

Konstruktion eines Direkt-Ethanol-Brennstoffzellensystems und Charakterisierung einzelner Komponenten

Diplomarbeit

im Studiengang Umweltingenieurwesen

an der

Fachhochschule Lübeck
Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck

erstellt am

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

vorgelegt von

Adam Halaburda

Erster Gutachter: Dr.-Ing. Roland Hamelmann, FH Lübeck
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Klein, FH Lübeck
Betreuer: M. Sc. Stefan Keller, Fraunhofer ISE

Bearbeitungszeitraum: 15.04. 2008 – 27.11.2008

Freiburg, November 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziel der Arbeit	5
3	Theoretische Grundlagen	6
3.1	Entstehungsgeschichte der Brennstoffzelle	6
3.2	Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle	7
3.2.1	Aufbau einer Brennstoffzelle.....	8
3.2.2	Strom-Spannungskennlinie (UI-Kennlinie).....	9
3.2.3	Strom- und Leistungsdichte	10
3.3	Brennstoffzellentypen	11
3.4	Funktionsprinzip einer PEMFC	12
3.5	Direkt- Ethanol- Brennstoffzelle (DEFC)	13
3.5.1	Funktionsprinzip einer DEFC	13
3.5.2	Ethanol-Oxidationsreaktion.....	14
3.5.3	Ethanol und Sauerstoff Crossover	16
3.5.4	Bestimmung des theoretisch benötigten Volumenstroms der Ethanol- Lösung	17
4	Systemkomponenten	22
4.1	Anordnung der Systemkomponenten	22
4.1.1	Stack.....	23
4.1.2	Pumpe	24
4.1.3	Pumpensteuerung	25
4.1.4	Systemsteuerung.....	25
4.1.5	Anwendung.....	26
4.1.6	Akku.....	26
4.1.7	Speicher.....	27
4.1.8	Gehäuse	27
4.2	Leistungsbilanz des Systems	29
5	Experimentelle Arbeiten	31
5.1	DEFC-Stack.....	31
5.1.1	Charakterisierung des DEFC-Stack 24.....	31
5.1.2	Bestimmung des Arbeitspunktes für den DEFC-Stack 25	34
5.2	Charakterisierung der Silicium-Mikropumpe	35
5.2.1	Verhalten beim Dauerbetrieb	36
5.2.2	Volumenstromänderung bezogen auf Pumphöhe	39
5.2.3	Volumenstromänderung bezogen auf die Ansaughöhe.....	41
6	Konstruktive Arbeiten	43
6.1	Konstruktion des Systemgehäuses.....	43
6.1.1	Wahl des Herstellungsverfahrens.....	44
6.1.2	Speicherbereich.....	44
6.1.3	Hintere Abdeckung	46
6.1.4	Elektronikbereich	47
6.1.5	Untere Abdeckung.....	49

