

Prüfstand-Entwicklung für Brennstoffzellen und Elektrolyseure

Befähigung eines multifunktionalen Testbetriebs

A. Kampker, H. H. Heimes, J. Hausmann, S. Biegler, P. Euchner, K. Hadla

ZUSAMMENFASSUNG Grüner Wasserstoff wird als Energieträger eine zentrale Rolle in der Dekarbonisierung emissionsreicher Sektoren einnehmen. Bei den dafür notwendigen Technologien existieren potenzielle Synergieeffekte, die noch nicht ausreichend erforscht und genutzt wurden. Am Beispiel der Prüfprozesse wird in diesem Beitrag ein Vorschlag erarbeitet, wie sich ein Einzelzellprüfstand konstruieren lässt, der einen multifunktionalen Prüfbetrieb für unterschiedliche Wasserstofftechnologien erlaubt.

STICHWÖRTER

Engineering, Entwicklung, Forschung

Enabling Multi-Functional Test Operation – Test Bench Development for Fuel Cells and Electrolyzers

ABSTRACT As an energy carrier, green hydrogen will play a central role in the decarbonization of high-emission sectors. There are potential synergy effects for the technologies required that have not yet been sufficiently researched and utilized. Using the example of test procedures, this article develops a proposal on how a single-cell test bench can be designed in order to carry out multi-functional test operation for various hydrogen technologies.

1 Einleitung und Motivation

Mit dem Pariser Klimaschutzabkommen aus dem Jahr 2015 haben sich die unterzeichnenden Nationen darauf geeinigt, gemeinsam auf eine Begrenzung der Erderwärmung um 1,5 °C hinzuarbeiten. [1] Um dieses Ziel zu erreichen, folgte die nationale Verpflichtung Deutschlands, eine Treibhausgasneutralität bis 2045 zu realisieren. [2] Ein Großteil der nationalen CO₂-Emissionen sind auf die Stahlindustrie (rund 28 %) und den Verkehrssektor (circa 22 %) zurückzuführen. [3] Zugleich stellen die Stahlindustrie und der Schwerlastbereich des Verkehrssektors Bereiche dar, die mit herkömmlichen Methoden technisch und ökonomisch kaum sinnvoll emissionsfrei zu gestalten sind. Die Nutzung von grünem, emissionsfrei erzeugtem Wasserstoff bietet hingegen das Potenzial, die Dekarbonisierung dieser Bereiche zu erreichen. [4]

Die Erzeugung grünen Wasserstoffs in einem Elektrolyseur erfolgt durch die Aufspaltung von Wasser mittels regenerativ erzeugter elektrischer Energie. Dabei existieren unterschiedliche Arten von Elektrolyseuren, die wiederum verschiedene Vorzüge und Nachteile aufweisen. Während Alkalische Elektrolyseure (AEL) insbesondere für große Anlagen unter konstanter Last genutzt werden, bieten sich Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyseure (PEMEL) für die Anwendung unter dynamischer Last an, wie sie beispielsweise bei der Nutzung von Windenergie vorkommt. Ein vielversprechendes Hybridmodell beider Technologien bildet der Anionen-Austausch-Membran-Elektrolyseur (AEMEL), der die Vorteile beider Technologien in sich vereinen soll. Auch wenn heutzutage die installierte Elektrolyseurkapazität primär auf die AEL-Technologie zurückzuführen ist, bedingt

die oftmals dynamische Bereitstellung regenerativer Energie einen vermehrten Ausbau der PEMEL- und langfristig auch der AEMEL-Technologie. [5, 6]

Zur Nutzung des erzeugten Wasserstoffs in mobilen Applikationen ist wiederum die Verwendung der Brennstoffzellentechnologie notwendig. Auch dort existieren unterschiedliche Technologien, wobei für den Einsatz in mobilen Applikationen fast ausschließlich die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMBZ) verwendet wird. Das Produkt und seine Produktion sind dabei nicht identisch, aber sehr ähnlich zu denen des PEMEL. Neben technologischen Parallelen auf Zellebene sind auch die Betriebsbedingungen in Teilen miteinander vergleichbar. Zugleich bilden der technische und zeitliche Umfang der zugehörigen Prüfprozesse sowie die wirtschaftlichen Konsequenzen Herausforderungen für die PEMBZ, den PEMEL und den AEMEL. Neben hohen Investitionskosten bleibt auch der Entwicklungsaufwand signifikant, der primär durch unterschiedliche Produkt- und Kundenanforderungen sowie mangelnde Standardisierung von Prüfprotokollen bedingt ist. [6, 7]

Ungeachtet dessen, werden potenzielle Synergieeffekte zwischen den Technologien der PEMBZ, des PEMEL und des AEMEL im Bereich der Prüfprozesse bislang kaum eruiert. Prüfstände, die in der Lage sind, die wichtigsten Prüfprozesse dieser drei Technologien ohne Adaptionen zu erfüllen, können durch Skalierung die individuellen Investitionskosten sowie die Entwicklungsaufwände reduzieren. Um Prüfprozesse in frühen Phasen der Entwicklung zu adressieren, soll die Ermittlung potenzieller Synergieeffekte zunächst für einen Einzelzellenprüfstand erfolgen. Das bedeutet, dass nur wenige Zellen anstelle von ganzen Stapeln oder Systemen getestet werden sollen, wodurch

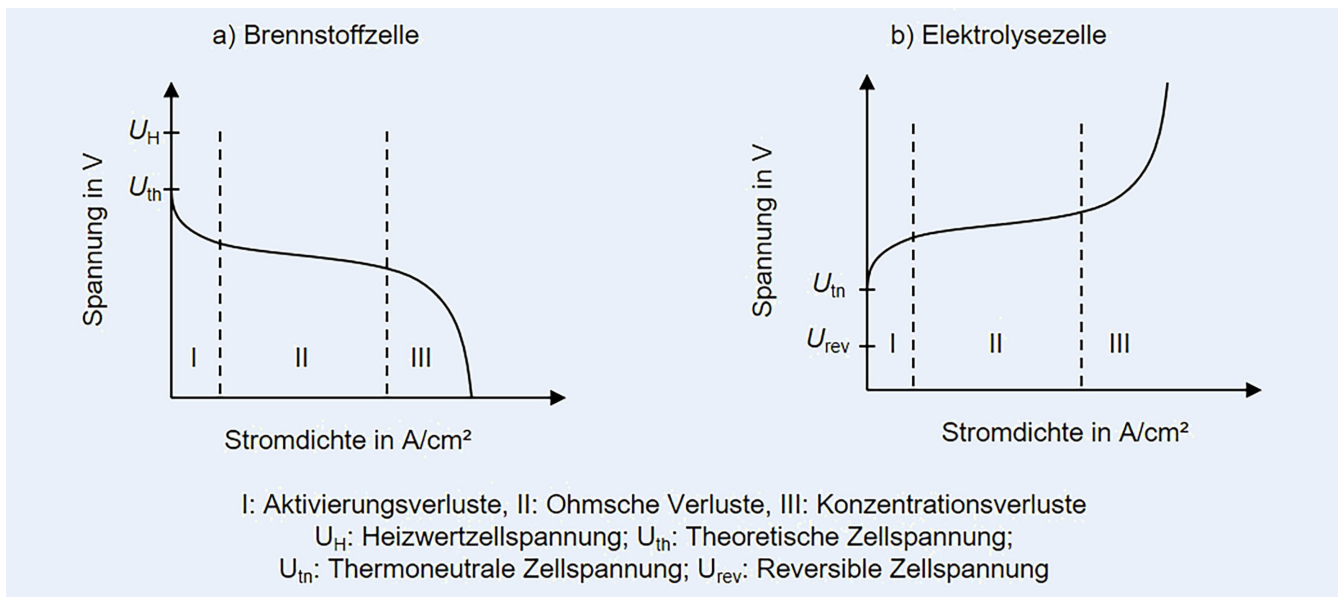


Bild 1. Polarisationskurven elektrochemischer Zellen. Grafik: PEM der RWTH Aachen in Anlehnung an O'Hayre et al. (Fuel cell fundamentals), 2016 & Tjarks (PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas-Anlagen), 2017

sich Materialkosten sparen lassen. Bei einer erfolgreichen Validierung können die Forschungsergebnisse als Grundlage dafür genutzt werden, potenzielle Synergieeffekte auch für andere Arten von Prüfständen zu schöpfen. Folgerichtig lautet die Forschungsfrage dieses Beitrags:

Wie kann die Konstruktion eines Einzelzellenprüfstands methodisch gestaltet werden, um die relevanten Prüfprozesse für eine PEMBZ, einen PEMEL sowie einen AEMEL abzubilden?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird dieser Beitrag entlang seiner inhaltlichen Struktur in verschiedene Arbeitsschritte gegliedert. Im ersten Schritt werden die relevanten Untersuchungsmethoden für elektrochemische Zellen identifiziert und für die betrachteten Technologien eingegrenzt. Basierend darauf, erfolgt die Ermittlung der konstruktiven Anforderungen an einen multifunktionalen Testbetrieb, wobei neben technologischen auch die forschungsseitigen Anforderungen betrachtet werden. Im Anschluss erfolgt die Entwicklung des Einzelzellenprüfstands in Anlehnung an das methodische Vorgehen der VDI 2221. [8] In der Zusammenfassung dieses Beitrags findet eine kritische Reflexion des Gesamtentwurfs sowie des methodischen Vorgehens statt, bevor ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben wird.

