

Band 2: Lastenheft

Projekttitle: Realisierung eines mikrostrukturierten Reformersystems zur Wasserstofferzeugung aus Bioethanol

Zuwendungsgeber: Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Aktenzeichen: 22420

Kurztitel: Bioethanolreformer

Projektlaufzeit: 01.05.2005 – 30.06.2007

Verfasser: Dr. Ludwig Jörissen
Zentrum für Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung Baden-Würt-
temberg (ZSW)
Geschäftsbereich 3



Ulm, 2005

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	2
1. Einführung	3
2. Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC)	5
2.1 Katalysatoren	7
2.2 Membranen	8
2.3 Benötigte Brennstoffmengen	11
2.4 Gasbefeuchtung	12
3. Typische Betriebsbedingungen für ZSW PEFC-Stacks im Reformatbetrieb	12
3.1 Elektrische Daten	13
3.2 Technische Daten	13
3.3 Medienversorgung Anode	14
3.4 Medienversorgung Kathode	14
3.5 Medienversorgung Kühlmittel	15
3.6 Empfohlene Betriebsbedingungen	15
3.7 Testprogramm	16
3.8 Weitere Betriebsempfehlungen	16

Abbildungsverzeichnis

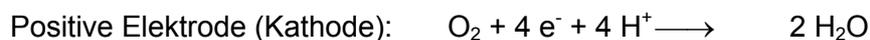
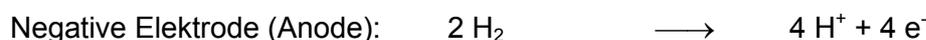
Abbildung 1:	Funktionsprinzip einer PEFC	3
Abbildung 2:	Komponenten eines Brennstoffzellensystems am Beispiel Fahrzeugantrieb.	6
Abbildung 3:	Schematische Zeichnung einer Elektrodenmikrostruktur.....	6
Abbildung 4:	Einfluss von CO auf die Kennlinie einer PEFC.....	7
Abbildung 5:	Strukturmodell von Nafion®	9
Abbildung 6:	Wasseraufnahme und ionische Leitfähigkeit von Nafion®	10
Abbildung 7:	Wassertransport innerhalb der Elektrolytmembran.....	11
Abbildung 8:	ZSW-Stack Typ BZ-100	12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anwendungsfelder von Brennstoffzellentechnologien	4
Tabelle 2:	Wirkungen verschiedener Kontaminanten auf die Leistung von PEFC.	8
Tabelle 3:	Technische Entwicklung von Polymermembranmaterialien	9

nur aufrechterhalten werden, solange die Versorgung der Elektroden mit Wasserstoff und Sauerstoff gewährleistet ist. Der Stromfluss wird direkt durch die Wandlung eines signifikanten Teils der chemischen Energie von Wasserstoff und Sauerstoff in elektrische Energie gespeist. Als Produkt entsteht reines Wasser. Die Entstehung weiterer Schadstoffe ist durch die Vermeidung von Flammverbrennungsvorgängen ausgeschlossen.

In der Brennstoffzelle finden also die folgenden Reaktionen statt:



Brennstoffzellen werden in der Regel nach dem verwendeten Elektrolyten und ihrer Arbeitstemperatur klassifiziert. Tabelle 1 zeigt eine Technologieübersicht und die zugehörigen Anwendungspotenziale.

Tabelle 1: Anwendungsfelder von Brennstoffzellentechnologien

System	Elektrolyt	Temperaturbereich	Zellwirkungsgrad	Anwendungsbereich
Alkalische BZ (AFC)	30-50 % KOH	60-90 °C	50-60%	Raumfahrt, U-Boot, Straßenfahrzeuge
Polymerelektrolyt-membran BZ (PEFC)	Protonenleitendes Polymer (z.B. Nafion®)	50-90 °C	50-60%	Raumfahrt, Straßenfahrzeuge, U-Boot, dezentrale & portable Stromversorgung, Kraft-Wärme-Kopplung
Phosphorsaure BZ (PAFC)	Konzentrierte Phosphorsäure	160-220 °C	55%	Stromerzeugung, Kraft-Wärme-Kopplung, Busse
Schmelzkarbonat BZ (MCFC)	Geschmolzene Karbonate (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	620-660 °C	45-60%	Elektrizitätserzeugung, Kraft-Wärme-Kopplung
Oxidkeramische BZ (SOFC)	Ionenleitende Keramik	750-1000 °C	55-65%	Elektrizitätserzeugung, Kraft-Wärme-Kopplung

Man erkennt, dass die Polymerelektrolytmembran Brennstoffzellen ein sehr weites Anwendungsfeld über einen weiten Leistungsbereich aufweisen. Die folgende Diskussion konzentriert sich daher auf diesen Brennstoffzellentyp.

2. Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC)

Der Elektrolyt in dieser Brennstoffzelle besteht aus einer dünnen, sauren Ionenaustauscher-membran, die als Protonenleiter wirkt. Üblicherweise werden fluoridierte Basispolymere verwendet, die durch den Einbau von Sulfonsäuregruppen ionenleitend gemacht wurden. Es wurden jedoch auch nicht fluoridierte Ionenaustauschermembranen typischerweise auf der Basis von Polyarylenen hergestellt und erprobt. Die funktionellen Gruppen der Elektrolyt-membran sind chemisch an das Polymergerüst gebunden. Daher befindet sich in der Regel keine freie Säure in der Brennstoffzelle.

Die Arbeitstemperatur der PEFC beträgt abhängig vom Betriebsdruck ca. 50 – 90 °C, da die Ionenleitfähigkeit dieser Polymere entscheidend vom Wassergehalt abhängig ist. Wasser-management ist daher eines der Schlüsselprobleme der PEFC. Das Austrocknen der Membran kann zu irreversiblen Schäden, bis hin zur Zerstörung der Zelle führen.

Als Katalysatoren wird in der Regel Kohle geträgertes Platin verwendet. In den letzten Jahren ist es gelungen die notwendigen Edelmetallgehalte auf deutlich unter 1 mg/cm² zu senken. Infolge des sauren Elektrolyten ist die PEFC CO₂-abweisend. Sie kann infolge der geringen Arbeitstemperatur nur geringe Mengen an CO tolerieren (<10 ppm). Durch Zumi-schung geringer Mengen an Luftsauerstoff bzw. H₂O₂ zum Brennstoff kann die CO-Toleranz jedoch gesteigert werden.

