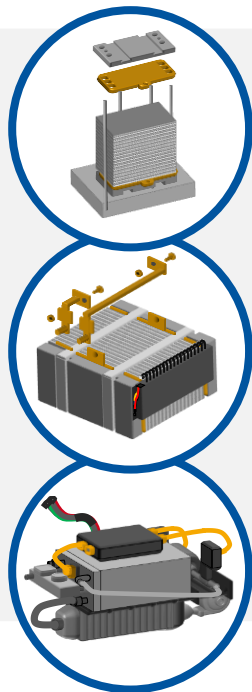
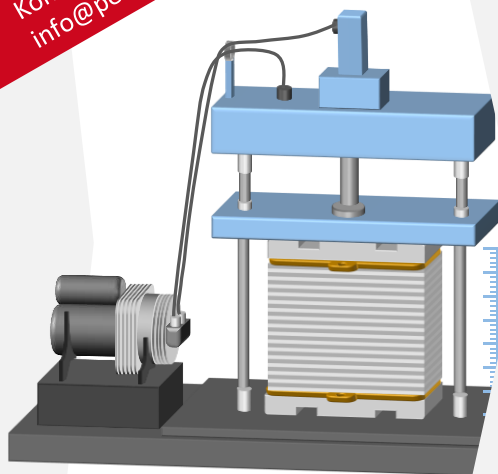


Auch als kostenlose
Broschüre erhältlich
Kontaktieren Sie uns unter:
info@pem.rwth-aachen.de



PRODUKTION VON BRENNSTOFFZELLEN- SYSTEMEN

Neue Auflage



RWTHAACHEN
UNIVERSITY



Brennstoffzellen



Der Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen beschäftigt sich mit der Produktionstechnik der Brennstoffzelle. Die Aktivitäten erstrecken sich innerhalb des Maschinenbausektors von der kosteneffizienten Produktion der Komponenten des wasserstoffbetriebenen Antriebsstrangs über innovative Mobilitätslösungen bis hin zur gesamten Emissionsreduktion. Durch nationale und internationale Projekte in Unternehmen verschiedener Wertschöpfungsstufen sowie Beteiligungen in zahlreichen Forschungsprojekten bietet PEM weitreichende Expertise.



PEM der RWTH Aachen

Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“
Bohr 12
52072 Aachen

www.pem.rwth-aachen.de

Die VDMA Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellen unterstützt Hersteller von Brennstoffzellenkomponenten und -systemen in Deutschland beim Ausbau des Industrienetzwerks. Sie bietet derzeit über 80 führenden national sowie international aktiven Herstellern und Zulieferern eine Kommunikationsplattform zur Vernetzung und gemeinsamen Interessenvertretung. In Projektgruppen werden technische Lösungen zur Optimierung und Kostenreduktion von Brennstoffzellensystemen und -komponenten sowie zum Aufbau der Serienfertigung erarbeitet.



VDMA

Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellen
Friedrichstraße 95
10117 Berlin

www.vdma.org/brennstoffzellen

Autoren

PEM der RWTH Aachen



Dr.-Ing. Heiner Heimes
Geschäftsführender Oberingenieur
h.heimes@pem.rwth-aachen.de



Mario Kehrer, M. Sc.
Oberingenieur
m.kehrer@pem.rwth-aachen.de



Sebastian Hagedorn, M. Sc.
Gruppenleiter Fuel Cell
s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de



Sebastian Biegler, M. Sc.
Wiss. Mitarbeiter Fuel Cell
s.biegler@pem.rwth-aachen.de

VDMA



Gerd Krieger
Geschäftsführer der Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellen
Gerd.Krieger@vdma.org



Jana Müller
Projektmanagerin Brennstoffzellen
Jana.Mueller@vdma.org



Haben Sie Fragen?

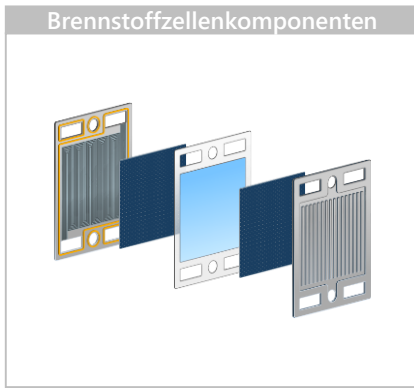
Sprechen Sie uns an!



Aachen, Oktober 2022
PEM der RWTH Aachen und
VDMA AG Brennstoffzellen
2. Auflage
ISBN: 978-3-947920-13-6

Übersicht

einer PEM-Brennstoffzelle



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

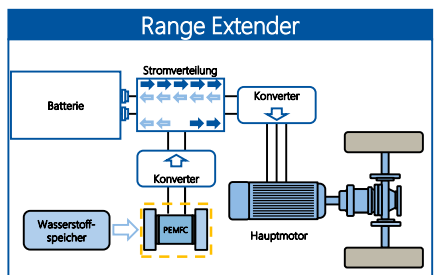
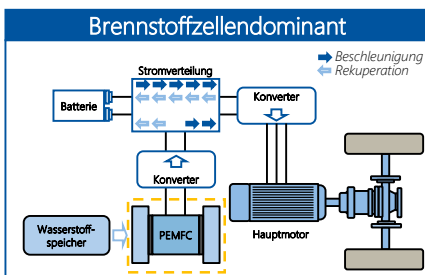
In dieser Broschüre wird der Produktionsprozess eines Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellensystems (PEM) schematisch anhand der einzelnen Produktionsschritte zur Stack- und Systemfertigung inklusive Assemblierung dargestellt.

Die einzelnen PEM-Brennstoffzellen werden in einem **Brennstoffzellenstack** in Serie verschaltet. Der Stack sowie weitere elektrische, mechanische und thermische Komponenten werden zu einem **Brennstoffzellensystem** assembliert.

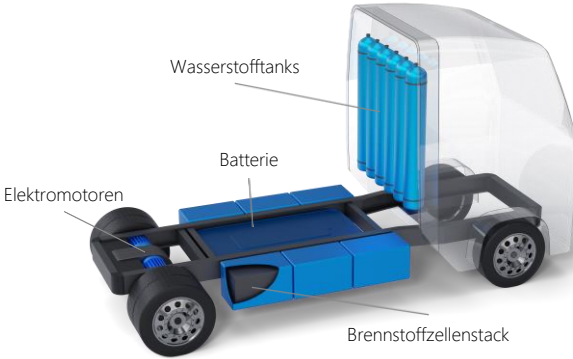
Je nach Systemdesign variiert die Anzahl und Dimensionierung verschalteter Brennstoffzellen innerhalb eines Stacks und damit die zugehörige Ausgestaltung der Leistungsdaten der Peripheriekomponenten. Durch die Vielzahl unterschiedlicher Produkt- und Prozessvarianten sind übergreifende Angaben zu den Prozessparametern nur bedingt möglich. In einer gemeinsamen Diskussion mit dem Lehrstuhl PEM oder der AG Brennstoffzellen lassen sie sich näher spezifizieren.