2 Identifikation relevanter Untersuchungsmethoden für elektrochemische Zellen

Prinzipiell lassen sich die Untersuchungsmethoden für elektrochemische Zellen in zwei Formen unterteilen: die Ex-situ- und die In-situ-Untersuchungen. Erstgenannte umfassen Methoden, die die Eigenschaften einzelner Komponenten außerhalb des Betriebsumfelds charakterisieren. Dementsprechend definieren Insitu-Untersuchungen die Erfassung von Parametern während des operativen Betriebs einer Komponente. Sofern möglich, sind Insitu-Untersuchungen zu bevorzugen, da sie schnelle und praxisnahe Rückschlüsse bezüglich der Qualität und Betriebsbedingun-

gen eines Produkts zulassen. Im Rahmen von Exsitu-Untersuchungen entsteht ein erhöhter Arbeitsaufwand durch den Ein- und Ausbau der Prüflinge. Gleichzeitig lassen sich Zusammenhänge zwischen Betriebsparametern und Testparametern nur unter Mehraufwand herstellen. Daher fokussiert sich dieser Beitrag auf einen Prüfstand mit Insitu-Untersuchungsmethoden, weshalb in diesem Kapitel auch nur solche vorgestellt werden. [5]

2.1 Charakterisierung mittels Polarisationskurve

Die Charakterisierung elektrochemischer Zellen mittels einer Polarisationskurve ist die am häufigsten genutzte In-situ-Untersuchungsmethode. In der Polarisationskurve wird der Zusammenhang zwischen der realen Spannung und der Stromdichte dargestellt. Die elektrische Leistungsdichte kann als Produkt aus Stromdichte und Spannung aus der Polarisationskurve abgeleitet werden. Der Verlauf der Polarisationskurve visualisiert somit die Effizienz und damit auch die Effizienzverluste einer elektrochemischen Zelle. In **Bild 1** ist auf der linken Seite die Polarisationskurve für eine Brennstoffzelle und auf der rechten Seite diejenige für einen Elektrolyseur dargestellt. [5, 9]

In einer Brennstoffzelle nimmt die entstehende Spannung bei zunehmender Stromdichte aufgrund der elektrochemischen Verluste stetig ab. Der Betriebspunkt in einer Brennstoffzelle liegt daher unterhalb der theoretischen Zellspannung. Die elektrische Leistungsdichte kann durch die Wahl des Betriebspunktes beeinflusst und maximiert werden. Für den Elektrolyseur nimmt die Spannung bei zunehmender Stromdichte stetig zu. Alle denkbaren Betriebspunkte eines Elektrolyseurs liegen daher oberhalb der reversiblen Zellspannung. Durch die Wahl des Betriebspunktes kann die elektrische Leistungsdichte eines Elektrolyseurs daher minimiert werden. [5, 9]

Die elektrochemischen Verluste der Zellen zeichnen sich innerhalb der Polarisationskurven ab. Im Bereich I dominieren die sogenannten Aktivierungsverluste, die sich aus der erforderlichen Aktivierungsenergie sowie der Reaktionskinetik ergeben.

Die ohmschen Verluste treten in Bereich II durch die elektrischen Widerstände der einzelnen Bauteile einer elektrochemischen Zelle auf. Die Polarisationskurve verdeutlicht den linearen Charakter dieser Verluste. In Bereich III erfolgen zuletzt die sogenannten Konzentrationsverluste, die durch den limitierten Stofftransport der Reaktionsprodukte verursacht wird. Aus diesem Grund wird eine Stoffverarmung im Betrieb durch eine überstöchiometrische Zufuhr an Reaktionsmitteln vermieden. [5, 9]

Neben den genannten Verlusten treten in der Zelle eines Elektrolyseurs zudem Massenverluste auf – auch „Faradaysche Verluste“ genannt. Sie entstehen hauptsächlich durch unbeabsichtigte Permeationsverluste durch die Membran, wodurch eine Senkung der Stromdichte und damit auch der Produktionsrate einhergehen. [9]

2.2 Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)

Im Rahmen der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) werden die elektrochemischen Verluste einer Zelle spezifiziert. Dazu wird ein sinusförmiges Anregungssignal mit geringer Amplitude an ein elektrochemisches System angelegt, das aus einer Einzelzelle oder mehreren von ihnen besteht. Das System gibt dabei ein ebenso sinusförmiges Signal gleicher Frequenz zurück. Die Amplitude und die Phase des Rückgabesignals sind dabei jedoch verändert. Aus dem Verhältnis von Eingangs- und Ausgangssignal wird die Impedanz des Systems berechnet. Durch Variation der Anregungsfrequenz über einen definierten Bereich lässt sich das Impedanzspektrum des Systems erfassen. In **Bild 2** ist das Prinzip der elektrochemischen Impedanzspektroskopie dargestellt. [5, 10, 11]

Ein Impedanzspektrum wird meist in Form eines Nyquist-Diagramms dargestellt. Dabei wird der Imaginärteil der Impedanz gegen den Realteil bei verschiedenen Frequenzen aufgetragen. **Bild 3** zeigt die exemplarischen Ergebnisse einer EIS für eine Brennstoffzelle in einem solchen Nyquist-Diagramm. [12]

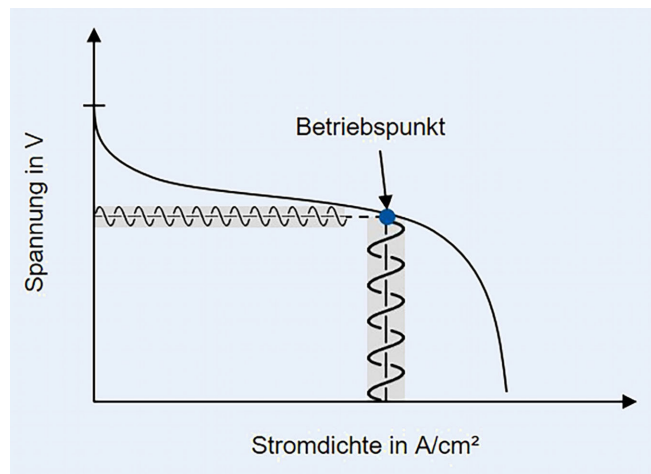


Bild 2. Prinzip der elektrochemischen Impedanzspektroskopie.

Grafik: PEM der RWTH Aachen in Anlehnung an O'Hayre et al. (Fuel cell fundamentals), 2016

Charakteristisch sind die beiden halbkreisförmigen Spitzen, wobei deren Größe einen Rückschluss auf die anoden- und kathodenseitigen Aktivierungsverluste zulässt. Die Schnittpunkte mit der x-Achse grenzen die Impedanzbereiche voneinander ab. Die Breite dieser Bereiche liefert wiederum Rückschlüsse über den relativen Anteil der jeweiligen elektrochemischen Verluste. Im dargestellten Beispiel ist der Leistungsabfall der Brennstoffzelle somit vor allem auf die kathodenseitigen Aktivierungsverluste zurückzuführen, während ohmsche Verluste zu vernachlässigen sind. [5, 11]

2.3 Dichtheitsprüfung

Ein wichtiges Funktions- und Qualitätsmerkmal eines Stapels aus mehreren elektrochemischen Zellen (auch „Stack“ genannt) ist die Dichtheit. Ihre Überprüfung erfolgt in der Regel durch ei-

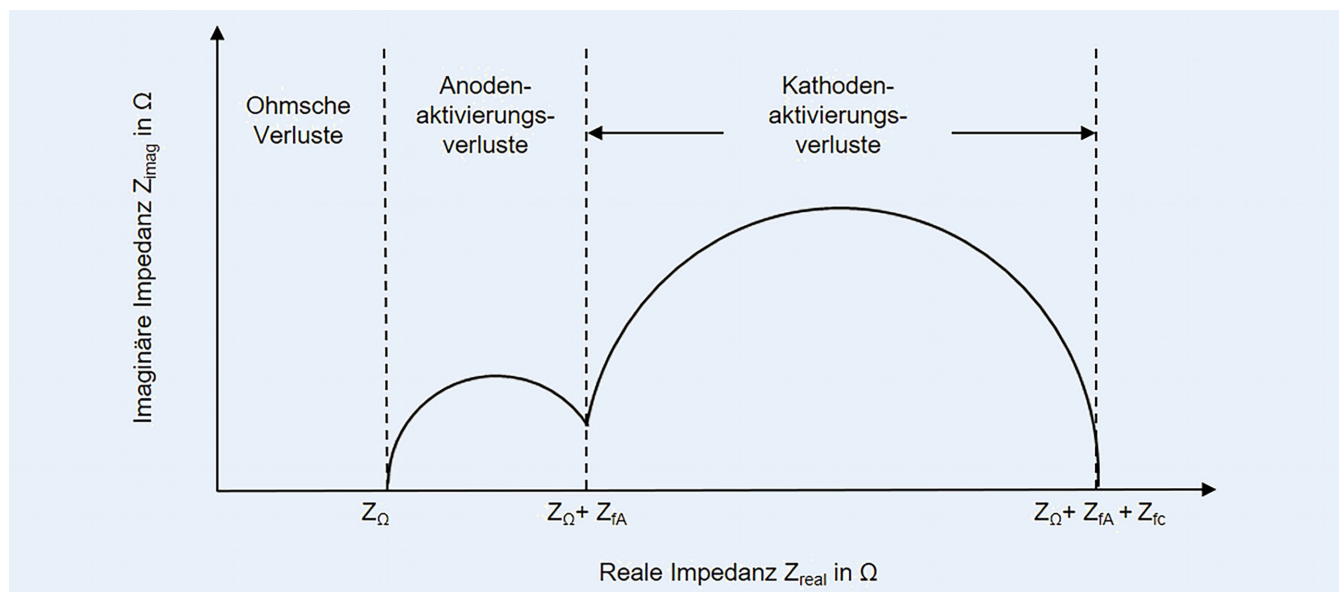


Bild 3. Exemplarisches Ergebnis einer EIS-Messung im Nyquist-Diagramm.