Die PEFC ist bei Gewährleistung hinreichender Medienversorgung in der Lage dynamisch auf schnelle Lastwechsel zu reagieren. Ferner können hohe Leistungsdichten erzielt werden. Daher eignet sich dieser Brennstoffzellentyp besonders für den Fahrzeugantrieb. Ferner sind Anwendungen in der Kraft-Wärme-Kopplung bzw. zum Antrieb von Elektrogeräten möglich. PEFC-Systeme mit einer Leistung von bis zu 250 kW wurden realisiert.

Die PEFC erzeugt Elektrizität durch die „kalte, elektrochemische Verbrennung“ von Wasserstoff in der Form von Gleichstrom. Ein komplettes System beinhaltet demzufolge neben der eigentlichen Brennstoffzelle noch Komponenten, die der Bereitstellung von Wasserstoff und der Konditionierung der elektrischen Energie dienen. Eine Schemazeichnung eines Kom-plettsystems am Beispiel der Fahrzeuganwendung ist in Abbildung 2 gezeigt.

Das komplette Antriebssystem kann demzufolge in folgende Module untergliedert werden:

- Gasversorgungsmodul
- Brennstoffzellenmodul
- Elektrischer Modul mit Nutzerschnittstelle
- Steuerungs- und Regelungsmodul

Das Kernstück des Brennstoffzellenmoduls ist der Brennstoffzellenstapel (Stack), der aus mehreren elektrisch in Reihe geschalteten Einzelzellen besteht. Die elektrochemischen Re-aktionen (Brennstoffoxidation, Sauerstoffreduktion) in den Elektroden finden typischerweise an platinhaltigen Katalysatoren statt. Die Elektroden selbst sind poröse Strukturen, die so-wohl durchlässig für die Reaktanden, die Reaktionsprodukte als auch elektrisch leitfähig sein müssen. Hierzu wird ein Komposit aus elektrisch- und ionenleitender Phase hergestellt. In PEFC Elektroden kann davon ausgegangen werden, dass die Oberfläche des Katalysators mit einer dünnen Ionomerschicht bedeckt ist (Abbildung 3). Das Ionomer dient gleichzeitig als Binder.

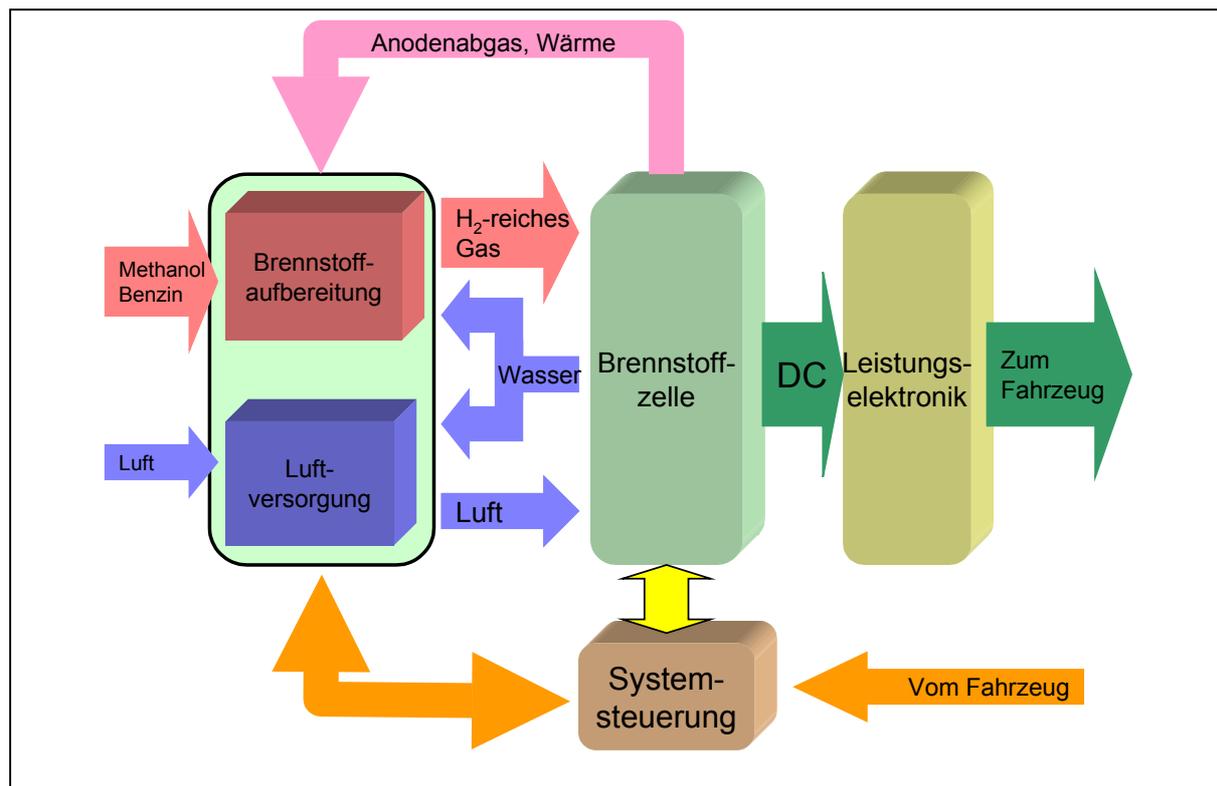


Abbildung 2: Komponenten eines Brennstoffzellensystems am Beispiel Fahrzeugantrieb.

