicherstellen und Verfügbarkeit der Anlagen garantieren	Bei einem Steildacheinsatz zur Erneuerung einer PV-Anlage war ich für die Planung, Koordination und Vor-Ort-Kontrolle des komplexen und sicherheitskritischen Einsatzes verantwortlich. Dabei musste ich die DC-Verkabelung der PV-Module anpassen, um eine saubere Produktionskurve über den Tag zu erhalten.
B11 Prozesse analysieren und optimieren	Das Lager bei uns im Service war oft überfüllt, es ging Material verloren und es blieb Material zurück, welches an den Hersteller musste. Ich habe den Prozess für die Rücklieferung an das Logistikcenter analysiert und einen Verbesserungsvorschlag an meinen Chef weitergegeben. Dieser beinhaltete, dass die Servicetechniker die Rücklieferung an das Logistikcenter selbst machten, da das Material leider bei Schnittstellen schnell verloren ging.

5 Projektinitialisierung

5.1 Pflichtenheft

1. Einleitung

Der Klimawandel schreitet voran und wird zunehmend spürbar. Er bewirkt unter anderem zu Veränderungen im Golfstrom, was auch das Klima in Europa beeinflusst. Vermehrt kommt es zu Überschwemmungen und Hitzewellen, welche gravierende Schäden mit sich ziehen.

Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, müssen wir den menschen-gemachten CO₂-Ausstoss drastisch reduzieren und einen grossen Wert auf Erneuerbare Energien und Kreislaufwirtschaft setzten.

Kohlekraftwerke sind für einen grossen Anteil der CO₂-Emissionen verantwortlich. Weltweit gibt es fast 2'500 Kohlekraftwerke, die rund 35% der weltweiten Stromproduktion sicherstellen.

In Deutschland beispielsweise ist die Kohle seit 2023 der zweitwichtigste Energieträger für die Stromerzeugung. Mit 26,8% liegt sie knapp hinter der Windenergie mit 27,2%. Bis 2023 lag sie an erster Stelle. In der Schweiz liegt die Wasserkraft mit 52% an erster Stelle, gefolgt von der Kernenergie mit 37%. In Frankreich stammen 62% der Stromproduktion aus Kernenergie, den zweiten Platz teilen sich Erdgas, Wind- und Wasserkraft mit je 10%. Kohle wird in der Schweiz und in Frankreich kaum verstromt. Die IEA (International Energy Agency) hat für das Jahr 2030 ein Ziel von 60% erneuerbarer Stromerzeugung weltweit festgelegt. Deutschland will bis dahin bereits 75% erneuerbaren Strom erreichen. (01, 2024)

Der Ausbau der Erneuerbaren Energien erfolgt vor allem durch Photovoltaik- und Windkraftanlagen, die stark wetterabhängig und daher schwer regulierbar sind. Dies führt zu erheblichen Energiefluktuationen zwischen Sommer und Winter; bzw. sonnen-/windreichen und sonnen-/windarmen Tagen. Die Folgen sind eine schlechte Regulierbarkeit und starke Netzschwankungen, die zu Blackouts im Stromnetz führen können.

Damit wir die Probleme, die die Erneuerbaren Energien mit sich bringen, kompensieren können, benötigen wir grosse Energiespeicher. Diese gleichen die Netzschwankungen und Energiefluktuation aus, um so einen Blackout zu verhindern. Momentan haben wir sehr viel verschiedene Energiespeicher, von Schwungrad-, über Druckluft- bis zu chemischen Batteriespeicher. Viele dieser Speicherarten sind noch in der Forschung und besitzen zum Teil nur eine Testanlage. In den Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern haben sich bis heute hauptsächlich nur die elektrochemischen Batteriespeicher durchgesetzt. Für grössere Energiespeicher wurde noch nicht die geeignete Lösung gefunden. Wir werden zukünftig sicher mehrere verschiedene Energiespeicherarten sehen, jedoch wird es womöglich nicht die perfekte Speicherart geben.

Das Team Clean Circles der TU Darmstadt arbeitet derzeit zusammen mit weiteren Universitäten an der Erforschung einer neuartigen Speichertechnologie. Die Idee ist, Eisenstaub zu verbrennen. Mit der gewonnenen Wärme wird Wasserdampf erzeugt, welcher erst eine Dampfturbine und schlussendlich einen Generator antreibt. Das Prinzip ist eigentlich dasselbe wie bei konventionellen thermischen Kraftwerken. Jedoch wird bei der Verbrennung kein CO₂ freigesetzt. Durch den Prozess wird lediglich das Eisen (Fe) mit Sauerstoff (O) verbunden und man erhält dadurch Eisenoxid (Fe₂O₃). Diese chemische Reaktion nennt man Oxidation und ist eine exotherme Reaktion, d.h. Energie wird frei.

Das Eisenoxid, welches man durch den Verbrennungsprozess erhält, wird durch eine Reduktion mittels Elektrolyse oder Wasserstoff wieder in den Kreislauf zurückgeführt. Hierbei wird das Eisen (Fe) wieder vom Sauerstoff (O) getrennt. Das gewonnene Eisen, respektive der Eisenstaub, wird erneut in Kraftwerken verbrannt (Oxidation). Die Reduktion, also von Eisenoxid zu Eisen, ist eine endotherme Reaktion und absorbiert dabei Energie. Diese soll von erneuerbaren Energieerzeugern kommen. (02, 2024)

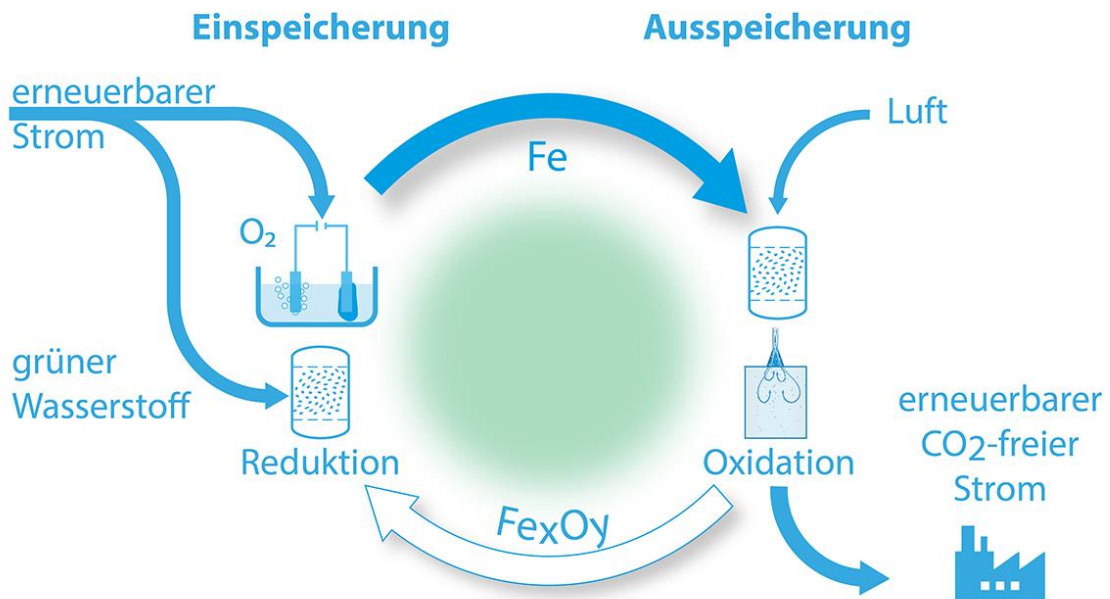


Abbildung 5.1, Eisen-Redox-Zyklus
von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/about_cc/research_summary_cc/index.de.jsp

Auf der linken Seite des Eisen-Redox-Zyklus befinden sich die Erneuerbaren Energieerzeuger, welche für die Reduktion verantwortlich sind. Der erhaltene reine Eisenstaub (Fe) wird dann zu einem Kraftwerk transportiert und dort durch Oxidation zu Eisenoxid (Fe_2O_3) umgewandelt. Die dabei erhaltene Wärmeenergie wird mittels Dampfturbine und Generator zu elektrischem Strom umgewandelt. Das Eisenoxid wird anschliessend wieder zu der Reduktion transportiert, wo sich der Kreislauf schliesst. (03, 2022)

Da der Verbrennungsprozess derselbe wie bei einem Kohlekraftwerk ist, überlegt man aktuell die Kohle in solchen Kraftwerken mit Eisenstaub zu ersetzen. Das erste Kohlekraftwerk, welches mit Eisen betrieben werden soll, könnte bereits 2035 in Deutschland in Betrieb gehen. Das Team von Clean Circles hat bereits bedeutende Forschungsergebnisse erzielt und planen, bis Ende 2027 eine 1 Megawatt Testanlage zu bauen. (02, 2024).

In dieser Arbeit gehe ich näher auf die oben beschriebene Technologie ein um diese nachvollziehen. Meine Arbeit analysiert die technischen Aspekte und die Machbarkeit des Eisen-Redox-Zyklus dokumentieren.

2. Fachexperte

Für meine Arbeit habe ich einen Fachexperten ausgewählt, welcher mich durch meine Diplomarbeit begleitet und bei welchem ich Nachfragen kann und Inputs sowie Kritik holen kann. Der Fachexperte schlägt am Ende der Arbeit der Höheren Fachschule TEKO Olten eine Note für meine Diplomarbeit vor.

Mein Thema umfasst eine Vielzahl von Fachbereichen. Chemie und Physik bilden dabei die übergeordneten Kategorien. Konkret beschäftige ich mich mit Themen wie Wasserstoff, Elektrolyse sowie den chemischen und physikalischen Prozessen in Kraftwerken.

Meine Auswahl für meinen Fachexperte fiel dabei auf Uwe Schnetgöke. Er hat in Deutschland Maschinenbauingenieur am KIT studiert und führte unter anderem Berechnungen und Auslegungen konventioneller Dampf- und Gaskraftwerke (GUD) durch.

Vorname, Name: Uwe Schnetgöke
Beruf: Maschinenbau Ing. (M.Sc.) & Dozent
Rolle/Funktion: Berechnung und Auslegung Konventioneller Kraftwerke
E-Mail: uwe.schnetgoeke@t-online.de

3. Inhalt

Um am Ende meiner Diplomarbeit das gewünschte Ergebnis zu erzielen, lege ich klare Richtziele, Ziele und Endergebnisse fest. Durch eine präzise Abgrenzung des Themas Sorge ich dafür, dass die Arbeit fokussiert bleibt und zielgerichtet abgeschlossen werden kann.

3.1 Richtziel

- Das Hauptziel der Arbeit ist, die technische Machbarkeit der Nutzung von Eisen als CO₂-freien Energieträger in thermischen Kraftwerken zu bewerten.

3.2 Ziele

- Untersuchung und Erklärung der technischen Prozesse, die für die Verbrennung von Eisenstaub notwendig sind, einschliesslich der Energieumwandlung und -speicherung in allen 4 Sektoren: Oxidation, Transport Eisenoxid, Reduktion und Transport Eisen.
- Bewertung der technischen Machbarkeit, Eisen als CO₂-freien Energieträger in bestehenden oder neuen thermischen Kraftwerken zu verwenden.
- Verifikation meiner Ergebnisse durch einen Besuch bei der TU Darmstadt. Vor Ort möchte ich einen tieferen Einblick in das Forschungslabor des Teams Clean Circles bei der TU Darmstadt gewinnen.



Abbildung 5.2, TU Darmstadt
von: <https://www.forschung-und-lehre.de/>

3.3 Endergebnis

- Ein umfassendes Dokument, das die technische Machbarkeit der Nutzung von Eisen als Energieträger in Kohlekraftwerken analysiert. Es enthält eine Bewertung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT-Analyse) des Eisen-Redox-Zyklus.



Abbildung 5.3, SWOT-Analyse
von: <https://smartmarketingbreaks.eu/swot-analyse/>

- Die Umrüstung der Kohlekraftwerke auf Eisen soll nach SMART definiert werden. SMART ist eine Methode, Ziele zu definieren, um jene erfolgreich zu erreichen.



Abbildung 5.4, SMART-Methode
von: <https://www.ionos.de/startupguide/produktivitaet/smart-methode/>

3.4 Rahmenabgrenzung

- Ich befasse mich ausschliesslich mit dem Eisen-Redox-Zyklus, welcher auf dem Verbrennungsprozess basiert. Ich werde mich nicht mit Eisen-Redox-Flow Batterien und nicht mit dem Eisen-Dampf-Kreislauf befassen. (15, 2024)
- Ich beziehe mich in der Arbeit ausschliesslich auf den Eisen-Redox-Zyklus und werde somit nicht gross auf die Erneuerbaren Energieerzeuger für die Reduktion eingehen.
- Die politischen und wirtschaftlichen Aspekte sprengen den Rahmen meiner Diplomarbeit. Aus diesen Gründen werde ich diese Bereiche auslassen.
- Da eine Risikoanalyse sich hauptsächlich auf den politischen und wirtschaftlichen Aspekten stützt, werde ich diese ebenfalls nicht durchführen.

5.2 Organigramm

Das Organigramm in der Diplomarbeit stellt die Rollenverteilung und Verantwortlichkeiten der beteiligten Personen übersichtlich dar. Es zeigt auf, wer welche Funktion im Rahmen der Diplomarbeit übernimmt und wie die Zusammenarbeit strukturiert ist.

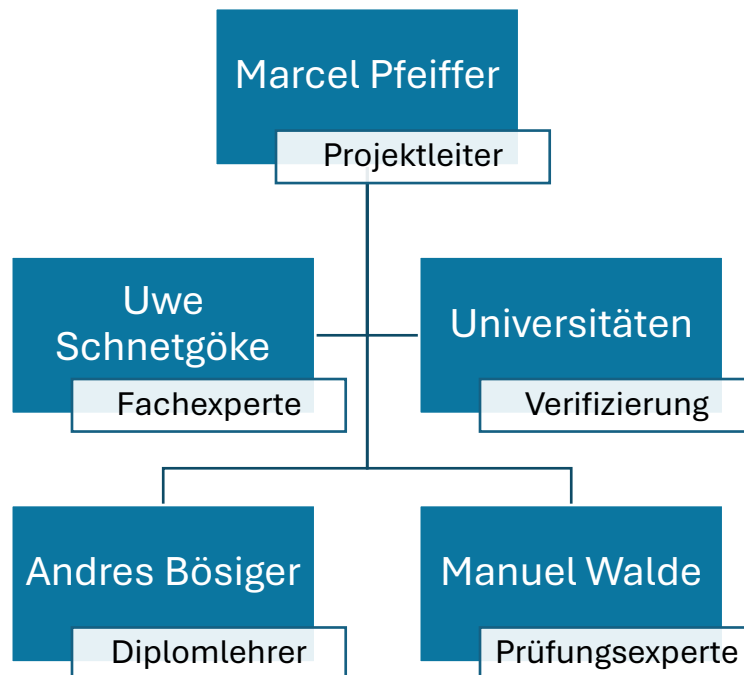


Abbildung 5.5, Organigramm

5.3 Zielscheibe

Die Zielscheibe, eine einfache und effektive Methode ein Projektziel klar und übersichtlich zu definieren. Es stellt sicher, dass das Ziel eindeutig festgelegt und mögliche Risiken frühzeitig erkannt werden.

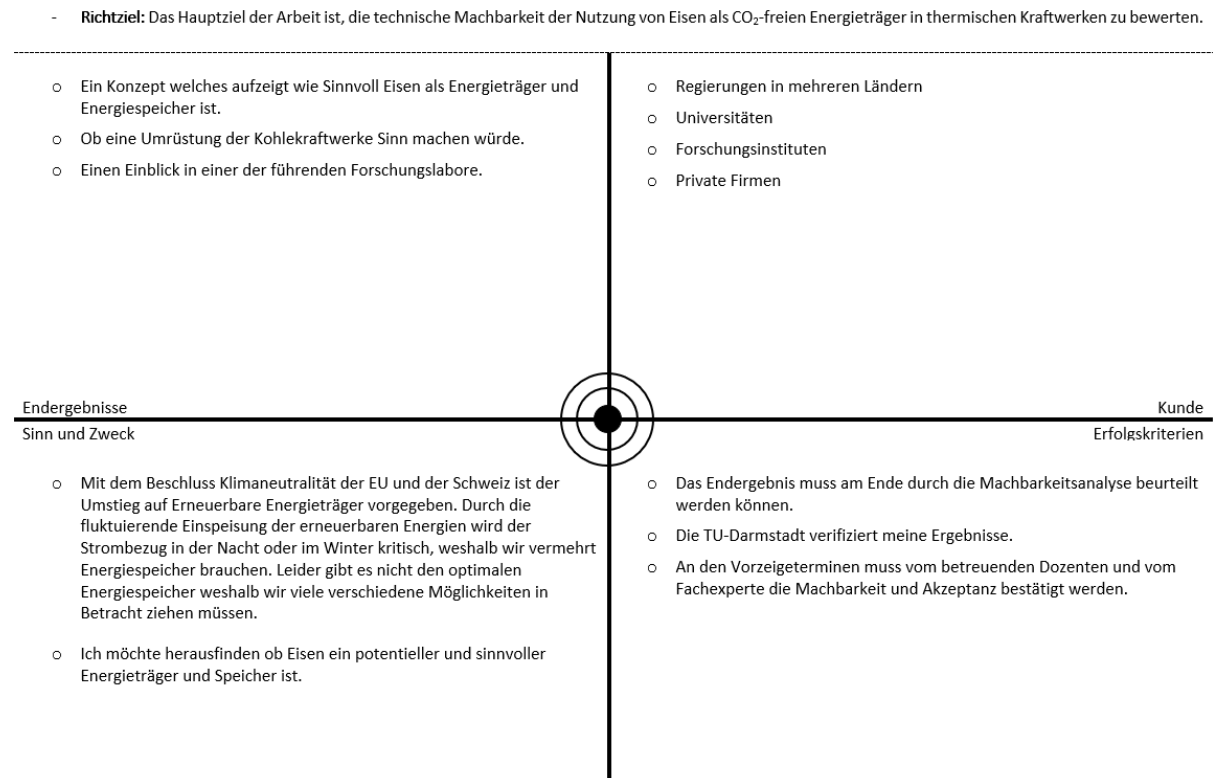


Abbildung 5.6, Zielscheibe

5.4 Stakeholder-Analyse

Stakeholderanalyse umfasst alle Personen oder Gruppen, die am Projekt beteiligt sind, davon betroffen sein könnten oder ein Interesse daran haben. Dies schliesst sowohl direkte Projektteilnehmer als auch indirekt Betroffene ein, deren Interessen durch den Projektverlauf oder die Projektergebnisse beeinflusst werden.