Grafik: PEM der RWTH Aachen in Anlehnung an O'Hayre et al. (Fuel cell fundamentals), 2016

ne Druckabfall- oder eine Durchflussprüfung. Dafür erhalten die Medieneingänge des Stapels eine Prüfgaszufuhr. Im Rahmen eines Druckabfalltests werden die Medienausgänge verschlossen und der Druckverlust im Verlauf der Zeit nach Befüllung des Stapels mit dem Prüfmedium gemessen. Beim Durchflusstest bleiben die Ausgänge geöffnet, und der Durchfluss des Prüfmediums wird erfasst. Mittels potenzieller Medienverluste wird die Dichtheit des Stapels falsifiziert. Üblicherweise wird für die meisten Prüfungen aus Kosten- und Sicherheitsgründen entweder Stickstoff oder ein Formiergas (5 % Wasserstoff, 95 % Stickstoff) verwendet. Damit lassen sich jedoch nicht alle undichten Stellen identifizieren, weshalb die Prüfung häufig auch mit Helium oder Wasserstoff validiert wird. Dadurch entstehen allerdings höhere Kosten, und es müssen Vorkehrungen im Sinne der Wasserstoffsicherheit getroffen werden. In der Entwicklung sind Dichtheitsprüfungen in der Regel nur nach konstruktiven Anpassungen notwendig, so dass der Prüfaufwand kalkulierbar ist. [7, 13]

2.4 Isolationsprüfung

Im Rahmen einer Isolationsprüfung erfolgt die Abschätzung, ob die konstruktiven Abstände und installierten Isolierungen der Einzelzellen eines Stapels einer kurzzeitigen Überspannung widerstehen können. Die Prüfung gilt als bestanden, sofern weder innerhalb der Zellen noch zwischen Stapel und Gehäuse ein elektrischer Durchschlag auftritt. Der Ableitstrom darf dabei das Verhältnis aus Prüfspannung zu Leerlaufspannung, multipliziert mit einem Milliampere, nicht überschreiten. Analog zur Dichtheitsprüfung, ist auch die Isolationsprüfung in der Regel nur bei konstruktiven Anpassungen notwendig. [7, 13]

2.5 Stresstests

Um die Langzeitstabilität elektrochemischer Zellen zu untersuchen, werden sogenannte beschleunigte Stresstests („Accelerated Stress Tests“; AST) vorgenommen. Diese rufen unter verschärften Betriebsbedingungen beschleunigte Degradationsmechanismen hervor. Im Rahmen von chemischen Stresstests wird die oxidative Degradation der Polymermembran herbeigeführt, die zu einer Reduktion der Protonenleitfähigkeit und einer strukturellen Schwächung führt. Mechanische Stresstests hingegen adressieren die Beanspruchung der Membran durch repetitive Temperatur- und Feuchtezyklen, die zu einer zyklischen Schrupfung und Dehnung führen, was letztlich in einer Rissbildung münden kann. Beide Arten von Stresstests sind relevant, um ein holistisches Bild über die Belastbarkeit und Lebensdauer der eingesetzten Komponenten zu erhalten. Mithilfe der Ergebnisse lassen sich zudem gezielte Optimierungen der Einzelzellkomponenten realisieren. [14]

3 Ermittlung konstruktiver Anforderungen an multifunktionalen Testbetrieb

Nachdem die relevanten Prüfungen für die PEMBZ, den PEMEL und den AEMEL identifiziert wurden, müssen die jeweiligen Produkte und deren technologischen Eigenschaften näher untersucht werden. Dazu wird zunächst der Aufbau der Peripheriekomponenten der jeweiligen Technologie betrachtet, um die realitätsnahe Versorgung der Einzelzellen im Prüfstand sicherzustellen. Die Peripheriekomponenten müssen demnach durch

den Prüfstand substituiert werden. Im Anschluss wird eine Recherche zur Identifizierung der für die Forschung relevanten Dimensionen dieser Technologien vorgenommen. Durch die resultierenden Abweichungen in Form der aktiven Fläche und der Zellanzahl entstehen auch variierende konstruktive Anforderungen an den Prüfstand.

3.1 Systemaufbau der betrachteten Technologien

Im Folgenden wird auf die Peripheriekomponenten der betrachteten Technologien eingegangen. Für die Brennstoffzelle wird dabei dezidiert die PEMBZ betrachtet, deren Systemarchitektur ähnlich zu vergleichbaren Wasserstoffbrennstoffzellen ist. Die Peripheriekomponenten des Elektrolyseurs beziehen sich auf den PEMEL und den AEMEL, wobei Unterschiede im Betrieb und in der Auslegung der einzelnen Komponenten existieren können. Diese werden aufgeschlüsselt und in der Auslegung des Prüfstands berücksichtigt. Insgesamt werden lediglich diejenigen Peripheriekomponenten aufgeführt, die für den Betrieb eines Prüfstands relevant sind. In der adressierten Anwendung ist das Hinzufügen weiterer Peripheriekomponenten sinnvoll.

3.1.1 Subsysteme für den Einzelzellprüfstand einer Brennstoffzelle

Zusätzlich zum Stapel besteht eine Brennstoffzelle aus unterschiedlichen Systemkreisläufen. Neben der Leistungselektronik, die die erzeugte elektrische Energie abführt, lassen sich die Peripheriekomponenten in das Wasserstoffsubsystem, das Luftsubsystem, das Kühltsubsystem sowie die Leistungselektronik aufgliedern. Die Subsysteme sowie die wichtigsten zugehörigen Peripheriekomponenten sind vereinfacht in **Bild 4** dargestellt und werden trotz existierender Variationen im weiterführenden Rahmen dieses Beitrags betrachtet. Die Leistungselektronik wird für die Auslegung des Prüfstands gesondert behandelt, da sie stark von der Stromsenke abhängig ist. [7]

Anodenseitig erfolgt die Versorgung des Stapels mit Wasserstoff. Volumenstrom und Eingangsdruck des Wasserstoffs werden ausgehend vom Betriebsdruck geregelt, wobei mehr Wasserstoff zugeführt wird, als in der Zelle reagiert. Das führt dazu, dass der nicht reagierte, überschüssige Wasserstoff aus dem Stapel wieder ausgeführt und im Wasserstoffsubsystem rezirkuliert wird. Je nach Systemgrenze und Komplexität besteht das Wasserstoffsubsystem aus einem Rezirkulationsgebläse, einem Kondensatabscheider sowie einem Druckregler und Ventilen. [7, 15]

Auf Kathodenseite wird der Stapel mit feuchter Luft versorgt, da für die elektrochemische Reaktion in der Zelle Sauerstoff benötigt wird. Da die Umgebungsluft Schmutzpartikel enthält, die Schäden in der Brennstoffzelle verursachen können, muss die in das System eintretende Luft zunächst gefiltert werden. Insgesamt besteht das Luftsubsystem vereinfacht aus einem Luftbefeuchter, einem Luftkompressor, einem Ladeluftkühler sowie einem Luftfilter. Alternativ kann für einen Prüfstand auch auf den Luftfilter, den Luftkompressor sowie den Ladeluftkühler verzichtet werden, sofern stattdessen eine Druckluftzufuhr installiert und angeschlossen wird. [7, 15]

Aufgrund einer geringen Abgasenthalpie und Betriebstemperaturen von unter 100 °C stellt die Kühlung einer Brennstoffzelle eine systemseitige Herausforderung dar. Zugleich muss die elektrische Leitfähigkeit trotz Ioneneintrags im Betrieb geringgehalten

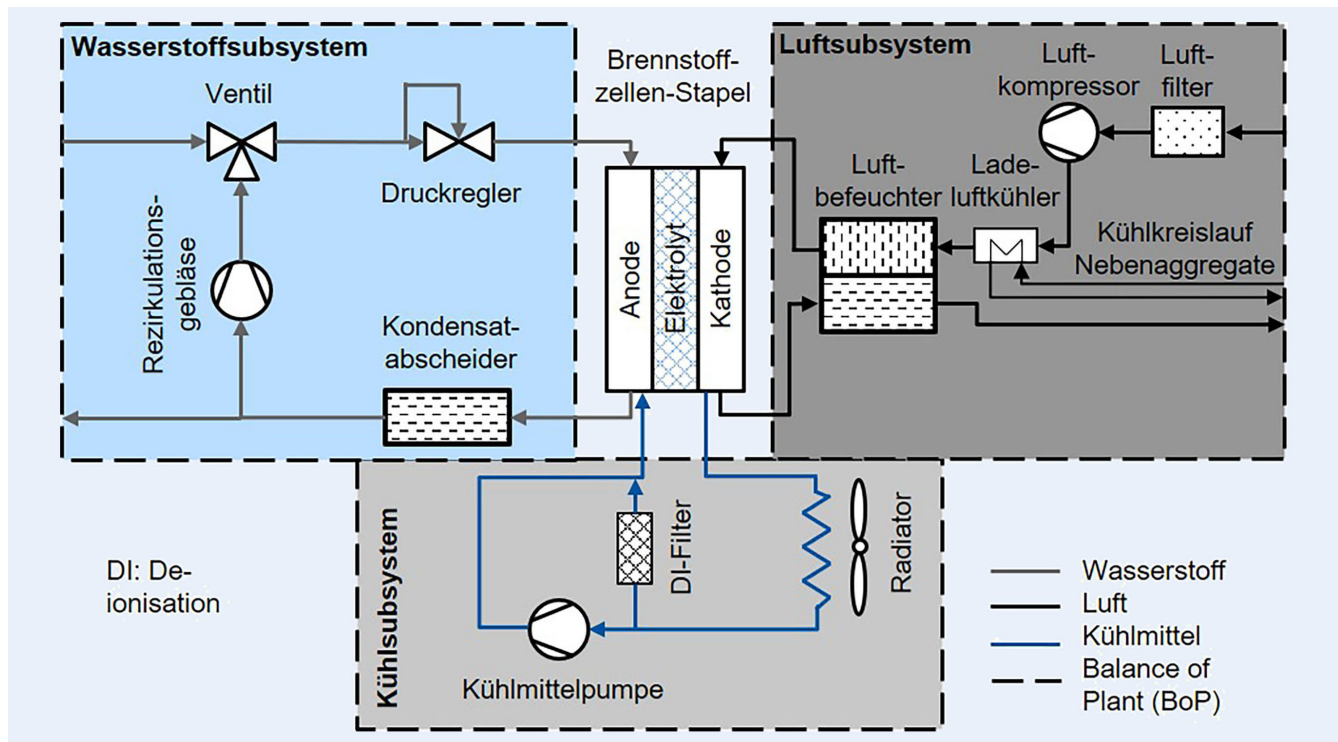


Bild 4. Brennstoffzellensubsysteme für den Prüfstandbetrieb. Grafik: PEM der RWTH Aachen in Anlehnung an Heimes et al. (Brennstoffzellensysteme), 2023

Tabelle 1. Betriebsparameter im Brennstoffzellenbetrieb.