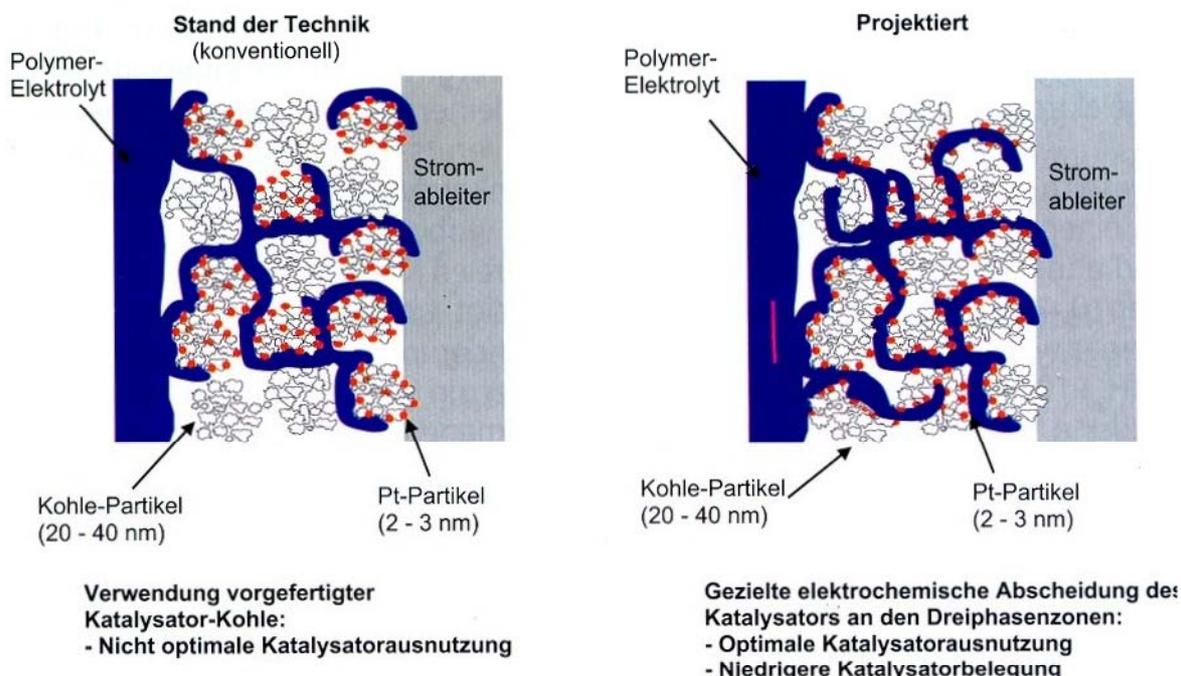


Abbildung 3: Schematische Zeichnung einer Elektrodenmikrostruktur

Im Folgenden wird näher auf die Eigenschaften der elektrochemisch aktiven Komponenten Katalysator und Ionermembran eingegangen.

2.1 Katalysatoren

Infolge der niedrigen Arbeitstemperatur und des sauren Elektrolyten benötigt die PEFC platinhaltige Katalysatoren. Seit Beginn der 80er Jahre gelang es durch konsequente Optimierung der Katalysatoren und der Elektrodenstrukturen den Edelmetallbedarf von 64 g/kW auf $\ll 1$ g/kW zu senken.

Die eingesetzten Pt-Katalysatoren sind allerdings sehr anfällig gegen Vergiftung durch im Wasserstoff oder in der Luft enthaltene Spurenverunreinigungen. Da Platin ein sehr katalytisch sehr aktives Material ist, werden starke Wechselwirkungen mit einer Vielzahl an Verbindungen beobachtet.

Es ist wohl bekannt, dass Kohlenmonoxid bei den typischen Betriebstemperaturen der PEFC an der Oberfläche von Platinkatalysatoren stark adsorbiert wird. Es entsteht ein „Wettbewerb“ um die katalytisch aktiven Plätze, wodurch ab einer bestimmten Oberflächenbelegung die Aktivität im Bezug auf die Wasserstoffoxidation stark verringert wird. Durch eine Erhöhung der Betriebstemperatur der Zelle kann dieser Effekt verringert werden. Bei einer Betriebstemperatur von 70 °C sind ohne weitere Maßnahmen ca. 10 ppm CO verträglich.

Der Einsatz von Legierungskatalysatoren (Pt/Ru, Pt/Sn etc.) bzw. die Dosierung geringer Mengen von Luft oder H_2O_2 zum Anodengas steigert die CO-Toleranz der Brennstoffzelle auf CO-Gehalte von ca. 20 bis 100 ppm. Bei Verwendung reiner Pt-Katalysatoren wird an der Anode auch die in-situ-Bildung von CO aus CO_2 beobachtet, die bei Legierungskatalysatoren nicht auftritt. Die weitere Optimierung der Katalysatoren muss zu einer weiteren Erhöhung der CO-Toleranz führen. Die Belegung der Katalysatoren mit CO führt in der Regel nicht zu einer dauerhaften Schädigung, da CO sowohl oxidativ als auch durch Verdrängung von der Katalysatoroberfläche entfernt werden kann. Generell wird jedoch eine stärkere Degradation der Elektroden in Reformat beobachtet.

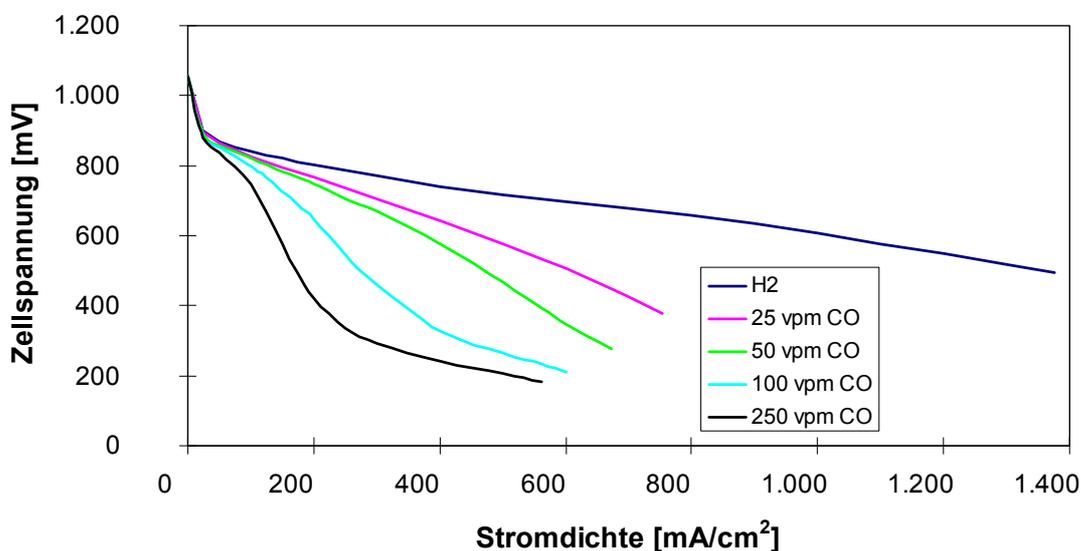


Abbildung 4: Einfluss von CO auf die Kennlinie einer PEFC.

