

# LCA- und LCC-Studien: Qualitative Analyse, Auswertungen und Stand der Technik am Ende des Lebenszyklus von Brennstoffzellenstacks mit Polyelektrolytmembranen

Luis A. S. de A. Prado\*, Selim Coskun, Katharina Bessler, Andreas Kötter  
Technology & Innovation / Altran Deutschland S.A.S. & Co. KG  
Hamburg, Deutschland  
\*luis.prado@capgemini.com

**Kurzfassung** – Die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft für Umwelt und Gesellschaft sowie die Minimierung der anthropogenen Umweltbelastungen erfordern eine nachhaltige technologische Entwicklung und die Steuerung des technischen Managements. In diesem Zusammenhang sind die Quantifizierung der Umweltauswirkungen und die Entwicklung von Konzepten zur Sicherstellung der Kreislauffähigkeit der Versorgungskette sehr wichtige Themen, die angegangen werden müssen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Frage, wie die Kosten einer solchen umweltfreundlichen Gesellschaft mit den bestehenden Bedürfnissen in Einklang gebracht werden können, während die Auswirkungen auf das Klima und die Umwelt so gering wie möglich gehalten werden. Die vorliegende Arbeit ist Teil des StBZuEL Projekts (Entwicklung und Test von elektrisch steuerbaren Membraneinheiten in Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (PEMFC) und Elektrolyseuren mit interner Methanisierung im Auslasskanal), welches in Zusammenarbeit mit der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU) erarbeitet wird. Dieses Dokument umfasst eine Einführung in die Ökobilanzierung (LCA) und die Lebenszykluskostenrechnung (LCC) sowie die Darstellung von End-of-Life-Konzepten für PEMFC-Stacks (im Allgemeinen) und schließlich das auf den PEMFC zugeschnittene Konzept dieses Projekts. Die Schritte und der Mehrwert der integrativen LCA als Kombination von LCA und LCC werden aufgezeigt und einige Beispiele aus anderen Forschungsprojekten vorgestellt. Die Wichtigkeit der End-of-Life-Betrachtung kann durch die hohen Produktions- und Energiekosten einiger Komponenten der PEMFC (z.B. der Polyelektrolyt-Membranen) begründet werden. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Rückgewinnung und des Recyclings von PEMFC-Komponenten liegt in der eingeschränkten Verfügbarkeit und dem hohen ökologischen Fußabdruck einiger Materialien (z.B. Edelmetalle, die für die Elektrodenkatalysatoren verwendet werden).

**Stichworte** – End-of-Life, Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft, Polyelektrolytmembran-Brennstoffzelle, Life-Cycle Assessment, Ökobilanz, Umweltauswirkungen

## NOMENKLATUR

AlCl <sub>3</sub>	Aluminiumchlorid
BZ	Brennstoffzelle
EGD	European Green Deal
EoL	End-of-Life
HCl	Salzsäure

HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
H <sub>2</sub> PtCl <sub>4</sub>	Tetrachloroplatinsäure
H <sub>2</sub> PtCl <sub>6</sub>	Hexachloroplatinsäure
LCA	Life-Cycle Assessment (deutsch: Ökobilanzierung)
iLCA	Integrative Life-Cycle Assessment
LCC	Life-Cycle Costing
MEA	Membrane-Elektrode-Assembly (deutsch: Membranelektrodeneinheit)
PEMFC	Polyelectrolyte Membrane Fuel-Cell (deutsch: Polyelektrolytmembran-Brennstoffzelle)
PGM	Platingruppenmetalle
StBZuEL	Projektakürzung für Entwicklung & Test von elektrisch steuerbaren Membraneinheiten in PEMFC
TRL	Technology Readiness Level
Vol.	Volumen

## I. EINLEITUNG

Klimawandel und Klimanotstand, Gesundheitsschädlichkeit von Luftverschmutzungen sind nur einige ernste Nachhaltigkeits-Herausforderungen, die sowohl von Regierungen als auch von der Industrie und wissenschaftlichen Organisationen angegangen werden müssen. Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz sind wichtige Faktoren zum Erreichen der Pariser Klimaziele [1] und der Sustainable Development Goals der United Nations. Alternative und weniger umweltbelastende Wege der Energieversorgung sind zu finden und die Energieverschwendung durch effizientere Nutzung der verfügbaren Ressourcen zu verringern. Um den Klimawandel und seine negativen Auswirkungen zu bewältigen, verabschiedeten 197 United Nations-Länder im Dezember 2015 das Pariser Abkommen, das darauf abzielt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energiesektor bis 2050 um etwa 95 % des vorindustriellen Niveaus (1850) zu senken, um das "2°C-Ziel" zu erreichen [1, 2]. Die Europäische Kommission hat eine Reihe von Vorschlägen

angenommen, um die Klima-, Energie-, Verkehrs- und Steuerpolitik der EU für die Verringerung der Netto-Treibhausgasemissionen fit zu machen. Gemäß dem European Green Deal (EDG) soll Europa bis 2050 die erste kohlenstoffneutrale Region des Planeten werden [2].

Als eine wesentliche Säule des European Green Deals spielen Brennstoffzellentechnologien weltweit eine ausschlaggebende Rolle, als eine wesentliche Option zur Dekarbonisierung der Energieerzeugung und -verbrauch (da klimaneutrale Outputs). Das Ziel des EGD-Programms ist eine innovative Strategie für alle Wirtschaftssektoren, die auf die Reduzierung der Kohlenstoffemissionen ausgerichtet ist. Für die Dekarbonisierung Europas müssen erneuerbare Energiequellen zur Hauptenergiequelle werden und gleichzeitig die Stabilität und Nachhaltigkeit des europäischen Energiesystems erhalten [3]. Deutschlandweit sind mehrere Vorbereitungen bereits getroffen mit dem Ziel, Brennstoffzellen (BZ) als saubere Energiequelle der Zukunft in der Realität umzusetzen. Beispielerweise sind im Bereich vom Transport, Wärme, Infrastruktur/ Lieferung/ Versorgung mehrere Meilensteine identifiziert worden, welche zur Etablierung dieser Technologie dienen. Aber es gibt noch viele Fragen, denen man sich widmen sollte:

- 1.) Wie wirkt die Brennstoffzellentechnologie auf die Umwelt?
- 2.) Wo gibt es Optimierungspotenziale in Bezug auf Kosten & Materialeinsätze?
- 3.) Stellt die BZ eine endgültige Lösung dar, oder wie können wir diese Technologie noch besser machen?
- 4.) Wo sind die Risiken, sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch betrachtet?