Parameter mit Einheit	Minimaler Wert	Maximaler Wert
Betriebsdruck auf der Anodenseite in bar	ca. 1	ca. 2,7
Betriebsdruck auf der Kathodenseite in bar	ca. 1,1	ca. 3
Betriebstemperatur in °C	50	80
Relative Feuchte der Luft auf der Kathodenseite in %	40	100

werden, um Kurzschlüsse innerhalb der Zelle zu vermeiden. Das Kühlsystem benötigt daher neben Radiatoren mit großen Oberflächen auch einen Ionenfilter, um die elektrische Leitfähigkeit des Kühlmittelstroms zu regulieren. Zusätzlich sind eine Kühlmittelpumpe und ein Druckregler notwendig, um Volumenstrom und Eingangsdruck entsprechend den Betriebsparametern einzustellen. [7, 15]

Die minimalen und maximalen Werte der Betriebsparameter einer PEMBZ sind in **Tabelle 1** dargestellt und somit relevant für die Auslegung des Prüfstands. Dabei gilt zu beachten, dass der Druck auf Kathodenseite üblicherweise höher ist als der auf Anodenseite, um die Reaktionskinetik zu verbessern und die Befeuchtung der Membran sicherzustellen. [16]

3.1.2 Subsysteme für den Einzelzellprüfstand eines Elektrolyseurs

Analog zur Brennstoffzelle, sind auch für den Betrieb eines Elektrolyseurs verschiedene Kreisläufe und Komponenten für dessen Betrieb notwendig. Die Subsysteme sowie die wichtigsten zugehörigen Peripheriekomponenten, die für einen Prüfstand relevant sind, werden vereinfacht in **Bild 5** visualisiert. Diese

werden trotz existierender Variationen im weiterführenden Rahmen dieses Beitrags betrachtet. [13]

Für den Betrieb eines Elektrolyseurstapels wird die Zufuhr von Wasser benötigt. Da die elektrische Leitfähigkeit des Wassers einen Wert von $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ nicht überschreiten darf, ist die Nutzung von deionisiertem Wasser notwendig. [17] Je nach Systemarchitektur erfolgt die Zufuhr des Wassers auf Anoden- oder auf Kathodenseite. Für den AEMEL variiert der Anteil von Kaliumhydroxid (KOH) Lösung im Wasser zwischen 0,3 und 0,7 wt% [18]. Zu Beginn der Elektrolyse ist die Zufuhr von Wärme in den Wasserkreislauf und damit in den Stapel vonnöten, da es sich um eine endotherme Reaktion handelt. Im Verlauf des Betriebs und den damit auftretenden Verlusten in Form von Wärme wird jedoch die Kühlung des Wasserstroms notwendig, der überstöchiometrisch zugeführt und damit auch wieder aus dem Stapel ausgeführt wird, bevor eine Rezirkulation nach Deionisierung erfolgt. Das Wassersubsystem besteht folgerichtig aus Wärmetauschern, einem Ionentauscher, einer Wasserpumpe sowie Ventilen und Filtern. [9, 13]

Die Abfuhr des produzierten Wasserstoffs erfolgt über das Wasserstoffsubsystem. Da die Reinheitsanforderungen mobiler Brennstoffzellen an den Wasserstoff äußerst hoch sind, muss der

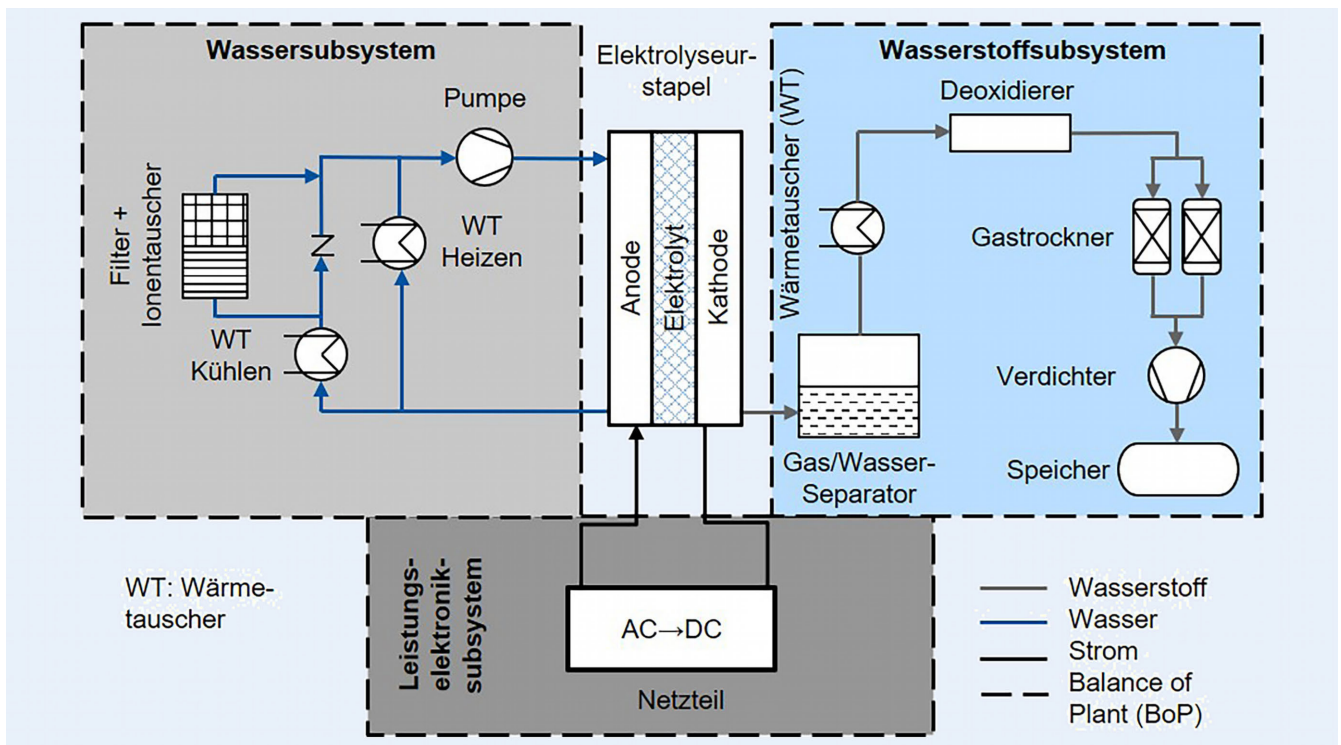


Bild 5. Elektrolyseur-Subsysteme für den Prüfstand-Betrieb.

Grafik: PEM der RWTH Aachen in Anlehnung an Tjarks (PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen), 2017

Tabelle 2. Betriebsparameter im Elektrolyseurbetrieb.

Parameter mit Einheit	PEMEL		AEMEL	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Betriebsdruck auf der Anodenseite in bar	1	8	1	8
Betriebsdruck auf der Kathodenseite in bar	0	40	0	40
Betriebstemperatur in °C	70	90	50	70
Zellspannung in V	0	2,2	0	2,2
Stromdichte in A/cm ²	0	3	0	1,5

produzierte Wasserstoff nach der Produktion getrocknet und des-oxidiert werden. Im Anschluss wird der Wasserstoff verdichtet und gasförmig gespeichert. Das Wasserstoffsubsystem besteht demnach aus einem Gas-/Wasser-Separator, Kondensatoren, einer Desoxidationseinheit, Kompressionspumpen, Wärmetauschern, einem Wasserstoffspeicher sowie einer Gastrocknungseinheit. [13, 19]

Neben Wasser benötigt ein Elektrolyseur für seinen Betrieb die Versorgung mit elektrischer Energie. Entsprechend ist ein Leistungselektroniksubsystem notwendig, das aus einem Trans-former (Netzteil) besteht und den Elektrolyseur mit Gleichstrom versorgt. [9]

Die minimalen und maximalen Werte der Betriebsparameter eines PEMEL und eines AEMEL sind in **Tabelle 2** aufgetragen und somit relevant für die Auslegung des Prüfstands. [20, 21]

3.2 Recherche zu üblichen Dimensionen der betrachteten Technologien

Mit dem anvisierten Einzelzellenprüfstand sollen insbesondere die frühen Entwicklungsphasen adressiert werden. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, muss mithilfe einer Literatur-recherche ermittelt werden, welche Dimensionen hinsichtlich aktiver Fläche und Zellanzahl für die Forschung relevant sind.

Für Brennstoffzellen konnten dabei insgesamt 66 Studien aus den vergangenen zehn Jahren identifiziert werden, die in **Bild 6** dargestellt werden, wo die Parameter der aktiven Fläche sowie der Zellanzahl aufgetragen sind. Die Größe des abgebildeten Kreises visualisiert dabei die Menge der Publikationen für eine spezielle Kombination dieser beiden Parameter. Zusätzlich erfolgt eine farbliche Zuordnung zum inhaltlichen Schwerpunkt der publizierten Forschung, wobei zwischen einer generischen Effizienzsteigerung, einer Erforschung des Katalysatormaterials und Untersuchungen zum Degradationsverhalten unterschieden wird.

