



Mitteilung

MOZART_M_Uebersicht_10-03-31

Datum: 2010-03-31

<https://purl.org/mozart/M2010-03-31>

Torben Koberg, Dieter Scholz
Aircraft Design and Systems Group (AERO)
Department F&F, HAW Hamburg
Berliner Tor 9, 20099 Hamburg

MOZART – Health Monitoring von Brennstoffzellensystemen in der Luftfahrt : Übersicht über ein Forschungsprojekt

Kurzreferat

Das Forschungsprojekt "MOZART – Health Monitoring von Brennstoffzellensystemen in der Luftfahrt" befasste sich mit der Zustandsüberwachung von Brennstoffzellensystemen. Gegenstand der Forschung waren Untersuchungen zum Stand der Technik des Health Monitorings. Basierend auf der Ermittlung des Standes der Technik zum Health Monitorings und den entsprechenden Überwachungsmöglichkeiten sollten Systemkomponenten gewählt werden, welche für das Health Monitoring von Relevanz sind. Mit den definierten Systemkomponenten sollte ein Health Monitoring System definiert werden, welches zur Untersuchung des Systemverhaltens dient. Bei der Betrachtung der Umwelteinflüsse sollten sowohl Kurz- als auch Langstreckenflüge sowie Zeiten am Boden berücksichtigt werden. Eine Untersuchung unter Variation von Lastzyklen der Brennstoffzelle sollte in die Untersuchung einbezogen werden. Auf Basis der genannten Untersuchungen sollten Wartungskonzepte evaluiert, Wartungsintervalle festgelegt und Wartungskosten reduziert werden.

1 Einleitung

Der offizielle Langtitel des Projektes ist dieser: "MOZART – Spitzencluster Luftfahrt – Metropolregion Hamburg; Leuchtturmprojekt 1: Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle (Health Monitoring von Brennstoffzellensystemen in der Luftfahrt)". Kurz: MOZART. Die Abkürzung setzt sich zusammen aus (unterstrichen): Health Monitoring von Brennstoffzellensystemen in der Luftfahrt.

MOZART war Teil der Spitzenclusterinitiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Gefördert wurden das Luftfahrtcluster der Metropolregion Hamburg Leuchtturmprojekt 1: "Kabinentechnologie und innovative Brennstoffzellenanwendung" (Federführer: Airbus)

Die Forschungsprojekt Gruppe AERO der HAW Hamburg arbeitete im Unterauftrag von Airbus. Die Dauer war angesetzt mit 2 Jahren und 3 Monaten. Offizieller Start war der 01.07.2009. **Im März 2010 (nach 9 Monaten) wurde das Projekt MOZART von Airbus beendet. Grund: Budgetkürzungen bei Airbus.**

Die Abwicklung für die HAW Hamburg hatte die Hamburg Innovation GmbH übernommen. Projektträger für den Spitzencluster-Wettbewerb war der Projektträger Jülich (PTJ).

Die Stelle eines Wissenschaftlichen Mitarbeiters war mit Herrn Dipl.-Ing. Torben Koberg besetzt. Herr Koberg war Promotionsstudent an der HAW Hamburg. Er hat die Organisation des Projektes und die Simulation der Brennstoffzelle vorangetrieben.

Philip Krammer und Oliver Meier beschäftigten sich mit einer wichtigen Teilaufgabe: Die Abschätzung der von einem elektrischen Enteisungssystems benötigten Leistung. Die Teilaufgabe ergab sich durch eine separate Anforderung durch das Future Project Office bei Airbus in Hamburg. Die Beantwortung dieser Frage ist wichtig, weil die elektrische Leistung (abhängig von der gewählten Systemarchitektur) dimensionierend für die Brennstoffzelle an Bord sein kann. Zu dieser Teilaufgabe konnten Ergebnisse in verschiedener Form erzielt werden – trotz der kurzen Laufzeit des Projektes: Technical Note, studentisches Projekt, Kongressveröffentlichung, Methode als Excel-Tabelle.

Parallel zum Forschungsprojekt in der Forschungsgruppe AERO wurde ein zweites Projekt an der HAW Hamburg durch Prof. Dr. Wolfgang Georg Winkler angeboten und von Airbus beauftragt mit dem Titel "Verdampfungungskühlung in H2 betriebenen PEFC Systemen".

Airbus hatte in Hamburg ein großes Forschungsnetzwerk zum Thema "Brennstoffzelle" aufgebaut. Die Wissenschaftlichen Mitarbeiter, ihre Organisation und Stichworte zu ihren Themen zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Das von Airbus aufgebauten Hamburger Forschungsnetzwerk "Brennstoffzelle":
Wissenschaftliche Mitarbeiter, ihre Organisation und Stichworte zu den Themen.