Um sich mit diesen Fragen auseinanderzusetzen, stellen wir hier vor, wie wir mittels des integrativen Life Cycle Assessments Brennstoffzellen „grüner“ und wirtschaftlich attraktiver machen wollen.

Die Unterstützung und Gewährleistung der Kreislaufwirtschaft spielen bei der nachhaltigen Entwicklung vieler Technologien eine wichtige Rolle. Viele Unternehmen wollen auch recycelte, wiederverwertete Rohstoffe und Produkte in ihre Lieferkette miteinbeziehen, um Kosten zu sparen und die negative Wirkung der Produktion auf die Umwelt zu verringern. Da Polyelektrolytmembran-Brennstoffzellenstapel derzeit eine Rolle bei der sauberen Energieerzeugung für viele Fahrzeuge spielen, ist es naheliegend, akzeptable End-of-Life(EoL)-Konzepte für brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge zu entwickeln. Die Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 regelt das Recycling von Kraftfahrzeugen innerhalb der EU. Diese Richtlinie enthält unter anderem Verbote für Stoffe wie Schwermetalle und Chrom (VI) und ist seit dem 1. Juli 2003 in Kraft. Ziel der Richtlinie ist es, die Wiederverwendungs- und Recyclingquote bis 2006 auf 85 Prozent des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts pro Jahr und bis 2015 auf 95 Prozent zu erhöhen. Außerdem sind die EU-Mitgliedstaaten verpflichtet, Rücknahmesysteme für Altfahrzeuge einzuführen [4].

Es besteht heutzutage nur ein begrenztes Interesse am Recycling oder der Wiederverwendung von Brennstoffzellen [5,6]. Zu den möglichen Gründen hierfür gehören: die enorme Komplexität und Architektur des Systems sowie die zu erwartende

Ungewissheit in Bezug auf den Recycling-/Verwertungsprozess. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die wichtigen Aspekten der End-of-Life einer BZ im Kapitel III zusammengefasst.

## II. INTEGRIERTE LIFE-CYCLE ANALYSEANSÄTZE

### A. Ansätze

Ziel dieser Analyse ist die kombinierte ökonomische und ökologische Bewertung eines vordefinierten Stoffes, Produktionsprozesses, einer Technologie auf Basis der Kombination des Nutzens der LCA [7] und der LCC [8] (siehe ABBILDUNG 1) sowie die zielgerichtete Steuerung des Lebenszykluserfolgs der angestrebten Technologieintegration auf Basis der erzielten Bewertungsergebnisse. Dieses Vorgehensmodell baut systematisch auf den konstitutiven Elementen von Entscheidungsmodellen auf, strukturiert den Analyse- und Bewertungsprozess, bildet einen Rahmen für die Systematisierung relevanter Methoden und Instrumente und ist für die ökonomische und ökologische Bewertung gleichermaßen gültig.

In diesem Zusammenhang können drei Bewertungen durchgeführt werden, um die wesentlichen Risiken für das System sowie die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen erstmals umfassend beurteilen zu können:

- 1.) In einer LCC-Bewertung (Life Cycle Costing) wird untersucht, ob die derzeitige Technologie einen positiven Business Case darstellt [8].
- 2.) In einer Lebenszyklusanalyse (LCA) können die Umweltauswirkungen (insbesondere der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und der Energiebedarf) der neuen Technologie bewertet werden.
- 3.) Bei der Risikobewertung werden alle wirtschaftlichen und ökologischen Risiken berücksichtigt mit dem Ziel, eine qualitative und quantitative Bewertung einer Risikovermeidung in Zukunft vorzunehmen. Daraufhin kann die Technologie optimiert werden, was zu geringeren Umweltauswirkungen und optimierten Kosten führt. Die Prozessschritte sind in ABBILDUNG 1 schematisch dargestellt.

Das LCC ist eine Methode, die darauf abzielt, alle ökonomischen Effekte und Trade-offs, die mit einem Objekt (Produkte, Prozesse, etc.) verbunden sind, über seinen Lebenszyklus systematisch zu erfassen, zu analysieren und zu prognostizieren [7]. Bisher wurden viele Ansätze für das LCC mit unterschiedlichen Schwerpunkten entwickelt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich des Detaillierungsgrades, der betrachteten Objekte, der Perspektive bzw. der verwendeten Berechnungsmethoden sowie der betrachteten Zielgrößen. Sie basieren meist auf dem Systemgedanken und konzentrieren sich primär auf die lebenszyklusbezogene Analyse und Steuerung der Systemelemente, ihrer Wechselwirkungen und Veränderungen im Zeitablauf sowie der damit verbundenen wirtschaftlichen Konsequenzen. Dementsprechend wird die LCC im Allgemeinen und im Rahmen dieses Projektes eingesetzt, um Entscheidungszusammenhänge zu verdeutlichen, die Priorisierung von Handlungsalternativen zu unterstützen und Entscheidungen über die Gestaltung von Systemen / Systemelementen zugunsten des zu erzielenden wirtschaftlichen Gesamterfolgs vorzubereiten.