Der Einfluss weiterer Spurenbestandteile auf die katalytischen Eigenschaften platinhaltiger Katalysatoren ist weniger gut untersucht. In der Literatur wird über Experimente mit folgenden Verunreinigungen berichtet:

Tabelle 2: Wirkungen verschiedener Kontaminanten auf die Leistung von PEFC.

Stoff	Wirkung
CO	Anodenseitig starke, reversible Verringerung der Zelleistung. Kathodenseitig geringe, reversible Verringerung der Zelleistung, da CO bei typischen Kathodenpotenzialen elektrochemisch zu CO ₂ oxidiert wird.
H ₂ S	Anodenseitig sind Effekte bereits bei Gehalten von wenigen ppb spürbar. Sulfidischer Schwefel scheint sich quantitativ auf der Katalysatoroberfläche zu sammeln. Air-bleed, führt nicht zu einer erhöhten Toleranz in Bezug auf sulfidischen Schwefel. Eine Teilregeneration durch Spülen mit sauerstoffhaltigen Gasen ist möglich. Kathodenseitig werden ebenfalls Beeinträchtigungen beobachtet. Die Oxidation von sulfidischem (S ²⁻) Schwefel führt zu Sulfiten (S ⁴⁺) bzw. Sulfaten (S ⁶⁺), die ebenfalls auf der Katalysatoroberfläche adsorbiert werden und dadurch die katalytische Aktivität beeinträchtigen.
HCN	Kathodenseitig wurde eine irreversible Verringerung der Zelleistung beobachtet.
SO ₂	Kurzfristige kathodenseitige Exposition bis 500 ppb ergab keine Beeinträchtigung der Zelleistung. Eine Beaufschlagung mit 5 ppm SO ₂ ergab eine irreversible Verringerung der Zelleistung.
NO _x	Keine oder schnell reversible Effekt beobachtet.
NH ₃	Langsam reversible Verringerung der Zelleistung bei anoden- und kathodenseitiger Exposition.
CH ₄	Keine Beeinträchtigung bei anoden- und kathodenseitiger Exposition. Höhere, gasförmige aliphatische KW zeigen ebenfalls keine Beeinträchtigungen.
Ethylen	Bei kathodenseitiger Exposition vollständig reversible Verringerung der Zelleistung beobachtet
Benzol	Bei kathodenseitiger Exposition fast vollständig reversible Verringerung der Zelleistung beobachtet. Die Erholung wurde erst nach Belassen der Zelle ohne Last beobachtet.
Toluol	Bei kathodenseitiger Exposition fast vollständig reversible Verringerung der Zelleistung beobachten
Methanol	Wie CO. Anodenseitig erhebliche aber reversible Verringerung der Zelleistung. Kathodenseitig: spürbare, reversible Verringerung der Zelleistung
Aldehyde / Ketone	Entstehen als Zwischenprodukte der Alkoholoxidation. Es wurde eine spürbare Verringerung der Zelleistung beobachtet, quantitative Daten fehlen.

2.2 Membranen

Die Eigenschaften der Elektrolytmembran haben über die zulässige Betriebstemperatur, die Aufwendungen für den Wasserhaushalt und die Sensitivität im Bezug auf oxidativen Abbau entscheidenden Einfluss auf das Betriebsverhalten der PEFC. Als Elektrolytmembran werden überwiegend saure Kationenaustauscherpolymere verwendet. In Tabelle 3 ist die Entwicklungsgeschichte verschiedener Membranmaterialien dargestellt. Die hohe Leitfähigkeit der Polymere wird durch Quellung in Wasser erreicht.

Tabelle 3: Technische Entwicklung von Polymermembranmaterialien

Zeit	Membran	Leistungsdichte [mW/cm ²]
1959-1961	Phenolsulfonsäure	5-10
1962-1965	Polystyrolsulfonsäure	40-60
1966-1967	Polytrifluorstyrolsulfonsäure	75-80
1968-1970	Nafion® (experimentell)	80-100
1971-1980	Nafion® (Produktion)	600-800
1980-1996	Fluorierte (Experimentell)	1.000-1500
1998	Nafion® (Produktion)	>> 900
1998	Sulfonierte Polyphenylensulfone (Experimentell)	300-1.000
2000	Verbesserte fluorierte Polymere	>> 900