Fahrzeuganwendungen der PEM-Brennstoffzelle

In der automobilen Anwendung existieren – basierend auf der PEM-Brennstoffzelle – zwei unterschiedliche Antriebsstrategien. Handelt es sich im Fahrzeug um einen durch die Brennstoffzelle dominierten Antrieb, wird der Fahrleistungsbedarf primär durch die Brennstoffzelle gedeckt. Zur Bedienung kurzfristiger Leistungsspitzen ist eine zusätzliche Lithium-Ionen-Batterie verbaut. Alternativ kann die Brennstoffzelle als sogenannter Range Extender verwendet werden. Dabei fungiert die Brennstoffzelle als „Onboard-Ladesystem“ für die Lithium-Ionen-Batterie des Fahrzeugs, die den Hauptenergeträger darstellt.



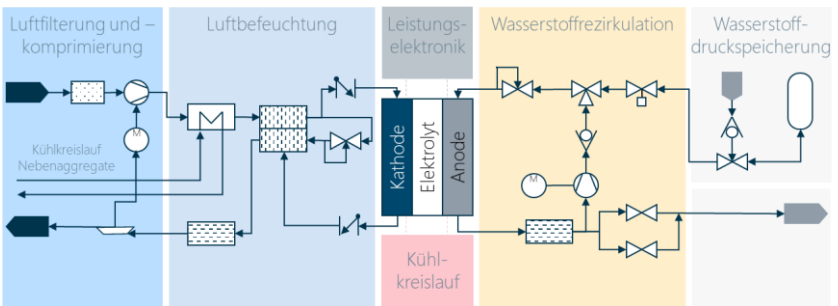
Fahrzeugarchitektur eines PEM-Brennstoffzellensystems



Die Architektur des Antriebsstrangs eines Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) umfasst die Hauptkomponenten Brennstoffzellensystem, Wasserstofftanks, Lithium-Ionen-Batterie, Elektromotor und Leistungselektronik. Während Batterie, Elektromotor und Leistungselektronik ebenfalls Bestandteil eines batteriebetriebenen Fahrzeugs sind, stellen Brennstoffzellensystem und Wasserstofftank die Alleinstellungsmerkmale eines FCEV dar. Während der Wasserstofftank meist aus kohlenstofffaserumwickeltem Kunststoff besteht, setzt sich das Brennstoffzellensystem aus Luft-, Wasserstoff- und Kühlkreislauf zusammen: Im **Luftkreislauf** wird Umgebungsluft zunächst verdichtet und anschließend befeuchtet, bevor sie der Kathodenseite der Brennstoffzelle zugeführt wird. Die Zuführung des Wasserstoffs auf Anodenseite erfolgt im Rahmen des **Wasserstoffkreislaufs** durch ein Wasserstoffgebläse, das mittels Zuführung von Frischwasserstoff die Leistungsregelung des Gesamtsystems übernimmt. Der **Kühlkreislauf** sorgt für die Abführung der Reaktionswärme und stellt darüber hinaus die Kaltstartfähigkeit bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes sicher.

Systemarchitektur

Die Systemarchitektur eines Brennstoffzellensystems samt funktionaler Peripheriekomponenten ist folgendermaßen aufgebaut:



Balance-of-Plant-Komponenten

als Teil der Systemarchitektur

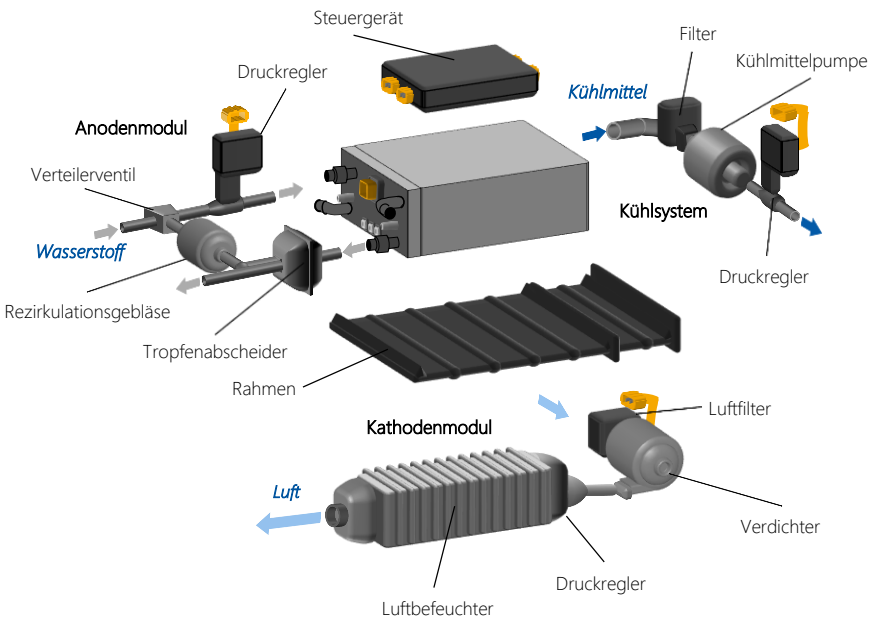
Die Komponenten eines Brennstoffzellensystems werden ganzheitlich als Balance-of-Plant (BoP) bezeichnet. Die einzelnen Komponenten können in die drei Subsysteme Anoden- und Kathodenmodul sowie Kühlsystem gegliedert werden. Sie stellen die Funktionalität der bereits benannten Medienkreisläufe sicher und sind – im Gegensatz zur Wasserstoffspeicherung – nachstehend exemplarisch abgebildet.