Hauke Lüdders	TUHH	Systemanalyse
Enno Vredenburg	TUHH	Cooling Center
Arno Lücken	HSU	Elektrisches Netz
Rasmus Kölln	HSU	Power Management
Andreas Gießmann	HSU	DC/DC Wandler
Sebastian Mock	HSU	Wasserstofftank
Felix Oehme	HSU	Cooling Center
Tobias Kut	HSU	Elektromagnetische Verträglichkeit
Martin Schultze	HSU	Fuel Cell
Alireza Riazi	HAW	Verdampfungungskühlung in H2 betriebenen PEFC Systemen
Torben Koberg	HAW	Health Monitoring von Brennstoffzellensystemen

2 Angebotener Leistungsumfang

Zunächst war geplant Airbus bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung von Brennstoffzellensystemen zu unterstützen. Aus den Diskussionen ergab sich dann aber die Anforderung Brennstoffzellen hinsichtlich ihres technischen Zustandes zu überwachen (health monitoring). Daher wurde der folgende Leistungsumfang gemeinsam mit Airbus erarbeitet, Airbus angeboten und von Airbus beauftragt:

- Stand der Technik zum Health Monitoring: Nutzen – Aufwandsanalyse.
- Definition von Systemkomponenten die in das Health Monitoring aufgenommen und überwacht werden sollen (z.B. Kompressor, Stack, ...)
- Untersuchung von Umwelteinflüssen auf den Stack durch Überwachung der Zellspannung, Stoffströme durch Kühler und Kondensator u.v.m. Dabei Unterscheidung zwischen atmosphärische Bedingungen im Reiseflug (Langstrecke vs. Kurzstrecke) und am Boden. Parameter die unter anderen Einfluss auf das System Brennstoffzelle ausüben sind: CO, SO₂ (z.B. bis 130 ppm am Flughafen in Shanghai), Ozon, Salzwasser Verunreinigungen der Luft, z. B: Staub, Abgasstrahl eines Triebwerkes.
- Untersuchung des Stacks bei Teil- und Vollastbetrieb (Condition Monitoring, Trend Monitoring). Untersuchung in Hinblick auf ein zukünftiges "stationäres Flugzeug" durch Verminderung von Lastzyklen und Erhöhung der Lebensdauer. Berücksichtigung von Technologiefaktoren (z.B. Generationswechsel der Brennstoffzellentechnologie in 5 Jahren durch neue Membrane, etc.)
- Definition von Subsystemen / Elementen / Filter (Ozonfilter für Polflüge, Aktivkohlefilter für den Bodenbetrieb) die einen dauerhaften Betrieb der Brennstoffzelle gewährleisten.
- Abschlussbetrachtungen: Wartungskonzepte, Strategien, Kosten, etc.
- Ergebnisbericht

Seit Anfang 2008 lief in der Forschungsgruppe AERO das Projekt "PAHMIR – Preventive Aircraft Health Monitoring for Integrated Reconfiguration" zusammen mit Airbus. Es sollten Erkenntnisse aus PAHMIR auch von MOZART übernommen werden.

3 Bürokratie zum Projektstart

Das Airbus Supplier Portal ist eine Plattform zum Datenaustausch zwischen Airbus und Zulieferern. Es sollte auch zur Kommunikation mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern der TUHH, HSU und HAW Hamburg genutzt werden. Es bestand die Problematik, dass Torben Koberg bei der Hamburg Innovation GmbH angestellt werden sollte und somit die Verbindung zur HAW Hamburg lediglich über den Promotionsstudentenstatus gegeben war. Die Hamburg Innovation GmbH kam als Vertragspartner für Airbus nicht in Frage. Die Justitiarin der HAW Hamburg sah keine Relevanz dem Vertrag zum Airbus Supplier Portal zuzustimmen. Außerdem bemängelte sie, dass der Airbus Vertrag auf französischem Recht basiert. Der Kanzler der HAW Hamburg sollte entscheiden. Der Vertrag wurde dann an den Präsidenten der HAW Hamburg weitergegeben und es passierte nichts. Solche Vorgänge sind leider kein Einzelfall, sondern symptomatisch für das Vorgehen an der HAW Hamburg. Die Inbetriebnahme eines Laptops konform mit Airbus-Anforderungen gestaltete sich ähnlich schwierig. Solche Probleme entstehen, wenn zwei große Organisationen zusammenarbeiten sollen / wollen, die unflexibel sind und jeweils auf ihren Prozessen beharren.

4 Literaturrecherche zur Zustandsüberwachung

Kolerus 2008 KOLERUS, Josef; WASSERMANN Johann: *Zustandsüberwachung von Maschinen – Das Lehr und Arbeitsbuch für den Praktiker*. Renningen : Expert Verlag, 2008

Das Buch "Zustandsüberwachung von Maschinen" gibt eine grundlegende Einführung in das Thema der Zustandsüberwachung. Es orientiert sich an der Vibrationsmessung von mechanischen Anlagen, wodurch es nur bedingt für die Brennstoffzelle (BSZ) adaptiert werden kann. Dennoch werden Methoden aufgezeigt, welche auf Basis "Direkten Fourier Transformation" eine Analyse der Messdaten erlauben. Weiterhin werden Messsysteme erläutert, welche in Verbindung mit rechnergestützter Software verwendet werden können. Ferner werden grundlegende Methoden und Strategien der Signalanalyse zur Fehlererkennung und Diagnose dargelegt, auch hier werden Erklärungen auf Basis der Vibrationsmessung vollzogen, welche jedoch nur bedingt auf die bestehende Problematik adaptiert werden können.

Fazit: Leider nur für die Grundzüge der Zustandsüberwachung zu gebrauchen, da das Buch stark an die Messung von Schwingungen angelehnt ist. Jedoch können die Methoden des Buches adaptiert werden.

