

Multikriterielle Bewertung von Elektrolyse- und CO₂-Capture Technologien für eine Power-to- Methanol Prozesskette

Christian Schnülle, Philipp Kenkel, Timo Wassermann

Das artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit ist ein interdisziplinäres Zentrum der Universität Bremen zur wissenschaftlichen Erforschung von Fragen der Nachhaltigkeit. Das Forschungszentrum Nachhaltigkeit gibt in seiner Schriftenreihe „artec-paper“ in loser Folge Aufsätze und Vorträge von MitarbeiterInnen sowie ausgewählte Arbeitspapiere und Berichte von Forschungsprojekten heraus.

Impressum

Herausgeber:

Universität Bremen
artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit
Postfach 33 04 40
28334 Bremen
Tel.: 0421 218 61801
Fax: 0421 218 98 61801
URL: www.uni-bremen.de/artec

Kontakt:

Katja Hessenkämper
E-Mail: hessenkaemper@uni-bremen.de

Multikriterielle Bewertung von Elektrolyse und CO₂-Capture Technologien für eine Power-to-Methanol Prozesskette

Christian Schnuelle^{a,*}, Philipp Kenkel^a, Timo Wassermann^a

^a *Universität Bremen, Advanced Energy Systems Institute, artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit, Enrique-Schmidt-Straße 7, 28359 Bremen, Deutschland*

christian.schnuelle@uni-bremen.de

Diesen Artikel widmen wir unserem ehemaligen Arbeitsgruppenleiter und Mentor Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann, der uns inspiriert, sein Wissen mit uns geteilt und sich mit großer Leidenschaft für die Energieforschung sowie eine nachhaltige Zukunft eingesetzt hat.

Abstract

Im Kontext der Energiewende und aktuellen Anstrengungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen erfahren Power-to-X Prozesse zunehmend Beachtung, da Sie die Minderung von Emissionen in schwer zu defossilisierenden Sektoren wie der chemischen Industrie oder dem Flugverkehr ermöglichen. Die Auswahl geeigneter Technologiealternativen für die Prozessstufen der Wasserstofferzeugung und der CO₂-Abscheidung stellt unter Berücksichtigung multipler Kriterien eine Herausforderung in der Gestaltung solcher Power-to-X Prozesse dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine multikriterielle Bewertung im Rahmen einer Fallstudie für verschiedene Elektrolyse und CO₂-Capture Technologien auf Basis ökonomischer, ökologischer und technischer Kriterien vorgenommen. Die ausgewählte Fallstudie betrachtet den Anwendungsfall einer Power-to-Methanol Prozesskette am Standort der Raffinerie Heide in Schleswig-Holstein. Die Analyse und Bewertung werden auf Basis der etablierten Methoden des Analytical Hierarchy Process und der Nutzwertanalyse durchgeführt. Für den Prozessschritt der Wasserstofferzeugung wurden die alkalische und die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse jeweils in einer Hoch- und einer Niederdruck Ausführung berücksichtigt. Für die CO₂-Abscheidung wurde zwischen einem Niedertemperatur Direct Air Capture Verfahren und einer Abscheidung aus dem raffinerieeigenen Kraftwerksrauchgasstrom mittels Aminwäsche differenziert. Die Analyse zeigt, dass eine atmosphärisch betriebene alkalische Elektrolyse, unter Berücksichtigung von insgesamt 10 Kriterien, die präferierte Technologie zur Wasserstoffbereitstellung darstellt. Kohlenstoffdioxid sollte entsprechend der ausgeführten Bewertung unter Berücksichtigung von 6 Kriterien vorzugsweise durch Aminwäsche aus den raffinerieeigenen Kraftwerksrauchgasen abgeschieden werden.

Keywords: MCDA, Power-to-X, multikriterielle Bewertung, Elektrolyse, CO₂-Abscheidung

Abkürzungen

AEL	Alkalische Elektrolyse
AHP	Analytical Hierarchy Process
CAPEX	Capital expenditure
DAC	Direct Air Capture
HP	High Pressure
HT	High temperature
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LP	Low Pressure
LT	Low temperature
MADM	Multi-Attribute Decision Making
MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
MODM	Multi-Objective Decision Making
OPEX	Operational expenditure
MeOH	Methanol
PEMEL	Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse
PtX	Power-to-X
TRL	Technology Readiness Level

1. Einleitung

Ein weltweit kontinuierlich steigender Energiebedarf, damit einhergehend ebenfalls zunehmende klimawirksame Emissionen sowie die Ausbeutung fossiler Ressourcen erfordern eine drastische und zeitnahe Transformation der Energie- und Rohstoffversorgung. Durch den Ausbau von erneuerbaren Energien, insbesondere in Form von Photovoltaik und Windenergieanlagen, konnte im Jahr 2019 bereits ein Anteil von 46,1 % der deutschen Stromerzeugung regenerativ bereitgestellt werden [1]. Für den Ausgleich der volatilen Erzeugung und eine Integration des erneuerbaren Stroms in andere energieintensive Sektoren bedarf es allerdings zunehmend neuer Speichertechnologien und Konversionsverfahren. Insbesondere die Erzeugung strombasierter, synthetischer Basischemikalien und Kraftstoffe durch so genannte Power-to-X Konzepte stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in nur schwer zu defossilisierenden Anwendungen und zur Kopplung der Sektoren Strom, Industrie und Verkehr dar [2].

Durch die Herstellung von Elektrolyse-Wasserstoff können bisher abgeregelte Erzeugungsspitzen geglättet und chemisch gespeichert werden. Mit einer nachhaltigen CO₂-Quelle können in einem Synthese-Schritt langkettige Kohlenwasserstoffe synthetisiert werden, welche beispielsweise als Drop-In Kraftstoffe in bereits vorhandene Infrastrukturen integriert und in andere Sektoren ausgekoppelt werden können. Die entsprechenden Technologien solcher Prozessketten sind bereits auf unterschiedlichen Skalen entwickelt, leiden allerdings unter hohen Investitions- und Betriebskosten sowie an zum Teil noch geringer Effizienz und Flexibilität. Für die Realisierung großer PtX Anlagen stellt sich daher je nach den standortspezifischen Rahmenbedingungen die Frage nach einer optimalen Technologieauswahl für die Ausgestaltung der Prozesskette. Unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien bietet sich für die Identifizierung einer am besten geeigneten Prozesskette die Durchführung einer multikriteriellen Bewertung an. Mittels etablierter Methoden, wie dem Analytical Hierarchy Process (AHP) und der Nutzwertanalyse, wird im Rahmen

dieser Ausarbeitung eine Technologieempfehlung für eine Power-to-Methanol Anlage am Standort der Raffinerie Heide in Schleswig-Holstein erarbeitet. Konkret werden die Prozessschritte Elektrolyse und Carbon Capture betrachtet, die im Kontext einer strombasierten Kohlenwasserstoffsynthese zur H_2/CO_2 Versorgung dienen. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die standortspezifischen Rahmenbedingungen dargestellt (Abschnitt 2) und das methodische Vorgehen der multikriteriellen Bewertung skizziert (Abschnitt 3). In Abschnitt 4 werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert und abschließend in Abschnitt 5 zusammengefasst.

