

**Gefährdungsbetrachtung von
PEM-Brennstoffzellen
hinsichtlich des Einsatzes in
explosionsgefährdeten Betriebsstätten**

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig



zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Thomas Horn
aus Braunschweig

eingereicht am: 21.01.2010
mündliche Prüfung am: 18.05.2010
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
Prof. Dr. Uwe Schröder
Dr.-Ing. Ulrich Johannsmeyer
Vorsitzender: Prof. Dr. Achim Enders

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2010

978-3-86955-495-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-495-2

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2004 bis 2010 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachbereiches „System- und Eigensicherheit“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig.

Ein besonderes Wort des Dankes möchte ich an meinen Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat richten, der mir die Möglichkeit eröffnete, diese Herausforderung anzunehmen und mir viel Geduld entgegenbrachte. Herrn Prof. Dr. Uwe Schröder danke ich für die bereitwillige Mitberichterstattung und Herrn Prof. Dr. Achim Enders für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Bedanken möchte ich mich im Besonderen bei dem Fachbereichsleiter der „System- und Eigensicherheit“ Herrn Dr.-Ing. Ulrich Johannsmeyer für die anregenden Diskussionen, die kritische Durchsicht meiner schriftlichen Ausarbeitungen sowie der Mitberichterstattung.

Herrn Dr.-Ing. Anton Schimmele möchte ich für die konstruktive und unkomplizierte Zusammenarbeit im Rahmen der Kooperation mit dem Unternehmen R. Stahl danken. Dem Arbeitsgruppenleiter für Explosionsgeschützte Feldbus- und Speisesysteme Herrn Dr.-Ing. Udo Gerlach bin ich für die Bereitstellung eines Teils der finanziellen Aufwendungen sehr verbunden. Die Durchführung des Projektes wäre ohne diese Unterstützung nicht möglich gewesen.

Dank schulde ich allen Kolleginnen und Kollegen des Fachbereiches für die Hilfsbereitschaft, die konstruktiven fachlichen Diskussionen, die angenehme Arbeitsatmosphäre und die gemütlichen Stunden. Insbesondere möchte ich mich bei den Technikerinnen und Technikern bedanken, die mich speziell beim Aufbau der Versuchsanlagen sowie zahlreicher Mess- und Teststände tatkräftig unterstützt haben. An dieser Stelle möchte ich mich gleichermaßen bei den Studenten bedanken, welche durch ihren Einsatz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein tiefster Dank gebührt meinen Eltern, meinen Geschwistern und meiner Frau für die nicht minder wichtige „außerakademische“ Unterstützung. Sie haben mir ein Studium ermöglicht, mir Selbstzweifel genommen, mir beigestanden, mir vertraut, mich ermutigt, mich aufgemuntert und mir ein unbeschwertes Dasein ermöglicht. Ohne dies wäre ich nie dort angekommen, wo ich jetzt bin.

Vielen herzlichen Dank.

Braunschweig, im Januar 2010

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Beurteilung von Zündgefahren, welche von einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle vor dem Hintergrund des Einsatzes in explosionsgefährdeten Betriebsstätten ausgehen. Die Ergebnisse der Einschätzung des Gefährdungspotentials dienen als Grundlage zur Entwicklung eines möglichen Explosionsschutzkonzeptes.

Unter Würdigung der Methodik einer Risikobeurteilung wird zunächst eine geeignete Vorgehensweise für eine Zündgefahrenbeurteilung der innovativen Technologie entwickelt. Über eine analytische, rein theoretische Betrachtung erfolgt die Identifikation wirksamer Zündquellen und deren Ursachen. Dabei werden die zur Verfügung stehenden Informationen unter Berücksichtigung von möglichen Fehlerzuständen einbezogen. Die Darstellungsform der Ergebnisse der Gefahrenidentifikation hinsichtlich potentieller Zündquellen geschieht anhand eines Ereignisablaufdiagramms. Daraus sind die verschiedenen Kausalitätsketten ersichtlich, die zum Auftreten einer potentiellen Zündquelle für eine die Brennstoffzelle umgebende explosionsfähige Atmosphäre führen können.