Sturm 1990 STURM, Adolf; FÖRSTER, Rudolf: Maschinen- und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung. Stuttgart : Teubner, 1990

Das Buch "Maschinen und Anlagendiagnostik" bietet eine tiefgreifende theoretische Einführung in die Zustandsüberwachung. Folgend sind Diagnoseverfahren nach den relevanten Gebieten der thermischen Verfahren, Schallemissionsverfahren und Schwingungsverfahren klassifiziert. Auf Grund der ausführlichen Darlegung der Schwingungsdiagnostik nach **Kolerus 2008** muss dieser Teil nicht tiefgehend untersucht werden. Auf Grund der thermischen Zusammenhänge, welche an der BSZ auftreten, sollte das Kapitel über thermische Diagnoseverfahren vertiefend behandelt werden. Ebenso wie die Schall- und Schwingungsdiagnostik, welche nicht direkt getrennt werden kann, da Schall und Schwingung gleicher Natur sind.

Fazit: Hervorzuheben sind die Kapitel 8 und 9, welche sich mit der Nutzung von Prozessparametern zur Schädigungsdiagnostik und der Gestaltung von Diagnosesystemen befassen.

5 Hinweise von Airbus

Manuell Intelligent Energy

Beschreibung des BSZ-Prüfstands der Firma Aerotec. Es werden die Grundzüge der Brennstoffzelle beschrieben, wobei der Fokus dieses Dokuments auf der Bedienung liegt. Dennoch werden Informationen über die Überwachungsmöglichkeiten gegeben und es wird eine Übersicht über das verwendete Health Monitoring Tool der BSZ gegeben. Die Spezifikationen des Systems und die System Operating Environment Requirements werden ebenfalls angegeben. Das BSZ-Interface gibt einen groben Überblick über Input- und Outputdaten, siehe Bild 1.

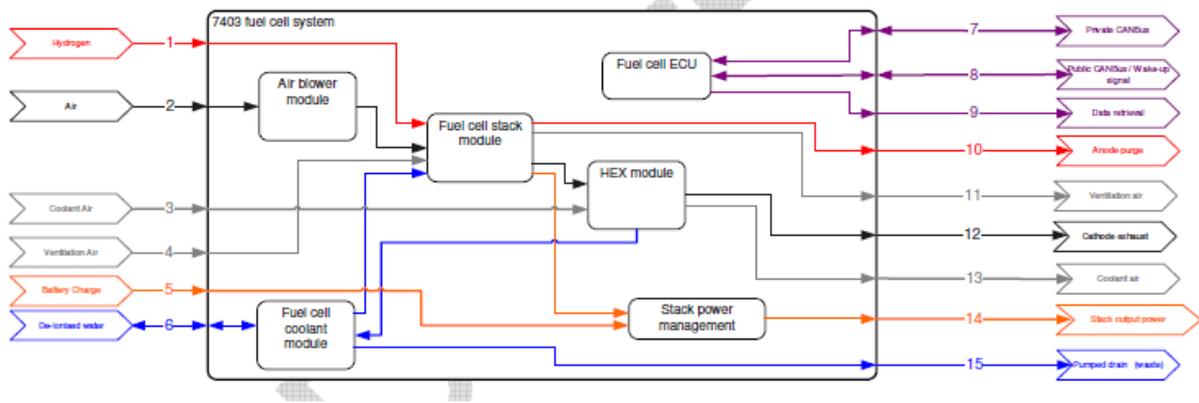


Bild 1: Schematic Interfaces Fuel Cell System

Airbus Requirements

Über das von Airbus verwendete Requirement-Tool DOORS sind Anforderungen (requirements) für die unterschiedlichen Systeme des A30x formuliert. Da bisher kein Zugang zu diesem Programm möglich war, sind Excel-Exporte erstellt worden. Diese sind nicht besonders angenehm zu lesen, geben aber eine klare Definition des entsprechenden Systems. Besonders von Interesse ist natürlich das BSZ-System (FCS.xls). Hier wird eine schematische Abbildung des Systems wiedergegeben, welches einen Überblick über die Komponenten des Systems gibt und deren Massenströme beschreibt.

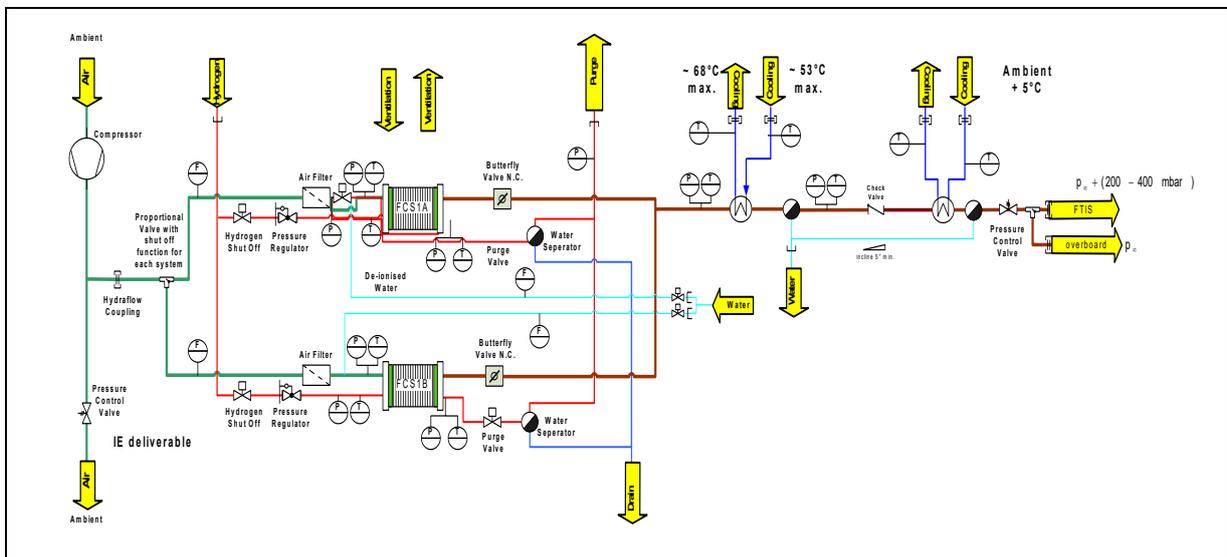


Bild 2: BSZ-System nach Airbus Requirements

Fazit: Das Dokument gibt lediglich Informationen über die erforderlichen Anforderungen wieder, es werden allerdings keine weiteren Informationen wiedergegeben.