Anodenmodul:

- Geschlossener Wasserstoffkreislauf samt Druck-Temperatur-Regelung
- Anodenmodul als Dosiereinheit zur Versorgung der Anode und Wasserstoffrezirkulation
- Gewährleistung des Betriebsdrucks und der Wasserstoffreinheit

Kühlsystem:

- Temperierung der Brennstoffzelle durch deionisiertes Kühlmittel
- Besteht aus Kühlmittelpumpe, Kühlmittelfiltern und Druckregler
- Kühlleistungsbedarf des Stacks bis zu 150 % der Stacknennleistung



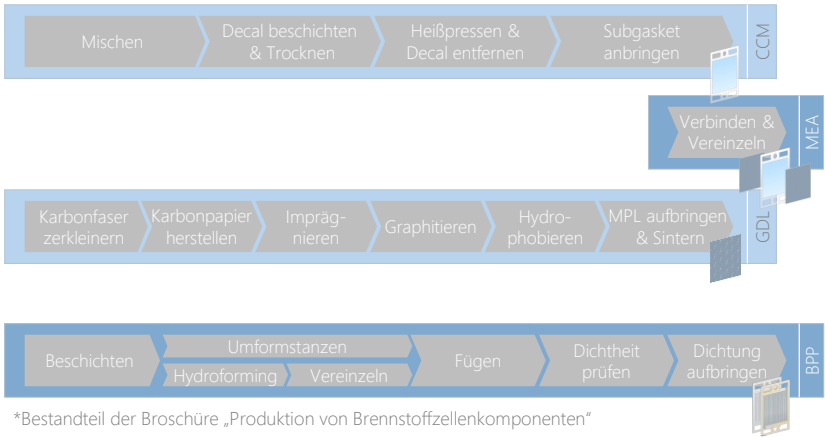
Kathodenmodul:

- Versorgung und Aufbereitung des Reaktanden Sauerstoff mittels Komponenten Luftfilter, elektrisch betriebenem Verdichter und Luftbefeuchter
- Ölfreier Turbolader als Luftverdichter, angetrieben durch Reaktionsabluft, zur Effizienzsteigerung
- Luftbefeuchter aus bündel- oder stapelförmigen Trennmembranen

Produktionsprozess eines PEM-Brennstoffzellensystems

- Die Prozesskette für die Serienfertigung von PEM-Brennstoffzellensystemen unterscheidet sich je nach Anwendung und jährlich produzierter Stückzahl. Einheitliche Standards sind aufgrund des **Manufakturcharakters** in der Brennstoffzellenfertigung aktuell noch nicht vorhanden.
- Die Herstellung eines PEM-Brennstoffzellensystems kann in die drei übergeordneten Schritte **Komponentenfertigung**, **Stackfertigung** und **Systemfertigung** gegliedert werden.
- Im Rahmen dieser Broschüre werden die Prozessschritte vorgestellt, die den **aktuellen Stand der Technik** in der Fertigung von PEM-Brennstoffzellenstacks und -systemen ausmachen.
- Die Fertigung der einzelnen Brennstoffzellenkomponenten wird im Rahmen der zweiten Broschüre „Produktion von Brennstoffzellenkomponenten“ näher erläutert.

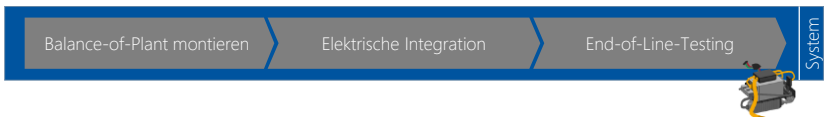
Komponentenfertigung*:



Stackfertigung:



Systemfertigung:



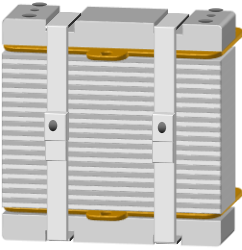
Prozessschritt
 Zwischenprodukt
 Endprodukt

Übersicht

PEM-Brennstoffzellenstack und -system



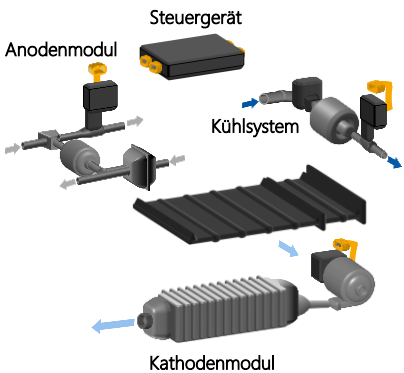
Brennstoffzellenstack



- Der Brennstoffzellenstack besteht aus einer beliebigen Anzahl einzelner, in Serie verschalteter Brennstoffzellen und ermöglicht somit skalierbare Leistungsbereiche.
- Ein funktionsfähiger Stack besteht neben den Einzelzellen aus Endplatten, Stromkollektoren, Verteilerplatte und Überwachungseinheit.
- In der Praxis existieren mehrere Möglichkeiten, Brennstoffzellenstacks zu verspannen. Beispielsweise werden Spannbänder (siehe oben) oder Zugstäbe (siehe unten) verwendet.



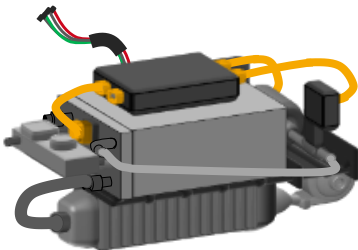
BoP-Komponenten



- Die Balance-of-Plant (BoP) besteht aus Luftkreislauf (Kathodenmodul), Wasserstoffkreislauf (Anodenmodul) sowie Hochtemperatur- und Nieder-temperatur-Kühlsystem.
- Im Luftkreislauf wird die Umgebungsluft gefiltert, komprimiert und der Brennstoffzelle in dosierter Form zugeführt.
- Im Wasserstoffkreislauf erfolgt die Druckminderung, die dosierte Zuführung und die Rezirkulation des im Tank gespeicherten Wasserstoffs.



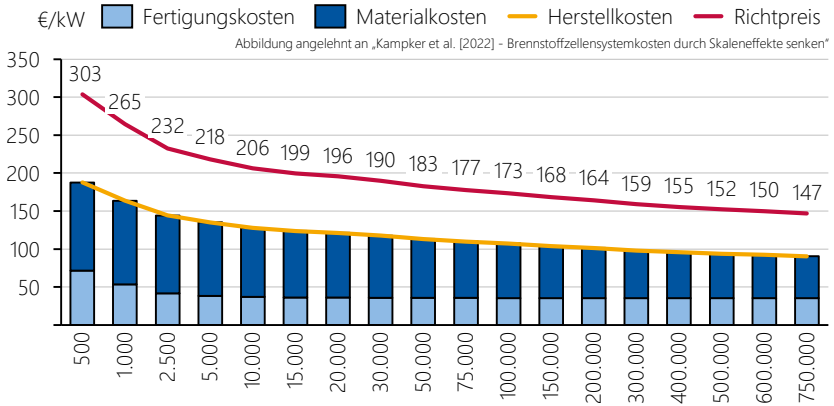
Brennstoffzellensystem



- Der Brennstoffzellenstack und die Balance-of-Plant (BoP) bilden das Brennstoffzellensystem (BZ-System), hinzu kommt das Tanksystem.
- Die beiden Kühlsysteme werden zur Kühlung des Brennstoffzellenstacks (Hochtemperatur) und zur Kühlung der komprimierten Luft (Niedertemperatur) sowie von Nebenaggregaten verwendet.