2. Fallstudie Power-to-Methanol am Standort Raffinerie Heide

Für eine großskalige Umsetzung von PtX Anlagen bieten industrielle Bestandsprozesse, für deren Betreiber die Herstellung strombasierter Produkte einen ökonomischen und/oder ökologischen Mehrwert darstellt, aus heutiger Sicht ideale Einstiegsbedingungen. Erdölraffinerien, wie die Raffinerie Heide, weisen ein besonders attraktives Umfeld auf, da Erfahrung in der Verarbeitung von Kohlenwasserstoffen vorliegt, notwendige Infrastrukturen vorhanden sind, bestehende CO_2 -Rauchgasströme als Punktquellen zur Verfügung stehen und im Rahmen umweltregulatorischer Verpflichtungen neue Lösungen für das Inverkehrbringen klimafreundlicherer Kraftstoffe gesucht werden [3]. Darüber hinaus bietet sich das Bundesland Schleswig-Holstein mit seiner hohen Kapazität an Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen und weiteren hohen Ausbaupotentialen als Modellregion für großskalige PtX Projekte an [4]. Derzeit sind in Schleswig-Holstein Onshore-Windenergieanlagen mit einer Nennleistung von 6,7 GW installiert [5]. Im Zusammenspiel mit einem unzureichenden Netzausbau führte dies auf Bundeslandebene zu Ausfallarbeit in Höhe von 3.258 GWh in 2017 und 2.860 GWh in 2018 [5], [6].

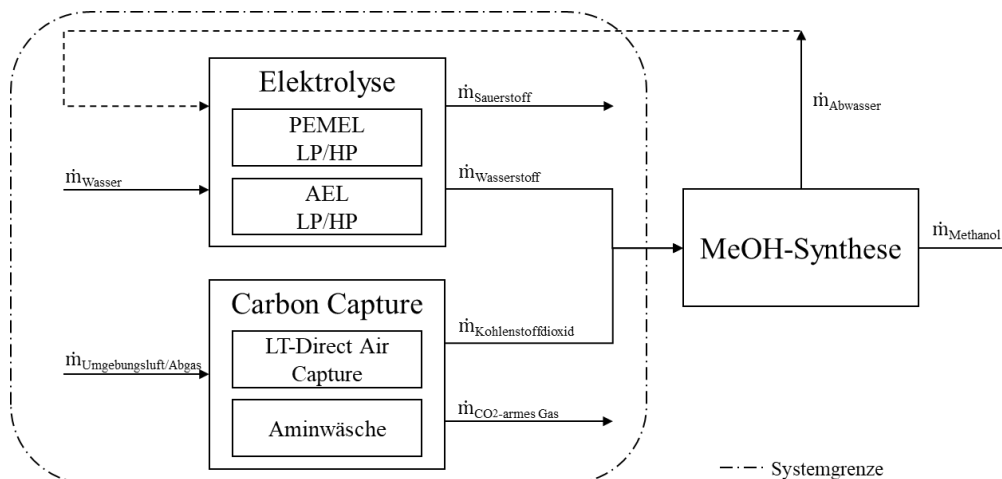


Abbildung 1: Prozessschema inkl. berücksichtigter Technologien und Systemgrenze

Für die Fallstudie „Power-to-Methanol am Standort Raffinerie Heide“ wird eine elektrische Anlagennennleistung in Höhe von 200 MW definiert, die einer industriellen Anlage mit einem Methanoloutput von circa 152 kt/a entspricht [3]. Wie in Abbildung 1 dargestellt, werden verschiedene Technologieoptionen für die Prozessschritte Elektrolyse und Carbon Capture im Gesamtkontext einer Power-to-Methanol Anlage betrachtet. Für die Wasserstoffbereitstellung werden die alkalische Elektrolyse (AEL) und die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL) jeweils für den Betrieb bei atmosphärischem Druck (LP) und bei 30 bar (HP) berücksichtigt. Um die Vergleichbarkeit beider Druckniveaus im Kontext des spezifischen Anwendungsfalls zu gewährleisten, wird jeweils eine

Nachverdichtung auf 75 bar berücksichtigt. Dies stellt ein typisches Druckniveau für die Methanolsynthese über direkte Hydrierung dar [7]. Eine Besonderheit der PEMEL, die im Rahmen der weiteren Analyse aufgegriffen wird, ist ihre Fähigkeit Wasser zu verarbeiten, das eine Methanolbelastung aufweist. Tatsächlich wurde für die PEMEL ein erhöhter Wirkungsgrad bei Verwendung von MeOH-belasteten Wasser beschrieben [8]. Diese Fähigkeit grenzt PEMEL und AEL im Analysefall Power-to-Methanol voneinander ab, da die AEL mit hochreinem, deionisiertem Wasser zu versorgen ist.

Als potentielle CO₂-Quellen werden im Rahmen dieser Arbeit die Umgebungsluft sowie das KWK-Kraftwerk der Raffinerie Heide betrachtet. Die CO₂-Abscheidung aus Umgebungsluft wird in Form des Direct Air Capture Verfahrens von Climeworks berücksichtigt, das eine Regeneration des Sorbents bei einem niedrigen Temperaturniveau (LT) von 100° C ermöglicht [9]. Aufgrund der niedrigen CO₂ Konzentration von 0,0407 vol.-% in der Umgebungsluft, ist die Abscheidung im Vergleich zu konzentrierten Punktquellen thermodynamisch aufwändiger. Die Abscheidung aus dem KWK-Kraftwerk der Raffinerie Heide wird über die etablierte Technologie Aminwäsche, unter Anwendung von Monoethanolamin (MEA) als Waschmittel, berücksichtigt. Das Kraftwerk stellt bezogen auf die emittierte CO₂ Menge mit circa 50 tCO₂/h die größte CO₂-Punktquelle am Standort dar und weist eine CO₂ Konzentration in Höhe von etwa 10 vol.-% auf.

3. Methodisches Vorgehen bei der Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)

Mit MCDA Methoden können Ergebnisse für ein Entscheidungsproblem erzielt werden, die eine Vielzahl an (interdisziplinären) Kriterien berücksichtigen und somit als eine Grundlage oder Handlungsempfehlung für wichtige Entscheidungen dienen können. Innerhalb etablierter Methoden zur multikriteriellen Analyse von Entscheidungsproblemen wird zwischen den Bereichen des „Multi-Objective Decision Making“ (MODM) und des „Multi-Attribute Decision Making“ (MADM) differenziert. Bei MODM Methoden werden optimale Lösungen aus einer stetigen Menge an Alternativen mittels mathematischer Verfahren ermittelt. Dem gegenüber werden bei MADM Methoden verschiedene diskrete Alternativen in Hinblick auf spezifische Kriterien bewertet [10]. Im Vorfeld der Entscheidungsfindung liegen also die zu betrachtenden Alternativen exakt definiert vor und das Entscheidungsproblem wird nach einer bestmöglichen Auswahl gelöst. Übertragen auf den konkreten Anwendungsfall für den Standort Raffinerie Heide kann also auf Basis der Charakterisierung von Einzeltechnologien mit MADM Methoden die Frage nach den am besten geeigneten Technologien für eine Power-to-Methanol Anlage beantwortet und eine Technologieempfehlung gegeben werden.

Methodisch werden für die MCDA in dieser Ausarbeitung die klassischen Verfahren der Nutzwertanalyse und des Analytical Hierarchy Process (AHP) angewendet, welche den Präferenzen des Entscheidungsträgers eine Nutzfunktion bzw. einen Nutzenwert zuordnen.

3.1 Schrittabfolge einer MCDA

Die Durchführung einer MCDA durchläuft in der Regel folgende Schrittabfolge, wobei die einzelnen Schritte nicht exakt definiert sind und zum Teil nochmals in weitere Einzelschritte unterteilt werden (vgl. [11], [12]).

1. Entscheidungsproblem definieren
2. Identifikation der Alternativen

3. Beschreibung des Zielsystems
4. Bestimmung der Kriterien und Darstellung in einer Hierarchie
5. Definition der Kriterienausprägungen für die einzelnen Alternativen
6. Ermittlung der subjektiven Kriteriengewichtung
7. Aggregation und Erzielen einer Rangfolge

Zunächst wird für die Durchführung einer MCDA ein Entscheidungsproblem definiert. Da das Entscheidungsproblem zumeist mehrere Faktoren umfasst, sollte an dieser Stelle ein übergeordnetes Gesamtziel formuliert werden, welches das Problem vollständig erfasst. Im zweiten Schritt werden bei MADM Methoden diskrete Alternativen definiert und beschrieben. Alternativen bilden die Wahlmöglichkeiten für die Lösung des Entscheidungsproblems, folglich müssen mindestens zwei Alternativen vorliegen. Für eine Vergleichbarkeit müssen diese mit charakteristischen Merkmalen beschrieben bzw. mit Daten unterlegt werden, wobei die Daten für alle Alternativen gleichermaßen vorliegen müssen.