DT-ALEGrO Data Basis for Design (DBD)

Das Dokument beschreibt die Ziele und die Konfiguration des A30x Projekts. Dabei wird hier besonders auf die Systemkomponenten eingegangen. Relevante Daten bzgl. der Flugmission, unterteilt in die einzelnen Flugphasen, und den zugehörigen Außenbedingungen über die Flugmission werden gegeben. Kapitel 3.4.1 gibt eine Übersicht über die Aufgaben eines Turn-Around, wobei auf die unterschiedlichen Energieversorgungssysteme eingegangen wird. Anhand dieser Übersicht kann eine Abschätzung über die On-Time der BSZ gemacht werden.

Hervorzuheben ist das Kapitel 4, dort wird eine Übersicht über die erforderlichen Systeme gegeben, die zur Realisierung der Ziele des Projekts benötigt werden. Hier wird explizit auf die Anforderungen der BSZ eingegangen, sowie den Betriebsbedingungen. Folgend wird im Kapitel 4 auf weitere Subsysteme eingegangen. (LH2 Tank, Cooling Center, Environmental Control System (Thermal Management), Electrical Network). In Kapitel 5 wird die Systemarchitektur dargestellt und auf die thermischen Daten, die Massenströme der BSZ inkl. BSZ-Subsystemen eingegangen. Weiterhin wird eine Electrical Load Analysis dargestellt.

Fazit: Leider sehr umfangreich, aber es können sehr viele Informationen aus dem Dokument gewonnen werden.

DTP Multi Functional Fuel Cell Application (PPT)

Allg. Präsentation des ALEGrO Projekts in dem die Ziele vorgestellt werden. Inkl. Spezifikationen der erforderlichen technischen Anforderungen bzgl. der BSZ. Es werden ebenso Randbedingungen definiert, welche für das BSZ-System relevant sind. Das BSZ-System wird wie in Bild 3 dargestellt. Es werden Überlegungen zum Auslegungspunkt angestellt (Bild 4).