Skalierung der Produktion

Kostendegressionen durch Skaleneffekte



Am Beispiel eines am Lehrstuhl PEM der RWTH Aachen spezifizierten BZ-Systems und dessen Fertigungsschritte wurden die Kosten errechnet. Die Modellierung aktuell am Markt etablierter Produktionstechnologie lässt erkennen, dass die Fertigungskosten ab einem Produktionsvolumen von ca. 2.500 BZ-Systemen pro Jahr nahezu konstant sind. Dies ist auf die zugrundeliegende Anlagentechnik zurückzuführen, die bisher nicht auf große Stückzahlen ausgelegt ist. Die Erzielung von Skaleneffekten und damit einhergehende Kostensenkungen werden dadurch erschwert. Der Maschinen- und Anlagenbau kann an dieser Stelle durch innovative Fertigungstechnik einen erheblichen Beitrag dazu leisten, Skaleneffekte früh nutzbar zu machen. Die nachfolgenden Ausführungen dieser Broschüre beziehen sich auf ein Stückzahlenszenario von 10.000 BZ-Systemen pro Jahr.

Kostenstruktur

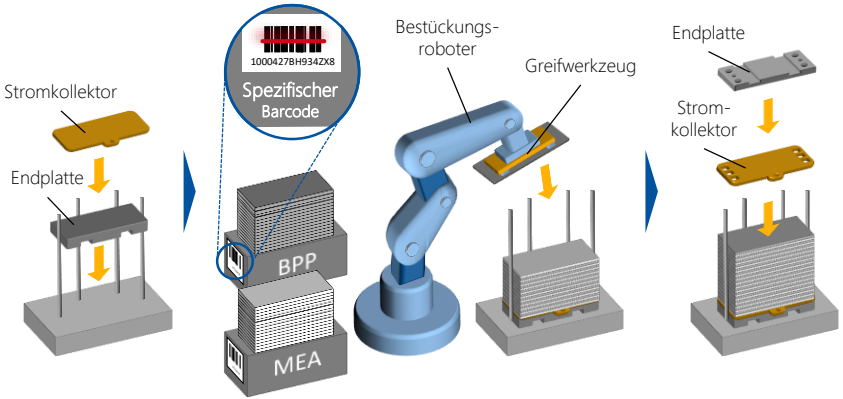
des BZ-Systems



Die durch den RWTH-Lehrstuhl PEM modellierten Ausgaben basieren auf einer Kostenstruktur, die den „Richtpreis“ als den Verkaufspreis des Produktes bei Deckung aller Kosten, Steuern und kalkuliertem Gewinn des Unternehmens definiert. Die „Gesamtkosten“ setzen sich aus Aufwendungen für Vertrieb, Verwaltung, Forschung und Entwicklung sowie den Herstellkosten zusammen. Die „Herstellkosten“ bilden die Summe aus Fertigungs- und Materialkosten. Die „Fertigungskosten“ bestehen aus „Fertigungseinzelkosten“ und „Fertigungsgemeinkosten“, während die „Materialkosten“ die „Materialeinzelkosten“ und die „Materialgemeinkosten“ umfassen. Einzelkosten beziehen sich dabei auf Ausgaben, die je produziertem Produkt anfallen. Gemeinkosten umfassen Aufwendungen, die einzelnen Produkten nur mittelbar zugerechnet werden. Nachfolgend werden für jeden Fertigungsschritt die Investitionskosten je Anlage ausgewiesen.

Stapeln und Vormontieren

Stackfertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Zu Beginn der Fertigung des Brennstoffzellenstacks werden die untere Endplatte und der untere Stromkollektor zunächst vormontiert.
- Das optionale Scannen von Produktlabels der MEA (engl. „Membrane Electrode Assembly“) und der BPP (engl. „bipolar plate“) im Wareneingang erleichtert eine spätere Bauteilrückverfolgbarkeit des Endproduktes.
- MEA (hier: 5-Lagen-MEA), BPP und Dichtungen werden in einer festgelegten Reihenfolge aufeinander gestapelt: (1) BPP, (2) Dichtung, (3) MEA, (4) Dichtung, (5) BPP
- Abschließend werden der obere Stromkollektor und die obere Endplatte samt Medienzugängen hinzugefügt.
- Die exakte Ausrichtung der einzelnen Komponenten des Stapels kann durch außen- und innenliegende Führungselemente gewährleistet werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Anzahl Brennstoffzellen: ca. 2 bis 10 Zellen pro kW
- Stapelgeschwindigkeit: < 2,3 Sekunden pro Komponente
- Positionsgenaueres Komponentenhandling von ca. 0,1 mm/100 µm

Technologiealternativen

- Pick-and-place-Handling-Roboter für den Stapelprozess
- Vollautomatisches Stapeln durch Bahn- oder Zuführsysteme
- Halbautomatisches Stapeln durch Karussellvorrichtungen oder Delta-Roboter
- Manuelles Stapeln im F&E Segment

Qualitätseinflüsse

- Toleranzgenauigkeit der Komponentendicken: < 10 µm
- Reinraum-Umgebungsklasse: ISO 8

Qualitätsmerkmale

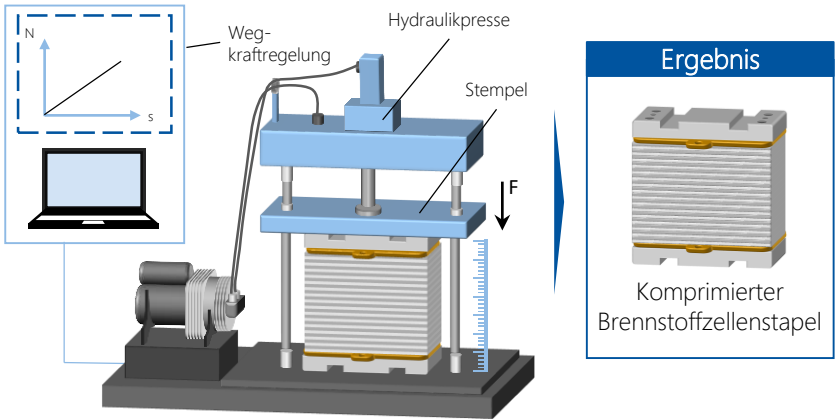
- Stackhöhe 1 bis 2 mm pro Zelle (je nach Leistungsklasse)
- Relative Positionierung der Zellen zueinander
- Zerstörungsfreiheit

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 0,5 - 0,8 Mio. €

Komprimieren

Stackfertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Die Komprimierung erfolgt innerhalb einer Pressvorrichtung, beispielsweise durch eine Hydraulikpresse.
- Durch Verpressen der einzelnen Komponenten werden die Brennstoffzellendichtungen gestaut und der Stack somit abgedichtet.
- Die Kontaktwiderstände zwischen den Komponenten werden durch die Kompression gesenkt.
- Eine Regelung der Presskraft und des Pressweges gewährleistet eine ausreichende Kompression und vermeidet die Schädigung der Bauteile durch Überbelastung.
- Eine gleichmäßige Verpressung hat einen erheblichen Einfluss auf die spätere Leistungsdichte sowie die Lebensdauer des Stacks.