6.2	Konstruktion des Ethanol-Doppelspeichers	50
6.2.1	Materialwahl und Herstellungsverfahren	50
6.2.2	Verschlussystem des Speichers	51
6.2.3	Einbau des Speichers in das Systemgehäuse	51
6.2.4	Zentrale Öffnungen des Speichers	52
6.3	Zusammenfügung aller Systemkomponenten	54
7	Zusammenfassung und Ausblick	55
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	55
7.1.1	Charakterisierung der Systemkomponenten	55
7.1.2	Prototypsystem	56
7.2	Ausblick	57
	Anhang.....	A-1
A	Designentwürfe.....	A-1
B	Messdaten und Tabellen	A-3
B.1	Stack.....	A-3
B.2	Mikropumpe	A-4
C	Konstruktionszeichnungen	A-14
C.1	Abmaße Systemgehäuse	A-14
C.2	Detailzeichnung Doppelspeicher	A-15
D	Fotos	A-19
D.1	Messstandaufbau	A-19
D.2	Systemkomponenten	A-21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Forschungsallianz Fraunhofer DEFC	3
Abbildung 3.1:	Schema von Groves Brennstoffzelle	6
Abbildung 3.2:	Vergleich Brennstoffzellen- und Carnot-Wirkungsgrad	7
Abbildung 3.3:	Aufbau einer Brennstoffzelle.....	8
Abbildung 3.4:	Charakteristik einer UI-Kennlinie	9
Abbildung 3.5:	Strom- und Leistungsdichte	11
Abbildung 3.6:	Funktionsprinzip einer PEMFC	12
Abbildung 3.7:	Funktionsprinzip einer DEFC.....	14
Abbildung 3.8:	Volumenstrom in Abhängigkeit zur Stromstärke bei unterschiedlichen Molaritäten bei $z=2$	20
Abbildung 3.9:	Volumenstrom in Abhängigkeit zur Stromstärke bei unterschiedlichen Molaritäten bei $z=12$	21
Abbildung 4.1:	Aufbau der Systemkomponenten	22
Abbildung 4.2:	Aufbau der DEFC-Stacks	23
Abbildung 4.3:	Anoden Flow-Field in Form von drei Mäanderkanälen	24
Abbildung 4.4:	Pumpprinzip der Mikromembranpumpe.....	24
Abbildung 4.5:	Pumpensteuerung	25
Abbildung 4.6:	Systemsteuerung.....	25
Abbildung 4.7:	Transceiver Modul (rechts) und Receiver Modul (links).....	26
Abbildung 4.8:	Akkumulator.....	26
Abbildung 4.9:	Prinzip eines Doppelspeichers	27
Abbildung 4.10:	DEFC-Design	28
Abbildung 4.11:	Schaltbild des Systems.....	29
Abbildung 4.12:	Leistungsbilanz des DEFC-Systems	30
Abbildung 5.1:	Aufbau des DEFC-Messstandes	32
Abbildung 5.2:	UI-Kennlinien unterschiedlicher Volumenströmen bei einer 1molaren Ethanol-Lösung.....	33
Abbildung 5.3:	UI-Kennlinien unterschiedlicher Volumenströmen bei einer 2molaren Ethanol-Lösung.....	33
Abbildung 5.4:	MPP in Abhängigkeit zur Molarität für unterschiedliche Volumenströme.....	34
Abbildung 5.5:	UI-Kennlinien einer 2molaren Ethanol-Lösung bei 1,3ml/min	35
Abbildung 5.6:	Aufbau des Dauertests	36
Abbildung 5.7:	Dauertest der Pumpe 151G1 031	37

Abbildung 5.8:	Vergleich zwischen abgekochtem und nicht abgekochtem Di-Wasser	38
Abbildung 5.9:	Dauertest der Pumpen 151G1 64 und 151G1 74 mit abgekochtem und nicht abgekochtem Di-Wasser.....	38
Abbildung 5.10:	Aufbau zur Ermittlung der Förderleistung bezogen auf die Pumphöhe	39
Abbildung 5.11:	Volumenstromänderung bezogen auf die Pumphöhe.....	40
Abbildung 5.12:	Aufbau zur Ermittlung der Pumpleistung bezogen auf die Ansaughöhe	41
Abbildung 5.13:	Volumenstromänderung bezogen auf die Ansaughöhe	42
Abbildung 6.1:	Komponenten und Bereiche des Gesamtgehäuses	43
Abbildung 6.2:	Auslegung des Speicherbereichs	45
Abbildung 6.3:	Charakteristika des Speicherbereiches	45
Abbildung 6.4:	Darstellung und Befestigung der hinteren Abdeckung.....	46
Abbildung 6.5:	Anordnung der Systemkomponenten im Gehäuse	47
Abbildung 6.6:	Befestigung der Komponenten im offenen Zustand.....	48
Abbildung 6.7:	Befestigung der Komponenten im geschlossenen Zustand.....	48
Abbildung 6.8:	Darstellung und Befestigung der unteren Abdeckung	49
Abbildung 6.9:	Aufbau der Speicherkomponenten	51
Abbildung 6.10:	Darstellung der Befestigung des Speichers mit dem Gehäuse	52
Abbildung 6.11:	Darstellung der Öffnungen des gesamten Speichers	53
Abbildung 6.12:	Gesamtdarstellung des DEFC-Systems	54
Abbildung A.1:	Gegenüberstellung unterschiedlicher Formgebungen	A-1
Abbildung A.2:	Gegenüberstellung unterschiedlicher Designentwürfe	A-2
Abbildung A.3:	UI-Kennlinien unterschiedlicher Volumenströmen bei 0,5molare Ethanol-Lösung.....	A-3
Abbildung A.4:	UI-Kennlinien unterschiedlicher Volumenströmen bei 1,5molarer Ethanol-Lösung	A-3
Abbildung A.5:	Abmaße des Gehäuses	A-14
Abbildung A.6:	Abmaße der hinteren Abdeckung	A-14
Abbildung A.7:	Abmaße der unteren Abdeckung	A-14
Abbildung A.8:	Detaillierte Konstruktionszeichnung des Speicherdeckels	A-15
Abbildung A.9:	Detaillierte Konstruktionszeichnung des Speichergehäuses 1	A-16
Abbildung A.10:	Detaillierte Konstruktionszeichnung des Speichergehäuses 2	A-17