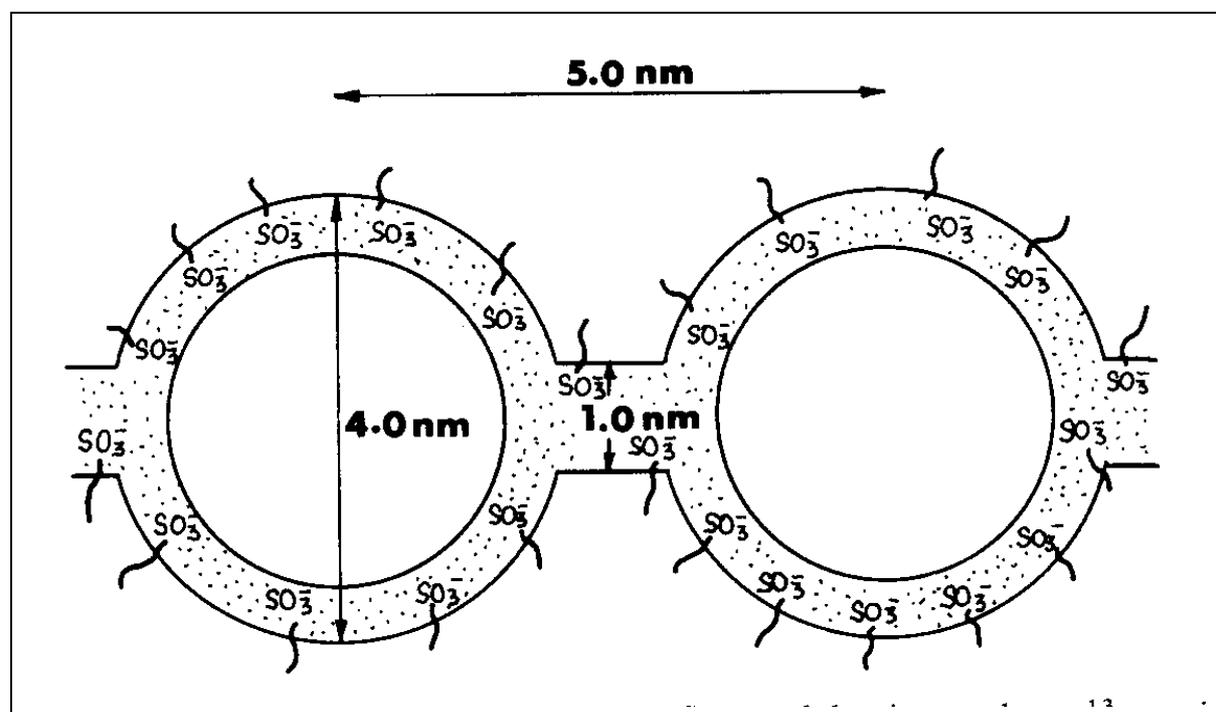


Abbildung 5: Strukturmodell von Nafion®

Die Sulfonsäuregruppen der Polymere werden durch einen Wasserfilm miteinander verbunden. Ein Modell dieser Struktur ist in Abbildung 5 am Beispiel des Nafions® gezeigt. In Kontakt mit Wasser in flüssiger Phase können bis zu 24 Moleküle Wasser pro Sulfonsäuregruppe aufgenommen werden (Abbildung 6).

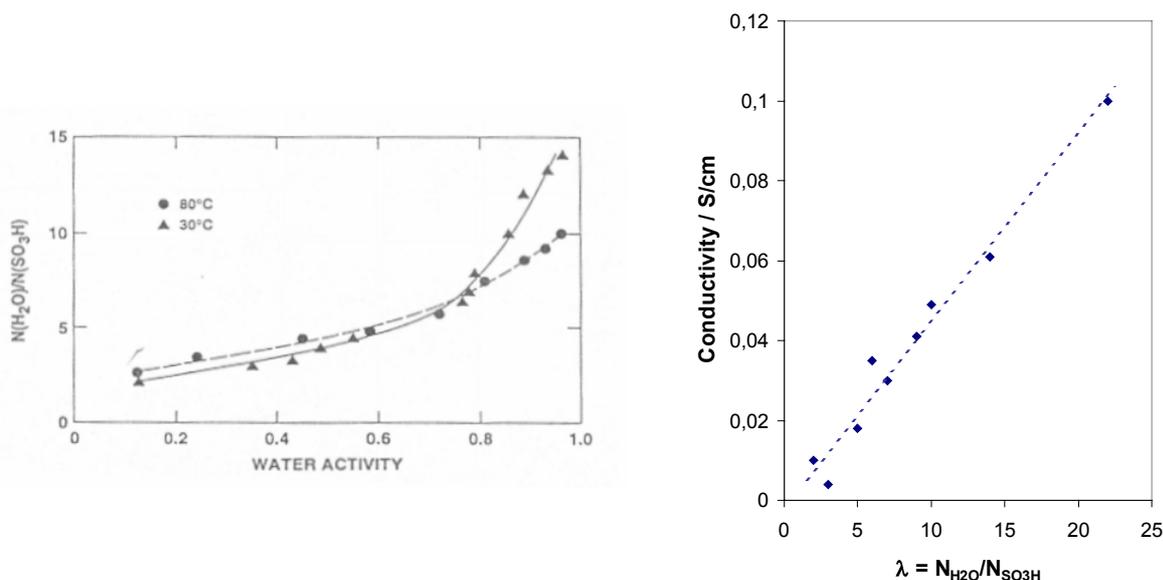


Abbildung 6: Wasseraufnahme und ionische Leitfähigkeit von Nafion®

Die Dimensionsänderungen bei Quellung und Schrumpfung betragen bis zu 20 % in jede Raumrichtung. Abhängig vom Herstellungsprozess (Kalandrieren oder Folienguss) ist die Quellung anisotrop. Trocknet die Membran aus, so führt dies zur Schrumpfung der Folie, ferner sinkt ihre Leitfähigkeit.

Ein Austrocknen des Ionomers wird trotz Befeuchtung des umgebenden Gasraums bei hohen Betriebstemperaturen beobachtet. Das Absinken der Leitfähigkeit selbst bei 100 % relativer Gasfeuchte ist bei Nafion® ab einer Temperatur von ca. 70 °C zu beobachten. Wird die Membran jedoch im ständigen Kontakt mit flüssigem Wasser gehalten, so ist auch ein Einsatz bei höherer Temperatur möglich.

Infolge der starken Abhängigkeit der Leitfähigkeit und der Außenabmessungen der Elektrolytmembran vom Quellungszustand (Wassergehalt), muss beim Betrieb einer PEFC besonders auf den Wasserhaushalt geachtet werden. Austrocknung der Membran, auch wenn dies nur punktuell und an wenigen Stellen geschieht, kann zu deren Zerstörung führen. Die Membranzerstörung kann mechanische oder thermische Ursachen haben.

Eine weitere, charakteristische Eigenschaft ist der Transport von Wasser im Betrieb der PEFC (Abbildung 7). Die bei der Wasserstoffoxidation an der Anode entstehenden Protonen schleppen koordinativ gebunden ca. 3-4 Moleküle Wasser pro Proton durch die Membran (Migration). Die Wasser-Akkumulation auf der Kathode führt zu einer „Gegenbewegung“ durch Diffusion.

Die Migration führt tendenziell zu einer Verarmung von Wasser auf der Anodenseite. Der Wassertransport durch Migration ist abhängig von der elektrischen Stromstärke. Die Diffusion ist tendenziell von der Kathode zur Anode gerichtet und kompensiert den anodenseitigen Wasserverlust durch Migration. Die Auswirkung der Diffusion auf die anodenseitig verfügbare Wassermenge ist durch die Membrandicke bestimmt. Ferner haben Absolutdruck und Druckdifferenzen zwischen Anode und Kathode einen Einfluss auf den Wasserhaushalt.