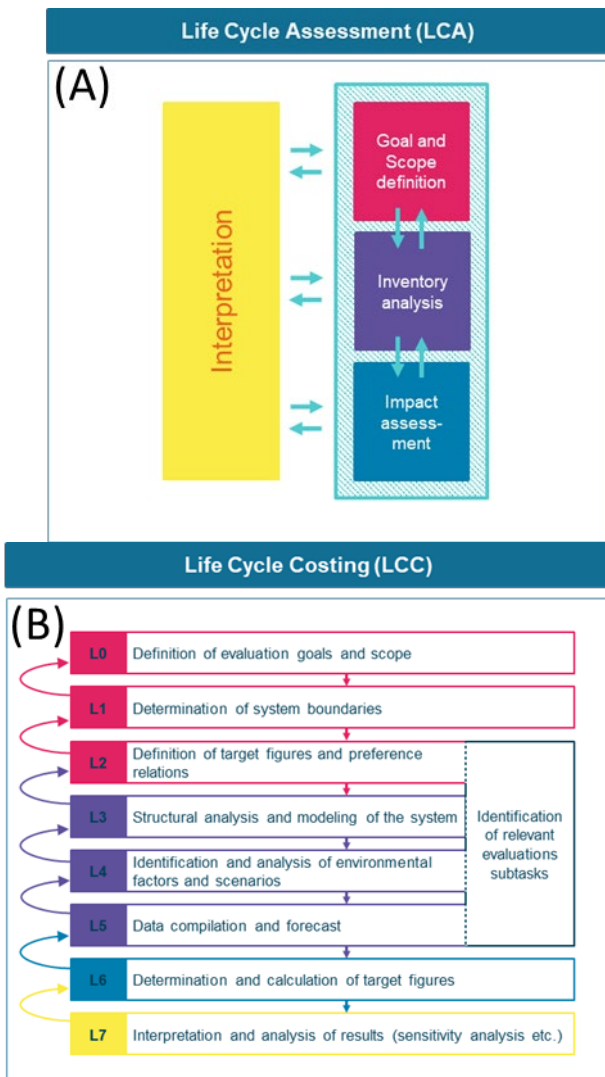


ABBILDUNG 1: VORGEHENSWEISE BEI DER LCA- (A) UND LCC-ANALYSE (B).

Die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) ist eine Methode nach DIN EN ISO 14040 zur Bewertung der Umweltauswirkungen in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines bestimmten Produkts oder Materials. Die Ökobilanzierungen werden bei uns sowohl für Produkte und Systeme angewendet. Es wird sogar die Bandbreite bedient zwischen den auf dem Markt befindlichen Produkten bis hin zu Produkten im Forschungs-/Entwicklungsbereich, wo es oftmals noch keine auf dem Markt verfügbaren Vergleichsprodukte gibt.

Ein LCA analysiert die Material- & Energie-Inputs und Outputs pro Lebenszyklusphase, die im Folgenden genauer beschrieben werden:

- 1.) **Materialgewinnung:** Materialien/ Rohstoffe werden bis zu dem Stadium der Landnutzung zurückverfolgt, wo die Rohstoffe extrahiert wurden. Extraktionsmethoden werden bewertet. Dazu dienen oft marktfähige Daten oder Öko-Datenbanken.
- 2.) **Herstellung:** Extrahierte Materialien werden in verwendbare Waren und Produkte weiterbe- und verarbeitet, evtl. umgewandelt und/oder oberflächenbehandelt. Alle diese Produktionsschritte werden berücksichtigt und bewertet, bspw. indem wir die CO<sub>2</sub>-

und sonstige Emissionen (z.B. NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Phosphate, usw.) in den jeweiligen Herstellungsprozessen berechnen.

- 3.) **Verpackung/Transport:** Es gilt der Transport vom Werksgelände bis zum Verbraucher/ Nutzer. Durch den Einsatz von Verpackungen wird der Produktverlust i. d. R. geringer. Transport aus der Ferne ist manchmal sinnvoller als lokal anzubauen, wenn kaltes Klima herrscht, z. B. Tomaten in Gewächshäusern brauchen Energie. Solche Vergleiche können in einem LCA-Modell simuliert und gegen den aktuellen Status Quo als Referenz verglichen werden.
- 4.) **Nutzungsphase:** Bei sog. aktiven Produkten muss während dieser Phase noch Maintenance, Erneuerungen, Austauscharbeiten o. ä. durchgeführt werden. Passive Produkte benötigen während des gesamten Lebenszyklus keinen zusätzlichen Input (wie bspw. ein Stuhl oder ein Buch), deshalb haben solche Produkte geringere Auswirkungen auf die Nutzungsphase und End-of-Life.
- 5.) **Das Produktdesign** hat meistens Auswirkung auf EoL- Strategien (wie bspw. Deponie/ Abfallbeseitigung): Hier gehen Produkte & Materialien aus dem System heraus und erzeugen negative externe Effekte. Recycling mit einem gewissen Grad der Wiederaufarbeitung, Wiederverwendung, Reparatur, Verbrennung (ersetzt die Produktion fossiler Brennstoffe, bedeutet aber, dass alle Materialien aus dem System verloren gehen) usw. werden an dieser Stelle berücksichtigt. Es ist zu empfehlen, dass alle End-of-Life-Überlegungen &-Probleme bereits in der Designphase eines Produktes angegangen werden.

Diese faktenbasierte Analyse kann die Umweltauswirkungen berücksichtigen, die mit der Gewinnung, der Herstellung, dem Vertrieb, der Nutzung, der Wartung und Reparatur und schließlich der Entsorgung eines Produkts verbunden sind. Eine Bewertung nur über Teile des Lebenszyklus ist auch möglich. In dem StBZuEL- Projekt wurde der Anwendungsbereich (Phase 1) so definiert, dass er die Rohstoffgewinnung, die Produktherstellung, die Nutzung und die Instandhaltung umfasst. Die von uns genutzte Umberto LCA -Software wird für eine tiefer gehende Bestandsaufnahme der Kohlenstoffemissionen und des Energieverbrauchs für alle Materialien und Prozesse verwendet.

Aufgrund verschiedener Überschneidungen zwischen LCC und LCA (z.B. systematisches Denken, Zeitbezug) haben sich insbesondere bei nachhaltigen Entwicklungen zunehmend Ansätze herausgebildet, die eine kombinierte Nutzung von LCC und LCA anstreben, um ökologische und ökonomische Ziele in Einklang zu bringen (eine Übersicht bestehender Ansätze zur Integration von LCC und LCA findet sich in [9]).

Die Forschung zu LCC, LCA und deren Kombination im Allgemeinen hat viele Ansätze und Erklärungen hervorgebracht, die wertvolle Ansatzpunkte für das vorliegende Projekt darstellen. Sie geben vor allem Aufschluss über die folgenden Punkte:

- 1.) **Methodische Gestaltungsvarianten** von LCC und LCA (z.B. spezifische Berechnungsmethoden und Zielwerte, Möglichkeiten der Systemabgrenzung)
- 2.) **Alternative Formen der Integration** von LCC und LCA

- 3.) Exemplarische Kostenstrukturen/-beziehungen, relevante Umweltauswirkungen, Einflussfaktoren
- 4.) Isolierte Referenzwerte zur Ergänzung und Validierung der im Projekt zu sammelnden Datenbasis (Sekundärdaten oder sog. „unit sets“ aus einer hinterlegten LCA-Datenbank)

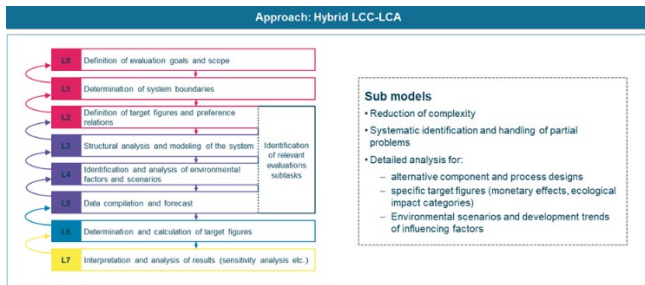


ABBILDUNG 2: INTEGRATIVER LCA.