Häufig wird bei der Entscheidungsfindung mehr als ein Ziel verfolgt und zwischen den parallel verfolgten Zielen bestehen zumeist Abhängigkeiten. Darüber hinaus können die Ziele auch in Widerspruch zueinander stehen. Im dritten Schritt gilt es daher ein strukturiertes Zielsystem zu definieren, für welches zunächst ein das Gesamtziel widerspiegelndes, jedoch meist abstrakteres, Oberziel formuliert wird. Im Anschluss werden spezifischere Unterziele definiert, mittels derer die exakten Ziele konkretisiert werden. Das Zielsystem stellt damit auch die Grundlage für die Ermittlung einer Kriterienhierarchie dar.

Die relevanten Kriterien können im vierten Schritt auf Basis des Zielsystems definiert werden. Sie stellen eine Grundlage zur Operationalisierung von (Unter-)Zielen dar und müssen in einem logischen Zusammenhang mit einem der (Unter-)Ziele stehen. Um die Zusammenhänge zu verdeutlichen, bietet es sich an, eine Kriterienhierarchie zu erstellen, durch welche das Entscheidungsproblem von Ebene zu Ebene immer detaillierter dargestellt wird. Dafür werden auf höchster Ebene grob definierte Oberziele aufgeführt, die anschließend über die Zuordnung von Unterzielen aufgeschlüsselt werden. Für die Unterziele werden dann passende Kriterien aufgeführt, welche abschließend in Form von messbaren Attributen konkretisiert werden. Den Attributen werden eine Maßeinheit und das Ziel einer Maximierung oder Minimierung zugeordnet.

Im fünften Schritt werden den Kriterien konkrete Werte, so genannte Kriterienausprägungen, zugeteilt, welche auf Basis einer Literaturrecherche und Expertenbefragungen erhoben werden. Der Entscheidungsträger kann seine (subjektive) Einschätzung einfließen lassen, wie wichtig die einzelnen Kriterien hinsichtlich des Gesamtproblems sind. Die Gewichtung bzw. der Gewichtungsfaktor repräsentiert also die Bedeutsamkeit des Kriteriums und stellt den sechsten Schritt in der Durchführung einer MCDA dar. Die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren stellt eine Herausforderung dar, da sie im Prinzip immer auf der subjektiven Einschätzung des Entscheiders beruht. Häufig werden Gewichtungsfaktoren auf einem kardinalen Skalenniveau dargestellt, welches üblicherweise von 0-100 Punkten oder 0-100 % reicht. Es gibt zahlreiche Methoden, die zur Ermittlung einer Kriteriengewichtung zum Einsatz kommen. Weit verbreitet ist der von Thomas L. Saaty entwickelte Analytical Hierarchy Process (AHP), welcher in dieser Ausarbeitung genutzt und nachfolgend zusammenfassend erläutert wird [13].

Beim AHP werden Wertefunktionen gebildet, deren Werte durch Paarvergleiche, also dem jeweiligen Vergleich zweier Elemente gegenüber einem anderen Element, von Kriterien ermittelt werden. Mithilfe der so genannten Saaty-Skala werden jeweils zwei Elemente paarweise bezüglich ihrer relativen Wichtigkeit zu einem weiteren Element verglichen. Die Saaty-Skala besteht aus einem 9-Punkte Bewertungssystem, welches in Tabelle 1 dargestellt wird. Den Kriterien werden gemäß der Skala je nach ihrer Bedeutung gegenüber des zu vergleichenden Kriteriums die Punkte 1-9 vergeben. Wird einem Kriterium die gleiche Bedeutung bzw. Wichtigkeit gegenüber dem Vergleichskriterium zugeordnet, so wird es mit 1 bewertet. Wird ein Kriterium als dominierend eingestuft, erhält es höhere Werte bis maximal 9 Punkte [14].

Tabelle 1: Saaty-Skala zur Bewertung von Kriterien

Skalenwert	Bedeutung
1	Gleiche Bedeutung
3	Etwas größere Bedeutung
7	Deutlich größere Bedeutung
9	Absolut Dominierend
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte

Die Saaty-Skala kann sowohl für quantifizierbare als auch qualitativ beschriebene Kriterien genutzt werden. Für jedes Kriterium C wird eine $n \times n$ Matrix A aufgestellt, deren Komponenten a_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) numerische Einträge darstellen, welche die relative Bedeutung des Kriterium i gegenüber Kriterium j ausdrücken [15].

Nach Durchführung der paarweisen Vergleiche ergibt sich eine Matrix A der Form:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad 1$$

mit $a_{ii} = 1$, $a_{ji} = a_{ij}$ und $a_{ij} \neq 0$.

Die Zielgewichte können anschließend mittels verschiedener Verfahren bestimmt werden. Zwei gängige Ansätze sind die Bestimmung des geometrischen Mittels oder des Eigenvektors der Matrix A zum größten Eigenwert. Die von Saaty vorgeschlagene Methode ist hierbei die Bestimmung des Eigenvektors, da dieser auch für eine folgende Konsistenzüberprüfung verwendet werden kann [16]. Der Eigenvektor \vec{v} ist dabei eine nicht-triviale Lösung (kein Null-Vektor) welcher der Gleichung 1 genügt. Hier repräsentieren λ_{max} den maximalen Eigenwert und E die Einheitsmatrix.

$$(A - \lambda_{max} \cdot E) \cdot \vec{v} = 0 \quad 2$$

Zur Bestimmung des maximalen Eigenwerts wird das charakteristische Polynom mithilfe der in Gleichung 3 und 4 gezeigten Determinanten gebildet und gelöst.

$$\det(A - \lambda_{max} \cdot E) = 0 \quad 3$$

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} - \lambda_{max} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda_{max} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda_{max} \end{pmatrix} = 0 \quad 4$$

Der größere Aufwand der Eigenwert-Methodik im Vergleich zur Berechnung des geometrischen Mittels ermöglicht eine nachfolgende Konsistenzüberprüfung der paarweisen Vergleiche der Kriterienbedeutungen. Der zuvor berechnete maximale Eigenwert λ_{max} kann dafür nach Gleichung 5 in einen Konsistenzindex (CI) überführt werden und mit einem Zufallsindex (RI) nach Gleichung 6 zum Konsistenzverhältnis (CR) ins Verhältnis gesetzt werden. Wenn das gebildete Verhältnis $CR < 0,1$ ist, entspricht dies einer genügend konsistenten Vergleichsmatrix.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad 5$$

$$CR = CI/RI \quad 6$$

Eine Übersicht über die von Saaty berechneten Zufallsindizes RI gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Zufallsindizes RI in Abhängigkeit der Kriterienanzahl n [16]

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Nach Prüfung der ausreichenden Konsistenz der paarweisen Kriterienvergleiche, wird im letzten Schritt eine Methode zur Aggregation der zuvor durchgeführten Arbeiten ausgewählt. In dieser Ausarbeitung wird die Nutzwertanalyse angewendet (vgl. [17], [18]). Um die multiattributive Bewertung einer Alternative in einen eindimensionalen Nutzwert transponieren zu können, müssen die Kriterienausprägungen miteinander vergleichbar gemacht werden. Eine Berücksichtigung aller Kriterien kardinal in ihrer jeweiligen Dimension würde zu stark abweichenden Werten in den Spaltenvektoren führen. Ohne Normalisierung würden dadurch implizite Gewichtungen der Kriterien aufgrund von Skaleneffekten entstehen. Aus diesem Grunde wird hier in Abhängigkeit der Wirkrichtung des Kriteriums eine lineare Normalisierung vorgenommen und ein dimensionsloser Parameter berechnet. Je nach Wirkrichtung wird beim Ziel einer Minimierung der niedrigste Wert eines Kriteriums auf 1 normalisiert, beim Ziel einer Maximierung wird der höchste Wert gleich 1 gesetzt.