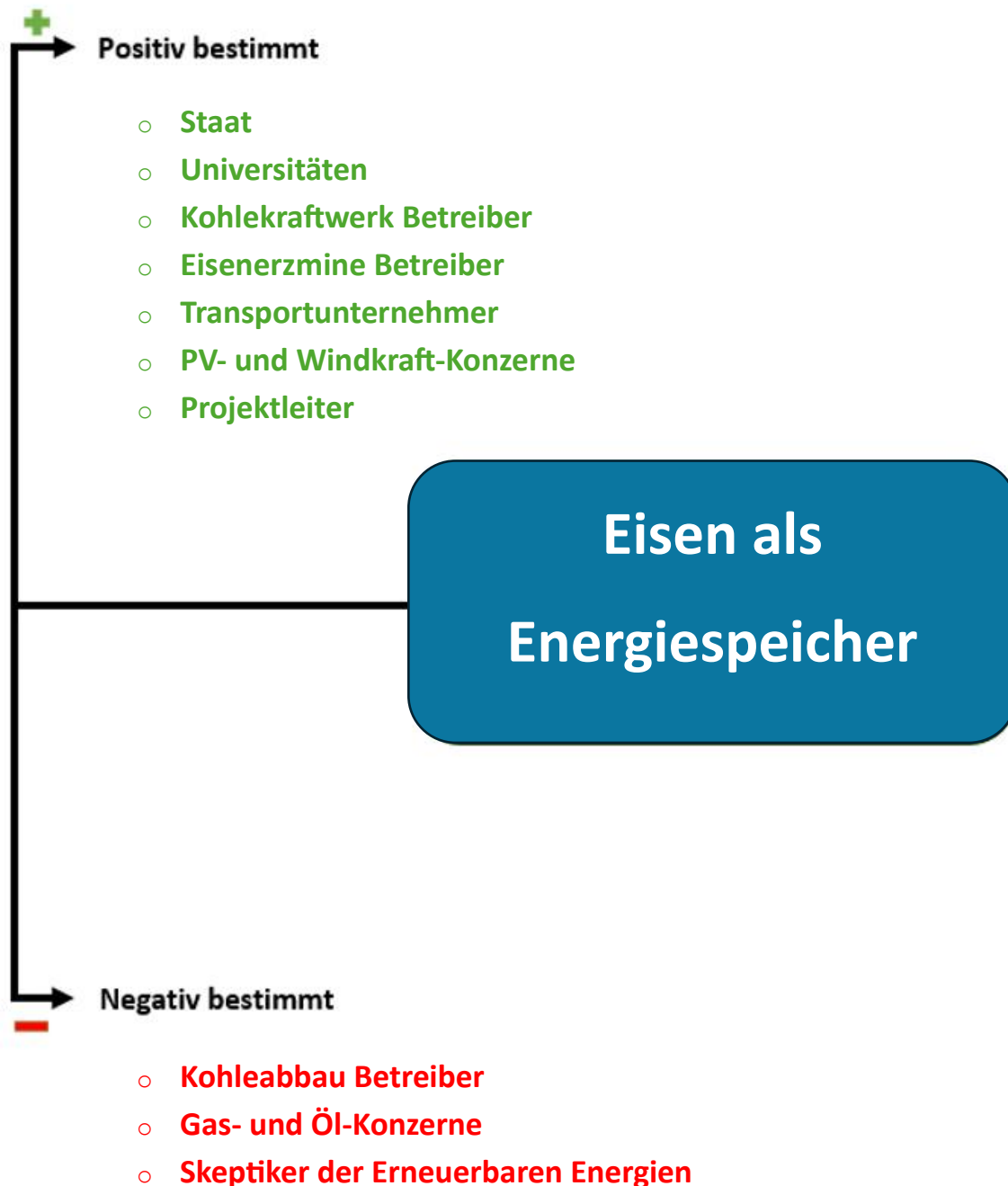


Abbildung 5.7, Stakeholderanalyse

6 Projektplanung

6.1 Projektstrukturplan

Bei der Projektstrukturplanung wird das gesamte Projekt in einzelne Arbeitspakete unterteilt, die gemeinsam die Gesamtergebnisse des Projekts liefern. Die nachfolgende Abbildung stellt einen Projektstrukturplan in Form eines Strukturbaums dar, der auf dem 4-Phasenmodell basiert.

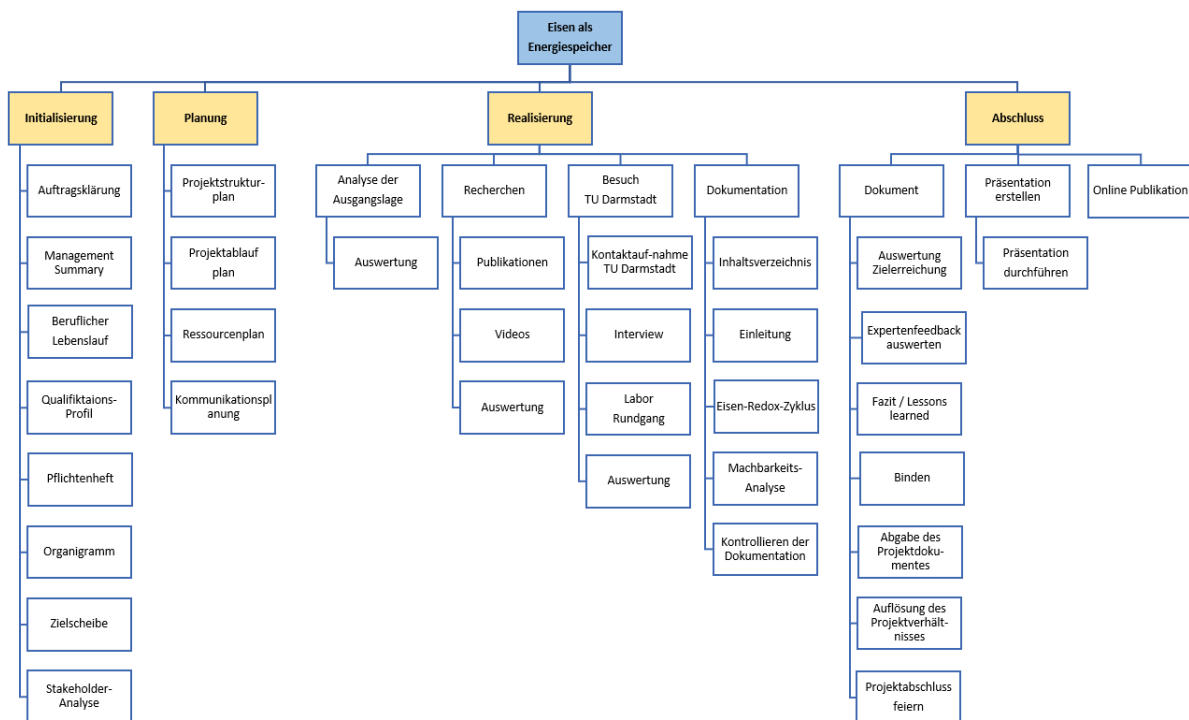


Abbildung 6.1, Projektstrukturplan

6.3 Ressourcenplan

Der Ressourcenplan gibt eine Übersicht welche Ressourcen ich für meine Diplomarbeit benötige. Da am Schluss meiner Arbeit eine Lektüre vorliegt, brauche ich in erster Linie nur meinen Laptop und die Programme des Microsoft 365. Für meinen Besuch bei der TU Darmstadt benötige ich zusätzlich eine Kamera, um den Besuch vor Ort festzuhalten. Aus diesem Grund gibt es keinen konkreten Ressourcenplan.

6.4 Kommunikationsplan

Im Kommunikationsplan werden alle relevanten Ziel- und Ansprechgruppen, die verschiedenen Kommunikationskanäle sowie die festgelegten Intervalle der Kommunikation aufgelistet. Dabei wird nicht nur definiert, welche Gruppen angesprochen werden sollen, sondern auch über welche Medien oder Plattformen die Kommunikation erfolgen wird. Zusätzlich werden Zeitpunkte und Frequenzen für die Kontaktaufnahme oder Informationsweitergabe festgelegt, um eine regelmässige und zielgerichtete Kommunikation zu gewährleisten.

Kommunikationsplan				
Ansprechgruppen	Inhalt	Intervalle/Termine	Kanal	Verantwortung
Fachexperte	Update zum Stand des Projekts	Wöchentlich	Teams/Mündlich	Projektleiter
Diplomlehrer	2x Vorzeigetermin	20.09.2024 17.10.2024	Teams	Projektleiter
TU Darmstadt	Interview	14.10.2024	vor Ort	Projektleiter
Diplomlehrer Diplomexperte	Präsentation	16.11.2024	vor Ort TEKO Olten	Projektleiter

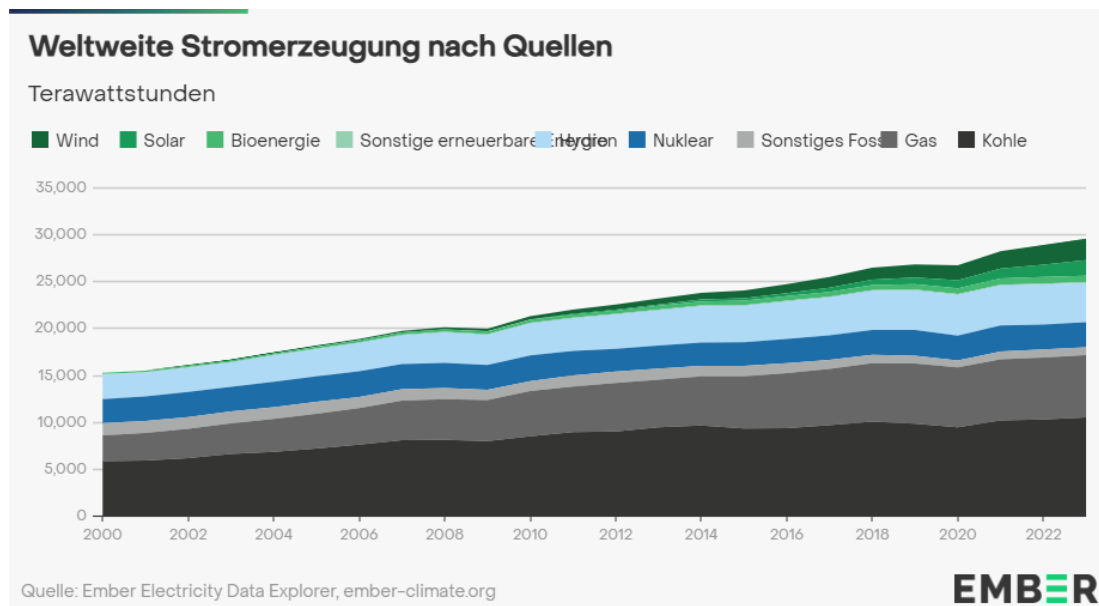
Table 6.2, Kommunikationsplan

7 Projektrealisierung

7.1 Ausgangslage

7.1.1 Stromerzeugung Global & Europa

Der weltweite Strombedarf steigt kontinuierlich und wächst von Jahr zu Jahr. Im Vergleich zum Jahr 2000, als der weltweite Stromverbrauch bei rund 15'000 TWh (Terawattstunden) pro Jahr lag, hat sich die erzeugte Strommenge bis heute auf rund 30'000 TWh pro Jahr verdoppelt. Derzeit stammen etwa zwei Drittel (66%) der weltweit erzeugten elektrischen Energie aus nicht erneuerbaren Quellen, sondern basieren auf fossilen Brennstoffen. Unter diesen fossilen Brennstoffen spielt Kohle eine zentrale Rolle: Etwa die Hälfte der Energie aus fossilen Brennstoffen wird durch die Verbrennung von Kohle erzeugt. (01, 2024)



*Tabelle 7.1, Weltweiter Stromverbrauch
von: <https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/>*

Dieser hohe Anteil an fossilen Brennstoffen, insbesondere Kohle, hat weitreichende Folgen für die Umwelt. Kohlekraftwerke sind einer der grössten Verursacher von CO₂-Emissionen und tragen damit erheblich zum Klimawandel bei. Trotz der negativen Umweltauswirkungen ist die Nachfrage nach diesen Energieträgern aufgrund ihrer Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit nach wie vor hoch. International wächst jedoch der Druck, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu verringern und den Anteil Erneuerbarer Energien wie Solar-, Wind- und Wasserkraft deutlich zu erhöhen, um den weltweiten Energiebedarf nachhaltiger zu decken.

In Europa verlieren fossile Brennstoffe immer mehr an Bedeutung: 59% des Stroms werden heute aus CO₂-freien Energiequellen erzeugt, davon 19% aus Kernenergie, 17% aus Wasserkraft und 18% aus der rasch wachsenden Wind- und Solarenergie. Die Stromerzeugung aus Kohle ist seit 2015 um 35% zurückgegangen und macht nur noch 14% des gesamten Strommixes aus. (01, 2024)

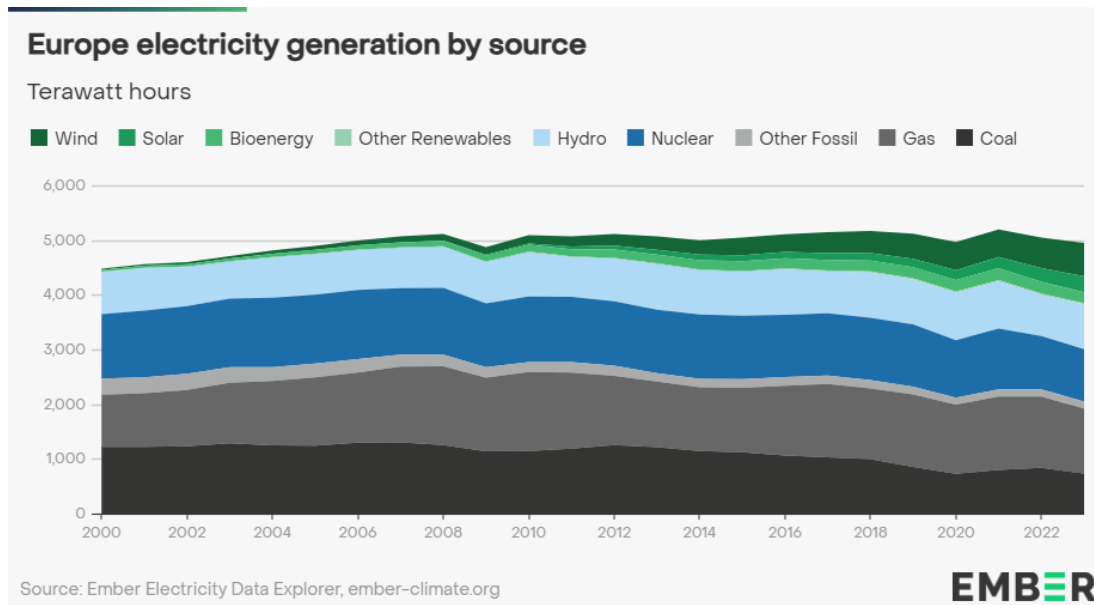


Tabelle 7.2, Stromverbrauch Europa
von: <https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/>

7.1.2 Kohleausstieg Deutschland

Deutschland hat sich im Rahmen seiner Klimaschutzpolitik zum schrittweisen Ausstieg aus der Kohleverstromung verpflichtet, um den CO₂-Ausstoss zu senken und die Klimaziele zu erreichen. Der Kohleausstieg ist Teil der Energiewende und soll bis spätestens 2038, idealerweise bereits bis 2030, abgeschlossen sein. Dieser Beschluss wurde im Jahr 2020 durch das deutsche Kohleausstiegsgesetz festgelegt. Die Verbrennung von Kohle, insbesondere von Braunkohle, trägt erheblich zu den deutschen CO₂-Emissionen bei. Der Kohleausstieg ist notwendig, um die Klimaziele des Pariser Abkommens und die nationale Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen. Der Anteil des Kohlestroms in Deutschland lag 2023 bei knapp 27%. (04, 2023) (01, 2024)

7.1.3 Herausforderungen und Chancen

Mit dem Ausstieg aus der Kohle und dem Ausbau der Erneuerbaren Energien kommt es zu immer grösseren Schwankungen im Stromnetz. Kohlekraftwerke können ihre Leistung stufenlos an den Bedarf anpassen. Bei Wind- und Solarenergie kann man dies nicht so einfach, man kann diese Anlagen zwar nach unten regeln, aber nach oben ist man von der Natur abhängig. Dadurch kann es zu vielen Engpässen kommen, in denen mehr Strom benötigt wird, als gerade produziert wird. Die Herausforderung besteht darin, diese Engpässe auszugleichen.