Abbildung A.11:	Detaillierte Konstruktionszeichnung des Speichergehäuses 3	A-18
Abbildung A.12:	Aufbau des Teststands für die Charakterisierung des Stacks	A-19
Abbildung A.13:	Messaufbau zur Bestimmung der Volumenstromänderung bezogen auf die Ansaughöhe	A-20
Abbildung A.14:	Speichergehäuse eingespannt in der Fräsbank	A-21
Abbildung A.15:	Fotografisches Abbild des fertig gestellten Doppelspeichers	A-21
Abbildung A.16:	Fotografische Abbilder des Systemgehäuses.....	A-22
Abbildung A.17:	Fotografische Abbilder der hinteren und unteren Abdeckung.....	A-22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Übersicht der Brennstoffzellentypen	11
Tabelle 3.2:	Produktanalyse einer 1molaren Ethanol-Lösung (Betriebstemperatur 80°C).....	16
Tabelle 4.1:	Ausgangsstrom des Stacks für $P_{\text{Stack}} = 200\text{mW}$	29
Tabelle A.1:	Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 031 mit nicht abgekochtem Wasser	A-4
Tabelle A.2:	Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 031 mit abgekochtem Wasser	A-5
Tabelle A.3:	Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 74 mit nicht abgekochtem Wasser	A-6
Tabelle A.4:	Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 74 mit abgekochtem Wasser	A-7
Tabelle A.5:	Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 64 mit nicht abgekochtem Wasser	A-8
Tabelle A.6:	Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 64 mit abgekochtem Wasser	A-9
Tabelle A.7:	Messreihe des Mikropumpentests: Volumenstrom- änderung bezogen auf die Pumphöhe.....	A-10
Tabelle A.8:	Zusammenfassung der Messwerte aus der Messreihe: Volumenstromänderung bezogen auf die Pumphöhe.....	A-12
Tabelle A.9:	Messreihe des Mikropumpentests: Volumenstrom- änderung bezogen auf die Ansaughöhe	A-13

Nomenklatur

Variablen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
c_x	Stoffmengenverhältnis des Reaktionsstoffes x	cm^3/cm^3
I	Stromstärke	A
m	Masse	kg
M	Molare Masse	kg/mol
M_x	Molmasse des Reaktionsstoffes x	g/mol
n	Stoffmenge	mol
n_{EtOH}	Stoffmenge von Ethanol	mol
n_x	Stoffmenge des Reaktionsstoffes x	mol
P	Leistung	mW
Q	Elektrische Ladung	As
t	Zeit	s
U	Spannung	V
V	Volumen	m^3
$V_{\text{EtOH-Lsg}}$	Volumen der Ethanol-Lösung	cm^3
$V_{\text{m,x}}$	Molares Volumen des Reaktionsstoffes x	cm^3/mol
V_x	Volumen des Reaktionsstoffes x	cm^3
$V_{\text{x-Lsg}}$	Volumen der Lösung des Reaktionsstoffes x	cm^3
\dot{V}_{EtOH}	Theoretischer Volumenstrom von Ethanol	$\mu\text{l}/\text{min}$
$\dot{V}_{\text{EtOH,Lsg.}}$	Theoretischer Volumenstrom einer Ethanol-Lösung	$\mu\text{l}/\text{min}$
\dot{V}_x	Theoretischer Volumenstrom des Reaktionsstoffes x	$\mu\text{l}/\text{min}$
$\dot{V}_{\text{x,Lsg.}}$	Theoretischer Volumenstrom der Lösung des Reaktionsstoffes x	$\mu\text{l}/\text{min}$
z	Ladungszahl	-
ρ	Dichte	kg/m^3
ρ_x	Dichte des Reaktionsstoffes x	g/cm^3

Konstanten

Symbol	Bezeichnung	Einheit
F	Faradaykonstante	96485,3399C/mol
M_{EtOH}	Molare Masse von Ethanol	46,07g/mol
$V_{\text{m,EtOH}}$	Molares Volumen von Ethanol	58,32cm ³ /mol
ρ_{EtOH}	Dichte von Ethanol	0,79g/cm ³