In einem nächsten Schritt werden aus den Gewichtungen und normalisierten Parametern Nutzwerte berechnet, wobei jeweils das Produkt aus den Gewichten der Kriterien und den Parametern gebildet wird. Aus der Summe der so berechneten Nutzwerte ergibt sich der Gesamtnutzwert einer Alternative und es kann abschließend eine Rangfolge gebildet werden.

$$\text{Gesamtnutzwert } (A_1) = \sum_{r=1}^n \text{Gewichtung}_r \times \text{normalisierter Parameter}_r \quad 7$$

3.2 Anwendung der Methoden

Bezogen auf die übergeordnete Fragestellung, der Bestimmung einer für den Standort optimalen Technologieauswahl für die Prozessschritte Elektrolyse und CO_2 -Capture, wird das Entscheidungsproblem für die beiden Technologien separat behandelt. Für den Prozessschritt Elektrolyse werden die vier Alternativen AEL (LP), AEL (HP), PEMEL (LP) und PEMEL (HP) bewertet. Das Hochtemperaturverfahren Festoxid-Elektrolyse wird aufgrund des noch vergleichsweise geringen Technology Readiness Level (TRL) von 5-6 nicht mit in die Bewertung mit aufgenommen.

Für die Analyse werden technische, wirtschaftliche und ökologische Aspekte betrachtet. Das Zielsystem setzt sich somit aus den Unterzielen einer technischen Funktionalität/Plausibilität, wirtschaftlicher

Effizienz und geringer ökologischer Wirkungen zusammen. Für eine exakte Beschreibung der Unterziele wird gemäß Abbildung 2 eine Kriterienhierarchie gebildet, für die geeignete Kriterien unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkrichtung (Maximierung vs. Minimierung) definiert werden. Insgesamt wurden zehn Kriterien zur Lösung des Entscheidungsproblems bestimmt, von denen fünf der technischen Funktionalität, zwei der Wirtschaftlichkeit und drei den ökologischen Wirkungen zugeordnet werden. Die für jedes Kriterium erhobenen Daten sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellt.

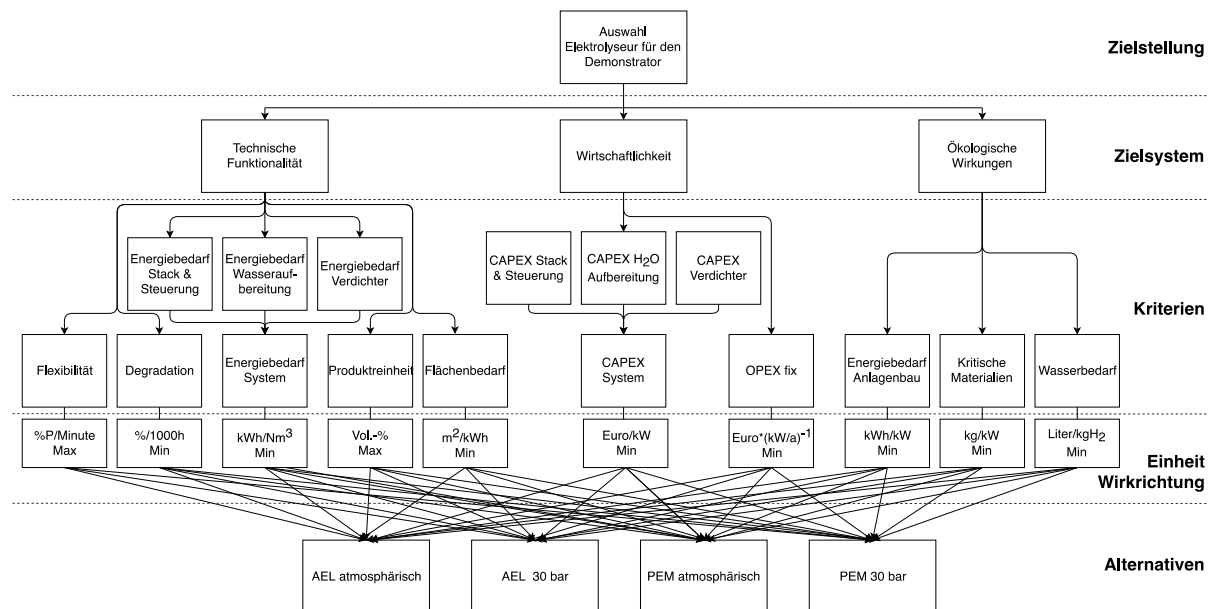


Abbildung 2: Darstellung der Kriterienhierarchie für die Auswahl eines am besten geeigneten Elektrolyseurs.

Aufgrund der Gegenüberstellung von Druck- und atmosphärischer Elektrolyse sowie der Option einer Abwasserrückführung aus der Methanolsynthese sind die Kriterien Energiebedarf und CAPEX zur weiteren Spezifizierung entsprechend in drei Unterkriterien unterteilt und werden jeweils zu einem Gesamtwert für das Elektrolyse-System aggregiert. Unter den fixen OPEX werden Kosten für die Wartung der Anlage aufgeführt. Variable Kosten für die Betriebsmittel Strom und Wasser werden nicht gesondert als Kriterium mit aufgenommen, da sie bereits indirekt über die Kriterien Energie- und Wasserbedarf abgedeckt sind und zu einer impliziten Verschiebung der Gewichtungen führen würden. Die Werte zu kritischen Materialien beziehen sich auf den Einsatz von Platingruppenmetallen, welche nur bei PEM-Elektrolyseuren eingesetzt werden (vgl. [2]).

Die MCDA wird für den Prozessschritt Elektrolyse für zwei Betrachtungsfälle durchgeführt. Wie in Abschnitt 2 bereits einführend erläutert, wird in der Literatur die Option der Verarbeitung von Wasser mit Methanolbelastung bei der PEM-Elektrolyse diskutiert. Diese Option würde die Rückführung des Abwasserstroms zur PEM-Elektrolyse ermöglichen und den Gesamtprozess effizienter gestalten, da sich einerseits der Wasserbedarf der gesamten Prozesskette und andererseits der Anteil des aufzubereitenden Speisewassers für die Elektrolyse entsprechend reduzieren ließen. Bisher ist die Umsetzung einer solchen Betriebsführung allerdings nicht bekannt, so dass hier in den Betrachtungsfällen bezüglich der Möglichkeit einer Abwasserrückführung differenziert wird. Die Parameter für alle Kriterien im Betrachtungsfall 1 ohne die Option einer Abwasserrückführung sind in Tabelle 3 dargestellt, für Betrachtungsfall 2 in Tabelle 4.

Tabelle 3: Übersicht über die Parametrierung der berücksichtigten Kriterien für Betrachtungsfall 1 – Keine Abwasserrückführung aus der MeOH-Synthese zur PEM-Elektrolyse [19][20][21][22][23][24][25][26][27][28][29].