Die Einbindung der Ergebnisse experimenteller Versuche an Brennstoffzellentestanordnungen ermöglicht eine qualitativ orientierte Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit wirksamer Zündquellen. Es werden verschiedene Fehlerszenarien des Ereignisablaufdiagramms nachgestellt, um deren Kritikalität festzustellen. Dabei werden die Auswirkungen einer explosionsartigen Verbrennungsreaktion innerhalb einer Brennstoffzellentestanordnung, die Entzündbarkeit von Wasserstoff/Luft-Gemischen während des Brennstoffzellenbetriebs, die Zündfähigkeit innerer Zündquellen und das Erwärmungsverhalten bei Brenngasübertritt, Kurzschluss und Eduktverarmung untersucht.

Auf Grundlage der Zündgefahrenbeurteilung erfolgt die Entwicklung eines Explosionsschutzkonzeptes, welches die Auftrittswahrscheinlichkeit wirksamer Zündquellen in ausreichendem Maße reduziert.

Abstract

The aim of this study is to assess the potential ignition risks which arise from a polymer electrolyte fuel cell that is operated in explosion hazardous areas. The results of this risk assessment are used as a basis for the development of a possible explosion protection concept.

Taking due account of the general method of a risk assessment, a suitable procedure is, first of all, developed for an assessment of the ignition risks of this innovative technology. Via an analytical, purely theoretical study, effective ignition sources and their possible causes are identified. For this, the available information will be used, whereby possible fault conditions will be taken into account. The results of the identification of potential ignition sources are shown in an event diagram. In this diagram, the different causation chains are to be seen which can lead to the occurrence of a potential ignition source for an explosive atmosphere surrounding a fuel cell.

By integrating also the results of experiments which have been carried out on fuel cell test objects, a qualitative estimation of the probability of effective ignition sources becomes possible. Different fault conditions of the event diagram are investigated in order to discover critical states. In this process, the effects of an explosive combustion reaction within the test cell, the flammability of hydrogen/air-mixtures during fuel cell operation, the ignitability of inner ignition sources and the incremental heating in the case of fuel crossover, short circuit and educt depletion are investigated.

On the basis of the ignition source assessment, an explosion protection concept is developed which reduces the probability of the occurrence of effective ignition sources to a sufficient degree.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	23
2	Grundlagen der PEM-Brennstoffzellentechnik	25
2.1	Elektrochemisches Funktionsprinzip	25
2.2	Thermodynamik	26
2.3	Spannungs-Strom-Charakteristik.....	27
2.4	Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle.....	29
2.4.1	Membran-Elektroden-Einheit	29
2.4.2	Separatorplatte.....	30
2.4.3	Brennstoffzellenblock.....	30
3	Grundlagen des Explosionsschutzes	33
3.1	Zünddreieck.....	33
3.2	Integrierter Explosionsschutz.....	34
3.3	Sicherheitstechnische Kennzahlen	34
3.3.1	Explosionsgrenzen.....	36
3.3.2	Zündtemperatur	37
3.3.3	Maximaler Explosionsdruck.....	37
3.3.4	Spezifische Kennzahlen für Wasserstoff/Luft-Gemische	38
3.3.5	Einflussgrößen	39
3.4	Geräteklassifizierungen innerhalb des europäischen Explosionsschutzes	42
3.4.1	Gerätegruppe und Kategorie.....	42
3.4.2	Temperaturklassen.....	43
3.5	Zündschutzarten.....	44
4	Methodik der Gefährdungs- und Risikobeurteilung.....	45
4.1	Gefährdung und Risiko.....	45
4.2	Risikobeurteilung im Sinne der Maschinensicherheit	45
4.3	Gefährdungsbetrachtung im Explosionsschutz	47
4.3.1	Begriffsvielfalt.....	47
4.3.2	Methode	47