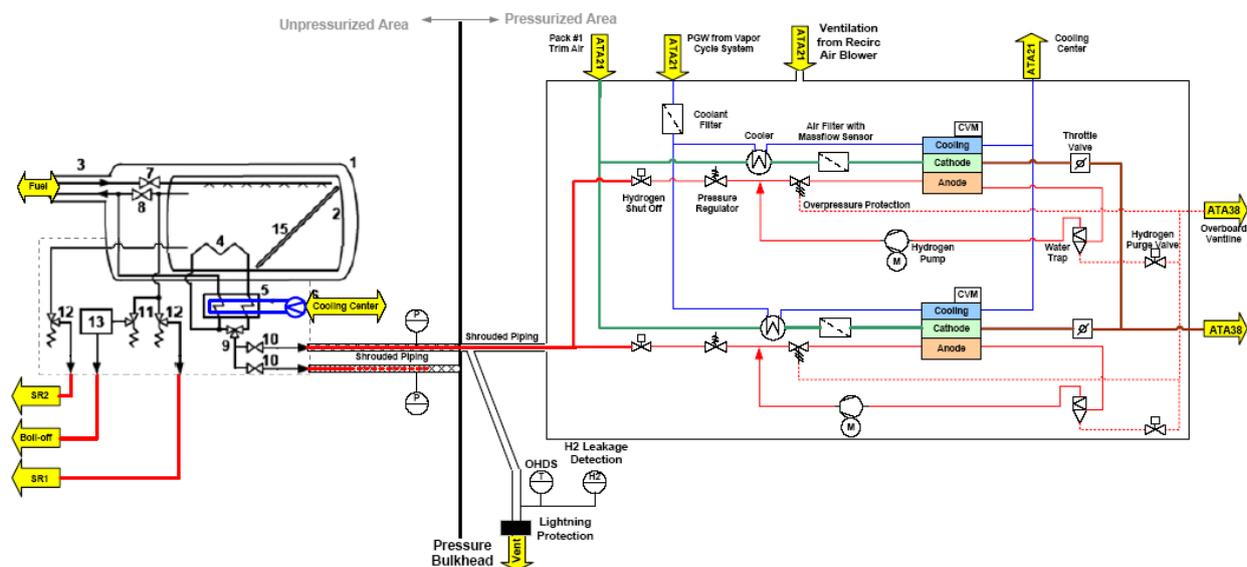


Bild 3: BSZ-System inkl. H₂-Tank

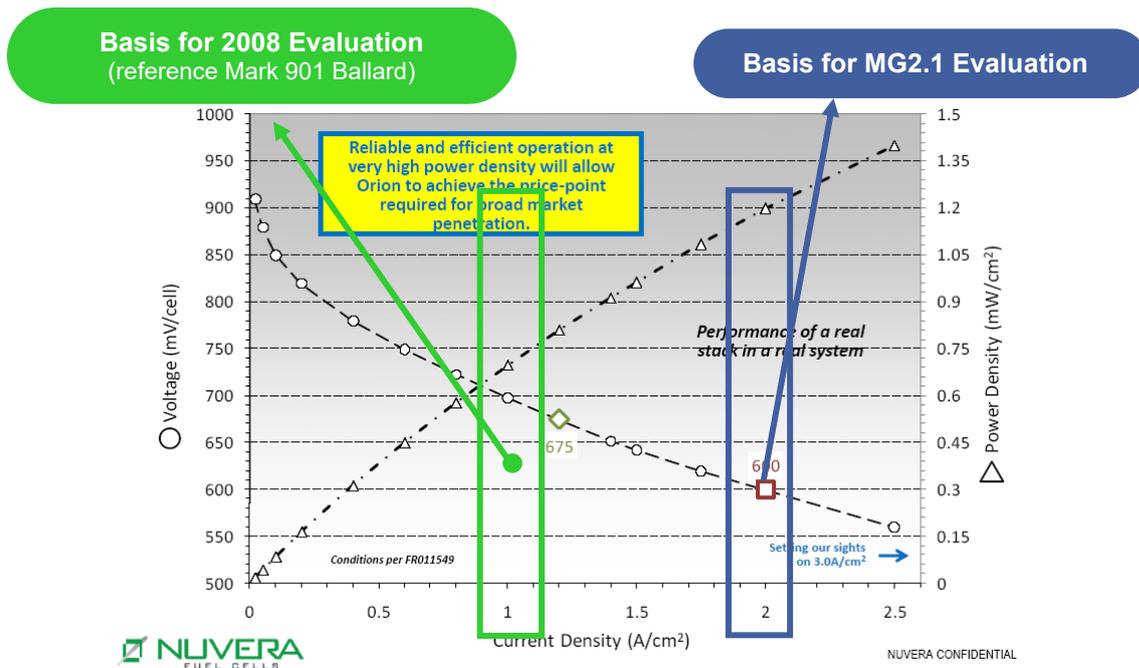


Bild 4: Auslegungspunkt NUVERA Fuel Cell

ELA_A30x_Power_Demand_vs_Flight_Phases_v8 (Excel)

Gibt die Leistungsanforderungen über die Flugmission (Pushback, Start, Takeoff....) an. Es werden die Leistungsanforderungen der einzelnen Systeme (Environmental Control System, ...) und der Flugphasen (main engine start, ...) angegeben.

6 Patentrecherche

Folgende Patente erwiesen sich als besonders hilfreich in Kontext des Forschungsprojektes.

Titel: Anordnung zur Überwachung des Zustands von Brennstoffzellen-Modulen

Patentnummer: DE 43 38 178 A1

Offenlegungstag: 11.05.1995

Anmelder: Licentia Patent-Verwaltung-GmbH, 60596 Frankfurt, DE

Das Patent befasst sich mit der Strom- und Spannungsmessung von mindestens zwei in Reihe geschalteten BSZ. Die Schaltung ist als Brückenschaltung ausgeführt und bemerkt Abweichungen in Spannung und Strom, wodurch ein permanenter Abgleich zwischen den Zellen erfolgt. Weichen Parameter stark voneinander ab, so wird eine Fehlermeldung produziert.

Titel: PEM Fuel Cell Monitoring System

Patentnummer: 5 763 113

Offenlegungstag: 09.06.1998

Anmelder: General Motors Corporation

Das Patent von General Motors Corporation bedient sich bei der Messung der Leistung der Stack Spannung und dem H₂-Gehalt des kathodenseitigen Abgases. Durch Differenzmessung und die daraus folgende Trendanalyse wird auf den Zustand der BSZ zurückgeschlossen. Es wird ein klares Vorgehen für diese Methode gezeigt, wobei auf die prinzipielle mathematische Methodik eingegangen wird. Diese beruht hauptsächlich auf der Berechnung von Differenzialquotienten (dV_s/dt) bzw. (dH_2/dt) Diese Daten werden folgend mit bereits bekannten Konstanten verglichen.

Weitere Patente sind vorhanden, die Relevanz ist jedoch im Einzelfall für das Projekt MOZART zu prüfen.

7 Literaturrecherche zur Einarbeitung "MATLAB"

Beucher 2006 BEUCHER, Ottmar: *MATLAB und Simulink*. München : Pearson Studium, 2006

Das Buch gibt eine sehr grundlegende Einarbeitung in MATLAB und Simulink. Für den absoluten Anfänger ist dieses Buch sehr geeignet. Es wird aber für die weiterführende Arbeit nicht ausreichend sein.

Stein 2007 STEIN, Ulrich: *Einstieg in das Programmieren mit MATLAB*. München : Hansa Verlag, 2007

Das Buch von **Stein 2007** gibt, ebenfalls wie **Beucher 2006**, eine grundlegende Einführung in das Programm MATLAB, jedoch sind die Ausführungen von **Stein 2007** wesentlich ausführlicher und mit mehr Hintergrundinformationen verknüpft. Leider wird in diesem Buch dem Tool Simulink keine große Beachtung geschenkt.