Kriterium / Alternative	Einheit	Min/Max	AEL LP	AEL HP	PEMEL LP	PEMEL HP
Energiebedarf Elektrolyse	kWh/Nm ³	Min	4,5	5,4	4,7	4,8
Energiebedarf H ₂ O Aufbereitung	kWh/Nm ³	Min	0,18	0,18	0,18	0,18
Energiebedarf Verdichtung	kWh/Nm ³	Min	0,25	0,05	0,25	0,05
Energiebedarf System	kWh/Nm ³	Min	4,93	5,63	5,13	5,03
Flexibilität	%P/min	Max	20	20	100	100
Degradation	% _η /1000h	Min	0,13	0,13	0,2	0,2
Produktreinheit	Vol.-%	Max	99,9	99,9	99,99	99,99
Flächenbedarf	m ² /MW	Min	63	63	14,48	14,48
CAPEX Elektrolyse	€/kW	Min	709	850	1363	1450
CAPEX H ₂ O Aufbereitung	€/kW	Min	6	6	6	6
CAPEX Verdichtung	€/kW	Min	62	9,1	62	9,1
CAPEX System	€/kW	Min	777	866	1431	1465
OPEX fix	€·(kW/a) ⁻¹	Min	15,08	23,08	12,04	15,04
Energiebedarf Anlagenbau	kWh/kW	Min	5,74	5,74	7	7
Kritisches Material	kg/kW	Min	0	0	0,0006	0,0006
Wasserbedarf	l/kg	Min	15	15	15	15

Tabelle 4: Übersicht über die Parametrierung der berücksichtigten Kriterien für Betrachtungsfall 2 – Abwasserrückführung aus der MeOH-Synthese zur PEM-Elektrolyse [19][20][21][22][23][24][25][26][27][28][29].

Kriterium / Alternative	Einheit	Min/Max	AEL LP	AEL HP	PEMEL LP	PEMEL HP
Energiebedarf Elektrolyse	kWh/Nm ³	Min	4,5	5,4	4,7	4,8
Energiebedarf H ₂ O Aufbereitung	kWh/Nm ³	Min	0,18	0,18	0,13	0,13
Energiebedarf Verdichtung	kWh/Nm ³	Min	0,25	0,05	0,25	0,05
Energiebedarf System	kWh/Nm ³	Min	4,93	5,63	5,08	4,98
Flexibilität	%P/min	Max	20	20	100	100
Degradation	% _η /1000h	Min	0,13	0,13	0,2	0,2
Produktreinheit	Vol.-%	Max	99,9	99,9	99,99	99,99
Flächenbedarf	m ² /MW	Min	63	63	14,48	14,48
CAPEX Elektrolyse	€/kW	Min	709	850	1363	1450
CAPEX H ₂ O Aufbereitung	€/kW	Min	6	6	4	4
CAPEX Verdichtung	€/kW	Min	62	9,1	62	9,1
CAPEX System	€/kW	Min	777	866	1429	1463
OPEX fix	€·(kW/a) ⁻¹	Min	15,08	23,08	12,04	15,04
Energiebedarf Anlagenbau	kWh/kW	Min	5,74	5,74	7	7
Kritisches Material	kg/kW	Min	0	0	0,0006	0,0006
Wasserbedarf	l/kg	Min	15	15	10,6	10,6

Bei Betrachtung der Kriterienausprägungen des Energiebedarfs der Elektrolysesysteme wird deutlich, dass insbesondere die alkalische Druckelektrolyse deutlich höhere Werte aufweist, als die AEL mit atmosphärischem Betriebsdruck sowie beide PEMEL-Varianten (vgl. [19]). In einer durchgeführten Berechnung mit AspenPlus V11 wurden der jeweilige Energiebedarf und die CAPEX für die Verdichtung auf 75 bar berechnet. Aus dem aggregierten Kriterium Energiebedarf System wird ersichtlich, dass der deutlich geringere Energieaufwand für eine nachgeschaltete Verdichtung von 30 bar auf 75 bar bei der PEMEL Technologie zu einem Effizienzvorteil gegenüber der Variante bei atmosphärischem Betriebsdruck führt, während bei der AEL eine nachgeschaltete Verdichtung der LP

Ausführung vorteilhaft ist. Ebenfalls auf Basis einer Aspen Simulation wird der geringere Wasserbedarf der PEMEL im Betrachtungsfall 2 berechnet, welcher sich aus der Simulation einer Methanolsynthese mit dem zugehörigen Abwasserstrom und aus dem Verhältnis des Speisewasserwasserbedarfs der Elektrolyse ergibt. Auffällig ist der deutlich höhere Flächenbedarf für AEL, welcher um einen Faktor 4 größer als für PEMEL ausfällt [22]. Zudem ist die PEMEL Technologie deutlich flexibler im Betrieb und weist eine höhere Produktreinheit auf [20].¹ Demgegenüber findet bei der AEL eine deutlich langsamere Degradation der Stacks statt und die CAPEX sind in der LP Variante um etwa 46 % günstiger bzw. um 41 % in der HP Variante.

Für den Prozessschritt CO₂-Capture wird analog vorgegangen, wobei hier gemäß Abbildung 3 nur sechs Kriterien für die MCDA aufgegriffen werden. Unter den technischen Kriterien wird zwischen dem Flächenbedarf und dem Energiebedarf für die CO₂-Abscheidung unterschieden, wobei sich der Energiebedarf in einen thermischen und einen elektrischen Parameter unterteilt und zum Kriterium Energiebedarf System aggregiert wird. Die CAPEX werden für das CO₂-Capture und eine separate SO₂-Abscheidung aus dem Rauchgas des Kraftwerkes separat aufgeführt. Bezüglich der ökologischen Wirkungen wird der jeweils anfallende Aminbedarf berücksichtigt. Die zugrundeliegenden Parameter für die Kriterien sind in Tabelle 5 dargestellt.

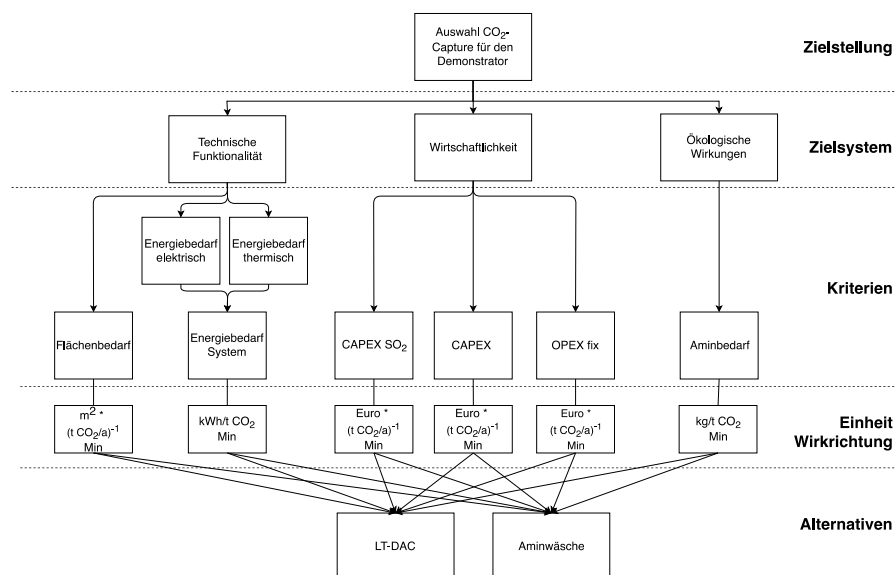


Abbildung 3: Darstellung der Kriterienhierarchie für den Prozessschritt CO₂-Capture.

Die Energiebedarfe des LT-DAC wurden Fasihi et al. entnommen [9], während eine Prozesssimulation mit AspenPlus die Datenbasis für die Aminwäsche darstellt [3]. Die Simulation bildet den spezifischen Anwendungsfall „CO₂-Abscheidung aus dem Rauchgas der Raffinerie“ ab und erlaubt über das Tool „Aspen Process Economic Analyzer“ die Ermittlung der resultierenden CAPEX. Der Flächenbedarf für das LT-DAC fällt aufgrund der geringen CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft deutlich größer aus, als für die Abscheidung aus dem KWK-Kraftwerk der Raffinerie (vgl. [27], [30]). Lediglich hinsichtlich der CAPEX für die Rauchgaswäsche zur Reduzierung des SO₂-Gehaltes ergibt sich ein Vorteil für das Direct Air Capture, da dieser Prozessschritt hier entfällt.