Prozessparameter & -anforderungen

- Presskraft (produktabhängig): max. 160 kN bei metallischen Bipolarplatten
- Gleichmäßiger Anpressdruck
- Pressweg (produktabhängig)
- Prozesszeit: 150 Sekunden bis 30 Minuten pro Stack

Technologiealternativen

- Spindelpresse
- Hydraulische Presse
- Pneumatische Presse
- Servohydraulische Presse

Qualitätseinflüsse

- Presskraft- und -weggenauigkeit: +/- 2 %
- Reinraum-Umgebungsstufe: ISO 8
- Verfahrensgeschwindigkeit
- Positioniergenauigkeit

Qualitätsmerkmale

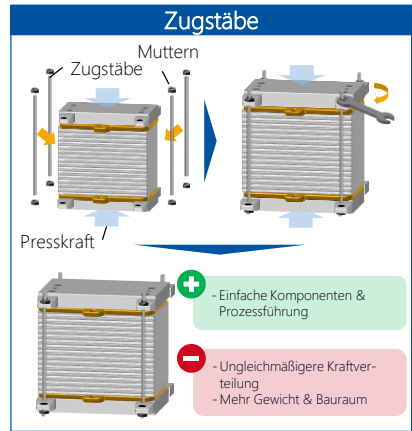
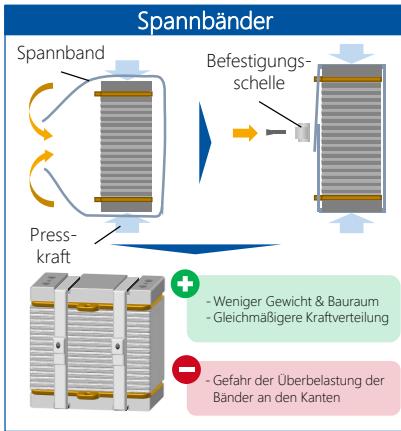
- Stackhöhe: 1 bis 2 mm pro Zelle (je nach Leistungsklasse)
- Dichtheit
- Zerstörungsfreiheit
- Gleichmäßige Druckverteilung

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 0,2 - 0,4 Mio. €

Verspannen

Stackfertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Die dauerhafte Kompression des Stacks wird durch geeignete Spannmittel, meist Spannbänder oder Zugstäbe, garantiert.
- Die Spannmittel werden noch unter aufgebrachter Kraft in der Pressvorrichtung befestigt.
- Die Spannbänder, meist metallisch oder kohlefaserverstärkt, werden um den Stack gelegt und zur Überlappung gebracht.
- Die Enden der Bänder werden mittels Schellen miteinander verklemt, teils auch stoffschlüssig (z. B. durch Schweißen) oder formschlüssig (z. B. durch Crimpen) verbunden.
- Zugstäbe werden alternativ durch die an den Endplatten vorgesehenen Öffnungen geführt und mittels Schraubmuttern gegen die Endplatten verspannt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Anpressdruck: ca. 0,5 - 1 MPa
- Anzugsmoment: ca. 11 Nm (Einzelzellen)
- Verdrehen der Vorrichtung bis zu 180° in Querschnittsfläche

Technologiealternativen

- Zugstäbe
- Klemmplatten
- Klemmbänder
- Ummantelung

Qualitätseinflüsse

- Verschraubungsreihenfolge
- Anzugsmoment
- Ungleichmäßige Verspannung durch Verformung der Endplatte

Qualitätsmerkmale

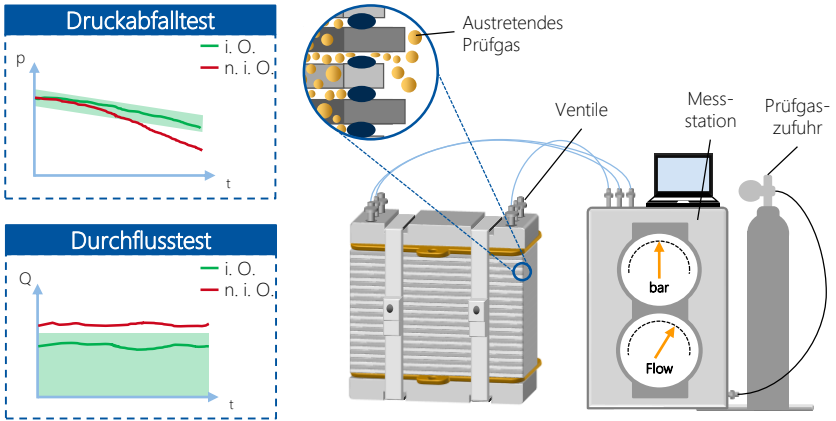
- Zerstörungsfreiheit der Spannbänder
- Bruchstellen oder Risse innerhalb der Brennstoffzelle oder an den Endplatten
- Kontinuierlicher Anpressdruck

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 0,1 - 0,2 Mio. €

Dichtheit prüfen

Stackfertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Um die Dichtheit des verspannten Stacks zu kontrollieren, werden eine Druckabfall- und/oder eine Durchflussprüfung vorgenommen.
- Eine Messstation samt Prüfgaszufuhr wird mit den Medieneingängen des Stacks verbunden.
- Beim Druckabfalltest werden die Ausgänge des Stacks verschlossen und der Druckabfall über die Zeit nach der Füllung durch Prüfgas gemessen.
- Beim Durchflusstest werden die Ausgänge des Stacks geöffnet und der Prüfgasdurchfluss gemessen.
- Es kann die Gesamtdichtheit des Stacks, aber auch diejenige der einzelnen Kreisläufe ermittelt werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Leckrate H_2 : max. 1×10^{-1} mbarl/s (gemäß IEC 62282-2)
- Leckrate O_2 : max. 4-fache Leckrate von H_2
- Betriebslast: je nach Stackleistung
- Prüfmedium: Helium oder Stickstoff