Dies erfordert grosse Speicherkapazitäten, die bei Stromüberschuss geladen und bei Strommangel entladen werden. So kann das Stromnetz stabil gehalten und eine sichere Stromversorgung gewährleistet werden. Die bestehenden Speicherkraftwerke werden in Zukunft kaum mehr ausreichen, es werden dringend Speicherlösungen benötigt, die ganze Städte abdecken können. Die richtige Lösung ist noch nicht gefunden und wird es wohl auch nie geben. Aber es gibt viele vielversprechende Ansätze, einer davon ist der Eisen-Redox-Zyklus.

7.2 Eisen als Energieträger

Die Dringlichkeit der Reduzierung von Treibhausgasemissionen und die Notwendigkeit einer nachhaltigen Energieerzeugung veranlasst dazu, nach geeigneten Energiespeichersystemen zu suchen. Das Metall Eisen ist hier ein sehr überzeugender Energieträger und wird schon bei kleinen Speichersystemen als Energieträger genutzt.

Der Eisen-Redox-Zyklus wird zu den chemischen Energiespeichern gerechnet, welche sich durch ihre Fähigkeit auszeichnen, Energie über lange Zeiträume zu speichern und grosse Energiemengen bereitzustellen, was sie ideal für die Langzeitspeicherung macht. Das Diagramm zeigt, dass chemische Speicher die Einzigen sind, welche sich für den Terawattstunden Bereich eignen, während andere Technologien wie elektrochemische Batterien oder mechanische Speicher (z.B. Pumpspeicherkraftwerke) eher im Kilowatt-, Megawatt- oder Gigawattstunden Bereich liegen.

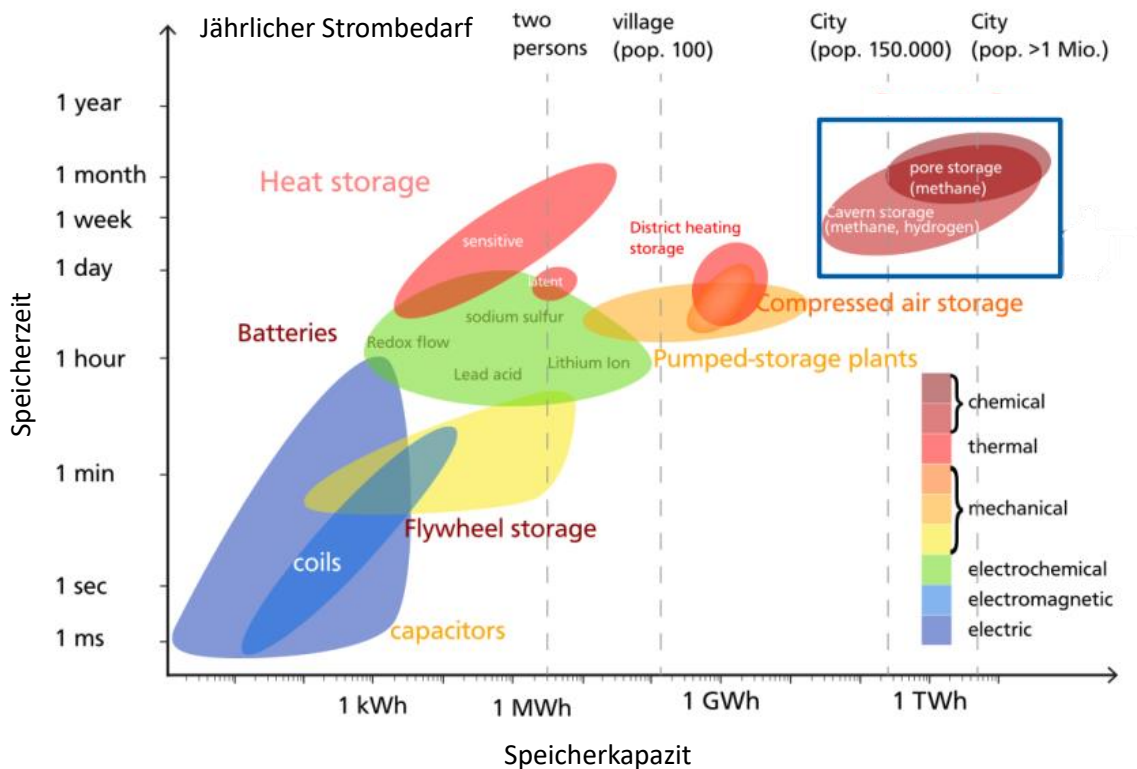


Tabelle 7.3, Speichertechnologien
von: I.Stadler, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-48893-5>

Eisen (Fe) ist dabei ein interessanter Energieträger, da es, wie im Diagramm unten zu sehen, einen relativ hohen Energiegehalt pro Volumeneinheit aufweist (ca. 16 kWh/l), was bedeutet, dass es bei geringem Volumen eine beträchtliche Menge an Energie speichern kann. Diese Eigenschaft macht es besonders geeignet für Anwendungen, bei denen der verfügbare Platz eine Rolle spielt. Im Vergleich zu anderen Energieträgern hat Eisen jedoch einen geringeren Energiegehalt pro Masse (2.06 kWh/kg). Das bedeutet, dass Eisen im Verhältnis zu seinem Gewicht nicht der effizienteste Energieträger ist, da es eine relativ grosse Masse benötigt, um grosse Energiemengen zu speichern oder bereitzustellen. (08, 2022)

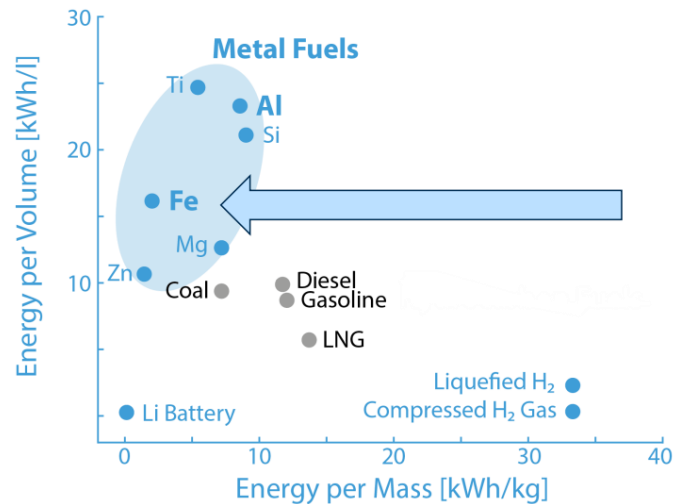


Tabelle 7.4, Diagramm Chemische Energieträger Energy pro Volumen & Energie pro Masse
von: Dabiagi, P., Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenge for retrofitting coal-fired power plants, 2022

Die folgende Abbildung zeigt noch einmal, wo die grossen Vorteile der Metalle liegen. Auf der linken Seite haben wir die Gase, die einen sehr hohen Energiegehalt pro Kilogramm haben, aber einen sehr geringen Energiegehalt pro Volumen und zudem noch schlechte Umgebungsbedingungen aufweisen. Auf der rechten Seite haben wir die Metalle, die einen enormen Energiegehalt pro Volumen haben, aber auch ein sehr hohes Gewicht. Ein grosser Vorteil der Metalle ist, dass sie bei Raumtemperatur gehandhabt werden können.



Abbildung 7.1, Energiedichte mittels PET-Flaschen
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"

Trotz seines geringeren Energiegehalts pro Gewicht, bietet Eisen wesentliche Vorteile. Zum einen ist es im Vergleich zu anderen Metallen wie Aluminium oder Titan deutlich kostengünstiger und weltweit verfügbar. Zudem ist Aluminium aufgrund des tieferen Schmelzpunktes nicht für den Redox-Zyklus bei Umgebungsdruck geeignet. Eisen ist relativ umweltfreundlich, da es ungiftig und leicht zu recyceln ist, was es zu einem vielversprechenden Energieträger für nachhaltige Energiesysteme macht. Der Eisen-Redox-Zyklus hat einen entscheidenden Vorteil: Der Kreislauf verbraucht kein Eisen, das Eisen muss nur einmal abgebaut werden und kann theoretisch immer wieder für den Kreislauf verwendet werden. (16, 2024)

Die Menge des verfügbaren Eisens wird in der folgenden Abbildung anhand der jährlichen Metallproduktion deutlich. Im Jahr 2021 wurden weltweit 2,6 Gigatonnen Eisen abgebaut, was einer gespeicherten Energiemenge in Eisen von 5'400 TWh entsprechen würde. (11, 2024)

Formel 1



Abbildung 7.2, Abgebaute Metalle im Jahr 2021
von: All the Metals We Mined in 2021: Visualized (visualcapitalist.com)

7.3 Eisen-Redox-Zyklus

Der Eisen-Redox-Zyklus basiert auf der Oxidation von Eisenstaub, wobei der Eisenstaub aufgrund seiner grossen Oberfläche zu Eisenoxid verbrannt wird. Das Eisenoxid wird durch die Reduktion wieder zu reinem Eisen, das durch die Verbrennung erneut oxidiert werden kann, so dass ein Kreislauf entsteht. Bei der Reduktion wird (erneuerbare) Energie eingespeichert, die bei der Oxidation wieder freigesetzt wird. Bei der Oxidation kann die entstehende Wärme zur Stromerzeugung genutzt werden. Das Entscheidende an diesem Kreislauf ist, dass weder bei der Reduktion noch bei der Oxidation CO_2 freigesetzt wird. Faszinierend ist auch, dass das bei der Oxidation verbrannte Eisen vollständig durch die Reduktion zurückgewonnen wird. Der Zyklus kann also theoretisch unendlich oft mit dem gleichen Eisen wiederholt werden.

In den folgenden Kapiteln werden die vier Hauptphasen des Eisen-Redox-Zyklus im Detail beschrieben: die Oxidation des Eisens, der Transport des Eisenoxids, die Reduktion des Eisenoxids und der Transport des Eisens, der den Kreislauf schliesst.

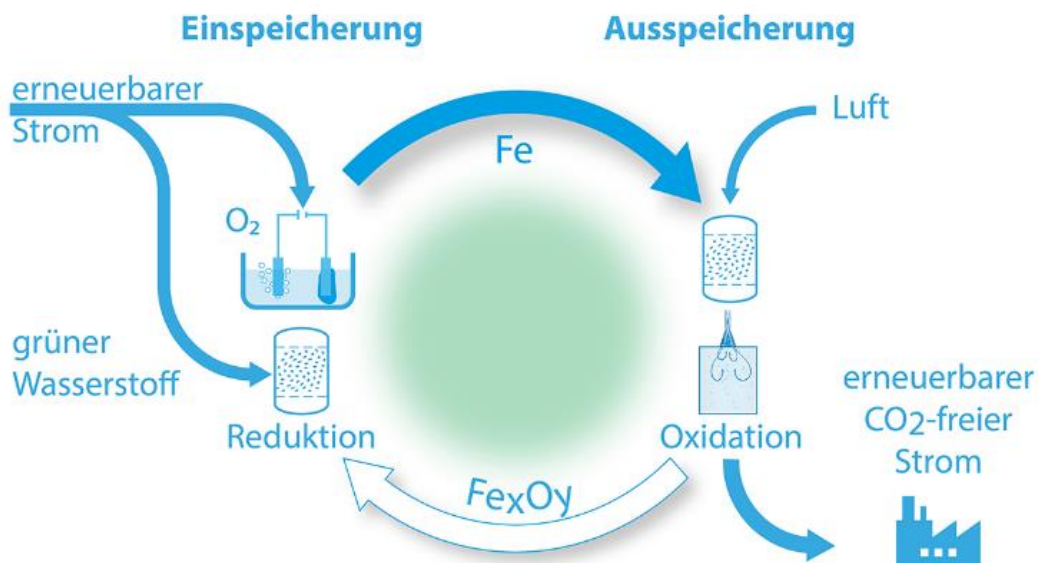


Abbildung 7.3, Eisen-Redox-Zyklus

von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/about_cc/research_summary_cc/index.de.jsp

7.3.1 Oxidation von Eisen

Die Oxidation von Eisen ist der erste Schritt im Eisen-Redox-Zyklus, bei dem durch einen chemischen Prozess Wärme freigesetzt wird. Dabei reagiert staubförmiges Eisen in einem Verbrennungsprozess mit Sauerstoff zu Eisenoxid. Da Eisen höherenergetisch als Eisenoxid ist, ist diese Reaktion exotherm, d.h. es wird Wärme freigesetzt. Nach dem Verbrennungsprozess bleibt Eisenoxid zurück, welches anschliessend zur Reduktion transportiert wird.

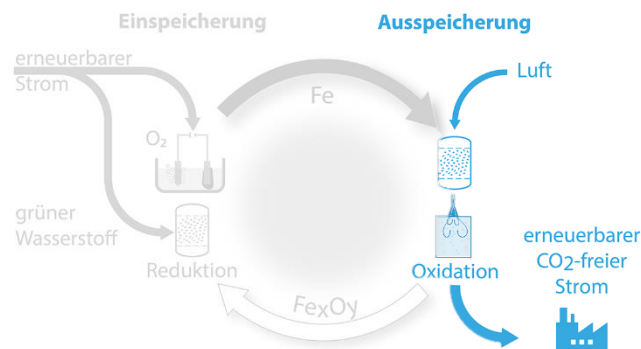
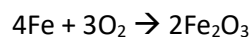


Abbildung 7.4, Eisen-Redox-Zyklus, Oxidation

von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/about_cc/research_summary_cc/index.de.jsp

Es gibt verschiedene Oxidationsstufen; da im Eisen-Redox-Zyklus eine vollständige Oxidation angestrebt wird, entsteht am Ende die Oxidationsstufe Hämatit. Die chemische Reaktionsgleichung für die Oxidation von Eisen zu Hämatit lautet:

(08, 2022)



Bei der Verbrennung reagieren vier Eisenatome mit drei Sauerstoffmolekülen zu Eisenoxid, wobei viel Wärmeenergie freigesetzt wird. Der Eisenstaub dient sozusagen als Brennstoff. Solange dem Verbrennungsprozess kontinuierlich Eisenstaub und Sauerstoff zugeführt wird, bleibt der Prozess stabil. Für die Zündung wird eine einmalige Energiezufuhr, z.B. über eine Gasflamme oder ein Mikrowellenplasma benötigt. Während des Betriebs ist keine Zufuhr von externer Wärme mehr erforderlich. Diese Energie kann direkt genutzt werden, um Wasser zu verdampfen, das durch Dampfturbinen geleitet wird, um elektrische Energie zu erzeugen. Der gesamte Oxidationsprozess ähnelt der Energieerzeugung in fossilen Kraftwerken, ist aber frei von CO₂-Emissionen, da keine fossilen Brennstoffe verbrannt werden. (08, 2022) (20, 2024)

7.3.1.1 Prozessbedingungen und Partikeleigenschaften

Die Effizienz der Oxidation von Eisenstaub hängt stark von der Grösse der Eisenpartikel ab. Kleinere Partikel bieten eine grössere Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Volumen, was die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht. Studien haben gezeigt, dass Eisenpartikel mit einer Grösse zwischen 1 - 10 Mikrometer (µm) am effizientesten oxidiert werden können. Diese Partikelgrösse gewährleistet eine nahezu vollständige Oxidation und maximiert die Energieausbeute. Ab einer Partikelgrösse von etwa 100 µm tritt eine vermehrte Anzahl von Mikroexplosionen auf, die den Prozess erheblich beeinträchtigen. (05, 2023)

Die Temperatur der Verbrennungsflamme bei entsprechender Prozessführung liegt bei ca. 2'000 °C und damit unter dem Schmelzpunkt, von 2'860 °C. Dadurch wird ein Schmelzen der Partikel verhindert. (20, 2024)

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis von etwa 1,75:1 bis 2:1 eine optimale Temperatur erreicht wird, bei der die Bildung unerwünschter Nebenprodukte vermieden wird. (05, 2023)

Auf der folgenden Abbildung ist eine Aufnahme einer Verbrennung von Eisenstaub in einem Testlabor.



Abbildung 7.5, Eisenstaub Verbrennung
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"

7.3.1.2 Herausforderungen bei der Oxidation

Die Oxidation mag sehr einfach erscheinen, aber auch hier gibt es einige technische Herausforderungen. Bei ungünstigen Prozessbedingungen kann es zur Bildung von Nanopartikeln und Mikroexplosionen kommen.