¹ Parameter zur Flexibilität basierend auf vertraulichen Herstellerangaben.

Tabelle 5: Übersicht über die Parametrierung der berücksichtigten Kriterien für den Prozessschritt CO₂-Capture [9][31][27][32][33].

Kriterium / Alternative	Einheit	Min/Max	LT-DAC	Aminwäsche
Energiebedarf elektrisch	kWh _e /tCO ₂	Min	250	12
Energiebedarf thermisch	kWh _{th} /tCO ₂	Min	1750	1011
Energiebedarf System	kWh/tCO ₂	Min	2000	1023
Flächenbedarf	m ² ·(tCO ₂ /a) ⁻¹	Min	0,1	0,01
CAPEX	€·(tCO ₂ /a) ⁻¹	Min	598	123
CAPEX SO ₂	€·(tCO ₂ /a) ⁻¹	Min	0	12,89
OPEX fix	€·(tCO ₂ /a) ⁻¹	Min	23,92	4,92
Aminbedarf	kg/tCO ₂	Min	7,5	1,6

4. Ergebnisse und Diskussion

Gemäß der Saaty-Skala zur Gewichtung von Kriterien wurden jeweils für Elektrolyse und CO₂-Capture mittels des AHP Ansatzes eine paarweise Vergleichsmatrix aufgestellt und eine Kriteriengewichtung vorgenommen. Aus den jeweiligen Gewichtungen und den normalisierten Parametern kann schließlich eine Rangfolge gebildet werden, aus der sich eine Empfehlung für die Technologieauswahl ergibt. Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

4.1 Ergebnisse für den Prozessschritt Elektrolyse

Die spezifischen Gewichtungen für alle Kriterien sind in Tabelle 6 dargestellt und ergeben sich aus der Umstellung der paarweisen Vergleichsmatrix aus Anhang A. Für den Prozessschritt Elektrolyse wurde unter den technischen Kriterien dem Energiebedarf eine besonders hohe Relevanz zugeordnet, da hieraus ein unmittelbarer Einfluss auf die Betriebskosten hervorgeht, welche wiederum entscheidend die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Betriebs beeinflussen. Zudem ist ein geringerer Energiebedarf indirekt auch aus ökologischer Sicht zu favorisieren. Den Kriterien Flexibilität und Degradation wird eine vergleichsweise geringe Bedeutung beigemessen, da anzunehmen ist, dass sowohl für die AEL als auch PEMEL keine Einschränkungen in der Betriebsführung vorliegen. Den CAPEX wird die höchste Gewichtung zugeordnet, da diese einen zentralen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit ausüben. Für die Kriterien Degradation und Flächenbedarf ergibt sich eine mittlere Gewichtung, da hier ebenfalls deutliche Unterschiede auftreten. Die PEMEL kann aufgrund der höheren Zellstromdichte und vermindertem Peripherieaufwand wesentlich kompakter gebaut werden, weist allerdings eine stärkere Degradationsrate auf, was sich im Langzeitbetrieb wiederum negativ auf den Energiebedarf ausübt. Die erreichbare Produktreinheit wird für beide Technologien als ausreichend erachtet und erhält daher eine niedrige Gewichtung. Der Wasserbedarf ist von höherer Bedeutung, da dieser generell zwar für beide Technologieoptionen als gleich hoch anzusetzen ist, in der Unterscheidung der zwei Betrachtungsfälle jedoch von zentraler Relevanz ist.

Tabelle 6: Gewichtung der Kriterien für die Auswahl eines Elektrolyseurs.

Energie- bedarf System	Flexibili- tät	Degrada- tion	Produkt- reinheit	Flächen- bedarf	CAPEX System	OPEX fix	Energie- bedarf Anlagenbau	Krit. Material	Wasser- bedarf
22 %	5 %	10 %	4 %	11 %	25 %	9 %	2 %	2 %	9 %

Zur Überprüfung der Konsistenz der paarweisen Vergleiche wurde der maximale Eigenwert $\lambda_{max} = 10,91$ berechnet und gemäß Gleichung 5 in den Konsistenzindex $CI = 0,10$ überführt. Auf Basis des Zufallsindex $RI = 1,49$ und Gleichung 6 ergibt sich ein zulässiges Konsistenzverhältnis von $CR = 0,068$.

Für beide Betrachtungsfälle wird auf Basis der gewichteten Kriterien und einer in Abhängigkeit der Wirkrichtung der Kriterienausprägungen durchgeführten linearen Normalisierung (vgl. Anhang B) separat unter Anwendung der Nutzwertanalyse eine Rangfolge gebildet.

Tabelle 7: Berechnete Rangfolge der vier bewerteten Alternativen für beide Betrachtungsfälle.

Alternative	Betrachtungsfall 1		Betrachtungsfall 2	
	Nutzwert	Rangfolge	Nutzwert	Rangfolge
AEL atm	0,8471	1	0,8471	2
AEL 30 bar	0,7692	4	0,7692	4
PEMEL atm	0,8086	2	0,8484	1
PEMEL 30 bar	0,7917	3	0,8316	3

In Tabelle 7 sind die berechneten Nutzwerte für die untersuchten Betrachtungsfälle dargestellt. In der Rangfolge erzielt die alkalische Elektrolyse bei atmosphärischem Betriebsdruck den höchsten Nutzwert im Betrachtungsfall 1. Aufgrund der deutlichen Vorteile dieser Alternative in den am höchsten gewichteten Kriterien Energiebedarf und CAPEX kann das Ergebnis als plausibel erachtet werden. Die beiden Ausführungen der PEM-Elektrolyse erzielen insbesondere aufgrund ihrer Vorteile bezüglich des Flächenbedarfs und der Wartungskosten die Ränge 2 und 3. Den niedrigsten Nutzwert erzielt die alkalische Druckelektrolyse, da diese einen deutlich geringeren Wirkungsgrad als die übrigen Alternativen aufweist.

In Betrachtungsfall 2 schneidet die atmosphärische PEM-Elektrolyse am besten ab, da der deutlich reduzierte Wasserbedarf sich zusätzlich sowohl auf das Kriterium Energiebedarf, als auch geringfügig auf die CAPEX positiv auswirkt. Bei einer zu erwartenden Reduktion der CAPEX in den kommenden Jahren könnte die PEM-Elektrolyse für die Prozesskette Power-to-Methanol deutliche Vorteile aufweisen, vorausgesetzt, eine Wasserrückführung aus der Methanolsynthese ist auch im realen Betrieb möglich. Da hier noch keine Erfahrungswerte vorliegen, kann über die Möglichkeit der Umsetzung einer solchen Prozesskette noch keine validierte Aussage getroffen werden.

4.2 Ergebnisse für den Prozessschritt CO₂-Capture

Analog zur Kriteriengewichtung für die Elektrolyse wurden auch für die Auswahl der CO₂-Capture Technologie der benötigte Energiebedarf und die Investitionskosten als besonders relevant bewertet. Als Ergebnis der paarweisen Vergleichsmatrix (vgl. Anhang C) wurden zudem dem Flächen- und Aminbedarf zur CO₂-Abscheidung eine mittlere Bedeutung zugeordnet. Die Investitionskosten für die SO₂-Abscheidung aus dem Rauchgasstrom des Kraftwerkes sowie die Wartungskosten für beide Technologien wurden als weniger relevant bewertet und erzielen eine geringe Gewichtung von 5-6 %.

Tabelle 8: Gewichtung der Kriterien zur Technologieauswahl für das CO₂-Capture.

Energiebedarf System	Flächenbedarf	CAPEX	CAPEX SO ₂	OPEX fix	Aminbedarf
32 %	13 %	32 %	5 %	6 %	13 %

Aus der Konsistenzüberprüfung mit $\lambda_{max} = 6,08$ und einem Konsistenzindex von $CI = 0,02$ ergibt sich mit einem bei sechs Kriterien gültigen Zufallsindex von $RI = 1,24$ ein zulässiges Konsistenzverhältnis von $CR = 0,014$.