8 Literaturrecherche zur Einarbeitung "Brennstoffzelle"

Larminie 2003 LARMINIE, James; DICKS, Andrew: Fuel Cell Systems Explained. West Sussex : Wiley, 2003

Dieses Buch behandelt ausführlich die Grundlagen von Brennstoffzellen und geht dabei auf die Effizienz, die Leerlaufspannung und die thermodynamischen Grundlagen der BSZ ein. Weiterhin werden mögliche Zukunftstechnologien behandelt. Kapitel 4 des Buches befasst sich ausschließlich mit PEM BSZ. Die Unterkapitel sind in die relevanten Themen des Wassermanagements, der Kühlung und dem operativen Druck unterteilt. Abschließend sind in dem Kapitel Beispielanlagen wiedergegeben, welche ebenso erklärt werden. Kapitel 9 behandelt Komponenten von BSZ-Anlagen, dabei geht das Buch auf Kompressoren, Turbinen, Fan, Gebläse und Pumpen ein.

O'Hayre 2009 O'HAYRE, Ryan; CHA, Suk-Won; COLELLA, Whitney; et al.: *Fuel Cell Fundamentals*. New Jersey : Wiley, 2009

Das Buch wurde hauptsächlich ausgewählt, da es in Kapitel 14 um die Wechselwirkungen der Umwelteinflüsse und BSZ geht.

Pukrusphan 2004 PUKRUSPHAN, Jay T.; STEFANOPOULOU, Anna G.; PENG, Huei: *Control of Fuel Cell Power Systems – Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*. New York : Springer, 2004

Da im Anhang des Buches **Pukrusphan 2004** ein Fuel Cell Simulinkmodell enthalten ist, wurde dieses Buch angeschafft. Es kann sowohl für die Verifikation weiterer Modelle genutzt werden als auch zur Berechnung von Referenzwerten zum Vergleich mit Messdaten.

9 MATLAB / Simulink-Modell

Titel: **PEM Brennstoffzellen Simulationstool für den Flugzeugentwurf**

Das Tool wurde von Till Marquardt bereitgestellt und wurde im Rahmen von mehreren Diplomarbeiten erarbeitet. Die Dokumentation ist eine PowerPoint-Präsentation zu einer der Diplomarbeit (Power-Manager.ppt).

10 Normen

Als weitere Informationsquelle wurde auf Standardnormen zurückgegriffen. Hervorzuheben ist die **DIN ISO 17359**, diese zeigt den methodischen Ablauf zur Evaluierung eines Zustandsüberwachungssystems, welcher in Bild 5 dargestellt ist. Das weitere Vorgehen sollte sich an diesem Ablaufplans orientieren.

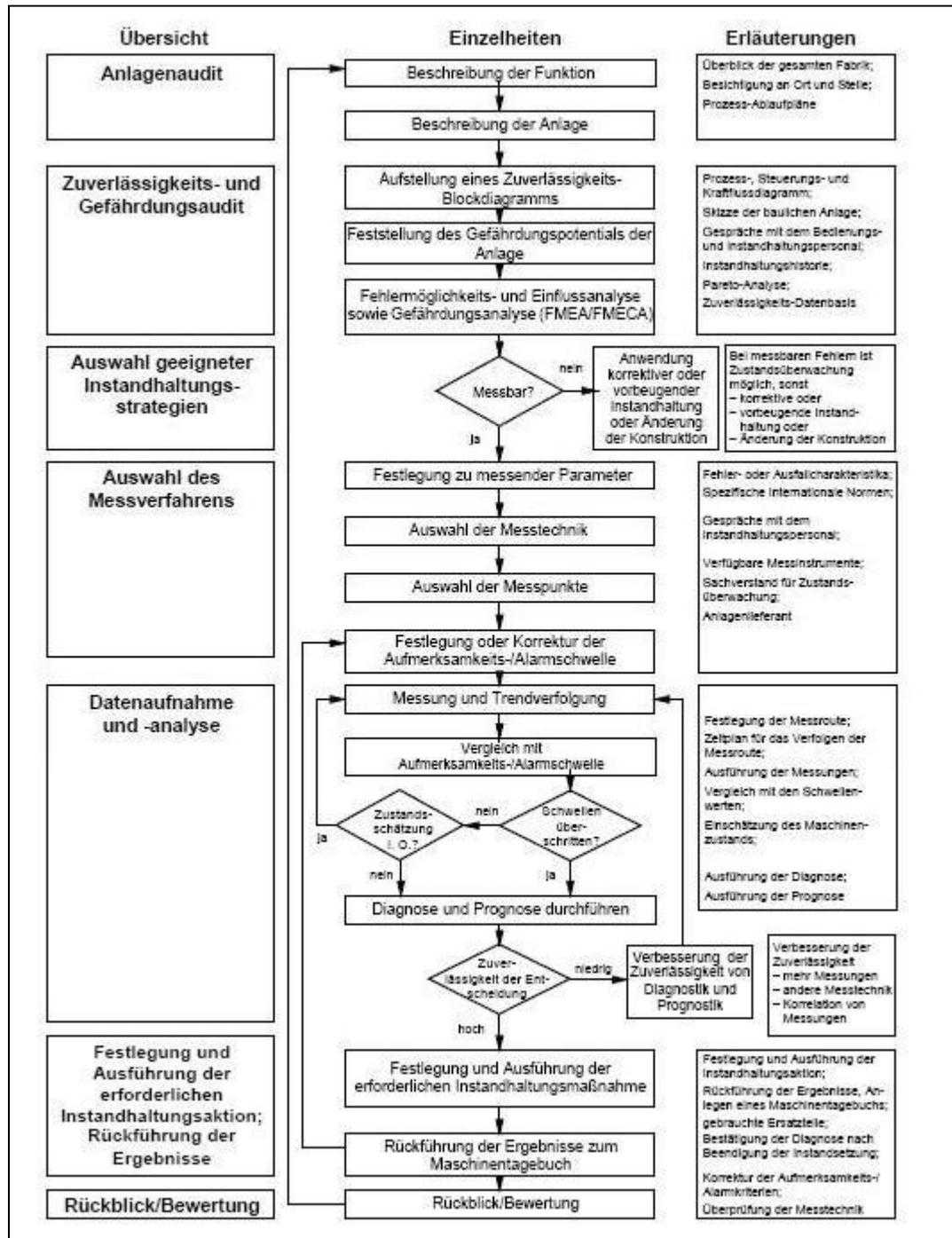


Bild 5: Ablaufplan zur Evaluierung eines Zustandsüberwachungssystems (DIN ISO 17359)