Nanopartikel entstehen, wenn Eisenpartikel bei hohen Temperaturen teilweise verdampfen. Bei der anschließenden Abkühlung kondensieren die gasförmigen Eisenmoleküle und bilden kleine feste Partikel (Nanopartikel). Nanopartikel sind toxisch und können, wenn sie sich ablagern, die Oberfläche jedes Materials beschädigen. (20, 2024)

Mikroexplosionen auftreten, wenn der Druck innerhalb der Eisenpartikel durch die rasche Freisetzung von Sauerstoff ansteigt. Dies führt zum Aufbrechen der Partikel und zur Bildung kleinerer Partikel, was die Effizienz des Prozesses beeinträchtigen kann. (05, 2023)

Eine weitere Herausforderung ist die Rückgewinnung der oxidierten Eisenpartikel, die effizient aufgefangen werden müssen, um eine Rückführung in den Kreislauf zu ermöglichen. Dies stellt vor allem bei grosstechnischen Anwendungen eine Herausforderung dar. (06, 2022)

7.3.1.3 Effizienz der Oxidation

Eisen (Fe) hat einen Energiegehalt von 2.06 kWh/kg. Bei einem Wirkungsgrad der gesamten Oxidationsanlage (Verbrennung und Wasser-Dampf Kreislauf) von 45% erhalten wir schliesslich 0,93 kWh/kg

elektrischen Strom. Die restlichen 55% sind Wärmeenergie, welche für andere Prozesse genutzt werden kann, z.B. für die Wärmeversorgung von Industrieanlagen oder Wohngebäuden. (08, 2022)

Formel 2

Energieeffizient der Oxidation

2.06 kWh/kg → 0.93 kWh/kg

7.3.2 Transport von Eisenoxid

Nach der Oxidation wird das entstandene Eisenoxid zu einer Reduktionsanlage transportiert, wo es wieder in Eisen (Fe) umgewandelt wird. Der Transport von Eisenoxid ist im Vergleich zu anderen Energieträgern relativ einfach, da es sich um ein stabiles, festes und ungiftiges Material handelt. Dies ermöglicht den Transport von Eisenoxid ohne grosse Sicherheitsvorkehrungen, wie sie z.B. für Wasserstoff oder flüssige Brennstoffe erforderlich wären.

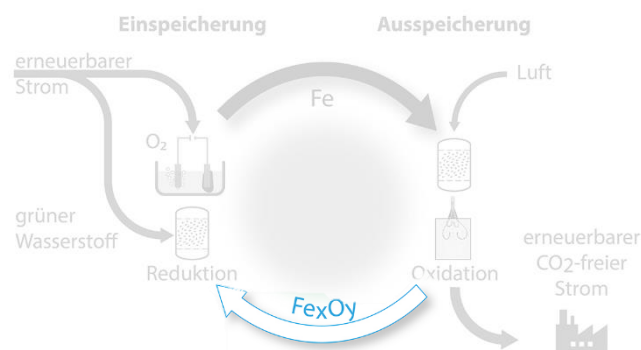


Abbildung 7.6, Eisen-Redox-Zyklus, Transport Eisenoxid

von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/about_cc/research_summary_cc/index.de.jsp

7.3.2.1 Transportmethoden

Eisenoxid kann in grossen Mengen per Lastwagen, Züge oder Schiffe transportiert werden. Das Material muss in Containern oder geschlossenen Behälter verpackt werden, die es vor äusseren Einflüssen schützen.

7.3.2.2 Transportmasse

Eine wichtige Tatsache, welche berücksichtigt werden muss, ist dass Eisenoxid deutlich schwerer ist als reines Eisen. Dies liegt daran, dass das Eisen bei der Oxidation Sauerstoffatome aufnimmt, wodurch sich die Masse des Materials erhöht. Genauer gesagt ist Eisenoxid etwa **43%** schwerer als Eisen. Durch die Oxidation nimmt auch das Volumen zu, und zwar um **115%**. In der Praxis kann es aber durchaus sein, dass die Partikel durch Hohlräume zwischen den Molekülen noch grösser sind. (09, 2024)

Formel 3

Formel 4

Masse		
1 kg Eisen	→ Oxidation →	1.43 kg Eisenoxid
Volumen		
1 m ³ Eisen	→ Oxidation →	2.15 m ³ Eisenoxid

7.3.3 Reduktion von Eisenoxid

Die Reduktion von Eisenoxid zu Eisen ist der zweite wesentliche Schritt im Eisen-Redox-Zyklus. Dabei werden die Eisenmoleküle wieder von den Sauerstoffmoleküle getrennt, so dass reines Eisen wieder entsteht. Dieser Prozess kann elektrochemisch oder thermochemisch durchgeführt werden. Die thermochemische Reduktion erfordert die Zugabe eines Reduktionsmittels, bei dem es sich um Kohlenmonoxid oder Wasserstoff handelt.

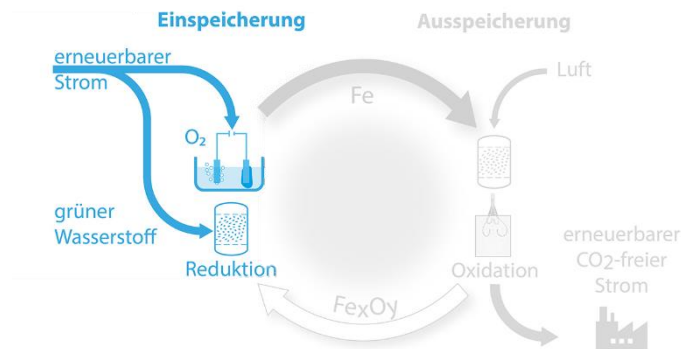


Abbildung 7.8, Eisen-Redox-Zyklus, Reduktion

von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/about_cc/research_summary_cc/index.de.jsp

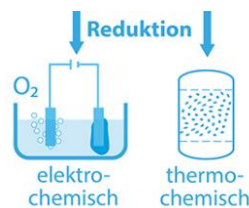
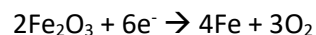


Abbildung 7.7, Reduktion elektro- & thermochemisch

von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/about_cc/research_summary_cc/index.de.jsp

7.3.3.1 Elektrochemische Reduktion

Bei diesem Verfahren wird das Eisenoxid durch Elektrolyse vom Sauerstoff getrennt. Dabei wird das Eisenoxid in einer alkalischen Elektrolytlösung direkt mit elektrischem Strom reduziert. Die Nutzung der Elektronen für die Reduktion der Eisenoxidpartikel, also der Wirkungsgrad, liegt derzeit bei >80%. (07, 2023) (20, 2024)

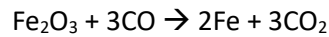


Da dieses Verfahren noch wenig erforscht ist, noch nicht grosstechnisch umgesetzt werden kann und ein höheres Gefährdungspotential aufweist, wird derzeit auf die thermochemische Reduktion gesetzt. Daher wird dieses Verfahren in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. (11, 2024)

7.3.3.2 Thermochemische Reduktion mit Kohlenmonoxid

Der Prozess der Reduktion von Eisenoxid mit Kohlenmonoxid ist exotherm, was bedeutet, dass während des Prozesses Wärme freigesetzt wird. Als Nebenprodukt entsteht dabei Kohlendioxid (CO₂). Diese Methode wird in der heutigen Stahlproduktion im Hochofenverfahren eingesetzt. Die chemische Reaktionsgleichung lautet:

(05, 2023)

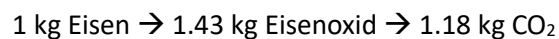


Hierbei reagiert eine Einheit Eisenoxid (Fe₂O₃) mit drei Molekülen Kohlenmonoxid (CO) zu zwei Eisenatomen (Fe) und drei Molekülen Kohlendioxid (CO₂). Da bei diesem Prozess CO₂ freigesetzt wird, ist die Reduktion von Eisenoxid mit Kohlenmonoxid keine geeignete Methode zur CO₂-freien Energieerzeugung. Aus diesem Grund wird diese Methode in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Nachfolgend wurde berechnet, wie viel CO₂ bei der Reduktion von Eisenoxid freigesetzt wird.

Formel 5

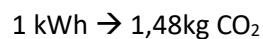
Formel 6

CO₂ pro Kilogramm Eisen



CO₂ pro kWh

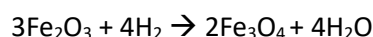
(elektrisch bei Endverbraucher)



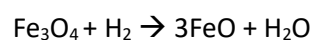
7.3.3.3 Thermochemische Reduktion mit Wasserstoff

Die Reduktion von Eisenoxid mit Wasserstoff gilt als besonders umweltfreundlich, da als Nebenprodukt nur Wasser entsteht. Damit stellt dieses Verfahren eine CO₂-freie Alternative zu herkömmlichen Reduktionsmethoden dar, was es besonders attraktiv macht. Der Prozess erfordert jedoch eine Wärmezufuhr, da er endotherm ist. Während des Reduktionsprozesses durchläuft das Eisenoxid mehrere Phasenübergänge. Zuerst wird Hämatit (Fe₂O₃) zu Magnetit (Fe₃O₄) dann zu Wüstit (FeO) und schliesslich zu Eisen (Fe) und Wasser (H₂O) reduziert. Der letzte Schritt, die Reduktion von Wüstit zu Eisen, ist der langsamste Prozess und spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Gesamtreaktionszeit. Dieser Schritt erfordert hohe Temperaturen, um die Reduktion effizient durchzuführen. Diese Wärme kann durch die Verbrennung von Wasserstoff oder durch Solarthermiekraftwerke kommen. Die benötigte Wärmeenergie für die Reduktion sind 98.8 kJ/mol Eisenoxid Fe₂O₃.
(08, 2022) (05, 2023) (10, 2022) (20, 2024)

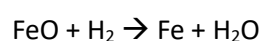
1. Reduktionsphase Hämatit zu Magnetit



2. Reduktionsphase Magnetit zu Wüstit



3. Reduktionsphase Wüstit zu metallischem Eisen



7.3.3.4 Prozessbedingungen

Der Reduktionsprozess ist stark von der Wasserstoffkonzentration und der Temperatur abhängig. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit mit steigendem Wasserstoffgehalt zunimmt. So wird die maximale Reduktionsrate bei einer Wasserstoffkonzentration von 25% erreicht. Eine weitere Erhöhung des Wasserstoffgehaltes über diesen Wert hinaus hat nur noch einen geringen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Der Prozess läuft typischerweise bei Temperaturen zwischen 370 °C und 900 °C ab. (10, 2022)

7.3.3.5 Herausforderungen bei der Reduktion

Die Rückgewinnung der Prozesswärme ist entscheidend für die Minimierung von Energieverlusten und die Erhöhung des Wirkungsgrades. Ohne effiziente Wärmerückgewinnung sinkt die Reduktionseffizienz auf etwa 73-75%, während sie bei optimaler Rückgewinnung auf bis zu 91% steigen kann. Dies erfordert jedoch technisch ausgereifte Wärmetauschersysteme. (10, 2022)

Die Reduktion von Eisenoxid erfordert hohe Temperaturen, um eine vollständige Umwandlung in metallisches Eisen zu erreichen. Die Aufrechterhaltung dieser hohen Temperaturen ist energieintensiv und kann den Gesamtwirkungsgrad des Prozesses verringern. Damit der ganze Kreislauf CO₂-frei bleibt, muss diese Wärme zwingend aus Erneuerbaren Energieerzeugern kommen. Eine Lösung hierfür wäre die Verbrennung von Wasserstoff. Für den Reduktionsprozess würde man etwa 20% des Wasserstoffs für die Wärmeerzeugung und 80% für den chemischen Prozess benötigen. Eine andere Lösung ist die Wärmeerzeugung durch Parabolrinnen- oder Solarturmkraftwerke. (20, 2024)

7.3.3.6 Effizienz der Reduktion

Die Effizienz des Reduktionsprozesses ist ein wesentlicher Aspekt, insbesondere im Hinblick auf die Gesamtausbeute. Unter optimalen Bedingungen kann die Reduktion von Eisenoxid mit Wasserstoff einen Wirkungsgrad von bis zu 91% erreichen, wenn eine geeignete Wärmerückgewinnung in den Prozess integriert ist. Ohne Wärmerückgewinnung sinkt der Wirkungsgrad auf etwa 73-75%, abhängig von der gewählten Temperatur und dem Wasserstoffgehalt. Die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse, die in diesem Prozess verwendet wird, hat einen Wirkungsgrad von etwa 70%. (10, 2022)

7.3.4 Transport von Eisen

Nach der Reduktion des Eisenoxids wird das zurückgewonnene metallische Eisen zu den Oxidationsanlagen zurück transportiert, um erneut oxidiert zu werden, somit schliesst sich der Kreislauf. Der Transport von Eisen ist nicht derselbe wie bei Eisenoxid, da Eisen bei schlechter Lagerung explodieren kann.

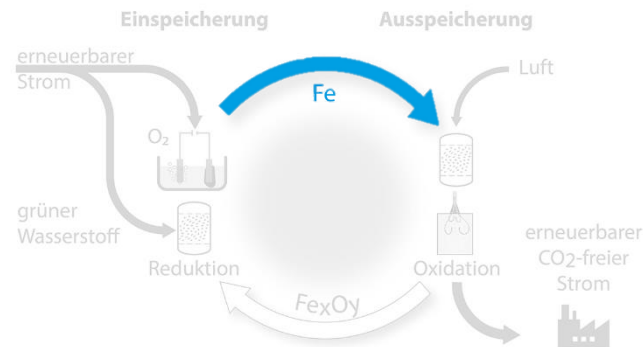


Abbildung 7.9, Eisen-Redox-Zyklus, Transport Eisen
 von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/about_cc/research_summary_cc/index.de.jsp

7.3.4.1 Explosionsgefahr

Eisenstaub hat eine sehr grosse Oberfläche und reagiert daher sehr schnell. Deshalb besteht die Gefahr, dass sich Eisenstaub in grossen Mengen bei der Lagerung in feuchten Räumen mit Sauerstoffmolekülen aus der Umgebungsluft zu Eisenoxid verbindet und dabei Wasserstoff in der Luft bildet, was zu einer Wasserstoff-Explosion führen kann. Lagerräume oder Silos können mit Wasserstoffsensoren ausgestattet werden, um im Bedarfsfall rechtzeitig reagieren zu können. (20, 2024)

7.3.4.2 Transportmethoden

Das Eisen, sowie das Eisenoxid muss vor äusseren Einflüssen geschützt werden. Hierzu bietet sich der Transport in Container oder geschlossenen Behälter an.

Sollte sich während des Transports Wasserstoff bilden, wäre ein Eingreifen kaum möglich. Daher sollte die Luft im Behälter durch Stickstoff (N_2) ersetzt werden oder mit N_2 durchströmt werden, um die Bildung von Wasserstoff zu verhindern. (20, 2024)

Der wesentliche Vorteil von Eisen ist, dass es ohne Qualitäts- und Energieverlust über längere Zeiträume gelagert werden kann. Dies macht Eisen zu einem idealen Energieträger für den internationalen Handel und für saisonale Speicherung. (08, 2022)

7.3.4.3 Transportmasse

Wie bereits in Kapitel 7.3.2.2 erwähnt, hat Eisen pro Atom eine geringere Masse und ein kleineres Volumen als das Eisenoxid-Molekül. Dieser Unterschied ist von grosser Bedeutung und muss beim Transport unbedingt berücksichtigt werden, da er die Transportkapazität und -effizienz beeinflusst.

Masse		
1 kg Eisen	→ Oxidation →	1.43 kg Eisenoxid
Volumen		
1 m ³ Eisen	→ Oxidation →	2.15 m ³ Eisenoxid

7.4 Machbarkeitsanalyse

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Machbarkeitsanalyse, ob der Eisen-Redox-Zyklus realisierbar ist oder ob diese Technologie eine Sackgasse darstellt.

7.4.1 Wirkungsgrade

Um die Machbarkeit dieses Prozesses umfassend beurteilen zu können, spielt der Wirkungsgrad eine zentrale Rolle. Man kann sogar sagen, dass der Wirkungsgrad der entscheidende Faktor in der gesamten Betrachtung ist. Der Wirkungsgrad gibt an, wie effizient die eingesetzte Energie in nutzbare Energie umgewandelt wird. Je höher der Wirkungsgrad, desto mehr Energie kann genutzt werden und desto weniger geht während des Prozesses verloren, z.B. in Form von Wärme oder anderen unerwünschten Verlusten. Ein niedriger Wirkungsgrad bedeutet dagegen, dass ein erheblicher Teil der Energie ungenutzt bleibt. Deshalb ist die Maximierung des Wirkungsgrades von entscheidender Bedeutung, um die Energieeffizienz des Gesamtsystems zu optimieren und sicherzustellen, dass die Investitionen in den Prozess wirtschaftlich sinnvoll und nachhaltig sind. Nur durch eine genaue Betrachtung und Optimierung des Wirkungsgrades kann der langfristige Erfolg eines solchen Prozesses gewährleistet werden.

7.4.1.1 Wirkungsgrad der Oxidation

Bei der Oxidation wird Eisen zu Eisenoxid verbrennt und setzt dabei Wärmeenergie frei welche anschliessend für die Stromproduktion genutzt werden kann. Da der Prozess ähnlich wie bei konventionellen Kraftwerken abläuft, liegt der Wirkungsgrad im gleichen Bereich bei ca. 45%, mit einer kleinen Steigerung hingegen zu Kohle von ca. 1-2%. (07, 2023)

Somit ergibt sich ein Wirkungsgrad von **44-46%**.