4.4	Bedeutung des Risikobegriffes im Explosionsschutz	50
4.4.1	Verknüpfung der Risikoelemente mit dem Konzept des Integrierten Explosionsschutzes	50
4.4.2	Risikomatrix	51
4.4.3	Risikoreduzierung im Explosionsschutz	53
4.4.4	Einbindung der Risikobeurteilung in die Methode des Explosionsschutzes	55
5	Methodenentwicklung der Zündgefahrenbeurteilung	57
5.1	Problemstellung	57
5.2	Festlegung von Beurteilungskriterien	58
5.2.1	Grundanforderungen	58
5.2.2	Quantitatives Toleranzkriterium	59
5.3	Entwicklung der Methode	60
5.3.1	Grundlegende Vorgehensweise	60
5.3.2	Auswahl einer Analysemethode zur Zündquellenidentifikation	61
5.3.3	Grundsätzliches Vorgehen zur Einschätzung und Bewertung der Zündquellenauftretswahrscheinlichkeit	62
6	Identifikation potentieller Zündquellen	65
6.1	Vorbereitung	65
6.1.1	Systemgrenzenfestlegung	65
6.1.2	Systembeschreibung	65
6.2	Analyse hinsichtlich potentieller Zündgefahren	66
6.2.1	Vorüberlegungen zu potentiellen Zündquellen	66
6.2.2	Materialversagen	68
6.2.3	Entwicklung einer geeigneten Darstellungsform der Ergebnisse	71
6.2.4	Interpretation des Ereignisablaufdiagramms	71
6.2.5	Ergebnisse der Zündquellenidentifikation	72
7	Experimenteller Teil der Zündgefahrenbeurteilung	77
7.1	Zünddurchschlagsversuche an der Flussfeldstruktur	78
7.1.1	Motivation	78
7.1.2	Fremdzündung am Gaseinlass und -auslass	78
7.1.3	Fremdzündung innerhalb der Flussfelder	89
7.1.4	Sicherheitstechnische Verwertung der Ergebnisse	95
7.2	Untersuchungen an Brennstoffzellenversuchsarrangements	95

7.2.1	Motivation	95
7.2.2	Versuchsanlage Brennstoffzelle	96
7.2.3	Zündversuche innerhalb der Brennstoffzelle	98
7.2.4	Einfluss der Brenngaskonzentration auf die Brennstoffzellenspannung.....	106
7.2.5	Temperaturverhalten bei homogener Gemischeinspeisung	108
7.2.6	Versuche mit perforierter MEA.....	111
7.2.7	Temperaturverhalten im Kurzschluss	116
7.2.8	Temperaturverhalten der Einzel-Zelle bei Eduktverarmung	118
7.2.9	Fehlerszenario mit elektrischer Überbelastung.....	122
7.2.10	Sicherheitstechnische Verwertung der Ergebnisse	125
8	Einschätzung bezüglich wirksamer Zündquellen.....	127
8.1	PEM-BZ-System: Praktische Erfahrungen	128
8.2	Auftrittswahrscheinlichkeit von Schlüsselereignissen	130
8.2.1	Leckagen.....	130
8.2.2	Explosionsfähiges Gemisch.....	132
8.2.3	Hot-Spots	134
8.3	Einschätzung der Wahrscheinlichkeit wirksamer Zündquellen.....	137
8.3.1	Flammen und heiße Gase.....	137
8.3.2	Heiße Oberflächen.....	142
8.3.3	Direkte katalytische Umsetzung	143
8.3.4	Zusammenfassung	144
8.4	Bestimmung der Gerätekategorie	145
9	Ansatzpunkte für ein Explosionsschutzkonzept	147
9.1	Risikobewertung.....	147
9.2	Vorüberlegungen zur Risikominderung.....	147
9.2.1	Externe Einflüsse	148
9.2.2	Erhöhung der inhärenten Sicherheit	149
9.3	Explosionsschutzkonzept	151
9.3.1	Zündquellenüberwachung.....	151
9.3.2	Konzepte zur Verhinderung wirksamer Zündquellen.....	154
9.3.3	Konkretisierung eines möglichen Schutzkonzeptes.....	155
10	Zusammenfassung und Ausblick	163

Literaturverzeichnis.....167

Anhang175

Datenübersicht PEM-Brennstoffzelle..... 175

Auszug bekannter Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel..... 176

Zusammenstellung von Merkmalen deterministischer und probabilistischer Ansätze einer Gefährdungs- bzw. Risikobeurteilung..... 177

Abfrageschema zur Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich Explosionsgefahren. Quelle:[EX-RL] 178