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AFC	Alkaline Fuel Cell (Alkalische Brennstoffzelle)
Akku	Akkumulator
CAD	Computer Aided Design
DC	Direct Current
DEFC	Direct Ethanol Fuel Cell (Direkt-Ethanol-Brennstoffzelle)
Di-Wasser	Deionisiertes Wasser
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle)
EtOH	Ethanol
FPM	Flourkautschuk
GDL	Gas Diffusion Layer (Gasdiffusionsschicht)
Hrsg.	Herausgeber
ICT	Institut Chemische Technologie
IGB	Institut Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik
IIS	Institut Integrierte Schaltungen
ISE	Institut Solare Energiesysteme
ISI	Institut System- und Innovationsforschung
ISO-2768-f	International Organization for Standardization 2768 fein
IZM	Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
Lsg.	Lösung
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle)
MEA	Membrane Electrode Assembly (Membran-Elektrolyt-Einheit)
MPP	Maximum Power Point
PA 2200	Polyamid 2200

PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsäure-Brennstoffzelle)
PBT 30 GF	Polybutylenterephthalat 30% glasfaserverstärkt
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle)
Pt	Platin
Ru	Ruthenium
SLS	Selektives Lasersintern
Sn	Zinn
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Festoxid-Brennstoffzelle)
sPEEK	Sulfonated Poly (ether ether ketone)

1 Einleitung

Die Globale Erwärmung ist Folge der seit Beginn des 20. Jahrhunderts stetig gestiegenen Nutzung fossiler Energieträger wie Mineralöl, Erdgas oder Kohle. Bei deren Verbrennung wird Kohlenstoffdioxid (CO_2) in großen Mengen freigesetzt, was zu einer Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes führt.

Der drohende Klimawandel wird durch das jetzige Verhaltensmuster bei der Energieerzeugung und -nutzung, das auch in den Ländern China und Indien übernommen wird, beschleunigt und führt zu einer schnelleren Verknappung der Erdölreserven bei stetig steigenden Rohstoffpreisen, mit erheblichen ökonomischen Konsequenzen für die Weltwirtschaft.

Die Erschließung alternativer Energiequellen und die teilweise Umstellung unseres Energiesystems von fossilen Quellen auf eine neue und nachhaltige Basis ist daher eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Die Voraussetzung für Zukunftstauglichkeit entsprechender Technologien ist dabei eine positive Energiebilanz bei hinreichender Nettoenergieerzeugung. Nachhaltigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass neben der ökonomischen Wirtschaftlichkeit die ökologische Verträglichkeit durch ein langfristig reproduzierbares Mengenpotential gesichert ist und keine negativen Wirkungen auf die soziale Wohlfahrt ausgehen.

Wasserstoff und Brennstoffzelle als Zukunftstechnologie

Zukunftstechnologien, die auf Erzeugung von Wasserstoff als Energieträger und auf die Entwicklung von Brennstoffzellen zur effizienteren Energieumwandlung gerichtet sind, haben in letzter Zeit immer stärker an Bedeutung gewonnen. Die Brennstoffzellentechnologie beruht immer auf der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, also quasi der Umkehrreaktion der Wasserelektrolyse. Dabei haben Brennstoffzellen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren und anderen Energiewandlern einen überdurchschnittlich hohen Wirkungsgrad. Dies ist auf die direkte Umwandlung der chemischen Energie eines Brennstoffes in elektrische Energie zurück zu führen. Bei Wärmekraftmaschinen wird die chemische Energie über die thermische und Bewegungsenergie in elektrische umgewandelt. Jeder Umwandlungsprozess ist mit Verlusten verbunden und führt zur Verschlechterung des Wirkungsgrades. Bei erfolgreicher technologischer Entwicklung verspricht man sich davon langfristig wichtige Komponenten einer auf Nachhaltigkeit beruhenden Energiewirtschaft.

Elementarer Wasserstoff (H) ist - gebunden im Wasser (H_2O) und in nahezu allen organischen Verbindungen - das häufigste Element auf der Erde und praktisch unbe-

grenzt vorhanden [1]. Gewonnen wird der Wasserstoff heute entweder per Elektrolyse aus Strom oder thermisch, durch die Spaltung von Erdgas. Beides sind allerdings sehr energieaufwendige Prozesse, bei denen gegebenenfalls mehr CO_2 frei gesetzt wird, als später durch den Einsatz von Wasserstoff etwa im Transportwesen eingespart werden kann.