Technologiealternativen

- Stickstoff als Prüfmedium
- Helium als Prüfmedium
- Durchflusstest
- Druckabfalltest

Qualitätseinflüsse

- Dichtheit der Zuleitungen und Medienanschlüsse
- Zerstörungsfreiheit der Komponenten
- Ungleichmäßige Verspannung
- Umgebungsdruck und -temperatur
- Staubdichtheit und Widerstandsfestigkeit

Qualitätsmerkmale

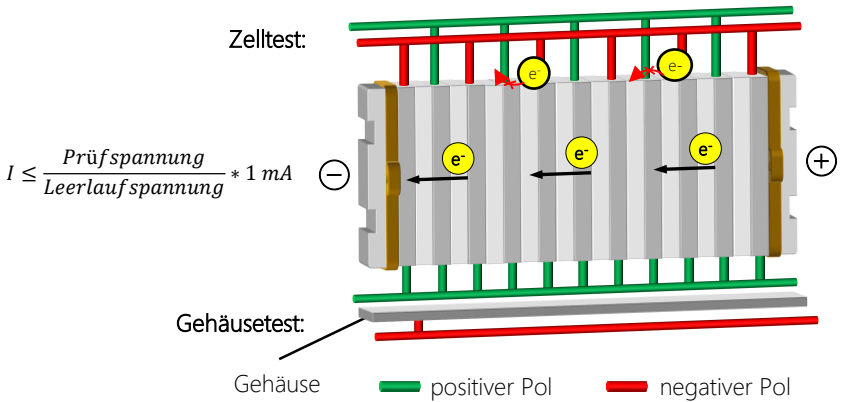
- Leckrate
- Definition erlaubter Nacharbeit

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 0,3 - 0,4 Mio. €

Isolation prüfen

Stackfertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Die Isolationsprüfung stellt sicher, dass die Abstände und die feste Isolierung der Komponenten eine ausreichende Spannungsfestigkeit aufweisen, um einer temporären Überspannung standzuhalten.
- Die Isolationsprüfung findet zwischen einer berührbaren leitfähigen Komponente und dem Stromkreis statt und ist als vollautomatisches Verfahren vorgesehen.
- Die Prüfung gilt als bestanden, wenn keine elektrischen Durchschläge innerhalb der Zellen und zwischen Stack und Gehäuse (zusammengefasste Darstellung) aufgetreten sind.
- Der Ableitstrom darf 1 mA multipliziert mit dem Verhältnis von Prüfspannung zu Leerlaufspannung nicht überschreiten.
- Da einzelne Brennstoffzellen wie Kondensatoren wirken, kann die Ursache von Kurzschlüssen nicht immer eindeutig ermittelt werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Prüfdauer Typprüfung: min. 60 Sek. (gemäß DIN EN 62477-1)
- Prüfdauer Stückprüfung: >5 Sek. (gemäß DIN EN 62282-2-100)
- Frequenz der Prüfspannung: 38 bis 62 Hz
- Prüfspannung: 2 bis 6 kV
- Prüfmedium: Kühlmittel

Technologiealternativen

- Keine vorhanden

Qualitätseinflüsse

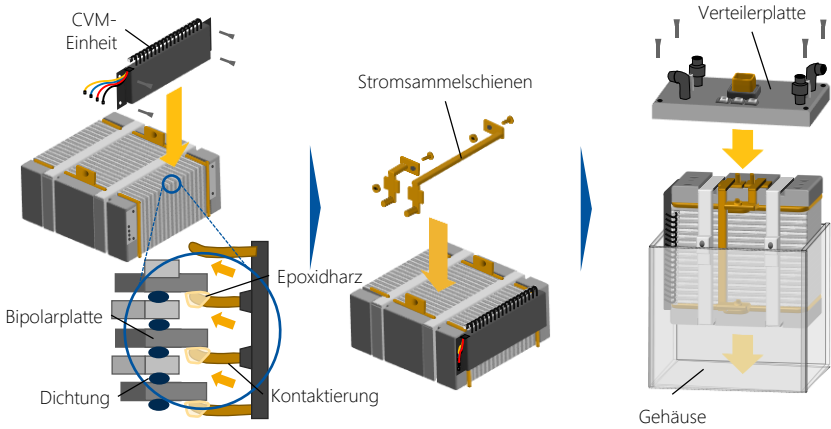
- Einzelne Brennstoffzellen wirken wie Kondensatoren → Quelle von Stromausfällen schwierig zu identifizieren
- Viel manueller Handbetrieb

Qualitätsmerkmale

- Vermeidung elektrischer Durchschläge

Finalisieren

Stackfertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Die CVM (engl. „Cell Voltage Monitoring“)-Einheit wird zur Spannungsüberwachung der einzelnen Zellen seitlich am Stack angebracht.
- Die einzelnen Kontakte der CVM-Einheit werden an den Bipolarplatten der Brennstoffzellen unter Verwendung von Epoxidharzen befestigt.
- Die Stromsammelschienen für die spätere HV-Ausgangsverkabelung des Stacks werden an den Stromkollektoren verschraubt.
- Der Stack wird in ein Gehäuse gefügt und der Gehäusedeckel montiert.
- Der Deckel des Gehäuses stellt gleichzeitig die Verteilerplatte dar und beinhaltet sämtliche Ein- und Ausgänge für Medien sowie Anschlüsse für Sensorik und HV-Verkabelung.

Prozessparameter & -anforderungen

- Dosiermenge des Epoxidharzes
- Gewährleistung der Transportsicherheit
- Positioniergenauigkeit der Leiterenden

Technologiealternativen

- Teilautomatisierte Montage
- Messung der Stack-Gesamtspannung anstelle einzelner Zellspannungen

Qualitätseinflüsse

- Benetzung und Qualität des Epoxidharzes
- Handhabungs- und Sicherheitsvorschriften bei der Kontrolle durch Mitarbeitende