In der **DIN ISO 17359** wird empfohlen eine Komponenten-Parameterübersicht zu erstellen. Dies orientiert sich an den verwendeten Komponenten des Brennstoffzellensystems und den

zugehörigen Zustandsparametern. Die Übersicht in Tabelle 2 dient der Auswahl von zustandsrelevanten Parametern.

Tabelle 2: Systemkomponenten und Zustandsparameter des BSZ-Systems

	Kompressor	Wasserleitung	Luftleitungen	Wasserstoffleitungen	Luftfilter	Druckregler	Wasserabscheider	BSZ-Stapel	Ventile	Gesamtsystem	Wärmetauscher
Temperatur [°K]								X			X
Eingangsdruck [Pa]	X		X	X	X	X		X	X		
Ausgangsdruck [Pa]	X				X	X		X	X		
dm/dt ein O ₂ [kg/s]	X		X		X			X			
dm/dt aus O ₂ [kg/s]	X		X		X			X			
dm/dt ein H ₂ [kg/s]				X				X			
dm/dt aus H ₂ [kg/s]								X			
dm/dt ein H ₂ O [kg/s]		X						X			
dm/dt aus H ₂ O [kg/s]		X						X			
Strom [V]	X							X			
Spannung [A]	X							X			
Widerstand [ohm]								X			
Eingangsleistung [P ein]	X										
Ausgangsleistung [P aus]								X			
Geräuschentwicklung [dB]	X										
Schwingungen [f]	X									X	
Leckagen				X				X			
Wirkungsgrad [eta]								X			
Feuchtigkeit [%]		X	X					X			
Leistung [W]	X							X			
Anzahl Schaltvorgänge [n]									X		
Reynoldszahl											X

11 Überlegungen zum Monitoring System

Das Patent US5763113 von General Motors beschreibt ein PEM Brennstoffzellen Überwachungssystem. Dabei wird eine Methode aufgezeigt, welche auf Basis der Spannungsmessung vom BSZ-Stack und der Einzelzellen, sowie der Messung der H₂-Konzentration im Kathodenabgas funktioniert. Aufgrund der Messdaten kann auf eine Verschlechterung der BSZ-Leistung rückgeschlossen werden. Gründe für die Leistungseinbuße sind dabei klassifiziert in:

- Eindringen von CO in den BSZ-Stack
- Fluten der BSZ-Zellen mit H₂O
- H₂-Leckagen der Proton-Austausch-Membran
 - Defekte Dichtungen
 - Beschädigte Membran

Als Folge von zu hoher H₂-Konzentrationen auf der Kathodenseite der BSZ entstehen Einbußen der Stackeffektivität, welche direkt mit einer geringeren Zellspannung in einher geht. Der Einfluss einer erhöhten CO oder H₂O-Konzentration im Stack führt ebenso zu einer verringerten BSZ-Spannung. Die Messung des H₂-Gehalts im Kathodenabgas wird genutzt, um die Änderung der H₂-Konzentration über der Zeit zu bestimmen ($\partial H_2 / \partial t \approx \Delta H_2 / \Delta t$). In analoger Weise wird mit der BSZ-Stackspannung verfahren. D.h. es wird die Änderung der BSZ-Stackspannung über der Zeit ($\partial V_s / \partial t \approx \Delta V_s / \Delta t$) gemessen. Beide Parameter werden mit Grenzwerten verglichen. Weichen die gemessenen Werte von den Grenzwerten ab, so kann automatisch eine Korrektur erfolgen:

- Reduktion des H₂-Drucks
- Erhöhung des kathodenseitigen Massenstroms

Des Weiteren werden die Differenzspannungen ΔV_m der Einzelzellen verglichen.

$$\Delta V_m = V_{n+1} - V_n \quad n = 1, 2, 3, \dots, k \quad m = 1, 2, 3, \dots, k - 1$$

k Entspricht der Anzahl der Einzelzellen im Stack

m Zählindex der Differenzspannungen

n Zählindex Einzelzellen

Tritt eine Überschreitung von Grenzwerten der Differenzspannung ΔV_m auf trotz Korrektur des H₂-Drucks oder des kathodenseitigen Massenstroms, so kann auf eine H₂-Leckage geschlossen werden.

In Bild 6 wird das Verfahren als Ablaufdiagramm wiedergegeben. An Hand dieses Diagramms werden die Messmethodiken deutlich, welche dann auf die Fehlerkombinationen mit den entsprechenden Fehlerberichten eingeht.