Ereignisablaufdiagramm bezüglich potentieller Zündquellen..... 179

Versuchsaufbau für Zünddurchschlagsversuche..... 180

Abmessungen der Separatorplatte 181

Orte der in das Acrylglas eingelassenen Zündelektroden 182

R&I-Fließschema der Versuchsanlage Brennstoffzelle 183

Membran-Elektroden-Einheit 184

Orte der Zündquellen zur Fremdzündung innerhalb der Brennstoffzelle 185

Lokale Schäden der GDL (Anodenseite) sowie der PEM durch Eduktverarmung..... 186

Massive Schadenauswirkung nach elektrischer Überlastung 188

Zündenergie und maximaler Explosionsdruck in Abhängigkeit der Wasserstoffkonzentration..... 189

Prozess der MEA-Konditionierung 190

Studentische Arbeiten 191

Lebenslauf..... 192

SYMBOLLE

F	Faradaykonstante	$C \cdot mol^{-1}$
H_D	Häufigkeit der Zünddurchschläge	---
I	elektrischer Strom	A
I_{BZ}	elektrischer Brennstoffzellenstrom	A
l_m	mittlere Weglänge	m
m	Anzahl der Zündversuche	---
n	Anzahl der Zünddurchschläge	---
P_{Leck}	Auftrittswahrscheinlichkeit Leckage	---
P_{Gem}	Auftrittswahrscheinlichkeit brennbares Gemisch	---
P_{Ex}	Auftrittswahrscheinlichkeit explosionsfähiges Gemisch	---
P_{Hot}	Auftrittswahrscheinlichkeit Hot-Spots	---
P_{Kat}	Auftrittswahrscheinlichkeit Katalysatorpartikel	---
$P_{i,ZD}$	Auftrittswahrscheinlichkeit der Zündquelle Zünddurchschlag	---
$P_{i,Gas}$	Auftrittswahrscheinlichkeit der Zündquelle heiße Gase	---
$P_{i,HO}$	Auftrittswahrscheinlichkeit der Zündquelle heiße Oberflächen	---
$P_{i,Kat}$	Auftrittswahrscheinlichkeit der Zündquelle katalytische Reaktion	---
P_{geA}	Auftrittswahrscheinlichkeit gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre	---
P_{ZO}	Auftrittswahrscheinlichkeit wirksame Zündquelle	---
\bar{p}_{ex}	Mittelwert des maximalen Explosionsdruckes	Pa
p_{ex}	Maximaler Explosionsdruck	Pa
p_A	Anodendruck	Pa
p_K	Kathodendruck	Pa
p_B	Betriebsdruck	Pa
q_A	Anodenvolumenstrom	$nl \cdot min^{-1}$
q_K	Kathodenvolumenstrom	$nl \cdot min^{-1}$
q_{Luft}	Luftvolumenstrom	$nl \cdot min^{-1}$
q_{H_2}	Wasserstoffvolumenstrom	$nl \cdot min^{-1}$
$q_{K,Luft}$	Kathodenluftvolumenstrom	$nl \cdot min^{-1}$
q_{A,H_2}	Anodenwasserstoffvolumenstrom	$nl \cdot min^{-1}$

R	Risiko	<i>Tote</i>
R_{tol}	toleriertes Risiko	<i>Tote</i>
S	Schaden	<i>Tote</i>
\bar{t}_{DL}	Mittelwert der Durchlaufzeiten	<i>s</i>
t_A	Aufwärmdauer	<i>min</i>
t_{KS}	Kurzschlussdauer	<i>min</i>
$t_{k,A}$	Anfangszeitpunkt eines kritischen Temperaturanstiegs	<i>min</i>
$t_{k,E}$	Endzeitpunkt eines kritischen Temperaturanstiegs	<i>min</i>
$t_{T,max}$	Zeitpunkt des maximalen Temperaturwertes	$^{\circ}C$
T	Temperatur	$^{\circ}C$
T_B	Betriebstemperatur	$^{\circ}C$
T_A	Anodentemperatur	$^{\circ}C$
T_K	Kathodentemperatur	$^{\circ}C$
$T_{A,K}$	Anoden- und Kathodentemperatur	$^{\circ}C$
U_{rev}	reversible Zellspannung im Leerlauf	<i>V</i>
U_{BZ}	Brennstoffzellenspannung	<i>V</i>
U_0	Quellenspannung	<i>V</i>
ΔG_0	Änderung der freien Standardreaktionsenthalpie	$kJ \cdot mol^{-1}$
ΔH_0	Änderung der Standardreaktionsenthalpie	$kJ \cdot mol^{-1}$
ΔS_0	Änderung der Standardentropie	$J \cdot mol^{-1} K^{-1}$
λ_A	Anodenstöchiometrie	---
λ_K	Kathodenstöchiometrie	---
\bar{v}_{FF}	Mittelwert der Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
τ_p	Explosionsdruckverhältnis	---
φ_{H_2}	Wasserstoffkonzentration	<i>Vol%</i>
$\varphi_{O_2,Luft}$	Sauerstoffkonzentration in Luft	<i>Vol%</i>
$\varphi_{O_2,Gem}$	Sauerstoffkonzentration im Gemisch	<i>Vol%</i>
$\varphi_{H_2,Gr}$	Wasserstoffgrenzkonzentration	<i>Vol%</i>