7.4.1.2 Wirkungsgrad der Reduktion mit Wasserstoff

Bei der Reduktion wird das Eisenoxid wieder in reines Eisen umgewandelt. Dieser Prozess wird mit Hilfe von einem Reduktionsmittel durchgeführt. Um den Kreislauf umweltfreundlich zu betreiben, verwenden wir hierfür Wasserstoff. Für die Reduktion wird zusätzlich Wärme benötigt, die den Wirkungsgrad beeinflusst. (10, 2022)

Ohne Wärmerückgewinnung kommen wir hier auf einen Wirkungsgrad von 71-75%.

Mit optimaler Wärmerückgewinnung auf **91%**.

7.4.1.3 Wirkungsgrad der Wasserstoffherstellung

Die Herstellung des für die Reduktion benötigten Wasserstoffs erfolgt durch Elektrolyse, wobei Strom verwendet wird, um Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. (10, 2022)

Hier bekommen wir einen Wirkungsgrad von **70%**.

7.4.1.4 Wirkungsgrad des Transports

Laut dem «Clean Circles» Team und einer Studie benötigt der Transport von Marokko nach Mitteleuropa ca. 3% der im Eisen gespeicherten Energie. In Marokko soll anhand der guten geografischen Lage für Solaranlagen, die Reduktion stattfinden. (11, 2024) (12, 2023)

In den meisten Fällen wird der Wirkungsgrad «Power to Power» betrachtet, d.h. der Transport des Eisenoxids wäre nicht enthalten. Da der Transport des Eisenoxids jedoch ein wichtiger Faktor im Kreislauf ist, wurde er in den 3% Verlust miteinbezogen.

Der Wirkungsgrad des Transports liegt somit bei ca. **97%**.

7.4.1.5 Gesamtwirkungsgrad

Der Gesamtwirkungsgrad des Eisen-Redox-Zyklus setzt sich aus allen Wirkungsgraden zusammen. Hier wird vom besten Szenario ausgegangen.

Oxidation:	46%
Reduktion:	91%
Wasserstoffherstellung:	70%
Transport:	97%

Gesamtwirkungsgrad: $28.4\% = 46\% * 91\% * 70\% * 97\%$

Nachfolgend ist der Wirkungsgrad grafisch abgebildet.

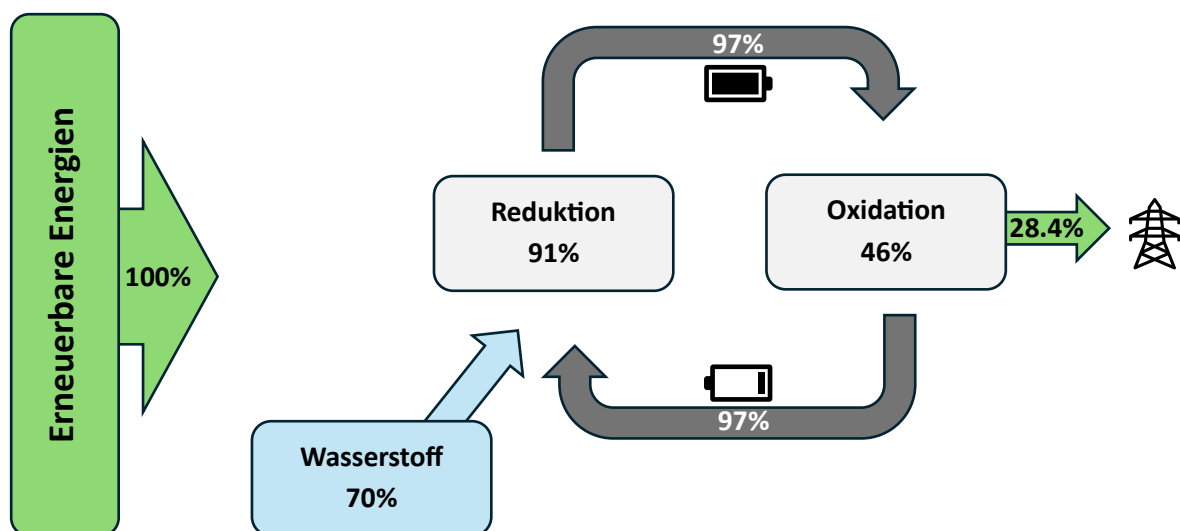


Abbildung 7.10, Wirkungsgrad grafisch

7.4.2 Benötigte Infrastruktur

Ein wesentlicher Vorteil der eisenbasierten Energietechnologie ist, dass grosse Teile der benötigten Infrastruktur bereits vorhanden sind. Dies reduziert den Bedarf an Neubauten, die oft mit der Erzeugung erheblicher Mengen an grauer Energie und zusätzlichen CO₂-Emissionen verbunden sind.

Eisenerzminen

Die Eisengewinnung ist bereits durch ein gut ausgebautes Netz grosser Eisenerzminen weltweit gesichert. Der Markt für den Handel mit Eisen ist robust und stellt sicher, dass genügend Ressourcen für die Umsetzung dieser Technologie zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zu den neuen Energieträgern, die möglicherweise noch eine eigene Infrastruktur für die Rohstoffgewinnung benötigen, gibt es für Eisen bereits ein funktionierendes und effizientes System.

Transportwege

Eisen zeichnet sich durch seine einfache Handhabung und Transportierbarkeit aus. Die dafür notwendigen Transportmittel wie Schiffe, Züge und Lastwagen existieren bereits und werden seit Jahrzehnten im Welthandel eingesetzt. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht alle derzeit genutzten Transportmittel CO₂-neutral sind. Durch den verstärkten Einsatz von CO₂-neutralen Alternativen, wie elektrifizierten Bahnstrecken oder Schiffen mit emissionsarmen Antrieben, könnte der Transport von Eisen in Zukunft vollständig klimaneutral gestaltet werden.

Oxidationsanlagen

Der Prozess der Energiegewinnung durch die Oxidation von Eisenstaub weist starke Gemeinsamkeiten zu bestehenden Kohlekraftwerken auf. Daher ist ein Retrofitting, d.h. die Umrüstung von Kohlekraftwerken auf die Verbrennung von Eisenstaub, technisch und wirtschaftlich machbar. Studien verschiedener Universitäten zeigen, dass die Umrüstung mit überschaubarem Aufwand möglich ist, da die bestehende Infrastruktur wie Dampfturbinen und andere Hauptkomponenten weiterverwendet werden können. Im Verlauf der Arbeit wird das Retrofitting der Kohlekraftwerke näher behandelt. (07, 2023)

Reduktionsanlagen

Im Gegensatz zu den Oxidationsanlagen müssen die Reduktionsanlagen, die für die Rückumwandlung des Eisenoxids in metallisches Eisen erforderlich sind, erst gebaut werden. Bisher gibt es keine grosstechnischen Reduktionsanlagen, die diese Prozesse im industriellen Massstab durchführen können. Diese Anlagen sollten idealerweise in sonnenreichen Regionen in der Nähe des Äquators errichtet werden, wo Solaranlagen ihr volles Potenzial über das ganze Jahr hinaus ausschöpfen können, damit die Reduktion durchlaufen kann.

Wasserstoffanlagen

Die Herstellung von grünem Wasserstoff ist entscheidend für die Reduktion von Eisenoxid zu metallischem Eisen. Grüner Wasserstoff zeichnet sich durch seine CO₂-freie Herstellung aus. Es existieren bereits effiziente Wasserstofferzeugungsanlagen. Um die für den grossflächigen Einsatz dieser Technologie erforderlichen Mengen an Wasserstoff bereitzustellen, müsste die Kapazität dieser Anlagen jedoch erheblich ausgebaut werden. (07, 2023)



Abbildung 7.11, Wasserstoffanlage

von: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/baut-deutschland-wasserstoffnetz-mit-staatsbeteiligung/>

Erneuerbare Energien

Neben dem Ausbau der Reduktionsanlagen und der Wasserstoffproduktion ist ein erheblicher Ausbau der Erneuerbarer Energien erforderlich, um die benötigte Energie für die Wasserstoffproduktion bereitzustellen. Von Bedeutung sind hier einerseits grosse Photovoltaik- und Windkraftanlagen, die den Strom für die Wasserstoffproduktion liefern, zum anderen grosse Parabolrinnen- oder Solarturmkraftwerke, die hohe Temperaturen für die Reduktion liefern können. Die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom in grossem Umfang ist eine zentrale Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der Technologie.



Abbildung 7.13, Parabolrinnenkraftwerk

von: [Integration of renewable energy into power systems - Khalifa University \(ku.ac.ae\)](https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/baut-deutschland-wasserstoffnetz-mit-staatsbeteiligung/)



Abbildung 7.12, Solarturmkraftwerk

von: <https://es.pinterest.com/pin/753438212631677909/>

7.4.3 Retrofitting Kohlekraftwerke

Das Retrofitting von Kohlekraftwerken zielt darauf ab, bestehende Anlagen mit hohen CO₂-Emissionen auf alternative, CO₂-freie Brennstoffe umzurüsten. Der Brennstoff wird hierbei von Kohle auf Eisen umgestellt. Somit können die Kraftwerke und die Transportinfrastruktur weiterverwendet werden. Weltweit gibt es etwa 2'500 aktive Kohlekraftwerke mit einer Gesamtleistung von etwa 2,1 TW. Die Umrüstung dieser Kraftwerke auf Eisen könnte eine erhebliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen ermöglichen, da der Eisen-Redox-Zyklus kein CO₂ freisetzt. (07, 2023)

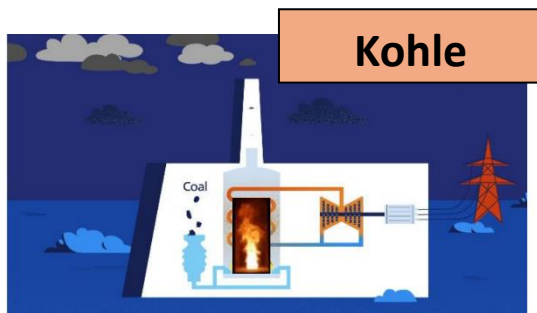


Abbildung 7.14, Kohle-Befeuerung
von Clean Circles, Präsentation: Iron is the new Coal



Abbildung 7.15, Eisen-Befeuerung
von Clean Circles, Präsentation: Iron is the new Coal

In Abbildung 7.14 ist ein traditionelles Kohlekraftwerk dargestellt, das Strom unter hohen Emissionen erzeugt, wie wir es bisher kennen. In Abbildung 7.15 hingegen wurde das Kraftwerk bereits einem Retrofitting unterzogen und produziert nun umweltfreundlichen Strom.

Es wurden bereits mehrere Analysen durchgeführt, die sich auf ein Retrofitting moderner Kohlekraftwerke der 800 MW-Klasse mit relativ neuen Technologien und hohen Dampftemperaturen von bis zu 620 °C konzentrieren. Dieser Kraftwerkstyp bietet ein grosses Potenzial für eine einfache Umstellung auf Eisenverbrennung, da wesentliche Komponenten wie der Dampferzeuger und die Turbinen wiederverwendet werden können. Die thermischen Wirkungsgrade sind mit denen von Kohle vergleichbar. (07, 2023) (11, 2024)



Abbildung 7.16, Kohlekraftwerk
von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/transfer_outreach_cc/circular_economy_cc/index.de.jsp

7.4.3.1 Modifikationen für ein Retrofitting

In diesem Kapitel wird erläutert, welche technischen Änderungen an einem konventionellen Kohlekraftwerk vorgenommen werden müssen, um ein Retrofitting zu ermöglichen und es damit zukünftig mit Eisenstaub anstelle von Kohle zu betreiben.

Brennstoffzufuhrsystem

In konventionellen Kohlekraftwerken muss die Kohle in Mühlen zerkleinert und als feiner Staub in die Brennkammer eingeblasen werden. Da Eisenstaub bereits in geeigneter Korngrösse vorliegt, entfällt dieser Schritt, was zu einer Vereinfachung und Effizienzsteigerung führt. (07, 2023)

Allerdings müssen die Zufuhrsysteme, bei Steinkohle-Kraftwerke, auf den höheren Massestrom des Eisenstaubs ausgelegt werden. Während Steinkohle einen geringeren Massenstrom aufweist, ähnelt der des Eisenstaubs eher dem von Braunkohle, weshalb hier die Anpassung der Fördersysteme vergleichbar mit denen eines Braunkohlekraftwerks ist. (07, 2023)

Brenner für feste Brennstoffe

Aufgrund der Feststoffmassenströme müssen auch die Brenner angepasst werden. Da die Düsenbrenner in einem Braunkohlekraftwerk weniger Modifikationen erfordern als in einem Steinkohlekraftwerk, ist die Umrüstung eines Braunkohlekraftwerks einfacher. (07, 2023)

Rauchgasentstaubung und Auffangvorrichtung

Um die hohen Staubanteile an Eisenoxid gut aus den Abgasen abscheiden zu können und wieder in Kreislauf bringen zu können, müssen hier Zyklone installiert werden und Änderungen an den Filtern vorgenommen werden. Erste Abschätzungen zeigen, dass mit Gewebefiltern eine Abscheidung der Staubanteile möglich ist. (07, 2023)

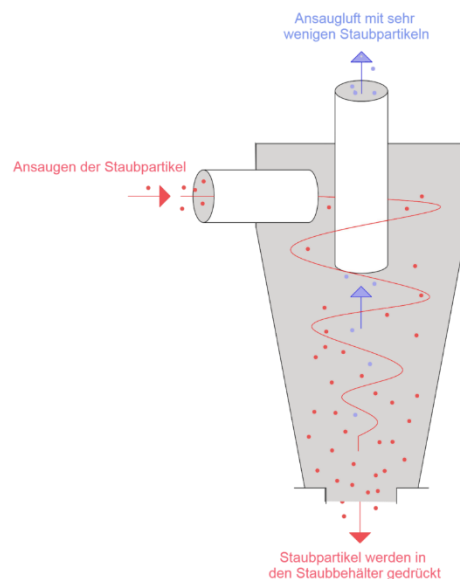


Abbildung 7.17, Prinzip eines Zyklons

von: <https://www.zyklon-absaugung.de/wp-content/uploads/2020/03/Funktionsweise-Zyklon-1-1280x1106.png>

Auf der obigen Abbildung ist das Prinzip eines Zyklons abgebildet. Im oberen Teil werden die Partikel, welche aus der Brennkammer kommen, angesaugt. Die schweren Eisenoxid-Partikel fallen aufgrund der Gravitation nach unten und können somit aufgefangen werden.

Luftvorwärmer

Der Einsatz von Eisenstaub erfordert auch Anpassungen an Wärmetauschern und Luftvorwärmern. Diese Komponenten müssen widerstandsfähiger gegen den Eisenstaub gemacht werden, um eine Erosion der Wärmetauscher zu verhindern. Vor allem die ersten Reihen der Konvektionsheizflächen müssen verstärkt oder durch spezielle Schutzvorrichtungen geschützt werden. Da die Eisenpartikel für ein solches Kraftwerk etwa eine Grösse von 200 µm haben und Kohle deutlich kleiner ist, besteht die Möglichkeit, dass die rotierenden Luftvorwärmer durch den Eisenstaub blockiert werden, weshalb auch hier Anpassungen vorgenommen werden müssen. (08, 2022) (07, 2023) (20, 2024)

Reinigungs- und Schutzsystem

Aufgrund des hohen Staubanfalls bei der Eisenverbrennung ist eine regelmässige Reinigung der Heizflächen erforderlich, um Ablagerungen zu vermeiden. Um sicherzustellen, dass der Staub den Wirkungsgrad der Wärmetauscher nicht beeinträchtigt, werden Druckluft- oder Dampfreinigungssysteme eingesetzt. Dies ist eine Standardtechnik in der Rauchgasreinigung, die jedoch an die höheren Staubmengen angepasst werden muss. (08, 2022)

Zusätzlich kann es erforderlich sein, die ersten Rohrreihen der Konvektionsheizflächen besonders zu schützen. Dies kann durch den Einsatz von Halbschalenrohren erreicht werden, die dazu beitragen, die Erosion durch den hohen Partikelverschleiss zu minimieren. (07, 2023)

Zusammenfassend

Bestehende Kraftwerke können durch Anpassungen der Brennstoffzufuhr, der Brenner, der Rauchgasreinigung und der Wärmetauscher effizient umgerüstet werden. Diese Massnahmen bieten nicht nur ökologische Vorteile durch Emissionsminderungen, sondern auch ökonomische Vorteile, da die bestehende Infrastruktur weiter genutzt werden kann. So können Kohlekraftwerke z.B. in Deutschland auch nach dem Kohleausstieg im Jahr 2038 weiter betrieben werden und weiterhin eine zentrale Rolle in der Stromversorgung spielen.