Bei Capgemini Engineering haben wir LCA und integrative LCA (iLCA) für die Modellierung mehrerer Systeme wie z.B. thermoplastische Faserverbundwerkstoffe, duroplastische Faserverbundwerkstoffe und für den metallbasierte Leichtbau (neue Magnesium- oder Aluminiumlegierungen) bereits erfolgreich angewendet [10,11].

Im Rahmen des von der EU bis 2024 geförderten Projekts ecoTECH konnten wir die Vorteile der Verwendung chromatfreier Oberflächenschutzsysteme für den Flugzeugrumpf nachweisen (deutlich geringerer ökologischer Fußabdruck im Vergleich zum Stand der Technik) [11]. Der Vorteil, die Ökobilanz zeigte, dass die im Rahmen von ecoTECH entwickelte neue Technologie im Vergleich zum Stand der Technik einen 10-fach geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck sowie eine geringere Humantoxizität und Wasserverschmutzung aufweist. Darüber hinaus war auch der Energiebedarf deutlich geringer, was den Erwartungen der Technologiepartner entspricht. Diese Schlussfolgerungen sind von großer Bedeutung, da sowohl Wasser als auch Energie in zunehmendem Maße weniger verfügbar sind.

Im StBZuELProjekt – haben wir einen 2 kW- Brennstoffzellen-Stack auf der Basis von Nafion® Polyelektrolytmembranen mit Goldnetz und platinbasierten Elektroden mit der Umberto LCA+ Software angefangen zu modellieren. Die Ergebnisse (mit 65 % Konfidenzniveau) zeigten, dass Platin und Gold die Hotspots sind, die zu hohen Umweltbelastungen beitragen können. Diese vorläufigen Ergebnisse sind in TABELLE I zusammengefasst.

TABELLE I: KOMPONENTEN EINES 2 kW BZ-STACKS UND CO<sub>2</sub>-FUßABDRUCK.

Komponente	CO <sub>2</sub> Emissionen [kg/CO <sub>2</sub> -eq]
katalysatorbeschichtete Membran(*)	159,37
a) Nafion	18,67
b) Platin	109,38
Gasdiffusionsschicht	30,39
Goldgitter	21,71
Bipollarplatte	11,91

(\*) Die katalysatorbeschichtete Membran besteht aus Nafion®, Platin und den Katalysatorträger (Rußpartikeln)

Da Platin und Gold Schlüsselkomponenten der in diesem Projekt vorgeschlagenen Membranelektrodenheit (MEA) sind, wäre die einzige Möglichkeit zur Verringerung ihrer

Umweltauswirkungen die Gewährleistung der Kreislauffähigkeit der Gold- und Platinversorgung durch Rückgewinnung und Recycling. Diese Themen werden im nächsten Kapitel der vorliegenden Veröffentlichung qualitativ behandelt.

In wirtschaftlicher Hinsicht spielt Nafion® ebenfalls (neben Platin und Gold) eine Rolle, aufgrund der hohen Kosten von Nafion®. Der Ersatz von Nafion®, als Polyelektrolyt-Membran ist nicht Gegenstand dieses Projekts. Wie für Platin und Gold beschrieben, werden wir den wirtschaftlichen Aspekt von Nafion® durch die Entwicklung von EoL-Strategien zur Rückgewinnung und Wiederverwendung des in den an der HSU hergestellten MEA vorhandenen Nafion® abmildern.

### III. END-OF-LIFE VON POLYELEKTROLYTMEMBRAN-BRENNSTOFFZELLEN

#### A. Relevanz des End-of-Life eines Produktes

Als ein wichtiger Schritt in einer Kreislaufwirtschaft spielt das Ende des Lebenszyklus (kurz: EoL) eines Produkts/Bauteils/Fahrzeugs eine entscheidende Rolle. Es umfasst die zu ergreifenden Maßnahmen, sobald ein Produkt das Ende seiner (geplanten) Nutzungszeit erreicht hat. Der Mehrwert von End-of-Life-Maßnahmen ist vielfältig: Kosteneinsparungen für Hersteller und End User [12] (wenn es sich um hochpreisige oder seltene Rohstoffe handelt) bis hin zur Minderung von Umweltauswirkungen am Ende der gesamten Lieferkette (bei Vorprodukten mit bspw. einem hohen Energie- oder Vorproduktverbrauchs, Verwendung giftiger bzw. gefährlicher Rohstoffe).

#### B. Allgemeine Konzepte

Brennstoffzellen bestehen aus einer großen Anzahl von Komponenten und einem komplexen Ökosystem. Daher ist es wichtig, sich auf die wichtigsten Komponenten (wirtschaftlich betrachtet: Nafion® und das Platin) zu beschränken, um einen technologischen Mehrwert für die Brennstoffzellen zu erzielen. In ABBILDUNG 3 stellen wir ein allgemeines End-of-Life Konzept für einen installierten PEMFC-Stack dar.



ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHER ABLAUF DER ZERLEGUNG EINER POLYELEKTROLYTMEMBRAN- BZ UND EINES STACKS.

Entscheidend ist hierbei, die Wertschöpfung der Komponente, welche rückgewonnen werden soll. Ein praktisches Beispiel ist die Rückgewinnung von Gold und anderen Edelmetallen im Vergleich zum Bergbauprozess, welches im Rahmen des Forschungsprojektes NaGOLD erforscht wurde. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Recycling von Altgold, Recycling von Elektronikschrott und Bergbau beträgt jeweils: 20kg-eq CO<sub>2</sub>/kg; 1020 kg-eq CO<sub>2</sub>/kg und 16300 kg-eqCO<sub>2</sub>/kg [13].