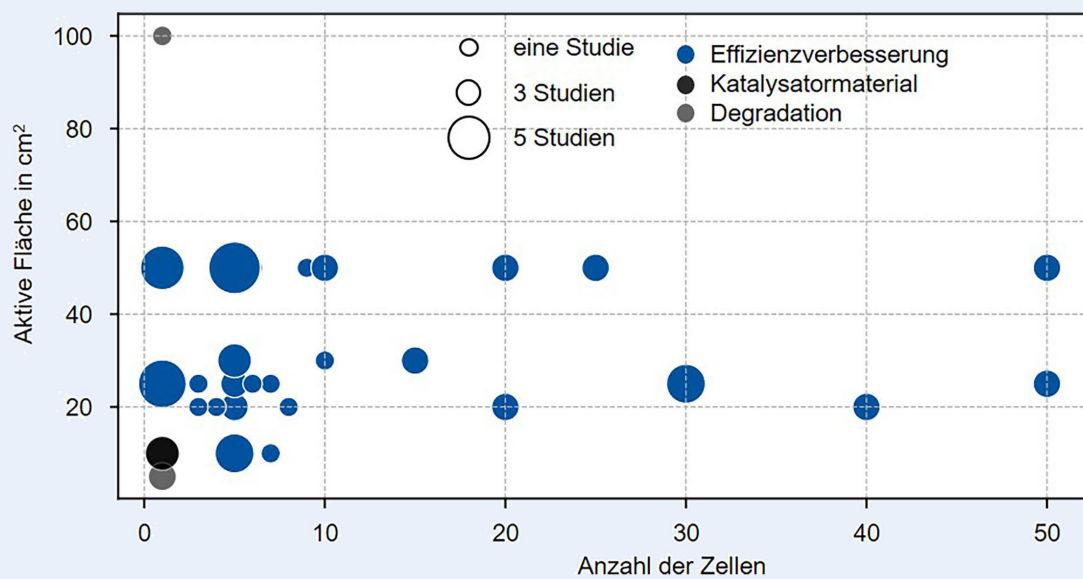


Bild 6. Aktive Fläche und Zellanzahl in Studien zu Brennstoffzellen. Grafik: PEM der RWTH Aachen

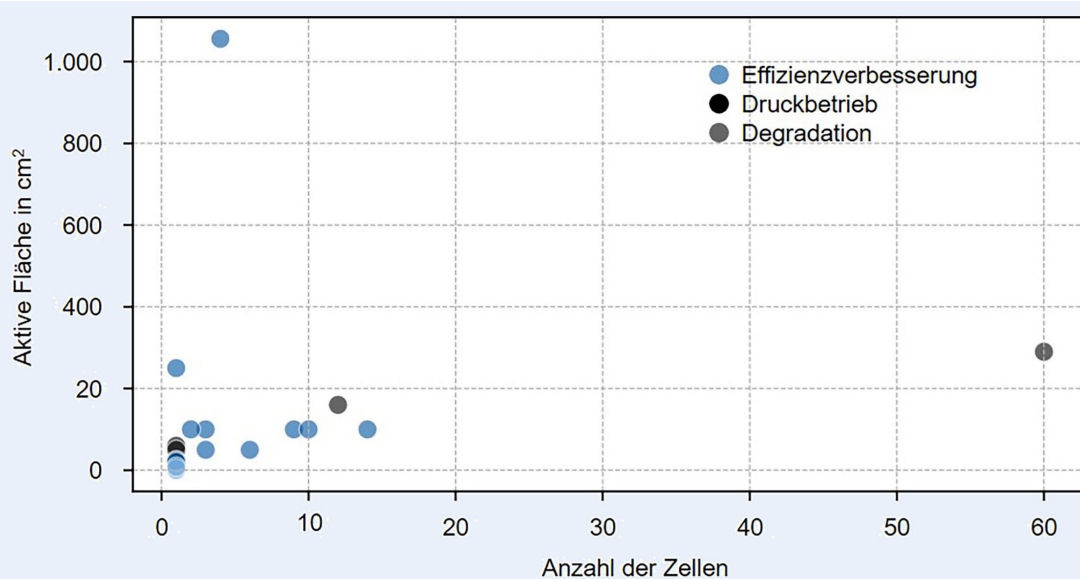


Bild 7. Aktive Fläche und Zellanzahl in Studien zu Elektrolyseuren. Grafik: PEM der RWTH Aachen

Aus der Abbildung lässt sich erkennen, dass der Großteil der in den identifizierten Publikationen verwendeten Zellen aktive Flächen im Bereich von fünf bis 50 cm² aufweisen. Ebenfalls signifikant ist die hohe Dichte von Publikationen im Bereich einer Zellanzahl von eins bis zehn. In diesem Bereich sind zudem alle drei Forschungsbereiche aufzufinden, so dass diese Spanne als repräsentativ für einen Großteil der Forschung angenommen werden kann.

Für die Elektrolyseure erfolgt ein analoges Vorgehen, wobei im Rahmen der Literaturrecherche aufgrund des Neuheitsgrads der AEM-Technologie vor allem Studien zum PEM-Elektrolyseur identifiziert werden konnten. Insgesamt wurden 14 Studien zusammengetragen, die nach dem gleichen Prinzip wie bei der Brennstoffzelle in Bild 7 dargestellt sind.

Anhand der Ergebnisse lässt sich ableiten, dass in den meisten Publikationen aktive Flächen zwischen neun und 200 cm² genutzt werden. Gleichzeitig weisen die Zellstapel üblicherweise eine Anzahl von eins bis zehn Zellen auf. Ziel der anstehenden Vorgehensweise und Konstruktion ist es, möglichst viele Forschungsbereiche abzudecken, so dass die identifizierten Dimensionen der aktiven Fläche und Zellanzahl die Grundlage für die Auslegung darstellen.

4 Methodische Umsetzung der Prüfstand-Entwicklung

Um eine systematische und organisierte Entwicklung des Prüfstands zu gewährleisten, ist es ratsam, sich an existierenden und

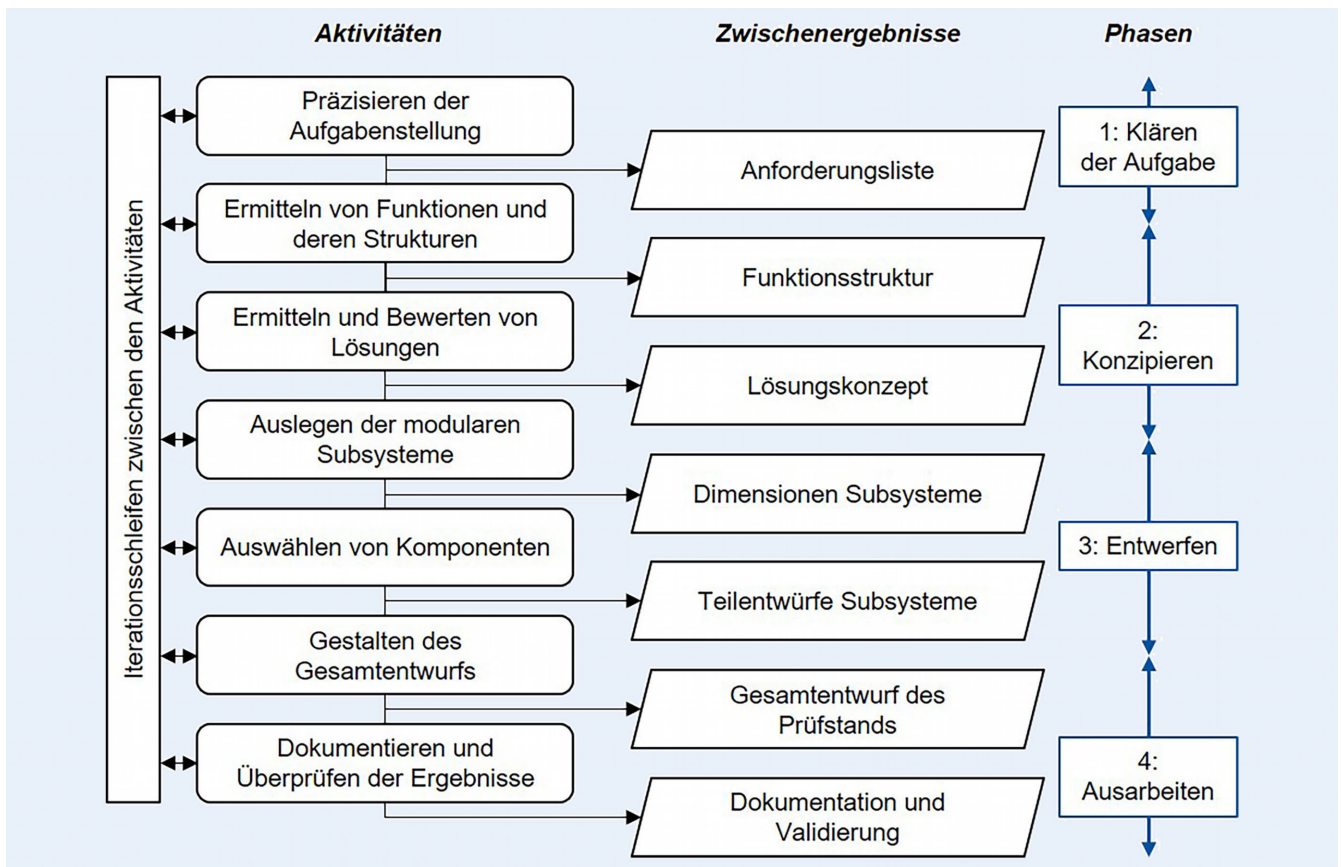


Bild 8. Vorgehensweise gemäß VDI 2221. Grafik: PEM der RWTH Aachen in Anlehnung an die VDI 2221

etablierten Methoden zu orientieren. Zur Entwicklung technischer Produkte und Systeme dient dabei in der Praxis vor allem die VDI 2221, mit der die Entwicklung in verschiedene Phasen aufgeteilt wird. Der inhaltliche Fokus fällt je nach Entwicklungskontext in die Phase „Klären der Aufgabe“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ oder „Ausarbeiten“. [8]

Die erste Phase (Klären der Aufgabe) dient der Ermittlung der konstruktiven Anforderungen für das zu entwickelnde System. Auf dieser Basis können im zweiten Schritt (Konzipieren) die Funktionsstrukturen des Systems abgeleitet werden, die zur Erfüllung der konstruktiven Anforderungen notwendig sind. Zugleich erfolgt die Identifizierung geeigneter Lösungskonzepte. Im Rahmen der vorliegenden Zielsetzung umfasst der dritte Schritt (Entwerfen) die Auslegung der Subsysteme sowie die zugehörige Auswahl der Komponenten. Das Zusammenführen der Teilentwürfe zu einem Gesamtentwurf vollzieht sich im vierten und letzten Schritt (Ausarbeiten). In **Bild 8** ist die Vorgehensweise der VDI 2221, ergänzt um die kontextuellen Details, dargestellt. [22, 23]

4.1 Realisierung der ersten Phase: Klären der Aufgabe

Das primäre Ziel der ersten Phase liegt in der Ermittlung der konstruktiven Anforderungen für das zu entwickelnde System. Dabei fließen neben der definierten Zielsetzung auch die Erkenntnisse über existierende In-situ-Untersuchungsmethoden und die Ergebnisse der Literaturrecherche ein. Des Weiteren werden relevante Normen zur Einhaltung der Sicherheitsanfor-

derungen einbezogen. [24, 25] In **Tabelle 3** ist eine exemplarische, verkürzte Anforderungsliste dargestellt, die die zugehörigen Anforderungen in die Kategorien „Variabilität“, „Messtechnik“, „Material“, „Sicherheit“ und „Umsetzung“ aufgliedert.