ABKÜRZUNGEN

BZ	Brennstoffzelle
BZS	Brennstoffzellensystem
Ex-At	explosionsfähige Atmosphäre
geA	gefährliche explosionsfähige Atmosphäre
GDL	Gasdiffusionslage
HAZOP	engl.: Hazard and Operability Study
MEA	Membran-Elektroden-Einheit (<i>engl.: membrane electrode assembly</i>)
nl	Normliter
OEG	obere Explosionsgrenze
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
R&I	Rohleitungen und Instrumente
STK	Sicherheitstechnische Kennzahlen
UEG	untere Explosionsgrenze
ZD	Zünddurchschlag
ZGB	Zündgefahrenbeurteilung
ZQ	Zündquelle

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Charakteristischer Verlauf der Spannungs-Strom-Kennlinie einer PEM-Brennstoffzelle.	28
Abb. 2-2: Schematische Struktur der Elektrode (Quelle: [Lar2003]).....	29
Abb. 2-3: Flussfelder der Separatorplatten (Bildquelle: Firma Ballard).	30
Abb. 2-4: Skizze zum schematischen Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle (ohne Berücksichtigung von Kühlkanälen).	31
Abb. 3-1: Explosionsdreieck.	33
Abb. 3-2: Darstellung des explosionsfähigen Konzentrationsbereiches für Wasserstoff/Luft-Gemische unter atmosphärischen Bedingungen (Explosionsgrenzen [Brandes2003] entnommen).....	37
Abb. 4-1: Diagramm zum schematischen Ablauf einer Risikobeurteilung nach [14121-1] mit Veranschaulichung der Risikotoleranzschwelle.	46
Abb. 4-2: Grundlegendes Ablaufschema zur Methode der Explosionsgefährdungsbeurteilung nach [EX-RL].	49
Abb. 4-3: Risikoelemente als Ansatzpunkt für Explosionsschutzmaßnahmen.	51
Abb. 4-4: Schema zur Explosionsgefährdungsbeurteilung unter Würdigung des Risikoansatzes.	56
Abb. 5-1: Ablaufschema zur Zündgefahrenbeurteilung als Bestandteil der Beurteilung der Explosionsgefahr.	61
Abb. 6-1: Schematische Darstellung der Systemgrenze zur Zündquellenidentifikation.	65
Abb. 6-2: Skizze zur Veranschaulichung des progressiven Verlaufes des Grades der Schädigung von Brennstoffzellenkomponenten über die Betriebsdauer bis zum Auftreten von sicherheitskritischen Auswirkungen.	71
Abb. 7-1: Skizze zum Versuchsaufbau für Zünddurchschlagsversuche an den Flussfeldstrukturen.	79
Abb. 7-2: Separatorplatte einer Einzelzelle vom Typ EFC25-02SP der Firma Electrochem Inc.....	80
Abb. 7-3: Zünddurchschlagshäufigkeiten bei ruhendem Gemisch in Abhängigkeit des Betriebsdruckes unter Variation des Parameters Gemischtemperatur.	85
Abb. 7-4: Zünddurchschlagshäufigkeiten bei strömendem Gemisch in Abhängigkeit des Betriebsdruckes unter Variation des Parameters Gemischtemperatur.	85
Abb. 7-5: Mittelwerte der maximalen Explosionsdrücke bei ruhendem Gemisch in Abhängigkeit des Betriebsdruckes unter Variation des Parameters Gemischtemperatur.....	87
Abb. 7-6: Arithmetischer Mittelwert der Flammenfrontgeschwindigkeit bei ruhendem Gemisch in Abhängigkeit des Betriebsdruckes unter Variation des Parameters Gemischtemperatur.....	89
Abb. 7-7: Arithmetische Mittelwerte des maximalen Explosionsdruckes in Abhängigkeit vom Betriebsdruck mit Trendlinie.....	92
Abb. 7-8: Explosionsdruckverhältnis in Abhängigkeit vom Betriebsdruck.	93
Abb. 7-9: Flammenfrontgeschwindigkeit bei Zünddurchschlag in die Eingangsmesskammer unter Verwendung der Zündquelle ZQ 2 in Abhängigkeit des Betriebsdruckes.....	94