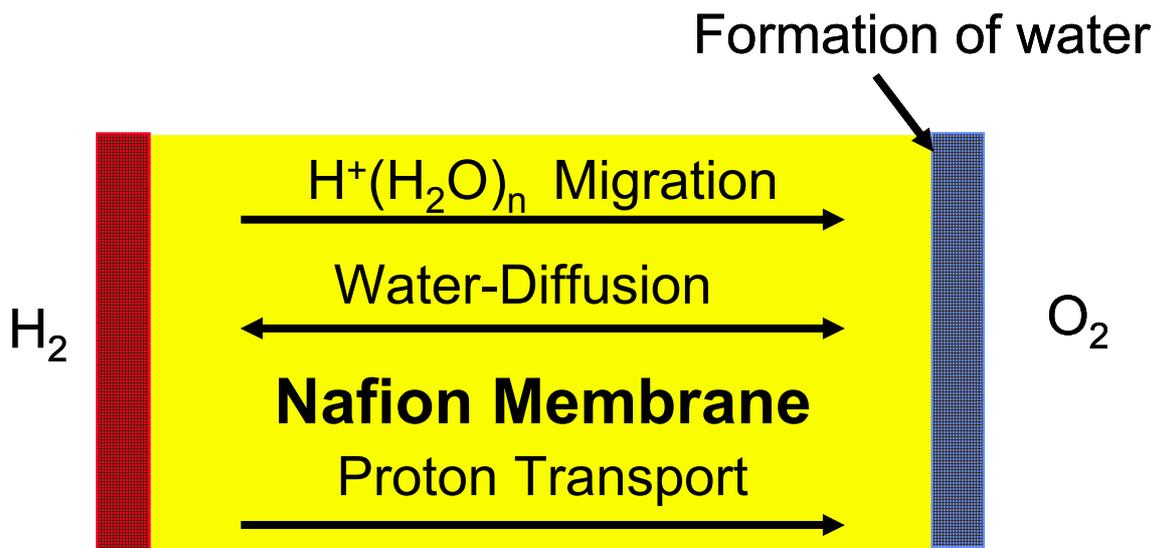


Abbildung 7: Wassertransport innerhalb der Elektrolytmembran.

Die höchste Leitfähigkeit der Elektrolytmembran wird in der Protonenform erreicht. Als saurer Kationenaustauscher bindet die Elektrolytmembran jedoch kationische Spezies (NH_4^+ , mehrwertige Metallionen z.B. Korrosionsprodukte etc.). Diese Verunreinigungen beeinträchtigen die Leitfähigkeit der Membran durch Blockade der Ionenaustauscherplätze und durch Veränderung des Quellverhaltens.

2.3 Benötigte Brennstoffmengen

Der zum Betrieb einer Brennstoffzelle benötigte Wasserstoffstrom ist gemäß Faraday'schem Gesetz proportional zum elektrischen Strom, der durch die Zelle fließt.

$$\text{Flow}(\text{H}_2) [\text{ml}/\text{min}] = 7 \text{ ml}/\text{min} \cdot I_{\text{el}} [\text{A}] \cdot n_{\text{Zelle}}$$

- I_{el} : Elektrischer Strom aus der Zelle in A
- n_{Zelle} : Zellzahl im BZ-Stapel

Gewöhnlich wird nur ein Teil (ca. 70 %) des einströmenden Wasserstoffs umgesetzt, das heißt, der tatsächlich in die Zelle fließende Wasserstoffstrom muss entsprechend der Wasserstoffumsatzrate höher sein. Überschüssiger Wasserstoff kann rezykliert werden oder muss im Falle von Reformatbetrieb thermisch verwertet werden.

Wasserstoffunterversorgung in einem Brennstoffzellenstapel kann in weniger als einer Sekunde zu irreversiblen Schäden in den betroffenen Zellen führen, die auch bei punktueller Unterversorgung zu beobachten sind. In einem Brennstoffzellenstapel sind die Einzelzellen elektrisch in Reihe geschaltet, das heißt: jeder Zelle wird der gleiche elektrische Strom aufgeprägt. Bei Wasserstoffunterversorgung werden die in der Zelle betroffenen Bereiche gezwungen, in eine andere anodische Reaktion auszuweichen. Die wahrscheinlichsten Reaktionen unter diesen Umständen sind Sauerstoffentwicklung, Edelmetalloxidation und Kohlenstoffkorrosion. Als Folge kann sich die Polarität der betroffenen Zelle im Stack umdrehen.

Die Steuerungs- und Regelungstechnik der Brennstoffzelle muss daher gewährleisten, dass der Zelle nur Strom entnommen wird, wenn Wasserstoff in ausreichender Menge bereitsteht. Da die Zelle mit wenigen Millisekunden Verzögerungszeit auf eine Leistungsanforderung reagiert, müssen Gasbereitstellung und -verzehr über die Regelungstechnik eng miteinander gekoppelt sein.

2.4 Gasbefeuchtung

Bei den typischen Betriebstemperaturen der PEFC liegt Wasser normalerweise in kondensierter Phase vor. Dies kann einerseits zu Flutungseffekten in den Elektroden, andererseits bei zu hohen Gasströmen zur Austrocknung der Membran führen. Kathodenseitig muss daher durch geeignete Befeuchtung des Zuluftstroms und durch Gewährleistung eines geeigneten Luftflusses sichergestellt werden, dass idealerweise genau die elektrochemisch erzeugte Menge an Wasser aus der Zelle ausgetragen wird. Im Betrieb reagiert die PEFC üblicherweise sensibel auf Unzulänglichkeiten im kathodenseitigen Wasserhaushalt. Die kathodenseitig optimalen Befeuchtungsbedingungen und Umsatzgrade sind ebenfalls abhängig von der relativen Richtung der Gasflüsse zueinander (Gleich- vs. Gegenstrom) und der über den Stack beobachteten Temperaturerhöhung.

Die Reaktion der PEFC auf Variationen der anodenseitigen Befeuchtung ist in der Regel weniger sensitiv als auf der Kathodenseite. Abhängig von den relativen Druckverhältnissen, der Befeuchtung des Anodengases und der Auswahl an Gasdiffusionslagen werden Flutungs- bzw. in einigen Fällen auch Austrocknungseffekte beobachtet.