4.2 Realisierung der zweiten Phase: Konzipieren

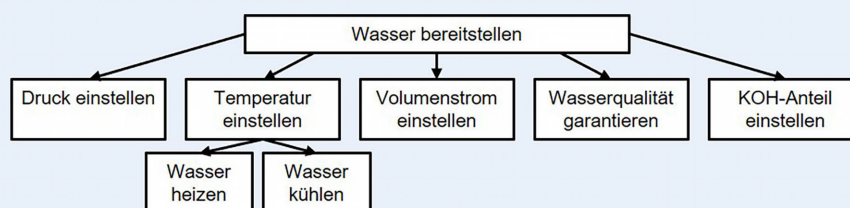
Die Anforderungen werden in der zweiten Phase dazu genutzt, die notwendigen Funktionsstrukturen abzuleiten. Die Funktionen werden dabei entlang der Submodule des Prüfstands (Wassersubsystem, Wasserstoffsubsystem, Luftsubsystem, Elektrik- und Elektroniksubsystem [E/E]) kategorisiert. Als Hauptfunktion wird die Untersuchung von Einzelzellen der PEMBZ, PEMEL und AEMEL vorausgesetzt.

Am Beispiel des Wassersubsystems wird eine Funktionsstruktur exemplarisch vorgestellt. In der Wasserelektrolyse fungiert Wasser sowohl als Edukt als auch als Medium zur Steuerung der Betriebstemperatur. Zugleich lässt sich im Elektrolyseurbetrieb der Betriebsdruck durch die Wasserzufuhr einstellen. Für die korrekte Zufuhr ist außerdem die Einstellung des Volumenstroms sowie die Gewährleistung einer hohen Reinheit erforderlich. Für die Einzelzellen des AEMEL muss zusätzlich die Einstellung des KOH-Anteils möglich sein. In **Bild 9** sind die Funktionen des Wassersubsystems visualisiert. Die Funktionen basieren auf Betriebsparametern, die direkt und aktiv eingestellt werden sollen. Indirekte Korrelationen bleiben dabei unberücksichtigt.

Auf Basis der ermittelten Funktionsstrukturen kann die Suche nach adäquaten Lösungskonzepten vorgenommen werden.

Tabelle 3. Verkürzte Liste konstruktiver Anforderungen.

Nr.	Konstruktive Anforderungen
1	Variabilität
1.1	Multifunktionaler Betrieb zur Untersuchung von PEM-Brennstoffzellen sowie PEM- und AEM-Elektrolysezellen
1.2	Untersuchung von PEM-Elektrolysezellen mit einer aktiven Fläche zwischen 9 und 200 cm ²
1.3	Untersuchung von AEM-Elektrolysezellen mit einer aktiven Fläche zwischen 9 und 200 cm ²
1.4	Untersuchung von PEM-Brennstoffzellen mit einer aktiven Fläche zwischen 5 und 50 cm ²
2	Messtechnik (Methoden, Signale und Software)
2.1	Aufnahme der Polarisationskurve während der Untersuchung
2.2	Umsetzung der EIS während der Untersuchung
2.3	Umsetzung von AST bei variablen Betriebsparametern
2.4	Integration der Sensorsignale (Temperatur, Druck, Volumenstrom etc.) in Messtechnik
3	Material
3.1	Korrosionsbeständigkeit bei der Untersuchung der PEM-Elektrolysezellen
3.2	KOH-Beständigkeit bei der Untersuchung der AEM-Elektrolysezellen
3.3	Wasserstoffbeständigkeit im Wasserstoffsubsystem
3.4	Temperatur- und Druckbeständigkeit in Betriebsbereichen
4	Sicherheit
4.1	Angemessener Umgang mit abgeführtem Wasserstoff
4.2	ATEX-Zertifizierung in explosionsgefährdeten Bereichen
4.3	Vermeidung von Bildung vom zündfähigen Gemisch
5	Umsetzung
5.1	Verwendung von vorhandenen Komponenten
5.2	Möglichst geringe Entwicklungskosten

**Bild 9.** Funktionsstruktur des Wassersubsystems. Grafik: PEM der RWTH Aachen

Zunächst werden Prinziplösungen für die identifizierten Teilfunktionen ermittelt, bevor diese zu Lösungskonzepten kumuliert werden. Dazu wird der Anforderungserfüllungsgrad der einzelnen Prinziplösungen bewertet, um die jeweils geeignetste von ihnen zu identifizieren.

Die Auswahl der Prinziplösungen erfolgt dabei auf Basis bereits etablierter und teilweise standardisierter Lösungen aus der Fachliteratur sowie vorhandenen Expertenwissens. In Teilen ist auch die Entwicklung neuer Komponentenkonstruktionen notwendig. Analog zur zweiten Phase wird die Auswahl der Prinzip-

lösungen exemplarisch am Wassersubsystem vorgenommen. Für die Darstellung und spätere Auswahl der Prinziplösungen wird der aus der Produktentwicklung bekannte morphologische Kasten genutzt, wobei in den Zeilen die jeweiligen Teilfunktionen dargestellt sind. Die Spalten bezeichnen und nummerieren die Anzahl der Lösungen, wobei die jeweiligen Zellen der Matrix mit der konkreten, technologischen Prinziplösung gefüllt werden. Für das Wassersubsystem ist der zugehörige morphologische Kasten in **Tabelle 4** dargestellt.

Tabelle 4. Morphologischer Kasten für das Wassersubsystem.

	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4
F1: Druck einstellen	Mechanische Pumpe	Nutzung Höhendifferenz		
F2: Wasser heizen	(Reversible) Wärmepumpe	Umgebung als Wärmequelle	Elektrischer Heizer	Heizkessel
F3: Wasser kühlen	(Reversible) Wärmepumpe	Umgebung als Wärmesenke	Kompressionskältemaschine	Absorptionskältemaschine
F4: Volumenstrom einstellen	Magnetischinduktiver Effekt	Thermisches Prinzip	Differenzdruck	
F5: Wasserqualität garantieren	Reinstwasser kaufen	Leitungswasser behandeln		
F6: KOH-Anteil einstellen	In-line-Zugabe	Zugabe im Batch		

Tabelle 5. Gewichtete Bewertungskriterien.

		T1	T2	T3	T4	T5	U1	U2	K1	K2
Technische Umsetzung	T1: Einfache Montage		+	+	+	+	-	-	+	-
	T2: Einfache Bedienung	-		-	+	+	-	-	-	-
	T3: Einfache Austauschbarkeit	-	+		+	+	-	+	+	-
	T4: Geringe Komplexität	-	-	-		+	-	-	-	-
	T5: Hohe Zuverlässigkeit	-	-	-	-		-	-	-	-
Umwelt	U1: Geringer Energiebedarf	+	+	+	+	+		+	-	-
	U2: Hohe Lebensdauer	+	+	-	+	+	-		-	-
Kosten	K1: Geringe CapEx	-	+	-	+	+	+	+		+
	K2: Geringe OpEx	+	+	+	+	+	+	+	-	
Häufigkeit der „+“		3	6	3	7	8	2	4	2	1
Normierte Gewichtungsfaktoren G_i		0,4	0,8	0,4	0,9	1	0,3	0,5	0,3	0,1
Legende: + = Vertikaler Eintrag ist wichtiger als horizontaler Eintrag - = Vertikaler Eintrag ist weniger wichtig als horizontaler Eintrag										

Nachdem die morphologischen Kästen der jeweiligen Subsysteme erstellt sind und damit die Identifizierung der Prinziplösungen für die Erfüllung der ermittelten Funktionsstruktur abgeschlossen wurde, muss in der vierten Phase eine Bewertung der jeweiligen Teillösungen erfolgen. Gemäß VDI 2221 stehen dazu mehrere Methoden zur Verfügung, die sich hinsichtlich ihrer Komplexität und dem damit verbundenen Aufwand unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit dem Vorgehen nach Wartack ein aufwendiges, aber fundiertes Bewertungsverfahren gewählt. [26]

Im ersten Schritt werden die Bewertungskriterien der in der ersten Phase festgelegten Anforderungsliste abgeleitet und der Übersichtlichkeit halber in die drei Kategorien „Technische Umsetzung“, „Umwelt“ und „Kosten“ untergliedert. Im Anschluss erfolgt anhand eines paarweisen Vergleichs die Gewichtung der einzelnen Kriterien, um deren unterschiedliche Relevanz in die Auswahl der Prinziplösungen einfließen zu lassen. In **Tabelle 5** sind die Bewertungskriterien inklusive ihrer normierten Gewichtungsfaktoren dargestellt. Um einen zuverlässigen Prüfstand-

betrieb zu ermöglichen, erhalten insbesondere die Kriterien der hohen Zuverlässigkeit sowie der geringen Komplexität hohe Bewertungen. Die Kosten werden zudem im Rahmen dieser Arbeit als weniger relevant erachtet, da entsprechend der Forschungsfrage insbesondere die technische Umsetzung im Fokus steht. In einem industriellen Kontext müssen die Kriterien der Kosten höher gewichtet werden.