Die normalisierten Kriterienausprägungen zur Bildung einer Rangfolge sind in Anhang D dargestellt. Aus Tabelle 9 gehen die Berechnungsergebnisse aus der Nutzwertanalyse hervor. Die CO₂-Abscheidung aus dem Rauchgasstrom des KWK-Kraftwerks mittels Aminwäsche schneidet deutlich besser als das Direct Air Capture ab. Das Ergebnis fällt mit Blick auf die Kriterienausprägungen nicht überraschend aus, da die CO₂-Abscheidung aus einer Punktquelle deutlich effizienter und kostengünstiger darstellbar ist. Bei der Deutung der erzielten Ergebnisse gilt es jedoch stets zu berücksichtigen, dass die zugrundeliegenden Umweltwirkungen eingehender Energie- und Stoffströme nicht zur Bewertung der jeweiligen Einzeltechnologien herangezogen wurden. Folglich ist der fossile Ursprung des aus dem Kraftwerk abgeschiedenen CO₂ nicht in die Bewertung eingeflossen. Diesbezüglich ist eine sachgemäße Allokation der durch das Kraftwerk verursachten Emissionen sicherzustellen, so dass diese weiterhin dem Kraftwerk bzw. Strom und Prozesswärme und/oder dem produzierten Methanol zugeordnet werden [34].

Tabelle 9: Berechnete Nutzwerte und Rangfolge.

Alternative	Nutzwert	Rangfolge
LT-DAC	0,3326	2
Aminwäsche	0,9600	1

5. Zusammenfassung

Die Erzeugung strombasierter, synthetischer Kraftstoffe und Basischemikalien durch sogenannte Power-to-X Konzepte stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und zur Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie dar. Die zugrundeliegenden Technologien solcher Prozessketten sind bereits grundsätzlich bekannt und unterschiedlich weit entwickelt. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wurde eine Technologieempfehlung für Prozessschritte Elektrolyse und CO₂-Capture einer Power-to-Methanol Anlage am Standort der Raffinerie Heide auf Basis einer multikriteriellen Analyse erarbeitet. Die Bewertung wurde unter Berücksichtigung spezifischer technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien und unter Anwendung der Methoden des AHP und der Nutzwertanalyse durchgeführt, wobei das vorgestellte methodische Vorgehen, die Kriterienauswahl sowie die Kriterienparametrierung als Ausgangspunkt für weitere PtX-Fallstudien herangezogen werden können.

Für den Prozessschritt Elektrolyse wurden die AEL und PEMEL Technologie jeweils für den Betrieb bei atmosphärischem Druck (LP) sowie bei einem Betriebsdruck von 30 bar (HP) verglichen. Die AEL bei atmosphärischem Betriebsdruck erzielte den höchsten Nutzwert und weist insbesondere in den Kriterien Energiebedarf und CAPEX deutliche Vorteile gegenüber den übrigen Alternativen auf. Demgegenüber erzielte die alkalische Druckelektrolyse insbesondere aufgrund eines sehr hohen spezifischen Energiebedarfs den geringsten Nutzwert. Die beiden PEMEL Varianten erzielten vergleichbare Ergebnisse und schnitten in der Rangfolge auf Rang 2 (PEMEL LP) und Rang 3 (PEMEL HP) ab. In der Literatur wird zudem eine Besonderheit der PEMEL diskutiert, auch mit Methanol verunreinigtes Wasser verarbeiten zu können. Diese Option könnte im Rahmen einer Power-to-Methanol Anlage besonders attraktiv sein, da somit der Abwasserstrom aus der Methanolsynthese ohne weitere Aufbereitung zur Elektrolyse zurückgeführt und die energieintensive Wasseraufbereitung von

Frischwasser anteilig reduziert werden kann. In einem zweiten Betrachtungsfall wurde daher angenommen, dass der Abwasserstrom der Methanolsynthese für die PEM-Elektrolyse genutzt kann. In diesem Betrachtungsfall konnte die PEMEL (LP) trotz der deutlich höheren CAPEX den höchsten Nutzwert erzielen, gefolgt von der AEL (LP), PEMEL (HP) und AEL (HP).

Bei der Bewertung von CO₂-Capture Technologien wurden das Direct Air Capture Verfahren von Climeworks, das mit Niedertemperaturwärme betrieben wird, sowie die etablierte Technologie der Aminwäsche zur Abscheidung von CO₂ aus dem KWK-Kraftwerk der Raffinerie Heide bewertet. Die Aminwäsche erzielte den deutlich höheren Nutzwert, da die CO₂-Abscheidung aus einer Punktquelle deutlich effizienter und kostengünstiger darstellbar ist als eine Abscheidung aus der Umgebungsluft. Es ist jedoch zu beachten, dass der abweichende Ursprung des CO₂ nicht in die ausgeführte Bewertung eingeflossen ist.

Förderung

Diese Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projekts KEROSyN100 durchgeführt (FKZ 03EIV051A). Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung des Projekts durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Literatur

- [1] Fraunhofer ISE, „Jährlicher Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland“, *Energy Charts*, 2020. .
- [2] C. Schnuelle, J. Thoeming, T. Wassermann, P. Thier, A. von Gleich, und S. Goessling-Reisemann, „Socio-technical-economic assessment of power-to-X: Potentials and limitations for an integration into the German energy system“, *Energy Res. Soc. Sci.*, Bd. 51, S. 187–197, Mai 2019.
- [3] T. Wassermann, C. Schnuelle, P. Kenkel, und E. Zondervan, „Power-to-Methanol at Refineries as a Precursor to Green Jet Fuel Production: A Simulation and Assessment Study“, *Comput. Aided Chem. Eng.*, forthcoming.
- [4] F. Flachsbarth und P. Karsten, „Aktuelle Potenziale der Produktion von PtX-Kraftstoffen auf Basis von zusätzlich integrierten Erneuerbaren Energien“, *Öko-Institut Work. Pap.*, Bd. 3, 2017.
- [5] BNetzA, „Monitoringbericht 2019“, Bonn, 2020.
- [6] BNetzA, „Monitoringbericht 2018“, Bonn, 2019.
- [7] A. Otto, „Chemische, verfahrenstechnische und ökonomische Bewertung von Kohlendioxid als Rohstoff in der chemischen Industrie“, RWTH Aachen, 2015.
- [8] S. Menia, H. Tebibel, F. Lassouane, A. Khellaf, und I. Nouicer, „Hydrogen production by methanol aqueous electrolysis using photovoltaic energy: Algerian potential“, *Int. J. Hydrogen Energy*, Bd. 42, Nr. 13, S. 8661–8669, März 2017.
- [9] M. Fasihi, O. Efimova, und C. Breyer, „Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants“, *J. Clean. Prod.*, 2019.
- [10] M. Reeg, „Auswahl einer MCDA-Methode unter Nachhaltigkeitsbedingungen für ein Bioenergiekonzept in Ludwigsfelde“, 2009.
- [11] I. Wilkens, „Multikriterielle Analyse zur Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen – Von der Theorie zur praktischen Anwendung“, Technische Universität Berlin, 2012.
- [12] N. Geldermann, Jutta; Lerche, „Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung“, 2014.
- [13] T. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process for Decision in a Complex World*. Pittsburgh: RWS

Publications, 1980.