Tatsächlich können Edelmetalle aus sekundären Quellen einen guten Meilenstein für die Pharmaindustrie darstellen, da sie im Vergleich zu primären Quellen einen um mehr als 85 %



geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweisen [14]. TABELLE II stellt die Wertschöpfung von mehreren Komponenten eines PEMFC Stacks auf verschiedenen Ebenen anhand der eingesetzten Materialien und Komplexitätsbewertung des Rückgewinnungsprozesses dar.

TABELLE II: WERTSCHÖPFUNG FÜR DIE RÜCKGEWINNUNG DER KOMPONENTEN EINES PEMFC-STACKS AUF DREI EBENEN: MEA, PERIPHERIE, STACKS.

Komponente	Material	Wertschöpfung für die Rückgewinnung	Komplexität des Rückgewinnungsprozesses
Polyelektrolytmembran	Nafion®	hoch	hoch
Gasdiffusionsschichten	Carbon	mittel	niedrig
Elektroden	Pt auf Träger	sehr hoch	medium
Bipolarplatten	Stahl oder Graphit	mittel	gering
Dichtungen	Elastomer	niedrig	gering
Befestigungselemente	Metall	mittel	gering
Endplatten	Metall	mittel	gering

### C. Trennung von Nafion® von den Katalysatoren

Im Rahmen des vom Fraunhofer koordinierten Projekts BRECYCLE werden verbrauchte BZ-Stacks erst manuell bzw. mechanisch zerlegt. Aus dem Stack werden die einzelnen Brennstoffzellen aussortiert. Danach erfolgen zwei Schritte:

- 1.) Die Trennung der MEA von den Bipolarplatten verläuft zuerst manuell. Eine Automatisierung dieser Schritte wird jedoch in Betracht gezogen.
- 2.) Die MEA wird in ihre Bestandteile getrennt: Gasdiffusionsschichten und Membran können relativ einfach manuell voneinander getrennt werden.

Es ist bereits zu erkennen, dass die abgetrennte Membran (Nafion®) auch Kohlenstoffpartikel und damit Platin enthalten kann, die sie schwarz einfärbt. Nach einem Austausch mit dem BRECYCLE-Projekt Koordinator erfuhren wir auch, dass die Alterung des Stacks eine Rolle bei der Stackzerlegung und der darauffolgenden Trennung der einzelnen BZ-Komponenten spielt. Aufgrund der Alterung neigen die Komponenten im Stack und in den einzelnen Brennstoffzellen dazu, stärker aneinander zu haften, was deren Trennung erheblich erschwert. Die erforderlichen Schritte sind zudem stark abhängig vom Lebenszyklus und der Nutzung des Brennstoffzellenstapels selbst sowie von der Größe und dem Herstellungsverfahren des jeweiligen Stacks. Diese Aspekte und Abhängigkeiten werden auch in dem BRECYCLE-Projekt adressiert [15].

Ein einfacher Prozess zur Wiederverwertung von Katalysatoren wurde auch veröffentlicht [16]. Ähnlich wie beim BRECYCLE-Projekt wurde zuerst die Membran von den Gasdiffusionsschichten manuell getrennt. Danach wurde die mit Katalysator imprägnierte Membran in kleine Stücke geschnitten, in Wasser/Isopropanol 50:50 vol.:vol. mittels Sonifizierung dispergiert und in einer sog. Reaktorautoklave bei 200°C für 24 Stunden gebracht. Dabei löste sich das Nafion® in der wässrigen Isopropanol-Lösung auf und somit wurden die Katalysatorpartikel (Pt auf Kohlenstoffträger) nach einer Vakuumfiltration wiederverwertet. Die Autoren behaupten

ebenfalls, dass diese Katalysatorpartikel wieder in einer Brennstoffzelle eingesetzt werden können. Nafion® wird durch Temperaturzufuhr als Pulver gelagert. Dieses Verfahren ist im Abb. 4 dargestellt.



ABBILDUNG 4: WIEDERVERWERTUNG VON NAFION® UND KATALYSATORPARTIKELN DURCH ERHITZEN IN WÄSSRIGEM ISOPROPANOL.

Das in Abb. 4 dargestellte Verfahren ähnelt auch manchen Patenten [17,18], welche die Wiederverwertung von Nafion® aus einer Brennstoffzelle mithilfe von wässrigen alkoholischen Lösungen beschreiben. Außerdem stellen die These auf sowohl diese Patentinhaber als auch der Projektkoordinator vom BRECYCLE-Projekt, dass die Katalysatorpartikel (wie in Abb. 4 hergestellt) Verunreinigungen durch Nafion®-Rückstände aufweisen. Wir erwarteten keine signifikante Beeinträchtigung der Leistung einer MEA durch die Verwendung dieser recycelten Katalysatorpartikel unter der Voraussetzung, dass sie in einer ähnlichen Art von Brennstoffzelle eingebaut werden kann. Es ist erforderlich, die Menge an restlichem Nafion® und Platin in diesen zurückgewonnenen Katalysatorpartikeln zu bestimmen und ein detailliertes Dokument (z. B. ein Materialdatenblatt) zu erstellen, aus dem diese Informationen eindeutig hervorgehen. Wir würden außerdem empfehlen, den Anwendungsbereich vorzugsweise auf die Herstellung der MEA zu beschränken.

### D. Zurückgewinnung von Katalysatoren aus den PEMFC-Elektroden

Da PEMFC gewöhnlich bei niedriger Temperatur im Betrieb genommen werden, ist es erforderlich, eine große Menge von Katalysatoren für die Abspaltung vom Wasserstoff und Reduktion vom Sauerstoff zu verwenden. Die Platingruppenmetalle, die so genannten PGMs, gehören zu den knappsten Rohstoffen weltweit und werden deshalb von der Europäischen Kommission als kritische Rohstoffe eingestuft. Zu dieser Gruppe zählen sechs Elemente: Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Palladium (Pd), Iridium (Ir), Osmium (Os) und Platin (Pt), wobei letzteres, das wirtschaftlich bedeutendste ist, da es von der Automobil- und Elektronik- bis zur Hightech-Industrie in großem Umfang verwendet wird [6,19-21].

Wenn absolut reine Katalysatorpartikel wiederhergestellt werden müssen, soll das Platin entweder nasschemisch (z. B. durch hydrometallurgisches Verfahren) oder thermisch (beispielsweise durch verschiedenes pyrometallurgisches Verfahren) von dem Katalysatorträger getrennt werden.