7.4.4 Benötigtes Eisen

7.4.4.1 Weltweiter Bedarf

Würde man alle Kohlekraftwerke der Erde auf Eisen umstellen, bräuchte man einmal die weltweite Jahresproduktion an Eisen. Das sind 2,6 Gigatonnen. Würde man die Jahresproduktion also um 5% erhöhen, würde die Umstellung 20 Jahre dauern, was umsetzbar ist. (11, 2024)

2,6 Gigatonnen Eisen entsprechen einer Speicherkapazität von ca. 5'400 TWh und einer elektrischen Energie von 2'400 TWh. «Clean Circles» von der TU-Darmstadt rechnet mit 4 Eisenzyklen pro Jahr, d.h. das Eisen durchläuft den gesamten Zyklus 4-mal pro Jahr, somit ist man bei 9'600 TWh elektrische Energie pro Jahr. Dies entspricht der jährlichen weltweiten Stromproduktion aus Kohle, somit 30% der gesamten Stromproduktion. (11, 2024) (01, 2024)

Formel 7

7.4.4.2 Bedarf Deutschland

Im Jahr 2023 stammen knapp 27% der Stromerzeugung aus Kohle, das sind 135 TWh. Würde man nun alle Kohlekraftwerke, die 2023 in Betrieb waren, auf Eisen umstellen, würde man 36 Megatonnen Eisen benötigen. Dies entspricht 1.4% der weltweiten jährlichen Eisenproduktion. Zum Vergleich: Deutschland hat im Jahr 2022 44 Megatonnen Steinkohle aus dem Ausland importiert. (01, 2024) (21, 2023)

Formel 8

7.4.4.3 Bedarf für eine Grossstadt

Für meine Berechnungen nehme ich eine Grossstadt mit einer Bevölkerung von 100'000 Einwohnern an und einen durchschnittlichen jährlichen Strombedarf von 6,5 MWh pro Kopf. (13, 2022)

Um eine solche Stadt mit Strom zu versorgen, bräuchte man 650 GWh elektrische Energie pro Jahr. Um die ganze Stadt mittels Verbrennung von Eisen zu versorgen, bräuchte es 175'000 Tonnen Eisen. Das ist ein Volumen von 22'300 m³. Ein grosser Schiffscontainer (40 Fuss) hat ein Volumen von 67 m³, es werden also ca. 330 Schiffscontainer benötigt, die 4-mal pro Jahr zum Kraftwerk geliefert werden.

Formel 9

7.4.5 SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse bietet einen kompakten Überblick über die wichtigsten Aspekte in den Bereichen Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken. Sie dient als strategisches Instrument, um diese Faktoren im Auge zu behalten und gezielt zu steuern.

7.4.5.1 SWOT

Hier werden die Stärken und Chancen aufgelistet, die im Verlauf des Dokuments bereits näher erläutert wurden. Auf die Schwächen und Risiken wurde bisher nicht näher eingegangen, daher werden diese beiden Themen im Anschluss näher erläutert.

S (Stärken) <ul style="list-style-type: none"> • Einfacher und nicht Toxischer Energieträger • Grosse Mengen an Rohstoff vorhanden • Vorhandene Infrastruktur • Einfache Transportwege • Lange Transportwege möglich • geringe Graue Energie • CO₂-frei • Schnell skalierbar • Über Monate hinweg speicherbar • Einfacher chemischer Prozess 	W (Schwächen) <ul style="list-style-type: none"> • Eisen hat ein sehr grosses Gewicht • Geringer Wirkungsgrad: 28.4% • Enorme Mengen an Erneuerbare Energieerzeuger benötigt • Grenzüberschreitende Zusammenarbeit
O (Chancen) <ul style="list-style-type: none"> • Im Winter Energie zu beziehen, welche im Sommer eingespeichert wurde • Einen Skalierbaren Speicher im Netz • Einen Speicher welche für ganze Städte und Länder einsetzbar ist • Erneuerbare Energien fördern • CO₂-freie Stromerzeugung • Frühere Abschaltung der Kohlekraftwerke mit Kohle • Kohlekraftwerke weiter mit Eisen zu betrieben 	T (Risiken) <ul style="list-style-type: none"> • Politische Probleme • Die Reduktion wird mittels Kohle oder Erdgas durchgeführt • Die Wärme für die Reduktion mit Wasserstoff setzt CO₂ frei

Tabelle 7.5, SWOT-Analyse

7.4.5.2 Schwächen

- Sehr grosses Gewicht
Eisen ist ein Metall und kein Gas wie z. B. Wasserstoff, das sehr leicht ist. Für eine grosse Speichermenge müssen mehrere tausend Tonnen Eisen bewegt werden.
- Geringer Wirkungsgrad
Der gesamte Kreislauf mit der Wasserstoffproduktion hat einen Wirkungsgrad von 28.4%, was nicht hoch ist. Zum Vergleich: Lithium-Batteriespeicher haben einen Wirkungsgrad von ca. 90%. Jedoch ist der Eisen-Redox-Zyklus ein Langzeitspeicher und der Lithium-Batteriespeicher ein Kurzzeitspeicher (17, 2024)
- Enorme Mengen an Erneuerbare Energieerzeuger benötigt
Da der Wirkungsgrad gering ist, müssen enorme Mengen an Erneuerbare Energieerzeuger für die Reduktion gebaut werden.
- Grenzüberschreitende Zusammenarbeit
Da eine beträchtliche Menge an Erneuerbare Energieerzeuger gebaut werden und die Reduktion durchlaufen muss, liegt es auf der Hand, dass die Reduktion mit den Energieerzeugern zentral am Äquator liegen muss. Solarkraftwerke können nur am Äquator ihr volles Potenzial ausschöpfen. Daher muss das Eisen über die Grenzen transportiert werden, was eine Zusammenarbeit zwischen mehreren Ländern erfordert.

7.4.5.3 Risiken

- Politische Probleme
Wie bereits bei den Schwächen erläutert, ist die Zusammenarbeit mehrerer Länder erforderlich. Die Länder sind also voneinander abhängig. Politische Probleme können den Kreislauf beeinflussen. Ausserdem können Reduktionsanlagen zum Ziel von Terroranschlägen werden, um z.B. europäische Länder zu schädigen.
- Die Reduktion wird mittels Kohle oder Erdgas durchgeführt
Da die Reduktion auch mit Kohle und Erdgas - also der Kohlendioxid-Methode - durchgeführt werden kann, muss regelmässig überprüft werden, ob tatsächlich Wasserstoff eingesetzt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass der Prozess CO₂-frei bleibt und die CO₂-Emissionen nicht einfach von den Kohlekraftwerken zu den Reduktionsanlagen verlagert werden.
- Die Wärme für die Reduktion mit Wasserstoff setzt CO₂ frei
Für die Reduktion wird Wärme mit einer Temperatur von ca. 800 °C benötigt. Um den Kreislauf CO₂-frei zu behalten, darf diese Wärme unter keinen Umständen durch fossile Brennstoffe erzeugt werden. Sie sollte stets durch Erneuerbare Energieerzeuger kommen, also mittels Wasserstoffs oder Solarthermie Kraftwerke.

7.4.6 Umrüstung nach SMART

Im Rahmen der Machbarkeitsanalyse möchte ich die Idee der Umrüstung von Kohlekraftwerken nach der bewährten SMART-Methode bewerten.

7.4.6.1 SMART -Methode

SMART ist eine bekannte Methode, um Ziele zu definieren und erfolgreich zu Erreichen. Sie besteht aus den folgenden 5 Punkten:



Abbildung 7.18, SMART-Methode
von: <https://www.ionos.de/startupguide/produktivitaet/smart-methode/>

Spezifisch

Das Ziel muss klar sein, spezifisch sein. Es sollte genau definiert werden, was das Ziel ist.

Messbar

Ein Ziel sollte messbar sein, d.h. man muss Messen können, ob das Ziel erreicht wurde.

Attraktiv

Damit das Ziel erreicht werden kann, muss es attraktiv sein, d.h. es muss ein Motivieren dieses Ziel zu erreichen.

Realistisch

Das Ziel soll realistisch sein, d.h. es muss umsetzbar sein und nicht unerreichbar.

Terminiert

Es muss ein Datum gesetzt werden, wann das Ziel erreicht werden muss.

7.4.6.2 Das Ziel nach SMART

Bis 2035 soll in Deutschland ein Kohlekraftwerk mit einer Leistung von mindestens 200 MW vollständig umgerüstet sein, da der Kohleausstieg dort auf 2038 festgelegt wurde. Dies soll mit einem optimalen Wirkungsgrad von ca. 45% durch Eisenstaub CO₂-frei betrieben werden. Der Transport und der Standort der Reduktion sollen so gewählt werden, dass der gesamte Kreislauf einen Wirkungsgrad von mindestens 28% aufweisen kann.

7.5 Bereits realisierte Anlagen

Das Team von «Clean Circles» ist nicht das erste, das sich mit dem Eisen-Redox-Zyklus beschäftigt. Weltweit arbeiten verschiedene Universitäten und Start-ups an dieser innovativen Forschung. Ziel ist es, den Eisen-Redox-Zyklus nicht nur für die Stromerzeugung zu nutzen, sondern auch für Anwendungen, die grosse Mengen an Wärmeenergie benötigen. Derzeit gibt es nur eine Anlage welche Eisen-Redox-Zyklus mit der Eisenverbrennung im industriellen Massstab nutzt, dies ist die Anlage der TU-Eindhoven, welche bei der Brauerei Royal Swinkels im Einsatz ist.

Nachfolgend sind alle Beteiligten der aktuellen Forschung für den Eisen-Redox Zyklus abgebildet.

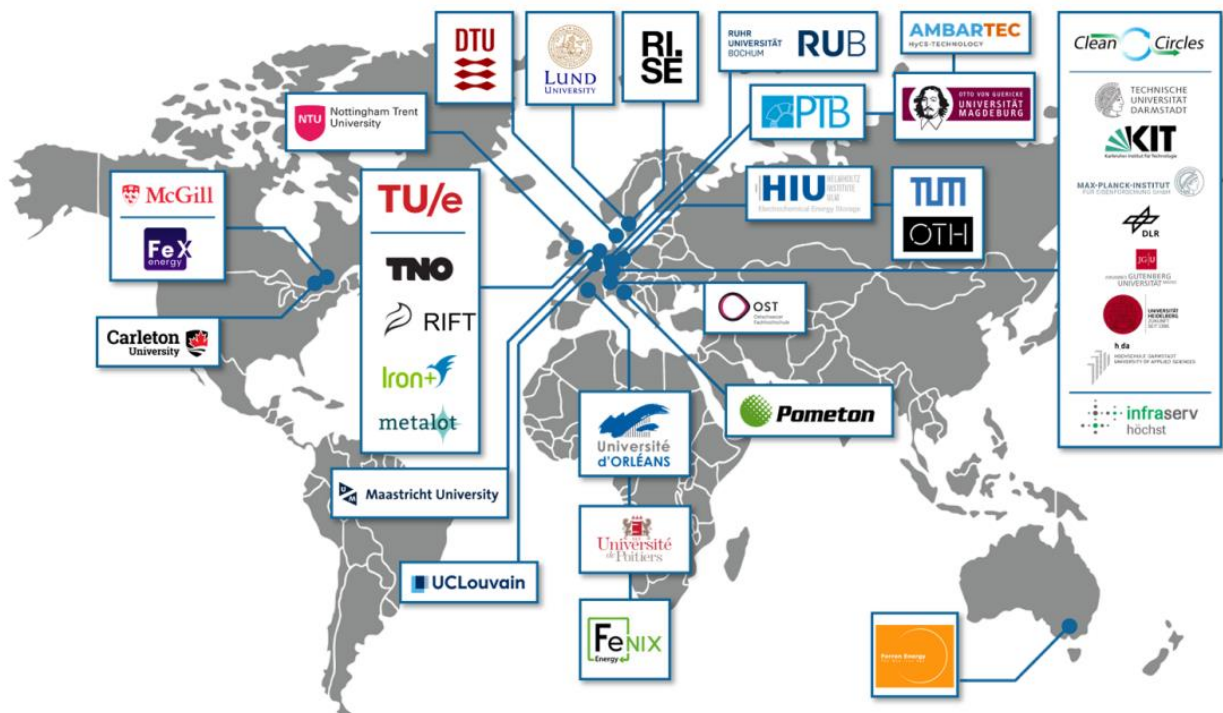


Abbildung 7.19, Beteiligte an der Forschung
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"

7.5.1 Brauerei Royal Swinkels

Die Brauerei Royal Swinkels ist eine über 350 Jahre alte Familienbrauerei in Eindhoven, Niederlande. Einer ihrer Verkaufsschlager ist das Bier Bavaria. Das Familienunternehmen setzt stark auf Umweltbewusstsein und wollte seinen Beitrag zur Energiewende leisten. So kam es zu einer Zusammenarbeit mit der TU Eindhoven, die einen Prototyp mit einer Leistung von 100 kW bei der Bavaria-Brauerei installierte. Diese Anlage soll nicht wie bei «Clean Circles» Strom erzeugen, sondern Wärme, die für den Brauprozess des Bieres benötigt wird.

Die Anlage wurde im Oktober 2020 in Betrieb genommen und soll die Machbarkeit im industriellen Massstab demonstrieren. Das Projekt war erfolgreich, die TU Eindhoven plant nun weitere Anlagen im Megawattbereich. (14, 2020)

Das Bild unten zeigt die kompakte 100 kW Anlage auf einem Sattelschlepper vor der Brauerei.



Abbildung 7.20, 100 Kilowatt-Anlage der TU Eindhoven

von: <https://www.tue.nl/en/news-and-events/news-overview/29-10-2020-tue-demonstrates-iron-fuel-at-brewery-bavaria-a-new-circular-and-co2-free-fuel-for-the-industry>

7.6 Geplante Projekte

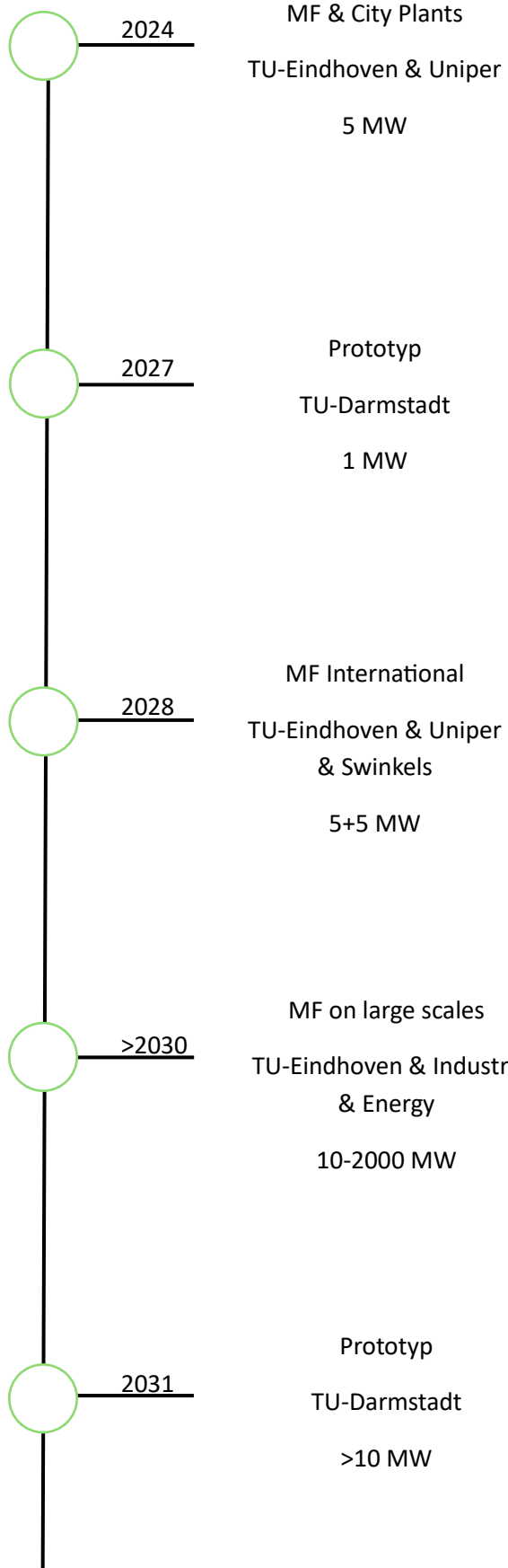


Abbildung 7.21, Industrie
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"



Abbildung 7.22, 1 MW-
Prototyp
von: Präsentation von Clean
Circles "IRON IS THE NEW
COAL"



Abbildung 7.23, TU-Darmstadt
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"



Abbildung 7.24, PV-Anlage
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"



Abbildung 7.25, Industrie
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"



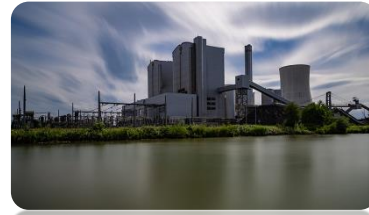
Abbildung 7.26, Industrie
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"



2035

Retrofit Kohlekraftwerk
TU-Darmstadt
>800 MW

Abbildung 7.27, Kohlekraftwerk
von: Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL"



Quelle für geplante Projekte: (11, 2024)

7.7 Besuch TU-Darmstadt «Clean Circles»

Im Rahmen meiner Diplomarbeit besuchte ich am 14. Oktober 2024 zusammen mit meinem Fachexperte die Technische Universität Darmstadt, um das «Clean Circles» Team vor Ort zu besuchen. Wir trafen uns mit Marius Schmidt, dem leitenden Direktor von «Clean Circles». Diese Gelegenheit bot die Möglichkeit, die laufende Forschung direkt kennenzulernen und wertvolle Einblicke in die Fortschritte des Projekts zu erhalten. Mein Hauptziel war es, ein tieferes Verständnis für die technischen und wissenschaftlichen Aspekte der Arbeit zu entwickeln. Darüber hinaus ermöglichte der Besuch einen persönlichen Austausch mit den Forscherinnen und Forschern, was besonders hilfreich war, um offene Fragen im direkten Dialog zu klären und spezifische Details zu besprechen, die für meine Diplomarbeit von Bedeutung sind. Durch die Gespräche mit dem Team konnte ich nicht nur mein Fachwissen erweitern, sondern auch praktische Einblicke in die Herausforderungen und Lösungsansätze der Forschung im Bereich der Erneuerbaren Energien gewinnen. Der Besuch war somit eine bereichernde Erfahrung, die wesentlich zur Qualität und Tiefe meiner Arbeit beigetragen hat.