Im nächsten Schritt erfolgt die Bewertung der einzelnen Prinziplösungen anhand der definierten Bewertungskriterien, wobei die Maßzahlen gemäß VDI 2225, Blatt 3 als Basis dienen. [27] Nach dieser Logik ergeben sich die folgenden Maßzahlen für die Bewertung:

- 4: Sehr gute Erfüllung des Bewertungskriteriums
 - 3: Gute Erfüllung des Bewertungskriteriums
 - 2: Durchschnittliche Erfüllung des Bewertungskriteriums
 - 1: Ausreichende Erfüllung des Bewertungskriteriums
 - 0: Ungenügende Erfüllung des Bewertungskriteriums
- Der qualitative Erfüllungsgrad der definierten Funktionen durch die jeweiligen Prinziplösungen wird anschließend mithilfe von

Tabelle 6. Bewertungsmatrix für das Wassersubsystem.

K	G _i	F1		F2				F3				F4			F5	
		L1	L2	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L1	L2
T1	0,4	2	3	1	1	3	2	1	3	1	1	3	2	1	3	3
T2	0,8	4	1	4	2	3	3	4	3	3	3	4	4	4	1	1
T3	0,4	3	0	3	1	3	2	3	3	1	1	3	2	3	2	2
T4	0,9	4	4	0	2	2	2	0	4	0	0	2	1	2	3	2
T5	1	3	0	3	0	4	3	3	4	3	3	4	2	2	2	3
U1	0,3	2	4	3	4	2	1	3	3	2	3	3	2	3	2	2
U2	0,5	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	4	1	3
K1	0,3	2	4	1	3	2	2	1	3	0	0	2	1	3	4	1
K2	0,1	2	4	3	4	2	3	2	4	1	2	3	2	3	1	4
Wert		1,3	1	1,1	0,9	1,4	1,2	1,1	1,7	0,9	0,9	1,6	1,2	1,4	1,1	1,2
Auswahl		✓			✓							✓				✓

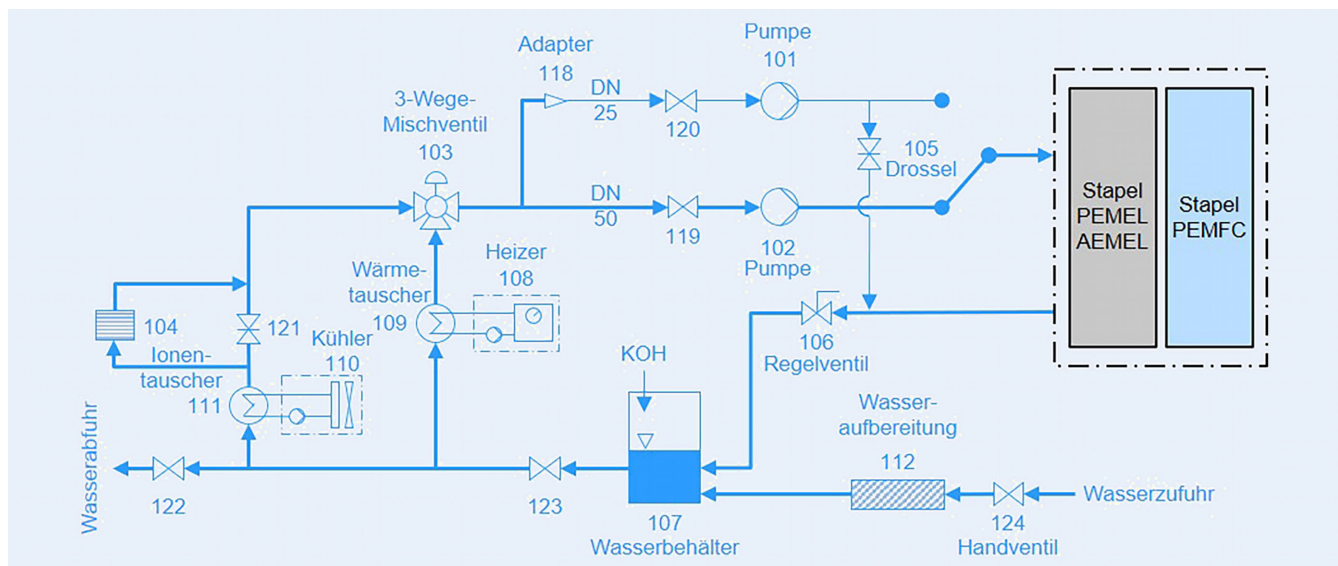


Bild 10. Teilentwurf des Wassersubsystems. Grafik: PEM der RWTH Aachen

Experten ermittelt und in Form des quantitativen Maßzahlensystems dokumentiert. Exemplarisch für das Wassersubsystem ergibt sich dadurch die in **Tabelle 6** visualisierte Bewertungsmatrix.

Infolge der Bewertungsmatrizen ist die Ermittlung der geeigneten Prinziplösungen möglich, für die im Anschluss eine Auslegung stattfinden muss. Dazu fließen die Anforderungen an den Prüfstand ein und werden in der Dimensionierung der Komponenten durch Bestimmung der notwendigen Betriebsparameter berücksichtigt. Aufgrund des Umfangs dieser Berechnungen wird darauf an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Für die Methode ist die Dimensionierung der Komponenten durch den Anwender jedoch von zentraler Bedeutung für die folgende Phase.

4.3 Realisierung der dritten Phase: Entwerfen

Im Anschluss an die Quantifizierung und Dimensionierung der Komponenten der Subsysteme erfolgt entlang der VDI 2221

die Ermittlung der Teilentwürfe, die in Form eines R&I-Fließschemas dargestellt werden. Entsprechend einer Zuordnungssystematik erhält jede Komponente eine individuelle dreistellige Nummer, wobei die erste Ziffer auf das Subsystem hindeutet (1: Wassersubsystem; 2: Wasserstoffs subsystem; 3: Luft subsystem; 4: E/E-Subsystem) und die Kombination aus der zweiten und dritten Ziffer eine einmalig vergebene, sequenzielle Nummernkennzeichnung darstellt. Exemplarisch für das Wassersubsystem ist in **Bild 10** der zugehörige Teilentwurf dargestellt.

Der Dimensionierung der Komponenten folgend, muss der Anwender der Methodik eine Herstellersauswahl treffen, um die Planung in diesem Schritt bereits konkret werden zu lassen. Zusätzlich müssen die Teilfunktionen der einzelnen Komponenten sowie der jeweiligen Submodule aufeinander abgestimmt sein, was die Detaillierung der Planung hinsichtlich der zugehörigen Schnittstellen bedingt.