#### 1) Pyrometallurgie [19,20,21]

Die Pyrometallurgie ist eine weitverbreitete Methode zur Rückgewinnung von Pt aus verbrauchten Katalysatoren. Bei diesem Verfahren wird der verbrauchte Katalysator durch thermische Behandlung physikalisch und chemisch umgewandelt. Es gibt drei wichtige pyrometallurgische Verfahren: Chlorierung, Schmelzen und Sinterverfahren. Im Gegensatz

zur Hydrometallurgie hat das pyrometallurgische Verfahren den Vorteil, dass es nicht von der ursprünglichen Form der Pt-Quelle abhängig ist und schnell zu guten Ergebnissen führt. Allerdings verbraucht die Pyrometallurgie aufgrund der hohen Temperaturen, die in der Regel über 1000 °C liegen, eine große Menge an Energie. Darüber hinaus entstehen bei dem Prozess große Mengen an gefährlichen Gasen, die weiter behandelt oder aufgefangen werden müssen. Es ist zu erwarten, dass die Pyrometallurgie aufgrund der entstehenden giftigen Gase (die entsprechend aufgefangen und entsorgt werden müssen) und des hohen Energieverbrauchs eine höhere Umweltbelastung aufweist. Aufgrund neuer Umweltvorschriften und -anforderungen schließen daher andere Verfahren wie die Hydrometallurgie oder die Biolaugung (engl. Bio-leaching) die Lücke zur industriellen Anwendung [22].

## 2) Hydrometallurgie [23,24]

Das hydrometallurgische Pt-Recycling basiert auf der Auslaugung des Metalls mit saurer/basischer Lösung anhand eines Oxidationsmittels. Um eine endgültige Rückgewinnung von Platin entweder in metallischer oder als anorganische Salze bewerkstelligen zu können, sind weitere Trennung-/Konzentrationsverfahren erforderlich. Im Gegensatz zu den pyrometallurgischen Verfahren sind wesentlich niedrigere Temperaturen erforderlich, sie können in kleinem oder größerem Maßstab eingesetzt werden und erzeugen weniger problematische und giftige Abgase. Andererseits ist je nach dem zu recycelnden Material häufig eine chemische oder mechanische Vorbehandlung erforderlich, um hitzebeständige Pt-Oxide, welche sich bei der Verwendung als Katalysator gebildet haben, zu reduzieren, restliche organische Verbindungen (organische Verunreinigungen) zu beseitigen oder die Partikelgröße der Ausgangsprobe zu senken.

Obwohl die Hydrometallurgie weniger Energieverbrauch und geringe Kosten verursacht, ist diese Technologie nicht so ausgereift. Pyrometallurgische Verfahren sind auf höchsten TRL (meistens 9) und sind deshalb schon längst in der Industrie für die Wiederverwertung von Platin und anderen Edelmetalle eingesetzt. Ein spezieller Markt hat sich weltweit darauf spezialisiert, da trotz der hohen Kosten der zunehmende Bedarf nach recyceltem Platin stets steigt.

In der TABELLE III sind die relevantesten Verfahren zur Wiederverwertung von Katalysatoren aus der Automobilindustrie gegenübergestellt, mit einer Einschätzung des Energieverbrauchs und Abfallentsorgung pro Verfahren. Die Rückgewinnungsraten aller Verfahren liegen sehr hoch zwischen 91 % und 99,95 %.

TABELLE III: GEGENÜBERSTELLUNG VERSCHIEDENER PT-RÜCKGEWINNUNGSTECHNOLOGIEN IN BEZUG AUF DIE PT-RÜCKGEWINNUNGSRATE (%), TRL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL VON 1-9), ENERGIEVERBRAUCH UND ABFALLERZEUGUNG [20].

Verfahren	Technologie	Rückgewinnungsrate (%)	TRL	Energieverbrauch	Erzeugte Abfallmenge
Herkömmlich*	P	99,95	9	●●●	●●●
Kupferverhüttung	P	99	9	●●●	●●●
Cyanid-Laugung	H	85	5	●●	●●●
Vorbehandlung mit Zinkdampf**	H	>95	3	●●	●●
Mikrowellenunterstützte Laugung	H	91	4	●	●●
Natriumhydroxid-Masting**	H	97,5	5	●●	●●
Chlorgestützte Laugung	P+H	95,9	4	●●	●●
Biogene Zyanidlaugung	Bioleaching	92,1	4	●	●

P: Pyrometallurgie; H: Hydrometallurgie; P+H: Pyro-hydrometallurgie; \*herkömmlich industrielles Verfahren zur Wiederverwertung von Platin; \*\*für Automobilkatalysatoren getestet); Energieverbrauch (●●●, ●● und ●: hoch, mäßig bzw. niedrig) und Abfallerzeugung (●●●: hohes Volumen und Toxizität, ●●: mäßiges Volumen und Toxizität und ●: geringes oder vernachlässigbares Abfallaufkommen).

## E. End-of-Life Konzepte für die MEA im Rahmen von StBZuEL Projekt

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 des StBZuEL-Projekts sind mehrere Prototypen, bestehend aus mehreren Polyelektrolytmembranen (Nafion®), Elektroden und ein Goldgitter, aufgebaut und getestet worden. Eine schematische Darstellung des Aufbaus befindet sich in Abb. 5

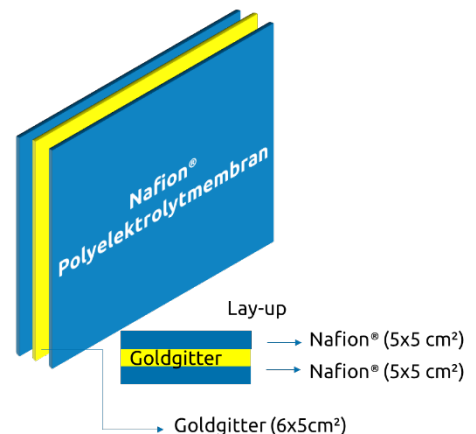


ABBILDUNG 5: VISUALISIERUNG DER KONSTRUKTIONSDetails, DIE FÜR DIE STEUERbaren MEMBRANen (Aus GoldGittern und PEM) IN BETRACHT KOMMEN.

In Anbetracht der Informationen, die wir aus der Literatur und anderen Forschungsprojekten gewonnen haben, konzentrieren wir uns auf die Wiederherstellung der Komponenten der MEA. Eine Besonderheit dieser Konstruktion ist der Einbau eines Goldnetzes zwischen zwei Nafion®-Membranen, dass

die Kontrollierbarkeit der Brennstoffzelle und ihre längerfristige Haltbarkeit gewährleisten soll.