Abb. 7-10: Übersichtsskizze des Versuchsstandes zur Untersuchung von Brennstoffzellen-Testobjekten.....	97
Abb. 7-11: Assemblierte Einzel-Brennstoffzelle der Firma Electrochem Inc. Typ EFC25-02SP.....	99
Abb. 7-12: Skizze des Versuchsaufbaus zur Untersuchung eines Brennstoffzellen-Testobjektes.....	101
Abb. 7-13: Polarisationskennlinie einer Einzelzelle.....	104
Abb. 7-14: Schematischer Verlauf der Wasserdampfsättigung und der Gaskonzentrationen bei kathodenseitigem Gemischeintritt unter der Annahme einer linearen Abnahme einer stöchiometrischen Eduktkonzentration am Flussfeldanfang in Abhängigkeit des Gasweges durch das Flussfeld und einer vollständigen Umsetzung der Reaktionspartner bis zum Flussfeldende.....	106
Abb. 7-15: Brennstoffzellenspannung in Abhängigkeit der kathodenseitigen Wasserstoffkonzentration in Luft unter Variation des Brennstoffzellenstromes.....	108
Abb. 7-16: Temperaturverlauf bei kathodenseitiger homogener Gemischeinspeisung unter Variation des Wasserstoffanteils in Luft.....	109
Abb. 7-17: Zeitliches Temperaturverhalten des Testobjektes bei direkter exothermer Umsetzung eines in den Kathodenraum eingespeisten stöchiometrischen Wasserstoff/Luft-Gemisches.....	111
Abb. 7-18: Skizze zur Darstellung der Abmessungen einer Perforation der MEA mit einem Mikrofräser (Schnitt quer zur MEA-Ebene).....	112
Abb. 7-19: Diagramm zur Abschätzung der Wasserstoffkonzentration anhand der Brennstoffzellenspannung.....	114
Abb. 7-20: Unterschied des zeitlichen Temperaturverhaltens bei direkter Einspeisung eines Wasserstoff/Luft-Gemisches und bei kegelförmiger Perforation der MEA unter Variation der Brenngaskonzentrationen.....	115
Abb. 7-21: Strom- und Temperaturverlauf während des Kurzschlussversuches.....	117
Abb. 7-22: Skizze des Stromlaufplanes zum Szenario der Eduktverarmung.....	118
Abb. 7-23: Charakteristischer Temperatur-, Spannungs- und Stromverlauf eines Eduktverarmungsversuches bei gleichzeitiger Unterbrechung der Wasserstoff- und Luftzufuhr.....	120
Abb. 7-24: Korrelation zwischen der elektrischen Leistung und der Temperaturanstiegsrate.....	121
Abb. 7-25: Vergleich der U-I-Kennlinien einer MEA nach erfolgter Eduktverarmung (Stromanstiegsfaktor 167 mA/s).....	122
Abb. 7-26: Messdaten zum Versuch des Überstrom-Fehlerszenarios.....	123
Abb. 8-1: Übersichtsschema des modularen Brennstoffzellensystems.....	129
Abb. 8-2: Methodische Vorgehensweise für die Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit wirksamer Zündquellen über Schlüsselereignisse.....	137
Abb. 8-3: Ausbildung einer lokalen Temperaturerhöhung bei Brenngasübertritt in den Kathodenraum durch Membranschädigung (schematisch). Ausschnitt entspricht dem Zoombereich aus Abb. 2-4.....	139
Abb. 9-1: Fehlerbaumstruktur des unerwünschten Ereignisses „heiße Oberflächen und Gase“.....	148
Abb. 9-2: Schematische Darstellung des Schutzkonzeptes einschließlich Sicherheitseinrichtungen.....	156