- [14] T. L. Saaty, „How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process“, *Eur. J. Oper. Res.*, Bd. 48, S. 9–26, 1990.
- [15] S. De Montis, Andrea; De Toro, Pasquale; Droste-Franke, Bert; Omann, Ines; Stagl, „Criteria for quality assessment of MCDA methods“, 2000.
- [16] T. L. Saaty, „A scaling method for priorities in hierarchical structures“, *J. Math. Psychol.*, Bd. 15, Nr. 3, S. 234–281, Juni 1977.
- [17] J. R. S. C. Mateo, „Weighted Sum Method and Weighted Product Method“, 2012, S. 19–22.
- [18] C. Zangemeister, „Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen“, Technische Universität Berlin, 1976.
- [19] T. Smolinka, E. T. Ojong, und J. Garche, „Hydrogen Production from Renewable Energies-Electrolyzer Technologies“, in *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, 2015.
- [20] A. Buttler und H. Spliethoff, „Current status of water electrolysis for energy storage , grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids : A review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 82, S. 2440–2454, 2018.
- [21] C. Caldera, Upeksha; Breyer, „Desalination powered by renewable energy“, 2018.
- [22] S. Noack, Christoph; Burggraf, Fabian; Hosseiny, Seyed Schwan; Lettenmeier, Philipp; Kolb, Svenja; Belz, „Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck“, 2015.
- [23] T. Smolinka u. a., „Studie IndWEDe - Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme“, Berlin, 2018.
- [24] M. Decker, F. Schorn, R. Can, R. Peters, und D. Stolten, „Off-grid power-to-fuel systems for a market launch scenario – A techno-economic assessment“, *Appl. Energy*, Bd. 250, S. 1099–1109, 2019.
- [25] H. Meereis, Juergen; Lutz-Kulawik, Thomas; Rickert, Mats; Sitner, Artur; Dittberner, Elena; Meereis, „Potenzialstudie Wasserstoffwirtschaft“, 2019.
- [26] P. Koj, Jan Christian; Wulf, Christina; Schreiber, Andrea; Zapp, „Site-Dependent Environmental Impacts of Industrial Hydrogen Production by Alkaline Water Electrolysis“, *Energies*, Bd. 10, Nr. 7, S. 860, Juni 2017.
- [27] P. Viebahn, „Technologien für die Energiewende Technologiebericht – Band 2“, *Wuppertal Rep.*, Nr. April, 2018.
- [28] C. Chardonnet, V. Giordano, S. Rapoport, und others, „Final Report: Study on early business cases for H2 in energy storage and more broadly power to H2 applications“, Brussels, 2017.
- [29] J. Dufour, D. P. Serrano, J. L. Gálvez, A. González, E. Soria, und J. L. G. Fierro, „Life cycle assessment of alternatives for hydrogen production from renewable and fossil sources“, *Int. J. Hydrogen Energy*, Bd. 37, Nr. 2, S. 1173–1183, Jan. 2012.
- [30] W. Kuckshinrichs, Wilhelm; Markewitz, Peter; Linssen, Jochen; Zapp, Petra; Peters, Martina, Köhler, Burkhard, Müller, Thomas E.; Leitner, „Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO2“, 60, 2010.
- [31] D. Singh, E. Croiset, P. L. Douglas, und M. A. Douglas, „Techno-economic study of CO2 capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O2/CO2 recycle combustion“, *Energy Convers. Manag.*, Bd. 44, Nr. 19, S. 3073–3091, 2003.
- [32] T. Roestenberg, „Design Study Report: ANTECY solar fuels development“, Hoevelaken, the Netherlands, 2015.
- [33] K. Li, W. Leigh, P. Feron, H. Yu, und M. Tade, „Systematic study of aqueous monoethanolamine (MEA)-based CO2 capture process: Techno-economic assessment of the MEA process and its improvements“, *Appl. Energy*, Bd. 165, S. 648–659, 2016.

- [34] N. von der Assen, J. Jung, und A. Bardow, „Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls“, *Energy Environ. Sci.*, Bd. 6, Nr. 9, S. 2721, 2013.

Anhang

A:

Paarweise Vergleichsmatrix der Kriterien zur Bewertung der Elektrolyse-Alternativen.

	Energie- bedarf System	Flexibilität	Degradation	Produkt- reinheit	CAPEX System	OPEX fix	Flächen- bedarf	Energie- bedarf Anlagenbau	Krit. Material	Wasser- bedarf
Energie- bedarf System	1,00	5,00	3,00	5,00	1,00	3,00	3,00	7,00	7,00	3,00
Flexibilität	0,20	1,00	0,33	1,00	0,20	0,33	0,33	5,00	5,00	0,33
Degradation	0,33	3,00	1,00	3,00	0,33	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00
Produkt- reinheit	0,20	1,00	0,33	1,00	0,20	0,20	0,20	3,00	3,00	0,33
CAPEX System	1,00	7,00	3,00	7,00	1,00	5,00	3,00	7,00	7,00	3,00
OPEX fix	0,33	5,00	1,00	5,00	0,33	1,00	0,20	3,00	3,00	1,00
Flächen- bedarf	0,33	5,00	1,00	5,00	0,33	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00
Energie- bedarf Anlagenbau	0,14	0,33	0,20	0,33	0,14	0,33	0,20	1,00	1,00	0,33
Krit. Material	0,14	0,33	0,20	0,33	0,14	0,33	0,20	1,00	1,00	0,33
Wasser- bedarf	0,33	3,00	1,00	3,00	0,33	1,00	1,00	3,00	3,00	1,00

B:

Transponierte Kriterienausprägungen als Grundlage für eine dimensionslose Vergleichbarkeit der Elektrolyse-Alternativen.

Kriterium/ Alternative	Energie- bedarf System	Flexibilität	Degradation	Produkt- reinheit	Flächen- bedarf	CAPEX System	OPEX fix	Energie- bedarf Anlagenbau	Kritisches Material	Wasser- bedarf
Einheit	kWh/Nm ³	%P/min	% _n /1000h	Vol.-%	m ² /MW	€/kW	€·(kW/a) ⁻¹	kWh/kW	kg/kW	Liter/kg
Min/Max	Min	Max	Min	Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min
AEL atm	1,0000	0,2000	1,0000	0,9991	0,2298	1,0000	0,7983	1,0000	1,0000	1,0000
AEL 30 bar	0,8757	0,2000	1,0000	0,9991	0,2298	0,8973	0,5217	1,0000	1,0000	1,0000
PEMEL atm	0,9610	1,0000	0,6500	1,0000	1,0000	0,5430	1,0000	0,8200	0,0000	1,0000
PEMEL 30 bar	0,9801	1,0000	0,6500	1,0000	1,0000	0,5303	0,8006	0,8200	0,0000	1,0000

C:

Paarweise Vergleichsmatrix der Kriterien zur Bewertung der CO₂-Capture Alternativen.

	Energiebedarf System	Flächenbedarf	CAPEX	CAPEX SO ₂	OPEX fix	Aminbedarf
Energiebedarf System	1,00	3,00	1,00	5,00	5,00	3,00
Flächenbedarf	0,33	1,00	0,33	3,00	3,00	1,00
CAPEX	1,00	3,00	1,00	5,00	5,00	3,00
CAPEX SO ₂	0,20	0,33	0,20	1,00	0,33	0,33
OPEX fix	0,33	0,33	0,20	1,00	1,00	0,33
Aminbedarf	0,33	1,00	0,33	3,00	3,00	1,00

D:

Transponierte Kriterienausprägungen als Grundlage für eine dimensionslose Vergleichbarkeit der CO₂-Capture Alternativen.

Kriterium/ Alternative	Energiebedarf System	Flächenbedarf	CAPEX	CAPEX SO ₂	OPEX fix	Aminbedarf
Einheit	kWh/t _{CO2}	m ² ·(t _{CO2} /a) ⁻¹	€·(t _{CO2} /a) ⁻¹	€·(t _{CO2} /a) ⁻¹	€·(t _{CO2} /a) ⁻¹	kg/t _{CO2}
Min/Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min
LT-DAC	0,51150	0,10000	0,20569	1,00000	0,20569	0,21333
Aminwäsche	1,00000	1,00000	1,00000	0,00000	1,00000	1,00000