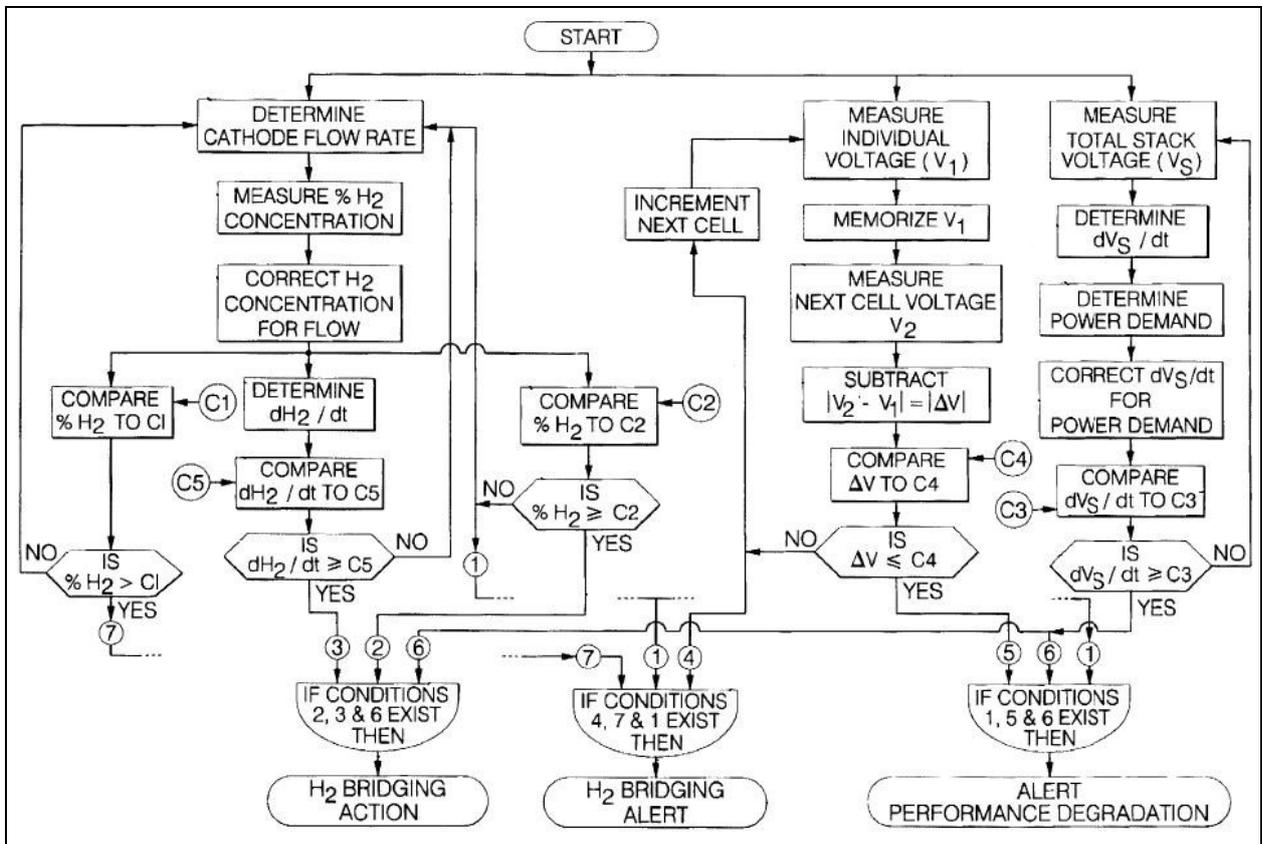


Bild 6: Ablaufdiagramm der Fehlerdiagnostik [Patent US5763113]

12 Parameter des Health Monitoring in BSZ-Systemen

Das BSZ-System (Bild 2) basierend auf von Airbus formulierten Requirements wird genutzt, für eine Betrachtung der zu überwachenden Zustandsparameter. Mit Bild 2 kann bereits auf zu erfassende Parameter geschlossen werden.

An Hand der DIN ISO 17359:2003-11 Anhang A wurde Tabelle 3 erstellt, welche die Subsysteme des BSZ-Systems klassifiziert und die möglichen Überwachungsparameter wiedergibt.

Aus dem von Intellent Energy (IE) bereitgestellten Manual geht hervor, dass folgende Sensoren bereits am Prüfstand vorhanden sind. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass weitere Sensoren vorhanden sind, jedoch keine Erwähnung im Manual von IE fanden.

Tabelle 3: Vorhandene Sensorik IE-Prüfstand

Sensor	Einheit	Berechnbare Größe	
Spannungssensor	[V]	Elektrische Leistung	[W]
Stromsensor	[A]		
Temperatursensor Kathodeneinlass	am [K]		
Massenstromsensor Kathode	der [kg/s]		
Temperatur Kathodenauslass	am [K]		
Wasserstoffsensor Detektion von H ₂ -Leckagen	zur [ppm]		

Zu den bereits erwähnten Sensoren wäre es möglich den Widerstand der BSZ zu messen, da Verluste durch Durchtrittsüberspannung bzw. Diffusionsüberspannung, Konzentrationsüberspannung und ohmsche Widerstände auftreten. Sollte folgend ein hoher Leistungsverlust entstehen, so kann auf eine der benannten Fehlerquellen zurückgeschlossen werden.

Für mechanische Komponenten und das Gesamtsystem kann eine Schwingungsmessung durchgeführt werden. Dabei ist zu untersuchen, ob eine 1-D-Messung ausreichend ist, oder eine Messung in den translatorischen Freiheitsgraden sinnvoll ist. Beide Messmethoden können mit Piezokristallen durchgeführt werden, wobei zu bedenken ist, dass die Datenmenge von einem 3D-Sensor wesentlich größer ist als von einem 1D-Sensor.