3. Typische Betriebsbedingungen für ZSW PEFC-Stacks im Reformatbetrieb

Reformatbetriebene PEFC-Stacks Typ BZ-100 des ZSW werden üblicherweise wie folgt spezifiziert und unter folgenden Randbedingungen betrieben:

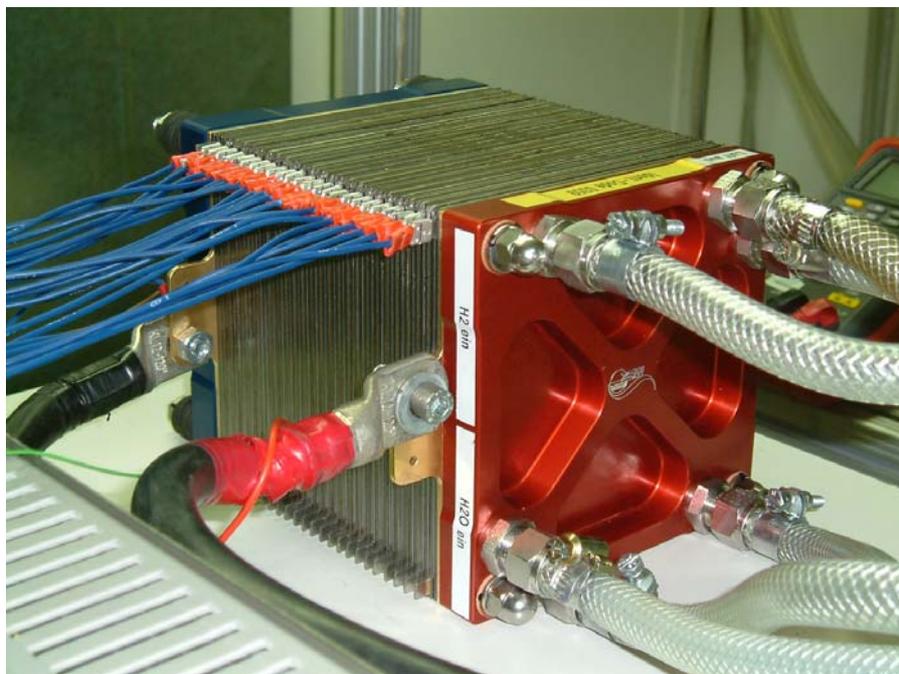


Abbildung 8: ZSW-Stack Typ BZ-100

3.1 Elektrische Daten

Leistungsanschluss:	Vergoldete Kontaktflasche mit Schraube M6
Maximalstrom bei Nennbetriebsbedingungen	70A
Minimale Starttemperatur	5 °C
Maximalstrom bei Startbedingungen T ₁ T ₂ T ₃ (Kalter Stack)	Welche Temp.? 5% bei 10°C 30% bei RT
DC-Nenn-Leistung (Brutto)	500 W (bei 24 Zellen, mittlere Zellspannung 0,6 V)
Kurzfristige Überlast für 2 sec.	1,5 fache Nennlast
Leerlaufspannung	22 V
Nennspannung	0,6 V/Zelle (Mittelwert über alle Zellen)
Minimalspannung (bis Lastabwurf erforderlich ist)	0,5 V/Zelle (Mittelwert über alle Zellen) 0,3 V (Einzelzelle)
Einzelzellmonitoring	Notwendig

3.2 Technische Daten

Typ:	Polymermembran Brennstoffzelle (PEM-FC)	
Elektrolyt:	Perfluorierte Sulfonsäure GORE Typ 57xx	
MEA-Typ	3 - X Lagen	
Art der Bipolarplatte	Grafit Komposite, thermoplastisch Gasverteilerfeld zerspanend bearbeitet	
Degradationsrate pro Zelle	<15 µV/h pro Zelle @ 55 °C (100 % RH, H ₂ / Luft)	
Anzahl Start/Stopp-Zyklen bezogen auf Lebensdauer	> 100 bis zu 80 % der Bruttoleistung	
Anzahl der Zellen:	24	
Zellfläche:	100 cm ²	
Abmessungen Aktivfläche 5-cm-Raster (lt. Empfehlung BERTA AK):	z.B. 100 x 100 mm	
Außenabmessungen:	Lichtes Maß einschl. Endplatten	Maß über alles
	Länge	24,5 cm < 28 cm
	Breite	14 cm

	Höhe	17 cm	
	Gewicht / kg	6 kg	
Befestigungsart		Separate Halteklammern an der Endplatte	
Einbaulage		Kontaktfahnen seitwärts, H ₂ -ein nach oben	
Einzelzellspannungsüberwachung		Kontakte vorhanden	
Kühlmedium		Luft / flüssig	
Oberflächentemperatur Max.		65°C an der Stackoberfläche	
Leckrate gemäß IEC 62282-2 Ed. 1.0 in cm ³ /min		Anodenseitig	< 20
		Kathodenseitig (wenn anwendbar)	< 20
		Kühlmittelseitig (wenn anwendbar)	< 15
Leckage nach außen in cm ³ /min		Alle Eingänge gleichzeitig bedrückt, Ausgänge verschlossen	
		< 20	
Brennbare Masse (kg) gemäß IEC 62282-2 Ed. 1.0		< 5 kg	

3.3 Medienversorgung Anode

Medienzusammensetzung	Reformat > 70% H ₂ (Taupunkt ~ 50°C)
Zulässige Verunreinigungen	< 10 ppm CO (Reformat ohne air-bleed)
Medienanschluss	Klemmring 12 mm
Position:	Endplatte Anodenseitig
Maximaler Gasumsatz	≥ 70% (bezogen)
Gasumsatz (Nennlast / Teillast)	Herstellerempfehlung
Gasfluss bei Nennlast	l/min h ₂
Empfohlener Eingangsdruck	100 - 300 hPa
Max. Eingangsdruck	800 hPa
Druckverlust	< 50 hPa Druckabfall @ Nennlast / @ min. Umsatz
Maximale Eintrittstemperatur	80°C
Anodenauslass	Offen zum System

3.4 Medienversorgung Kathode

Medienzusammensetzung	Luft (Taupunkt ~60 °C)
Zulässige Verunreinigungen	N ₂ , O ₂ < 1%, CO ₂ , H ₂ O
Medienanschluss	Klemmring 12 mm
Position:	Endplatte anodenseitig
Maximaler Gasumsatz	> 40 % (abhängig von Feuchte und Betriebspunkt)
Gasumsatz (Nennlast / Teillast)	40 % @ 55 °C

Empfohlener Eingangsdruck	200-500 hPa
Max. Eingangsdruck	800 hPa
Druckverlust	< 150 hPa Druckabfall @ Nennlast / @ min. Umsatz
Max. Eintrittstemperatur	80°C