Qualitätsmerkmale

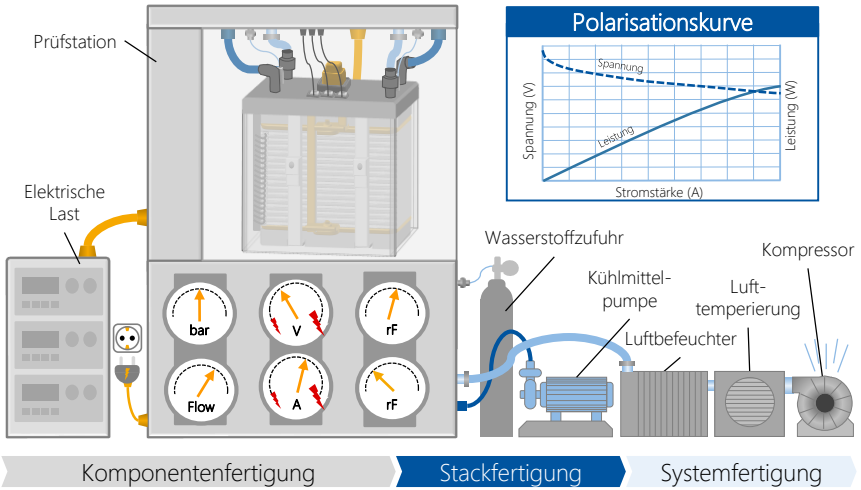
- Leitfähigkeit und korrekte Aufnahme der einzelnen Zellspannungen
- Servicefähigkeit durch Möglichkeit zur Öffnung des Gehäuses

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: ca. 0,1 Mio. €

Einfahren und Prüfen

Stackfertigung



- Die montierten Brennstoffzellenstacks werden zur Sicherstellung der Leistungsfähigkeit in einem Prüfstand aktiviert.
- Während der Aktivierung erfolgt die Entfernung von Verunreinigungen und Lösemittelresten, die Öffnung der Poren sowie die Befeuchtung der Membran und Ionomere.
- Während des Einfahrprozesses werden verschiedene Kombinationen aus Durchflussrate, Mediendruck, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit durchlaufen.
- Die Leistungsfähigkeit des Stacks steigt zu Beginn stetig an und nähert sich dann asymptotisch einem Optimum, was in einem Kompromiss zwischen Aktivierungszeit und Leistungsfähigkeit resultiert.
- Es existieren verschiedene Protokolle, die unterschiedliche Aktivierungszeiten und Zelldegradationen hervorrufen.
- In manchen Fällen ist ein erneuter Dichtigkeitstest im Anschluss an den Aktivierungsvorgang notwendig.

Prozessparameter & -anforderungen

- Prozesszeit: ca. 10 min für 90 % Leistung und ca. 120 bis 480 min für 100 % Leistung
- Betriebslast: 0,3 bis 0,6 V (manchmal 0,9 V)
- Betriebstemperatur: 55 bis 95 °C
- Betriebsdruck: 3,4 bis 5 bar

Technologiealternativen

- Diskontinuierliche Lastzyklen
- Diskontinuierliche Medienzufuhr
- Diskontinuierlicher Temperaturverlauf

Qualitätseinflüsse

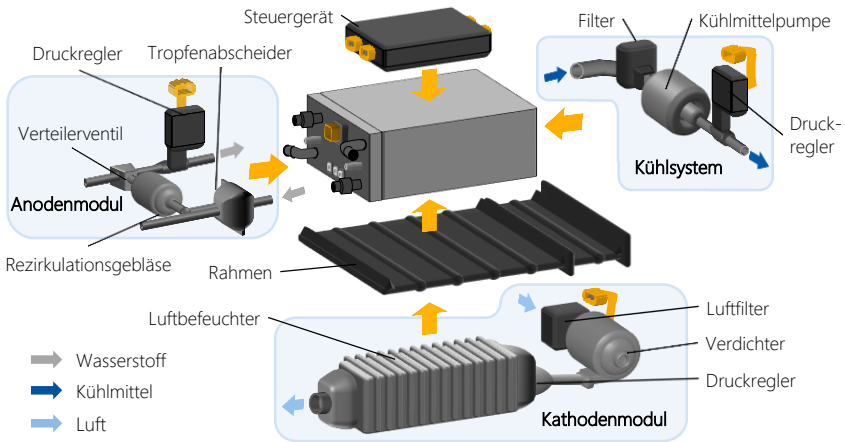
- Medienreinheit (u. a. H₂-Grad 7 für mobile Anwendungen)
- Medienzufuhr und Kühlleistung
- Dichtigkeit der Zuleitungen und Medienanschlüsse
- Betriebsdruck und -temperatur

Qualitätsmerkmale

- Zellspannung und Wirkungsgrad
- Einfluss auf die Zelldegradation
- Dichtheit

Balance-of-Plant montieren

Systemfertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Die BoP-Komponenten werden beispielsweise mit Hilfe eines Montagerahmens an den Brennstoffzellenstack gebunden.
- Zur Versorgung des Gesamtsystems mit Wasserstoff wird das Anodenmodul (bestehend aus Wasserstoff-Rezirkulationsgebläse, Druckregler, Verteilventil, Tropfenabscheider und Leitungen) befestigt.
- Zur Gewährleistung der notwendigen Systemkühlung wird das Kühlsystem (bestehend aus Filtern, Kühlmittelpumpe, Druckregler und Leitungen) montiert.
- Zur Versorgung des Gesamtsystems mit Luft wird das Kathodenmodul (bestehend aus Verdichter, Luftfilter, Luftbefeuchter, Druckregler und Leitungen) befestigt.
- Zur Regelung der Medienzufuhr und des Thermomanagements wird das Steuergerät montiert.

Prozessparameter & -anforderungen

- Montageanleitung samt Einteilung in Unterbaugruppen
- Montagegerechtes Komponentendesign (z. B. Lochbild im Rahmen)
- Gewährleistung der Transportsicherheit (Kabel, Anschlüsse, Schutzklappen etc.)

Technologiealternativen

- Teilautomatisierung der Montage möglich
- Steck- und Schraubverbindungen

Qualitätseinflüsse

- Handhabungs- und Sicherheitsvorschriften bei der Kontrolle durch Mitarbeitende
- Inline-Mess- und -Prüftechnologie der Montage
- Poka-Yoke-Auslegung zum Schutz vor fehlerhafter Montage
- Zugänglichkeit der Anschlussstellen

Qualitätsmerkmale

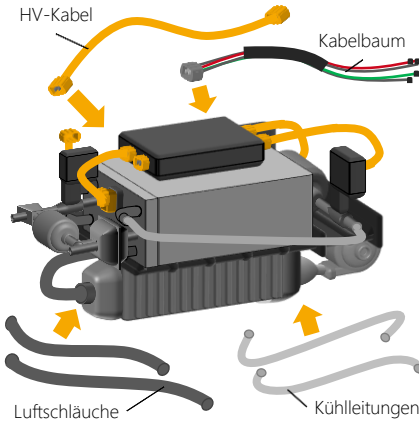
- Äußere Unversehrtheit und technische Sauberkeit
- Festsitzende Fügeverbindungen
- Korrekte Positionierung und Verkabelung der Peripheriegeräte
- Demontierbarkeit

Fertigungskosten [Auszug]

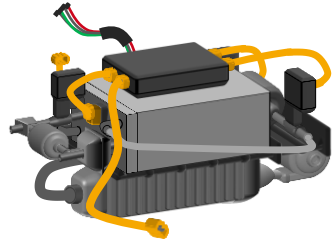
Invest für Maschinen und Anlagen: 0,05 - 0,1 Mio. €

Elektrische Integration

Systemfertigung



Montiertes Brennstoffzellensystem



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Die zuvor montierten BoP-Komponenten werden über Leitungen mit den Medienöffnungen des Stacks verbunden.
- Das Steuergerät wird mit den einzelnen BoP-Komponenten verbunden.
- Die HV-Ausgangsverkabelung wird angebracht.
- Im letzten Montageschritt wird der Kabelbaum zur späteren Fahrzeugintegration montiert.