7.7.1 «Clean Circles»

Das Team «Clean Circles» der Technischen Universität Darmstadt arbeitet an diesem innovativen Energiekonzept, das Eisen und seine Oxide als kohlenstofffreien chemischen Energieträger nutzt. Das Projekt ist fachübergreifend angelegt und vereint Expertinnen und Experten aus verschiedenen Fachrichtungen, darunter Chemie, Thermodynamik, Energiesystemtechnik, aber auch Sozial- und Wirtschaftswissenschaften. Diese Zusammenarbeit ermöglicht es, die technischen, politischen und wirtschaftlichen Herausforderungen der Energiespeicherung und -nutzung umfassend anzugehen. Beteiligt sind Forscher mehrerer Institutionen, darunter das Karlsruher Institut für Technologie, die Universität Heidelberg und das Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien.

Das Projekt «Clean Circles» wird vom Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert und hat zum Ziel, bestehende Technologien zu verbessern und CO₂-neutrale Energieerzeugungsmethoden zu entwickeln, die zur langfristigen Nutzung und Speicherung von Energie beitragen können.



Abbildung 7.28, Logo Clean Circles
von: https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/news_details_cc_292352.de.jsp

7.7.2 Offene Fragen

Bei der Erstellung meiner Diplomarbeit sind einige Fragen aufgetaucht, die ich mir selbst nicht beantworten konnte. Während des Besuches an der TU-Darmstadt konnte ich meine Fragen an Marius Schmidt stellen und so für Klarheit sorgen.

Diese Fragen und die paraphrasierten Antworten (in Kursivschrift) sind nachstehend aufgeführt.

- Für die Oxidation wird Sauerstoff benötigt. Gibt es da schon Ansätze, woher man dies für das geplante Kohlenkraftwerk im Jahr 2035 beziehen möchte? Und muss der Sauerstoff aufbereitet werden?

Für den Sauerstoff kann man die Umgebungsluft ansaugen. Diese muss auch nicht aufbereitet werden. Die restlichen Gase in der Umgebungsluft, hauptsächlich Stickstoff, wird über die Abgasluft abgeführt.

- In der Arbeit von C. Kuhn (10, 2022) wird erwähnt, dass die Reduktion am besten bei einem Wasserstoffanteil von 25% durchgeführt werden kann. Die anderen 75%, sind das andere Gase oder was ist das?

Genau, die anderen 75% sind hauptsächlich Stickstoff und andere Gase.

- Wie wahrscheinlich ist es, dass wir bei der Reduktion die 91% Wirkungsgrad welche in der Arbeit von C. Kuhn (10, 2022) erwähnt wird erreichen und nicht bei einem Wert von 71% landen?

In der Arbeit von C. Kuhn wurde bewiesen, dass der 91% Wirkungsgrad machbar ist. Jedoch wird man bei den ersten paar Anlagen einen tieferen Wirkungsgrad erreichen, welcher im Bereich bei 70-80% liegen könnte. Erst mit weiteren Anlagen kann ein Wert von 91% erreicht werden.

- Bei der Reduktion wird externe Wärme benötigt welche ca. 800 °C beträgt. Soll diese Wärme durch Parabolrinnen- und Solarturmkraftwerke kommen oder gibt es da andere Ansätze bei Clean Circles?

Es gibt auch die Möglichkeit Wasserstoff zu verbrennen, um die benötigte Hitze zu erreichen. Man müsste ca. 20% des Wasserstoffes für die Hitze aufwenden und die restlichen 80% des Wasserstoffes gehen direkt in die Reduktion, um das Eisenoxid zu reduzieren.

Dann könnte man die Reduktion auch gut in Mitteleuropa ohne Parabolrinnen- und Solarturmkraftwerke durchführen?

Nicht ganz. Bei kleinen Anlagen ist das durchaus möglich, aber bei grossen Industrieanlagen kann man das nicht machen. Da die Hochtemperatur-Elektrolyseure eine hohe Temperatur benötigen, möchte man die Anlagen durchlaufen lassen und nicht zwischendurch abschalten, da die Anlaufzeit sehr hoch ist. Deshalb sollte dies optimal in sonnenreichen Regionen mit ausreichend Solarstrom erfolgen, um kontinuierlich Wasserstoff für Reduktion herzustellen. Bei kleinen Anlagen kann mit einem Niedertemperatur-Elektrolyseur gearbeitet werden, da diese eine kurze Anlaufzeit haben.

- Wie lange dauert der Reduktions-Prozess? Reden wir hier von Minuten, Stunden oder sogar von Tagen?

Die Dauer ist immer abhängig von der Menge Eisenoxid und der Anlagengrösse. Aber die Elektrochemische Reduktion dauert deutlich länger als die Thermochemische Reduktion. Beim elektrochemischen Verfahren dauert dieser Prozess mehrere Stunden bis mehrere Tage. Bei der Thermochemischen mit Wasserstoff dauert es einige Minuten bis Stunden.

- Wird die elektrochemische Reduktion in der Zukunft ein Thema sein oder setzt man vollkommen auf die thermochemische Reduktion mittels Wasserstoffes?

Während die elektrochemische Reduktion noch wenig erforscht ist, wird die thermochemische Reduktion bereits im industriellen Massstab bei der Stahlerzeugung eingesetzt. Daher konzentriert man sich derzeit auf die thermochemische Reduktion.

Wenn die elektrochemische Reduktion marktreif und wirtschaftlich ist, kann auch diese Technologie eine Rolle spielen.

- Ist es korrekt, dass man das Eisen immer und immer wieder ohne Qualitätsverlust benutzen kann? Und mit was für einem Schwund von Eisenstaub ist zu rechnen, 2% Eisen pro Zyklus?

In der Theorie hat der grundlegende Redox-Zyklus keinen Materialverbrauch. In der Praxis werden wir jedoch einen Verlust von etwa 1 bis 2 % pro Zyklus haben. Diese gehen beim Transport und bei der Handhabung des Eisenstaubs verloren.

Allerdings könnten die Partikel nach einigen Jahren spröde werden und ihre Grösse verändern. Um dies zu verhindern, könnte man alle 10 Zyklen einen Schmelzprozess durchführen, der die Partikel wieder auf ihre ursprüngliche Grösse bringt. Jedoch muss dies noch genauer erforscht werden.

- Ist man momentan auf Kurs bis 2035 das erste Kohlekraftwerk einem Retrofitting unterzogen zu haben?

Wichtige Fragen der Grundlagenforschung sind gelöst. Momentan stehen Projekte zur Demonstration auf 1 MW-Skala in den Startlöchern, so dass diese Stufe bis 2027 demonstriert

werden soll. Bei anschliessender Unterstützung ist die Umrüstung eines Kohlekraftwerkblocks ab 2035 realistisch.

- Wie wahrscheinlich ist es, dass in 20 – 30 Jahren der Eisen-Redox-Zyklus ein wichtiger Bestandteil der Stromversorgung ist?

Wir sind zuversichtlich, dass Eisen in der Energieversorgung eine Rolle spielen wird, nicht nur bei der Stromerzeugung, sondern auch bei Fern- und Nahwärmenetzen oder Wasserstoffanwendungen. Der Einsatz verschiedener Energieträger und Technologien ist für ein stabiles und flexibles Energiesystem wichtig. Möglicherweise werden wir auch einige Kohlekraftwerke der 800 MW-Klasse sehen, die mit Eisenstaub betrieben werden. Da die grossen Kraftwerke eine lange Anlaufzeit haben, sollten diese weiter als Grundlastkraftwerke betrieben werden. Auch könnte man die grossen Kraftwerke z. B. von Herbst bis Frühling durchlaufen lassen.

- Wie lange kann man Eisen lagern, ohne einen Energieverlust zu haben? Ist eine Speicherzeit von einem Jahr realistisch oder reden wir eher von ein paar Monaten?

Solange das Eisen in einem trockenen oder mit Stickstoff gefluteten Raum gelagert wird, geht keine Energie verloren.

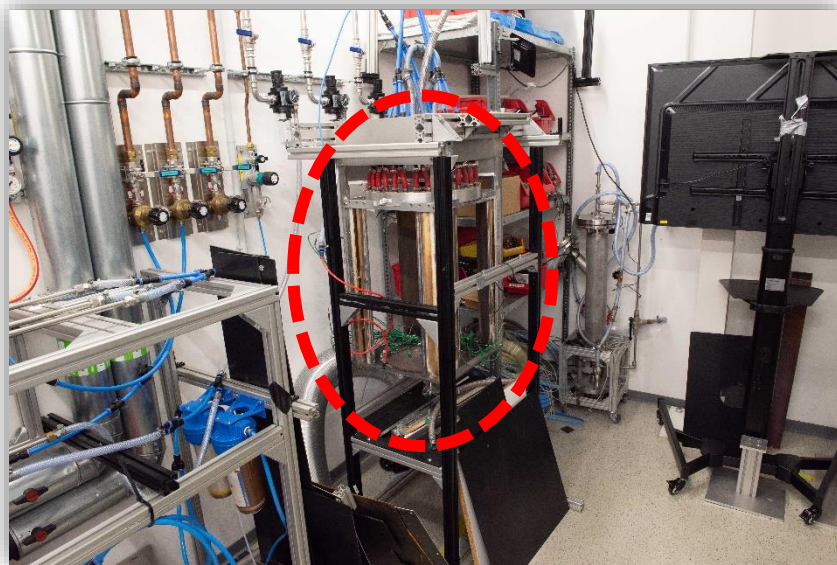
7.7.3 Einblicke

Während meines Besuchs hatte ich die Gelegenheit, einen Einblick in die laufende Forschung des Teams zu bekommen. Es war beeindruckend, die verschiedenen Laborgeräte aus nächster Nähe zu sehen. Um diese wertvollen Momente festzuhalten, habe ich einige Fototaufnahmen gemacht, die ich hier mit Ihnen teilen möchte.

Die beiden folgenden Bilder zeigen das Labor, in dem alles noch im kleinen Massstab abläuft. Hier sind die Wände der Brennkammern durchsichtig, um das genaue Verhalten der Partikel zu analysieren. Das untere Bild zeigt eine kleine Brennkammer.



*Abbildung 7.30, Labor Clean Circles
von: eigene Aufnahme*



*Abbildung 7.29, Labor Clean Circles mit kleiner Brennkammer
von: eigene Aufnahme*

Vor Ort konnten wir die Verbrennung von Eisenpartikel mit einem Gasbrenner simulieren. Dabei haben wir Eisen mit einer Grösse von $<32\ \mu\text{m}$ von oben in die Gasflamme regnen lassen.



Abbildung 7.31, Eisenflamme mit einem Gasbrenner
von: eigene Aufnahme

Anschliessend besichtigten wir eine Versuchsanlage, die sich bereits im vorindustriellen Stadium befindet. Hier kann Eisen in grösseren Mengen untersucht werden. Diese ist aber nicht nur für das «Clean Circles» Team, sondern allgemein für die Verbrennung von Festbrennstoffen in Staubform, wie Kohle und Biomasse ausgelegt. Eine Umrüstung auf Eisen soll bis 2027 erfolgen.

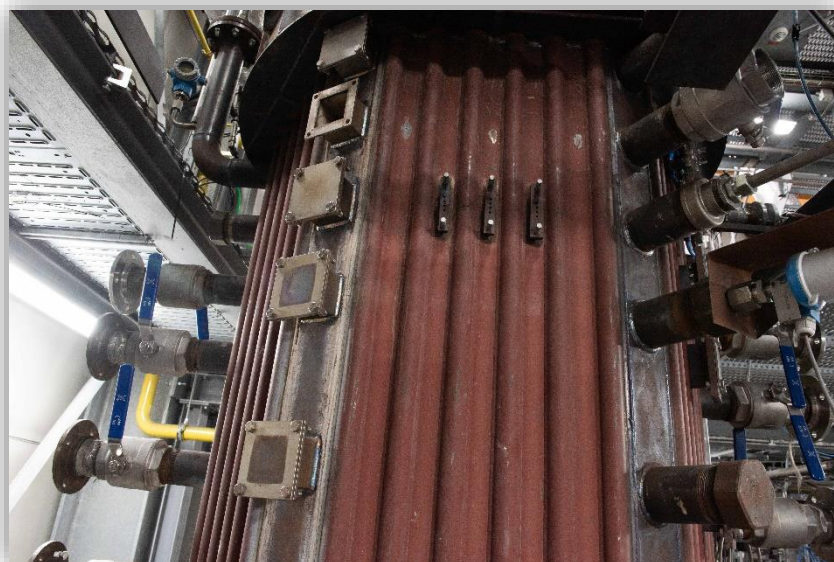


Abbildung 7.32, vorindustrielle Versuchsanlage für die Oxidation
von: eigene Aufnahme

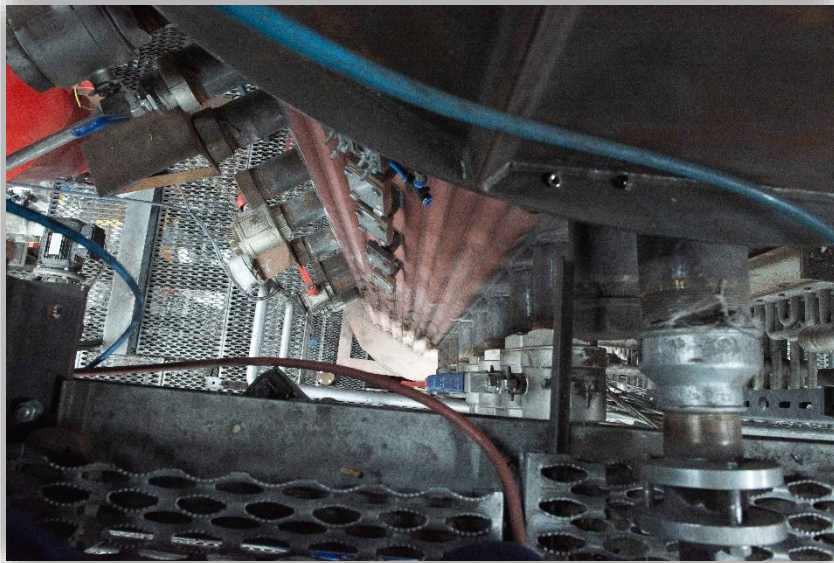


Abbildung 7.34, vorindustrielle Versuchsanlage für die Oxidation (Blickrichtung von oben nach unten)

von: eigene Aufnahme



Abbildung 7.33, Eisenoxid im Fass

von: eigene Aufnahme

8 Abschluss

8.1 Projektüberwachung

Ich konnte alle Termine gemäss dem Ablaufplan einhalten. Allerdings war die Informationsbeschaffung wesentlich aufwendiger als erwartet, da viele Dokumente sehr wissenschaftlich und in englischer Sprache verfasst sind. Der Ablaufplan ist sehr detailliert und kann vollständig für zukünftige Projekte verwendet werden. Auch der Strukturplan sowie die SWOT-Analyse und der Kommunikationsplan können übernommen werden.

8.2 Evaluation der Zielerreichung

Am Anfang der Arbeit habe ich mir im Pflichtenheft Ziele festgelegt, hier vergleiche ich diese nun mit meinen Endergebnissen, um die Zielerreichung zu beurteilen.

Untersuchung und Erklärung der technischen Prozesse, die für die Verbrennung von Eisenstaub notwendig sind, einschliesslich der Energieumwandlung und -speicherung in allen 4 Sektoren: Oxidation, Transport Eisenoxid, Reduktion und Transport Eisen.

Durch umfangreiche Recherchen konnte ich die technischen Abläufe in allen vier Sektoren umfassend und verständlich analysieren und erklären.

Bewertung der technischen Machbarkeit, Eisen als CO₂-freien Energieträger in bestehenden oder neuen thermischen Kraftwerken zu verwenden.

Ausgehend von einer Wirkungsgradbetrachtung bis hin zum Retrofit bestehender Kohlekraftwerke wird in der Machbarkeitsstudie die Umsetzung des Eisen-Redox-Kreislaufes für die Energiespeicherung als realisierbar bewertet. Damit bestätigt sich auch die eingangs aufgestellte These: «Eine Lösung für CO₂-freie Kohlekraftwerke?!»

Verifikation meiner Ergebnisse durch einen Besuch bei der TU Darmstadt. Vor Ort möchte ich einen tieferen Einblick in das Forschungslabor des Teams Clean Circles bei der TU Darmstadt gewinnen.

Durch einen Besuch des Team Clean Circles an der TU-Darmstadt konnte ich meine Arbeit über den Eisen-Redox-Zyklus durch den leitenden Geschäftsführer Marius Schmidt verifizieren und meine Arbeit ergänzen.

8.3 Reflexion Weg zum Ziel

Für das Endergebnis war eine intensive Auseinandersetzung der Veröffentlichungen der Forscher notwendig, da es kaum andere Quellen gab. Da diese wissenschaftlich geschrieben sind, musste ich manche Sätze mehrmals lesen, um sie vollständig zu verstehen. Manchmal war ich der Verzweiflung nahe, denn sobald ich dachte, eine Lösung gefunden zu haben, tauchten zwei neue Probleme auf.