Die Trennung von MEA, Bipolarplatte und Gasdiffusionsschicht kann anhand der in Abb. 4 und Abb. 6 zusammengefassten Prozesse erfolgen. Wir halten es für schwierig, das Goldgitter ohne Beschädigung von der MEA zu trennen.

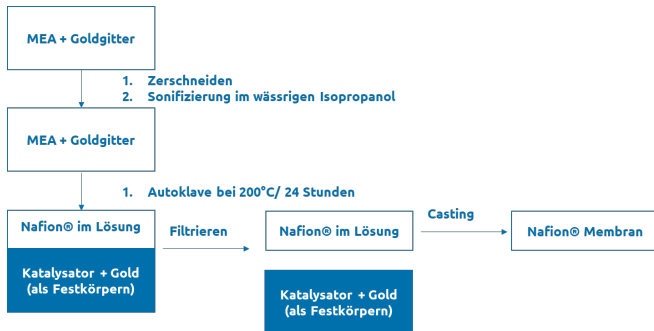


ABBILDUNG 6: WIEDERVERWERTUNG VON NAFION® UND ABTRENNUNG VON KATALYSATORPARTIKELN UND GOLD VON DER MEA.

Im Rahmen des in Abb. 6 dargestellt End-of-Life Konzeptes lässt sich leicht die Membran wiederherstellen. Die Edelmetalle sollen sich im Präzipitat als Festkörper bilden. Es stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung:

- 1.) Szenario (A): Rein wirtschaftlich betrachtet wäre es einfach, den Träger mittels Pyrometallurgie von dem Katalysator und von den Goldpartikeln zu trennen. Daraus ergäbe sich eine Pt-Gold Legierung, die für Goldschmiede von Bedeutung wäre.
- 2.) Szenario (B): Das Platin könnte anhand von elektrochemischen Verfahren in leicht saurigen Lösungen (mithilfe von Salpetersäure und Aluminiumchlorid) als  $H_2PtCl_6$  oder  $H_2PtCl_4$  vom Gold und Katalysatorträger getrennt werden [25]. Nach einigen Filtrations- und Reinigungsschritten könnten die wasserlöslichen Platin-Komplexe durch anschließende Präzipitation mit geeigneten Kationen isoliert und die Salze zur Herstellung neuer Katalysatoren verwendet werden (höchstwahrscheinlich für Brennstoffzellenanwendungen, da die Nachfrage nach zurückgewonnenem Platin auf diesem Markt steigt). Andernfalls könnten diese Salze zu metallischem Platin reduziert werden. Dieser Prozess ist in Abb. 7 (Szenario (B)) zu sehen. Das Gold könnte entweder durch Pyrolyse oder nasschemisch (bspw. mittels Hydrometallurgie) von dem restlichen Katalysatorträger getrennt werden (siehe Szenario (B), Variante A und B)).

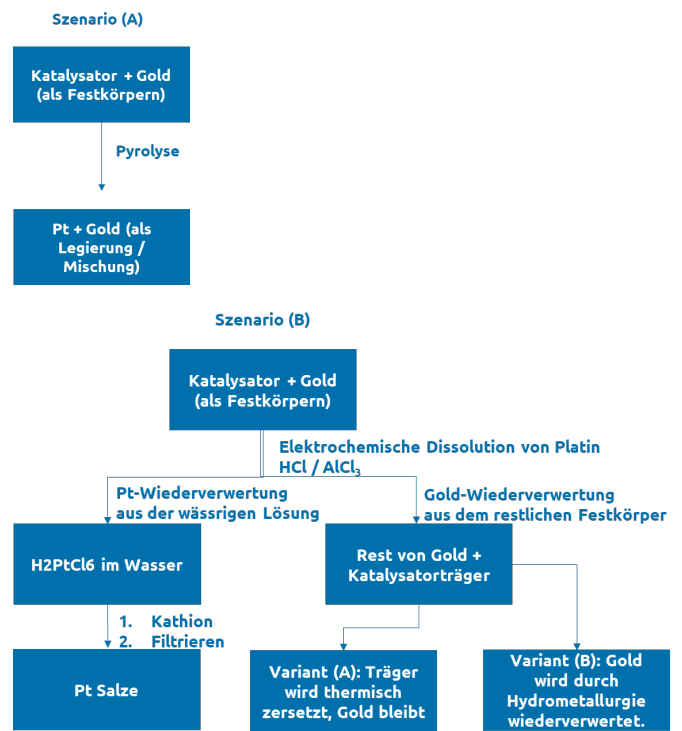


ABBILDUNG 7: WIEDERVERWERTUNG VON EDELMETALLEN AUS DER MEA UND GOLDGITTER.

#### IV. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Platin und Gold sowohl als ökonomische und ökologische Hot-Spots für eine nachhaltige Entwicklung von Brennstoffzellen identifiziert. Für eine Minderung derer negativen Umweltauswirkungen sollen diese beiden Werkstoffe möglichst wiederverwertet werden. Für die im Rahmen des StBZuEL-Projekts entwickelten Membran-Elektroden-Einheiten haben wir ein maßgeschneidertes End-of-Life Konzept vorgestellt. Dieses Konzept wurde vorgeschlagen, um die wertvollsten Materialien und Komponenten zurückzugewinnen und gleichzeitig die Umweltauswirkungen so gering wie möglich zu halten. Darüber hinaus haben wir die integrative Ökobilanz als einen weiteren Mehrwert für die Quantifizierung und Abschwächung der Umweltauswirkungen und die Optimierung der Kosten bei jeder weiteren technologischen Entwicklung vorgestellt.

#### V. DANKSAGUNG

Das Projekt Entwicklung und Test von elektrisch steuerbaren Membraneinheiten in Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen und Elektrolyseuren mit interner Methanisierung im Auslasskanal (kurz: StBZuEL) wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03ET6133A im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms gefördert.