3.5 Medienversorgung Kühlmittel

Medium	(demineralisiertes) Wasser Leitfähigkeit: < 10 μ S/cm
Medienanschluss	Klemmring 12 mm
Position:	Endplatte anodenseitig
Max. Eingangstemperatur	75 °C
Max. Temperaturdifferenz	10 K
Kühlmittelfluss in l/h bzw. m ³ /h	
Kühlmittelüberdruck	max. 100 hPa
Druckabfall über Kühlzone	< 100 hPa

3.6 Empfohlene Betriebsbedingungen

Lastbereich	50 - 500 W
Anode	Gasfluss bei < 100 mA/cm ² : 2,4 l/min (H ₂). Umsatz oberhalb 100mA/cm ² : 70 % Taupunkt: 30 - 50 °C
Kathode	Luftfluss bei < 100 mA/cm ² : 10,5 l/min Umsatz oberhalb 100mA/cm ² : 40 % Taupunkt: 55 °C
Temperaturgradienten bei Lastwechsel	< 10 K/min
Umgebungstemperatur des Stack	2°C - 45°C
Lagerbedingungen:	In Innenräumen bei Temperaturen von +5 bis +60 °C
Transportbedingungen Vibrationsfestigkeit, Schockfestigkeit	Derzeit keine Angaben
Umgebungsbedingungen	Spritzwassergeschützt, Atmosphärendruck Umgebungstemperatur +5 °C bis + 60 °C
Gasdifferenzdruck Anode / Kathode	< 300 hPa

3.7 Testprogramm

Lecktest	
Isolationsprüfung	

3.8 Weitere Betriebsempfehlungen

Brennstoffzellenstack und Gasversorgungseinheit sollten über eine abgestimmte Steuerungs- und Regelungseinheit verfügen. Es wird empfohlen den Brennstoffzellenstack stromgeführt zu belasten, da so eine einfache Rückkopplung mit dem Gasversorgungssystem möglich ist. Folgende Betriebszustände sollten sicher vermieden werden:

- Mittlere Zellspannung < 400 mV für mehr als 2 Minuten
- Einzelne Zellspannung < 200 mV für mehr als 2 Minuten
- Einzelne Zellspannung < -200 mV für mehr als 20 sec
- Einzelne Zellspannung < -700 mV für mehr als 500 msec
- Zellspannungssoszillationen über mehr als 200 mV

Es wird empfohlen bei Auftreten der oben genannten Störungen bei konstantem Gasfluss und unveränderter Befeuchtung, die Stromentnahme am Brennstoffzellenstack auf ein Drittel zu reduzieren. Sollte die Störung anhalten sollte ein weiterer Versuch einer „Drittellung“ gemacht werden. Verläuft dieser ebenfalls erfolglos, sollte der Stack außer Betrieb genommen werden. Bei Drittellung der Stromentnahme werden entsprechend weniger H₂ und Luft umgesetzt. Dies führt zu geringerer Wasser- und Wärmeproduktion im Stack, was eine Austrocknung bzw. Auskühlung zur Folge hat. Ferner ist der Heizwert des Anodenabgases höher. Dies muss bei der Dimensionierung der Verwertungseinheit für Restwasserstoff (Reformerbrenner, Abgasbrenner, Ventilation etc.) berücksichtigt werden. Wird der Fehler nicht mehr beobachtet, so kann die Last innerhalb eines Intervalls von 10 sec bis 10 min idealerweise über eine Rampenfunktion wieder auf den Ausgangswert gestellt werden.

Regelungstechnisch sollte vorgesehen werden, dass der Brennstofffluss der elektrischen Stromanforderung um etwa 0,5 bis 1 sec vorausseilt. Dies muss auch beim Durchlaufen von Lasttransienten zu beachtet werden. Generell ist empfehlenswert:

- Lasterhöhung: zunächst Erhöhung der H₂-Erzeugung, nachfolgend Erhöhung der Strombelastung.
- Lasterniedrigung: zunächst Reduktion der Strombelastung, nachfolgend Reduktion der H₂-Erzeugung.

Während des Durchlaufens von Transienten muss die Reaktion des Brennstoffzellenstapels beobachtet werden.

Handelsübliche Pt/Ru-Katalysatoren tolerieren einen kontinuierlichen CO Gehalt von 10 ppm im Anodengas. Hierbei ist ein großer Anteil der verfügbaren Katalysatorplätze bereits besetzt. CO-Transienten sind grundsätzlich tolerierbar, da die CO-Vergiftung reversibel ist, sofern ein Umpolen der Zelle vermieden werden kann. Kurzfristig können höhere CO-Gehalte toleriert werden. Die CO-Toleranz bemisst sich an der verfügbaren Katalysatormenge.

- CO-Gehalte von 20 ppm werden typischerweise für Stunden vertragen
- Die Zufuhr von Gas mit mehr als 50 ppm CO über einen Zeitraum von mehreren Minuten sollte vermieden werden.

Wasserstoff und CO konkurrieren um freie Katalysatorplätze. Zur Regeneration einer CO vergifteten Elektrode genügt in der Regel der Betrieb mit „sauberem Gas“ bei verringertem Umsatz. Unter Umständen kann zur Regeneration auch die Betriebstemperatur angehoben werden. Sofern keine andere Schädigung der Zelle vorliegt, ist eine vollständige Regeneration durch Spülen der Anodenseite mit Luft nach Außerbetriebsetzung der Zelle zu erwarten.

Die Belastung der Zelle mit H₂S muss vermieden werden. Sulfidischer Schwefel wird auf der Katalysatoroberfläche kumuliert und belegt die Oberfläche quantitativ und irreversibel. Oxidative Entfernung von sulfidischem Schwefel führt zu Sulfiten bzw. Sulfaten, die ihrerseits auf der Edelmetalloberfläche haften und sie belegen.

Die Belastung mit aromatischen Kohlenwasserstoffen sollte vermieden werden. Eine entsprechende Vergiftung der Katalysatoren ist nur „teilreversibel“.

Olefine und Aldehyde sollten ebenfalls vermieden werden. Zwar sind kathodenseitige Vergiftungen reversibel, über anodenseitige Vergiftungen liegen bisher noch keine gesicherten experimentellen Daten vor.