Durch Gespräche mit dem Direktor von Clean Circles M. Schmidt und dem Fachexperten U. Schnetgöke konnte ich jedoch die Unklarheiten beseitigen. Mit Hilfe des Struktur- und Ablaufplans konnte ich immer den Überblick behalten. Der Besuch an der TU Darmstadt war von grosser Bedeutung, da ich einige zentrale Fragen erst dort klären konnte.

8.4 Lessons learnt

Durch diese Arbeit habe ich mein Wissen über Energieträger erheblich erweitert. Ich habe viel darüber gelernt, dass auch Metalle als Energieträger dienen können und sich besonders gut für die Langzeitspeicherung eignen und dass konventionelle Kraftwerke nach dem Abschalten mit dem richtigen Energieträger weiter betrieben werden können. Ausserdem habe ich meine Chemiekennnisse vertieft, vor allem, was chemische Formeln und Berechnungen angeht. Der Besuch an der TU Darmstadt hat mir gezeigt, was Forschung wirklich bedeutet und welche umfangreichen Prozesse dahinterstecken. Dabei habe ich auch erfahren, dass die Umsetzung oft mehr von der Finanzierung als von naturwissenschaftlichen Gesetzen abhängt.

Auch im Bereich Projektmanagement habe ich viel dazu gelernt, insbesondere wie wichtig eine klar formulierte Zielsetzung, ein Projektstrukturplan und ein Projektablaufplan sind. Ausserdem habe ich realisiert, wie wichtig eine genaue Quellenangabe ist, um die Nachvollziehbarkeit und Zuverlässigkeit der Arbeit zu gewährleisten.

8.5 Ausblicke

Im Laufe der Arbeit sind einige Ideen für weitere Arbeiten entstanden, die ich aus zeitlichen Gründen und wegen der Abgrenzung des Rahmens nicht weiter vertiefen konnte. Dennoch möchte ich diese Ideen weitergeben und im Folgenden erläutern.

Eine dieser Ideen wäre eine Nutzwertanalyse, um die geeignete Variante für den Reduktionprozess zu finden. Die Frage ist, ob die benötigte Wärme bei der thermochemischen Reduktion mit Wasserstoff, durch Wasserstoff oder durch solarthermische Kraftwerke erzeugt werden soll.

Eine weitere Idee wäre eine Machbarkeitsanalyse über die wirtschaftlichen Aspekte. Ab welcher Grösse lohnt sich die Umsetzung und ein wirtschaftlicher Vergleich, ob am Ende Strom oder Wärme erzeugt werden soll.

Man könnte eine Analyse aufzeigen, in welchen Industriezweigen dieser Kreislauf Anwendung findet und welche Prozesse davon profitieren.

8.6 Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle ganz besonders den folgenden Personen für ihre Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit danken:

Uwe Schnetgöke

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei meinem Fachexperten bedanken, der mich während der gesamten Diplomarbeit begleitet hat. Seine fachliche Unterstützung, seine wertvollen Inputs und seine konstruktive Kritik haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein weiterer besonderer Dank gilt ihm für die Begleitung nach Darmstadt, um den Besuch der Technischen Universität zu ermöglichen.

Marius Schmidt

Mein herzlicher Dank gilt auch Marius Schmidt, dem Geschäftsführer des «Clean Circles» Teams an der Technischen Universität Darmstadt. Seine Bereitschaft, uns den Besuch in Darmstadt zu ermöglichen und wertvolle Dokumente für die Informationsbeschaffung zur Verfügung zu stellen, war für den Fortschritt dieser Arbeit von unschätzbarem Wert.

Andreas Bösiger

Ein besonderer Dank geht an Andreas Bösiger, meinen Diplomlehrer von der TEKO Olten. Er hat mich vor und während der Diplomarbeit begleitet. Er hat mich sorgfältig in die Diplomarbeit eingeführt und begleitet. Durch seine Unterstützung konnte ich Unklarheiten bezüglich des Ablaufs und der Aufgabenstellung klären.

8.7 Nutzung von KI

Diese Diplomarbeit wurde mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz (KI) erstellt. Für jede Benutzungsart der KI wurde vorgängig beim Diplomlehrer das Einverständnis eingeholt.

Mit Hilfe von ChatGPT 4o konnte ich das Sammeln von Informationen aus den Publikationen der Unis und Professoren erheblich vereinfachen und beschleunigen. (18, 2024)

Das gesamte Dokument wurde mit DeepL Write überarbeitet, so dass ich mich auf den Inhalt des Textes konzentrieren konnte. Die Künstliche Intelligenz hat die Rechtschreibung, die richtige Wortwahl und die korrekte Satzstellung überprüft und korrigiert. (19, 2024)

8.8 Eigenständigkeitserklärung

Der Verfasser bestätigt mit seiner Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als die angegebenen Hilfsmittel erstellt wurde.

Die aus fremden Quellen (einschliesslich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Inhalte sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht vorgelegt worden.

Unterschrift:

Datum/Ort: Mittwoch, 6. November 2024, Langendorf



Marcel Pfeiffer

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

01. (2024). *Ember*. Abgerufen am Sept. 2024 von <https://ember-climate.org>
02. (2024). *TU Darmstadt, Clean Circles*. Abgerufen am Sept. 2024 von https://www.tu-darmstadt.de/clean-circles/about_cc/index.de.jsp
- 03, D. A. (2022). *Eisen-Redox-Zyklus*. Abgerufen am Sept. 2024 von <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/3600>
04. (Feb 2023). *Bundesregierung*. Abgerufen am Sept 2024 von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/kohleausstieg-1664496>
- 05, S. B. (Feb. 2023). *MDPI*. (K. I. Technologie, Herausgeber) Abgerufen am Sept 2024 von <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/5/2009>
- 06, Y. B. (Juni 2022). *ScienceDirect*. Abgerufen am Sept 2024 von <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645422002841?via%3Dihub>
- 07, J. (2023). *The potential of retrofitting existing coal power plants: A case study for operation with green iron*. TU Darmstadt. Elsevier.
- 08, P. (2022). *Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants*. Elsevier.
09. (Apr. 2024). *testbook*. Abgerufen am Sept. 2024 von <https://testbook.com/chemistry/iron-oxide>
- 10, C. K. (2022). *Iron as recyclable energy carrier: Feasibility study and kinetic analysis of ironoxide reduction*. Elsevier. Abgerufen am Sept. 2024 von <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666352X22000395?via%3Dihub>
- 11, C. C. (19. 03 2024). Präsentation von Clean Circles "IRON IS THE NEW COAL".
- 12, J. (2023). *Techno-economic assessment of long-distance supply chains of energy carriers: Comparing hydrogen and iron for carbon-free electricity generation*. TU Darmstadt. Elsevier. Abgerufen am Sept. 2024
13. (2022). *Statista*. Abgerufen am Okt. 2024 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164149/umfrage/netto-stromverbrauch-in-deutschland-seit-1999/#:~:text=Der%20Begriff%20Nettostromverbrauch%20bezeichnet%20die%20vom%20Verbraucher%20genutzte,im%20Jahr%202022%20bei%20etwa%206%2C5%20Megawattstun>
14. (2020). *TU Eindhoven*. Abgerufen am Okt. 2024 von <https://www.tue.nl/en/news-and-events/news-overview/29-10-2020-tue-demonstrates-iron-fuel-at-brewery-bavaria-a-new-circular-and-co2-free-fuel-for-the-industry>
15. (Aug. 2024). *ETH Zürich*. Abgerufen am Okt. 2024 von <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2024/08/eisen-als-guenstiger-wasserstoffspeicher.html>

16. (März 2024). *Youtube*. Abgerufen am Okt 2024 von <https://www.youtube.com/watch?v=2-iodtzKL34&t=567s>
17. (April 2024). *energie-fachberater.de*. Abgerufen am Okt. 2024 von <https://www.energie-fachberater.de/strom-solar/solar/solarstromspeicher/stromspeicher-inspektion-2024-die-besten-solarstromspeicher.php>
18. (2024). *ChatGPT*. Abgerufen am Sept.-Okt. 2024 von <https://chatgpt.com/>
19. (2024). *DeepL*. Abgerufen am Sept.-Nov. 2024 von <https://www.deepl.com/de/write>
20. (14. Okt. 2024). Interview mit Marius Schmidt von Clean Circles. TU Darmstadt, Deutschland.
21. (12. April 2023). *MDR.de*. Abgerufen am 16.. Okt. 2024 von <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/wirtschaft/tagebau-stilllegung-kohle-strom-importe-100.html>

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Titelbild, von Clean Circles	1
Abbildung 5.1, Eisen-Redox-Zyklus.....	10
Abbildung 5.2, TU Darmstadt	12
Abbildung 5.3, SWOT-Analyse	13
Abbildung 5.4, SMART-Methode	13
Abbildung 5.5, Organigramm	14
Abbildung 5.6, Zielscheibe.....	15
Abbildung 5.7, Stakeholderanalyse	16
Abbildung 6.1, Projektstrukturplan	17
Abbildung 7.1, Energiedichte mittels PET-Flaschen.....	23
Abbildung 7.2, Abgebaute Metalle im Jahr 2021	24
Abbildung 7.3, Eisen-Redox-Zyklus.....	25
Abbildung 7.4, Eisen-Redox-Zyklus, Oxidation	26
Abbildung 7.5, Eisenstaub Verbrennung	27
Abbildung 7.6, Eisen-Redox-Zyklus, Transport Eisenoxid	28
Abbildung 7.7, Eisen-Redox-Zyklus, Reduktion	29
Abbildung 7.8, Reduktion elektro- & thermochemisch.....	29
Abbildung 7.9, Eisen-Redox-Zyklus, Transport Eisen	32
Abbildung 7.10, Wirkungsgrad grafisch.....	34
Abbildung 7.11, Wasserstoffanlage	36
Abbildung 7.12, Solarturmkraftwerk.....	36
Abbildung 7.13, Parabolrinnnekraftwerk	36
Abbildung 7.14, Kohle-Befeuerung	37
Abbildung 7.15, Eisen-Befeuerung	37
Abbildung 7.16, Kohlekraftwerk.....	37
Abbildung 7.17, Prinzip eines Zyklon.....	38
Abbildung 7.18, SMART-Methode	43
Abbildung 7.19, Beteiligte an der Forschung.....	44
Abbildung 7.20, 100 Kilowatt-Anlage der TU Eindhoven.....	45
Abbildung 7.21, Industrie	46
Abbildung 7.22, 1 MW-Prototyp	46
Abbildung 7.23, TU-Darmstadt.....	46
Abbildung 7.24, PV-Anlage	46
Abbildung 7.25, Industrie	46
Abbildung 7.26, Industrie	46
Abbildung 7.27, Kohlekraftwerk	47
Abbildung 7.28, Logo Clean Circles	48
Abbildung 7.29, Labor Clean Circles mit kleiner Brennkammer.....	52
Abbildung 7.30, Labor Clean Circles	52
Abbildung 7.31, Eisenflamme mit einem Gasbrenner	53
Abbildung 7.32, vorindustrielle Versuchsanlage für die Oxidation	53
Abbildung 7.33, Eisenoxid im Fass.....	54
Abbildung 7.34, vorindustrielle Versuchsanlage für die Oxidation (von oben nach unten).....	54

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1, Projektplanung	18
Tabelle 6.2, Kommunikationsplan	19
Tabelle 7.1, Weltweiter Stromverbrauch.....	20
Tabelle 7.2, Stromverbrauch Europa	21
Tabelle 7.3, Speichertechnologien.....	22
Tabelle 7.4, Diagramm Chemische Energieträger Energy pro Volumen & Energie pro Masse	23
Tabelle 7.5, SWOT-Analyse	41

9.4 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
kWh	Kilowattstunde
MWh	Megawattstunde
GWh	Gigawattstunde
TWh	Terawattstunde
z. B.	zum Beispiel
d.h.	das heisst
IEA	International Energy Agency
MF	Microgrid Facilities (Mikronetz-Anlagen)
KI	Künstliche Intelligenz

9.5 Grössentabelle

Dezimalwert	Zehnerpotenz	Symbol	Name
1'000'000'000'000	10^{12}	T	Tera
1'000'000'000	10^9	G	Giga
1'000'000	10^6	M	Mega
1'000	10^3	k	Kilo
1	10^0		
0,001	10^{-3}	m	milli
0,000 001	10^{-6}	μ	mikro
0,000 000 001	10^{-9}	n	nano
0,000 000 000 001	10^{-12}	p	Pico

9.6 Berechnungen

Formel 1..... 24

$$2.6\text{Gt} = 2.6 \cdot 10^{12}\text{kg}$$

$$2.6 \cdot 10^{12}\text{kg} \cdot 2.06\text{ kWh/kg} = 5.356 \cdot 10^{12}\text{kWh}$$

$$5.2 \cdot 10^{12}\text{kWh} = 5'356\text{TWh} \approx 5'400\text{TWh}$$

Formel 2..... 28

$$2.06\text{ kWh} \cdot 45\% = 0.927\text{ kWh} \approx 0.93\text{kWh}$$

Formel 3..... 28

4Fe

$$4 \cdot 55,845\text{ g/mol} = 223,38\text{ g/mol}$$

2Fe₂O₃

$$2 \cdot 2 \cdot 55,845\text{ g/mol} = 223,38\text{ g/mol}$$

$$+ \quad 2 \cdot 3 \cdot 16\text{ g/mol} = 96\text{ g/mol}$$

$$319,38\text{ g/mol}$$

Anzahl mol

$$\frac{1000\text{g Fe}}{223.38\text{g/mol}} = 4.477\text{mol}$$

Masse

$$4.477\text{mol} \cdot 319.38\text{ g/mol} = 1429.76\text{g}$$

Formel 4..... 28

Molare Masse von Eisen (Fe):

$$\text{Fe} = 55,845 \text{ g/mol}$$

$$1'000 \text{ cm}^3 \cdot 7,87 \text{ g/cm}^3 = 7870 \text{ g}$$

$$\frac{7870 \text{ g}}{55,845 \text{ g/mol}} = 140,926 \text{ mol}$$

Molare Masse von Fe₂O₃:

$$2 \cdot 55,845 \text{ g/mol} + 3 \cdot 16 \text{ g/mol} = 159,69 \text{ g/mol}$$

Molverhältnis:Aus der Reaktionsgleichung: **4 mol Fe** reagieren zu **2 mol Fe₂O₃**.**Masse des Eisenoxids**

$$\frac{140,926 \text{ mol}}{2} = 70,463 \text{ mol}$$

$$70,463 \text{ mol} \cdot 159,69 \text{ g/mol} = 11'252,237 \text{ g}$$

$$\frac{11'252,237 \text{ g}}{5,24 \text{ g/cm}^3} = 2'147 \text{ cm}^3$$

$$\text{Fe } 1'000 \text{ cm}^3 = 2'147 \text{ cm}^3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Formel 5..... 30

Molare Massen

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 159,69 \text{ g/mol}$$

$$\text{CO}_2 = 44,01 \text{ g/mol}$$

Molzahl

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{1'430 \text{ g}}{159,69 \text{ g/mol}} = 8,955 \text{ mol}$$

$$\text{CO}_2 = 8,955 \text{ mol} \cdot 3 = 26,865 \text{ mol}$$

Masse CO₂

$$26,865 \text{ mol} \cdot 44,01 \text{ g/mol} = 1'182,329 \text{ g}$$

Formel 6..... 30

$$\frac{1\text{kWh}}{0.8\text{ kWh/kg}} = 1,25\text{kg Fe}$$

$$1,25\text{kg Fe} \cdot 1,43 \frac{\text{kg Fe}_2\text{O}_3}{\text{kg Fe}} = 1,79\text{kg Fe}_2\text{O}_3$$

$$1,79\text{kg Fe}_2\text{O}_3 \cdot \frac{1,18\text{kg CO}_2}{1,43\text{kg Fe}_2\text{O}_3} = 1,48\text{kg CO}_2$$

Formel 7..... 40

$$\text{Energie (Eisen)} = (2.6 \cdot 10^{12})\text{kg} \cdot 2.06\text{ kWh/kg} = 5'356\text{TWh}$$

$$\text{Energie (elektrisch)} = 5'356\text{TWh} \cdot 45\% = 2'410\text{TWh}$$

$$\text{Energie pro Jahr (elektrisch)} = 2'410\text{TWh} \cdot 4\text{Zyklen} = 9'641\text{TWh} \approx 9'600\text{TWh}$$

Formel 8..... 40

$$\text{Masse Eisen} = \frac{(135 \cdot 10^9)\text{kWh}}{0.927\text{ kWh/kg}} = 145'631'068'000\text{kg} \div 4\text{ Zyklen} = 36'407'766'990\text{kg}$$

$$\text{Anteil der Weltweiten Prod.} = \frac{100\%}{2600\text{Mt}} \cdot 36,408\text{Mt} = 1,4\%$$

Formel 9..... 40

$$\text{Masse Eisen} = \frac{(650 \cdot 10^6)\text{kWh}}{0.927\text{ kWh/kg}} = 701'186'623.5\text{kg} \div 4\text{ Zyklen} = 175'296'655\text{kg}$$

$$\text{Volumen} = \frac{175'296'655\text{kg}}{7857\text{ kg/m}^3} = 22'282.53\text{m}^3$$

$$\text{Anzahl Schiffscontainer: } \frac{22'282.53\text{m}^3}{67\text{m}^3} = 332.57$$