## LITERATUR

- [1] Paris Agreement [Online]. Verfügbar: [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_en) [letzter Zugriff am 19 September 2022].
- [2] Delivering the European Green Deal [Online]. Verfügbar: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en) [letzter Zugriff am 19 September 2022].
- [3] Policy-induced energy technological innovation and finance for low-carbon economic growth [Online]. Verfügbar: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ENER%20Macro-Energy\\_Innovation\\_D2%20Final%20%28Ares%20registered%29.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ENER%20Macro-Energy_Innovation_D2%20Final%20%28Ares%20registered%29.pdf) [letzter Zugriff am 21 September 2022].
- [4] Richtlinie 2005/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates von 18. September über Altfahrzeuge [Online]. Verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0053-20180704> [letzter Zugriff am 19 September 2022].
- [5] A. Marchisio Prosdocimo, „Best4Hy Closing the Loop. The Recycling of End-of-Life Fuel Cells“, Hydrogen Standard, Bd. 1, Beitrag 8, S. 26-28, August 2021. [Online]. Verfügbar: <https://view.publitas.com/thehydrogenstandard/hydrogen-standard-issue-final/page/26>. [letzter Zugriff am 21 September 2021].
- [6] R. Stropnik, A. Lotrič, A. Bernad Montenegro, M. Sekavčnik, M. Mori, „Critical materials in PEMFC systems and a LCA analysis for the potential reduction of environmental impacts with EoL strategies“, Energy Science & Engineering, Bd. 7, Heft 6, S. 2519-2538, 2019.
- [7] J.M. Rödiger, L.L. Kjaer und A. Pagoropoulos. Life-Cycle Assessment Theory and Practice, Cham, Switzerland: Springer International Publishing (M.Z. Hausschild; R.K. Rosenbaum; S.I. Olsen (Eds), 2018.
- [8] R.J. Brown und R.R. Yanuck. Life Cycle Costing : A Practical Guide for Energy Managers, Atlanta, Georgia : The Fairmont Press Inc, 1980.
- [9] L.Meynerts, U. Götze, und S. Claus. „Integrative Bewertung der lebenszyklusbezogenen ökonomischen und ökologischen Vorteilhaftigkeit von Hybridschienenfahrzeugen“, uwf UmweltWirtschaftsForum Bd. 24, Heft 1, S. 75–81, 2016.
- [10] A. Salles, C. Lätsch, T. Das, L. Prado, S. Coskun, S. Pfeuffer und A. Geß, „New Life Cycle Inventories from Clean Sky Airframe technologies“. LCM Conference 2021, Stuttgart, Deutschland, 01-08. Sep., 2021.
- [11] L.A.S.A. Prado, T.S.G. Das, S. Coskun, und A. Kötter, „Development of innovative and eco-friendly airframe technologies to improve aircraft life cycle environmental footprint – life cycle assessment activities at ecotech / cleansky 2“. ICAS Conference 2002, Stockholm Schweden, 04-08.Sep., 2022.
- [12] Ballard®: „Technical Note - Recycling of Fuel Cells / End-of-Life Management“ [Online]. Verfügbar: [https://www.ballard.com/docs/default-source/web-pdfs/recycling-technical-note\\_final.pdf](https://www.ballard.com/docs/default-source/web-pdfs/recycling-technical-note_final.pdf) [letzter Zugriff am: 23 September 2022]
- [13] B. Fritz, „Der Klimafußabdruck von Gold – Forschungsergebnisse zum Gold-Recycling in Deutschland“ [Online]. Verfügbar: [https://hs-pforzheim.de/aktuelles/news/details/der\\_klimafussabdruck\\_von\\_Gold](https://hs-pforzheim.de/aktuelles/news/details/der_klimafussabdruck_von_Gold) [letzter Zugriff am 19 September 2022].
- [14] R. Kolvenbach, „A Strategic Advantage and Economic Hedge - Precious Metals from Secondary Sources are a Smart Way to Minimize Risk and Uncertainty“, CHEManager International | Bd. 1, S. 24-25, 2021 [Online]. Available: <https://www.chemanager-online.com/en/restricted-files/216291> [letzter Zugriff am 21 September 2022].
- [15] S. Grieger, „BReCycle Kreislaufwirtschaftskonzept für Brennstoffzellen“, 20. Brennstoffzellenforum Hessen, Frankfurt am Main, Deutschland, 28 Okt., 2021.
- [16] A. Barthi, und Rajalakshmi Natarajan, „Recovery of expensive Pt/C catalysts from the end-of-life membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells“, RSC Advances, Band 10, S. 35057-35061, 2020.
- [17] S. Grot, und Walter Grot. „Recycling of Perfluorosulfonic acid Membranes“ U.S. Patent 089,547, 24 März, 2015..
- [18] L. Shore, „Process for Recycling Components of a PEM Fuel Cell Membrane Electrode Assembly“ Europäisches Patent 2,036,153 B1, 19 April, 2017.
- [19] S. K. Padamata, A. S. Yasinskiy, P. V. Polyakov, E. A. Pavlov, und D. Y Varyukhin, „Recovery of Noble Metals from Spent Catalysts: A Review“, Metallurgical and Materials Transactions B, Bd. 51, Heft 5, S. 2413–2435, 2020.
- [20] R. Granados-Fernández, M. A. Montiel, S. Díaz-Abad, M. A. Rodrigo, und J. Lobato, „Platinum Recovery Techniques for a Circular Economy“, Catalysis, Bd. 11, Heft 8, S. 937, 2021.
- [21] C. Liu, S. Sun, X. Zhu, und G.Tu, „Metals smelting-collection method for recycling of platinum group metals from waste catalysts: A mini review“, Waste Management & Research, Bd. 39, Heft 1, S. 45-52, 2021.
- [22] M. K. Jha, Jae-chun Lee, M. Kim, J. Jeong, B. Kim, und V. Kumar, „Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review“, Hydrometallurgy, Bd. 133, S. 23-32, 2013.
- [23] A. P. Paiva, F. V. Piedras, P. G.Rodrigues, und C. A.Nogueira, „Hydrometallurgical recovery of platinum-group metals from spent auto-catalysts – Focus on leaching and solvent extraction“, Separation and Purification Technology, Bd. 286, S. 120474, 2022.
- [24] D. Shin, J. Park, J. Jeong, und B. Kim, „A biological cyanide production and accumulation system and the recovery of platinum-group metals from spent automotive catalysts by biogenic cyanide“, Hydrometallurgy, Bd. 158, S. 10-18, 2015.
- [25] E. Medupe, „An electrochemical investigation of the dissolution of platinum employing  $\text{AlCl}_3/\text{HNO}_3$ “, (Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree Magister Scientiae in Chemistry at the Potchefstroom Campus of the North-West University), 2014.