Prozessparameter & -anforderungen

- Qualifikation der Mitarbeitenden zur Montage biegeschlaffer Kabel
- Qualifikation der Mitarbeitenden zur Montage unter Hochvoltsicherheit (> 60 V)
- Gewährleistung der Transportsicherheit (Kabel, Anschlüsse, Schutzklappen etc.)

Technologiealternativen

- Steck- und Schraubverbindungen
- Anpressen der Schläuche und Leitungen

Qualitätseinflüsse

- Handhabungs- und Sicherheitsvorschriften bei der Kontrolle durch Mitarbeitende
- Zugänglichkeit der Anschlussstellen
- Poka-Yoke-Auslegung zum Schutz vor fehlerhafter Kontaktierung

Qualitätsmerkmale

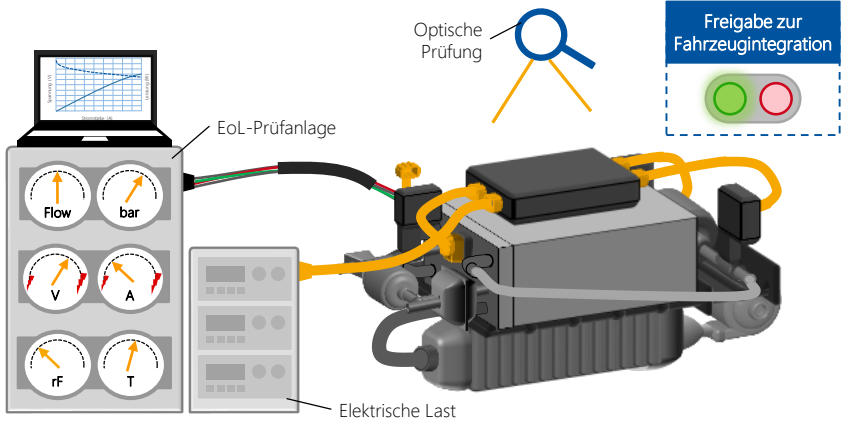
- Äußere Unversehrtheit und technische Sauberkeit
- Festsitzende Fügeverbindungen
- Korrekte Positionierung und Verkabelung der Peripheriegeräte
- Demontierbarkeit

Fertigungskosten [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: ca. 0,05 Mio. €

End-of-Line-Testing

Systemfertigung



Komponentenfertigung

Stackfertigung

Systemfertigung

- Das gesamte Brennstoffzellensystem wird samt allen angeschlossenen Medienleitungen und Aggregate an einem End of Line (EoL)-Prüfstand getestet.
- Das System durchläuft ein Prüfprogramm, in dem über die Variation der Eingangsparameter verschiedene Betriebszustände durchlaufen werden.
- Die EoL-Prüfung stellt die Funktionstüchtigkeit des Systems aus den einzelnen Komponenten (inkl. Software) und ihre korrekte Verbindung zueinander sicher.
- Dabei durchläuft es einen Funktionstest für einwandfreie Leistung und einen Sicherheitstest für einwandfreies Strömen von Gasen und Flüssigkeiten. Bei EoL-Prüfung ohne Fehlersignal und bestandener optischer Prüfung wird das Brennstoffzellensystem zur Fahrzeugintegration freigegeben.

Prozessparameter & -anforderungen

- Prozess-Know-how
- Kriterienkatalog für umfassende Prüfung (keine einheitliche Vorschrift)
- Definierter Ablieferzustand in Abstimmung mit Fahrzeugmontage
- Qualifikation der Mitarbeitenden für Hochvoltsicherheit (> 60 V)

Technologiealternativen

- Vorgelagertes Testing der einzelnen Peripheriekomponenten → Sicherheitstest nicht enthalten
- Statistisches Testing bei steigender Stückzahl
- Eventuell EoL mit der Inbetriebnahme kombinieren

Qualitätseinflüsse

- Keine

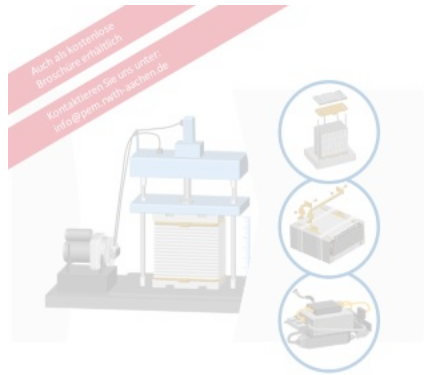
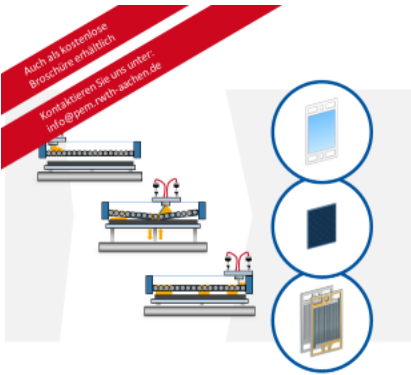
Qualitätsmerkmale

- Factory Acceptance Test (FAT) als finale Produktfreigabe
- Definition von erlaubter Nacharbeit
- Interne Merkmale von Hersteller und Kunde

Weitere Informationen

zu Brennstoffzellen und H₂ Komponenten

Die im Rahmen dieser Broschüre erläuterte Produktionskette eines Brennstoffzellensystems setzt auf der Produktion von Brennstofffeinzelzellen auf. Für mehr Informationen hinsichtlich dieser kann die unten aufgeführte Broschüre herangezogen werden. In dieser wird detailliert auf die Produktionsschritte zur Herstellung der einzelnen Zellbestandteile und der damit verbundenen Gesamtkosten eingegangen.



PRODUKTION VON
BRENNSTOFFZELLEN-
KOMPONENTEN

Neue Auflage



PRODUKTION VON
BRENNSTOFFZELLEN-
SYSTEMEN

Neue Auflage