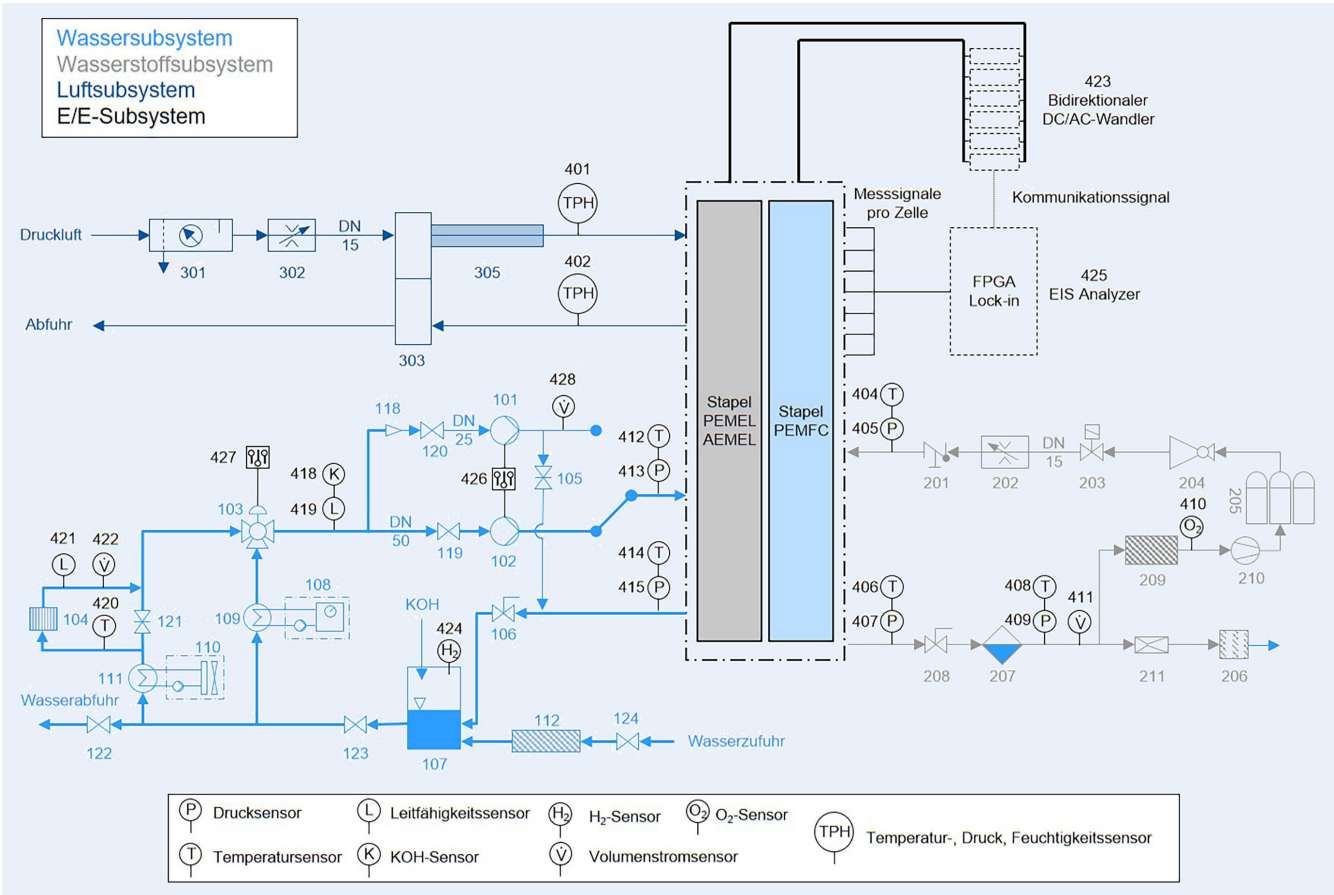


Bild 11. Gesamtentwurf des Prüfstands. *Grafik: PEM der RWTH Aachen*

4.4 Realisierung der vierten Phase: Ausarbeiten

In der vierten und letzten Phase der Methodik erfolgt die Konsolidierung der einzelnen Teilentwürfe zu einem Gesamtkonzept. Die zuvor eingeführte Zuordnungssystematik und die Darstellung in Form eines R&IFließschemas bleiben dabei erhalten. In **Bild 11** ist der finale Gesamtentwurf dargestellt, mit dem die Realisierung eines multifunktionalen Prüfstands aus konstruktiver Sicht prinzipiell möglich ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das übergeordnete Ziel dieses Beitrags liegt in der Eruierung potenzieller Synergieeffekte zwischen den Technologien der PEMBZ, des PEMEL und des AEMEL im Bereich der Prüfprozesse. Die dazu formulierte Forschungsfrage richtet sich an die methodische Gestaltung der Konstruktion eines Einzelzellenprüfstands, mit dem sich die relevanten Prüfprozesse dieser Technologien abbilden lassen.

Im ersten Schritt werden dazu die relevanten Untersuchungsmethoden für elektrochemische Zellen identifiziert, wobei eine Fokussierung auf In-situ-Prüfungen gelegt wird, um eine schnellere Reaktionsfähigkeit bei Abweichung der anvisierten Qualitätsparameter zu ermöglichen. Darauf aufbauend, erfolgt die Ermittlung der konstruktiven Anforderungen an einen multifunktionalen Testbetrieb, wobei die für einen Einzelzellenprüfstand notwendigen Subsysteme und Komponenten identifiziert werden. Im selben Zuge wird anhand einer Literaturrecherche dazu ermittelt,

welche Dimensionen für die aktive Fläche und die Zellanzahl für den Großteil der Forschung relevant sind, so dass der Prüfstand prinzipiell in der frühen Produktentwicklung eingesetzt werden kann.

Anschließend erfolgt die Prüfstand-Entwicklung, wobei sich das methodische Vorgehen an der VDI 2221 orientiert. Im ersten Schritt werden dazu die konstruktiven Anforderungen an den Prüfstand konsolidiert und spezifiziert, bevor die dafür notwendige Funktionsstruktur abgeleitet wird. Auf Basis eines morphologischen Kastens werden die möglichen Prinzipiellösungen für die Erfüllung der Funktionsstruktur zusammengetragen, worauf die Auswahl der geeignetsten Prinzipiellösung anhand eines Bewertungsschemas folgt. Die Konsolidierung der Prinzipiellösung in Teilentwürfen findet in der dritten Phase statt. Mithilfe eines R&I-Fließschemas werden die Komponenten sowie deren Schnittstellen visualisiert, bevor die Auslegung und Dimensionierung der Komponenten anhand der konstruktiven Anforderungen erfolgt. Anschließend muss die Auswahl der Hersteller sowie die Ableitung des Gesamtentwurfs für den Prüfstand stattfinden.


Insgesamt ist festzuhalten, dass die initiale Forschungsfrage in Form einer Prüfstandsentwicklung und -konzeptionierung beantwortet wurde und eine Lösung für ein Konzept erarbeitet werden konnte. In Form von Simulationen muss im nächsten Schritt noch die technische und wirtschaftliche Machbarkeit herausgestellt werden.

Unterdessen stehen der Aufbau und damit die praktische Validierung des Prüfstands noch aus. Es ist denkbar, dass im Zuge dessen noch nicht absehbare Herausforderungen entstehen, die

den Ergebnissen dieses Beitrags entgegenstehen. Daher ist es notwendig, im Nachgang den Gesamtentwurf des R&I-Fließschemas in ein Konstruktionsmodell umzuwandeln, auf dessen Basis die Beschaffung und der Aufbau des konzipierten Prüfstands erfolgen kann. Im Anschluss müssen zudem repräsentative Testdurchläufe der identifizierten Insitu-Untersuchungsmethoden vorgenommen und mit den Ergebnissen anderer Prüfstände verglichen werden. Nur so lässt sich nachhaltig validieren, ob das für diesen Beitrag definierte Ziel erreicht wurde und der Aufbau eines multifunktionalen Prüfstands technisch sowie ökonomisch sinnvoll und zweckmäßig sein kann.

L I T E R A T U R

- [1] United Nations: Paris Agreement. 12.12.2015
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Klimaschutz in Zahlen. Aktuelle Emissionstrends und Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland. Berlin, Heidelberg, 2022
- [3] Umweltbundesamt: Finale Daten für 2023. Klimaschädliche Emissionen sanken um zehn Prozent. 15.01.2025
- [4] Heimes, H.; Kampker, A.; Kehler, M. et al.: Strategien zur Erreichung der Emissionsziele im Nutzfahrzeugsektor, 2023
- [5] O'Hayre, R.; Cha, S.-W.; Colella, W. et al.: Fuel Cell Fundamentals. Wiley 2016
- [6] El-Shafie, M.: Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. Results in Engineering 20 (2023), S. 101426
- [7] Heimes, H. H.; Kampker, A.; Kehler, M. et al.: Brennstoffzellensysteme. In: Kampker, A.; Heimes, H. H. (Hrsg.): Elektromobilität. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2024, S. 153–164
- [8] Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklung technischer Produkte und Systeme. VDI 2221. November 2019
- [9] Tjarks, G.: PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen. Dissertation, Forschungszentrum Jülich, 2017
- [10] Zhang, J.; Zhang, H.; Wu, J. et al.: Techniques for PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis. In: Pem Fuel Cell Testing and Diagnosis. Elsevier 2013, S. 81–119
- [11] Wagner, N.: Einsatz der Impedanzspektroskopie in der Brennstoffzellenforschung. tm - Technisches Messen 78 (2011) 1, S. 30–35
- [12] WU, J.; YUAN, X.; WANG, H. et al.: Diagnostic tools in PEM fuel cell research: Part I Electrochemical techniques. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008) 6, S. 1735–1746
- [13] Kampker, A.; Heimes, H.; Kehler, M. et al.: Produktion von Elektrolyseursystemen, Frankfurt am Main, 2023
- [14] Oh, S.; Lim, D.; Han, Y. et al.: Development of Chemical and Mechanical Acceleration Stress Test Method for PEMFC Polymer Membranes. 2023
- [15] Mohrdieck, C.; Venturi, M.; Breitrück, K.: Mobile Anwendungen. In: Töpler, J.; Lehmann, J. (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017, S. 59–113
- [16] Lu, G.; Yan, Q.; Li, S. et al.: Design and performance study of a kilowatt-class PEMFC stack with metal fiber felts as flow fields. International Journal of Electrochemical Science 19 (2024) 11, S. 100839
- [17] Jaramillo Rodríguez, N. D.; Luxa, A.; Jürgensen, L.: Adaptation and Application of a Polarisation Curve Test Protocol for a Commercial Pem Electrolyser on Cell and Stack Level. Acta Mechanica et Automatica 17 (2023) 3, S. 395–404
- [18] Gul, E.; Baldinelli, G.; Farooqui, A. et al.: AEM-electrolyzer based hydrogen integrated renewable energy system optimisation model for distributed communities. Energy Conversion and Management 285 (2023), S. 117025
- [19] Holst, M.; Aschbrenner, S.; Smolinka, T. et al.: Cost forecast for low temperature electrolysis. Technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems. A cost analysis study on behalf of Clean Air Task Force, 2021
- [20] Bernat, R.; Milewski, J.; Dybinski, O. et al.: Review of AEM Electrolysis Research from the Perspective of Developing a Reliable Model. Energies 17 (2024) 20, S. 5030
- [21] Klell, M.; Eichlseder, H.; Trattner, A.: Erzeugung. In: Klell, M.; Eichlseder, H.; Trattner, A. (Hrsg.): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018, S. 71–108
- [22] Bender, B.; Feldhusen, J.; Krause, D. et al.: Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens. In: Bender, B.; Göhlich, D. (Hrsg.): Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020, S. 3–63
- [23] Gericke, K.; Bender, B.; Pahl, G. et al.: Der Produktentwicklungsprozess. In: Bender, B.; Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2021, S. 57–93
- [24] Europäische Kommission: Richtlinie 2014/34/EU. Richtlinie 2014/34/EU. 29.3.2014
- [25] Deutsches Institut für Normung: 22734. Wasserstoffherzeuger auf Grundlage der Elektrolyse von Wasser. Oktober 2024
- [26] Wartack, S.: Auswahl- und Bewertungsmethoden. In: Bender, B.; Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2021, S. 307–334
- [27] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2225. Konstruktionsmethodik. Beuth Verlag 1998

Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker MBA 
a.kampker@pem.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Heiner Hans Heimes
h.heimes@pem.rwth-aachen.de

Julius Hausmann, M.Sc. M.Sc.
j.hausmann@pem.rwth-aachen.de

Sebastian Biegler, M.Sc.
s.biegler@pem.rwth-aachen.de

Philipp Euchner, M.Sc. 
p.euchner@pem.rwth-aachen.de

Karem Hadla, M.Sc.
karem.hadla@rwth-aachen.de

Production Engineering of E-Mobility Components (PEM)
of RWTH Aachen University
Bohr 12, 52072 Aachen
www.pem.rwth-aachen.de/cms/~fecr/PEM/

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)