Auch ist die Speicherung des Wasserstoffgases sowohl in technischer als auch ökonomischer Hinsicht problematisch. Aufgrund seiner geringen Dichte ist Wasserstoff sehr leicht flüchtig und diffundiert schnell, so dass beim Speichern und Transport erhebliche Mengenverluste entstehen können. Wasserstoff muss daher entweder extrem stark verdichtet oder verflüssigt, d.h. bei sehr tiefer Temperatur gespeichert werden. Dies ist ein Prozess, der ebenfalls viel Energie erfordert und kostenintensiv ist.

Schließlich ist der Umgang mit Wasserstoffgas (H_2) nicht ganz ungefährlich, da er brennbar ist und in Verbindung mit Luft ein explosives Gasgemisch (Knallgas) bilden kann. Da Wasserstoffgas farb- und geruchlos ist, kann unsachgemäßer Umgang mit hohen Konzentrationen in geschlossenen Räumen zur Verdrängung von Sauerstoff führen, mit Gefahr von Erstickung [2].

Obwohl die Nutzung von Wasserstoff in Verbindung mit der Brennstoffzellentechnologie eine lokal fast emissionsfreie Energieerzeugung verspricht, ist eine wirtschaftlich effiziente und wettbewerbsfähige Produktion auf dieser Basis aufgrund der negativen Energiebilanz noch lange nicht in Sicht.

Alternative Energieträger

Bei der Suche nach alternativen Energieträgern zum Wasserstoff trat dabei zunächst Methanol als eine mögliche Lösung in den Mittelpunkt vieler Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Methanol - auch Methylalkohol oder Holzgeist genannt - ist ein einwertiger Alkohol (CH_3OH), der in der Natur in Baumwollpflanzen, Gräsern und in ätherischen Ölen vorkommt [3] und eine mögliche Alternative zu Wasserstoff und fossilen Energieträgern darstellt. Methanol ist aus regenerativer Biomasse durch Aufspaltung leicht herzustellen, lässt sich aufgrund seines flüssigen Aggregatzustandes bei Normbedingungen gut speichern und kann als Gemisch mit Wasser direkt in der Brennstoffzelle verwertet werden. Allerdings ist der Einsatz von Methanol problematisch, weil er selbst giftig ist, bei seiner Herstellung CO_2 entsteht und der enthaltene Kohlenstoff bei seiner Umsetzung in der Brennstoffzelle giftiges Kohlenstoffmonoxid (CO) frei setzt.

Jüngste Entwicklungen propagieren, dass die Erzeugung und Nutzung von Ethanol einen alternativen Energielieferant darstellen könnte. Er kann ebenfalls aus Biomasse,

d.h. aus nachwachsenden Kohlenstoffträgern wie Holz- und Strohresten sowie aus pflanzlichen Abfällen (z.B. Zuckerrohr, Getreide) oder eigens angebauten, schnell wachsenden Pflanzen ohne wesentliche Klimabelastungen hergestellt werden. Ethanol ist weltweit verfügbar, im Gegensatz zu Methanol als ungiftige Flüssigkeit leicht und sicher zu verwenden und umweltfreundlich herzustellen. Allerdings ist die Umwandlung der in Ethanol enthaltenen Energie eine große Herausforderung für Ingenieure und Forscher, da der zweiwertige Alkohol eine komplexere Oxidationsreaktion aufweist.

Trotz seiner positiven Energiebilanz wird die Umweltfreundlichkeit angesichts des hohen Bedarfs an Anbauflächen (Monokulturen) noch kritisch eingeschätzt.

Forschungsallianz Fraunhofer

An der Technologieentwicklung von Brennstoffzellen zur direkten Umsetzung von Ethanol arbeiten derzeit Forscher und Entwickler aus sechs Fraunhofer-Instituten sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene zusammen. Das Ziel dieses Verbundprojektes ist die Entwicklung eines Prototypensystems basierend auf einer Direkt-Ethanol-Brennstoffzelle (Direct Ethanol Fuel Cell – DEFC). In Abbildung 1.1 sind die Aufgabengebiete der einzelnen Fraunhofer Institute dargestellt.

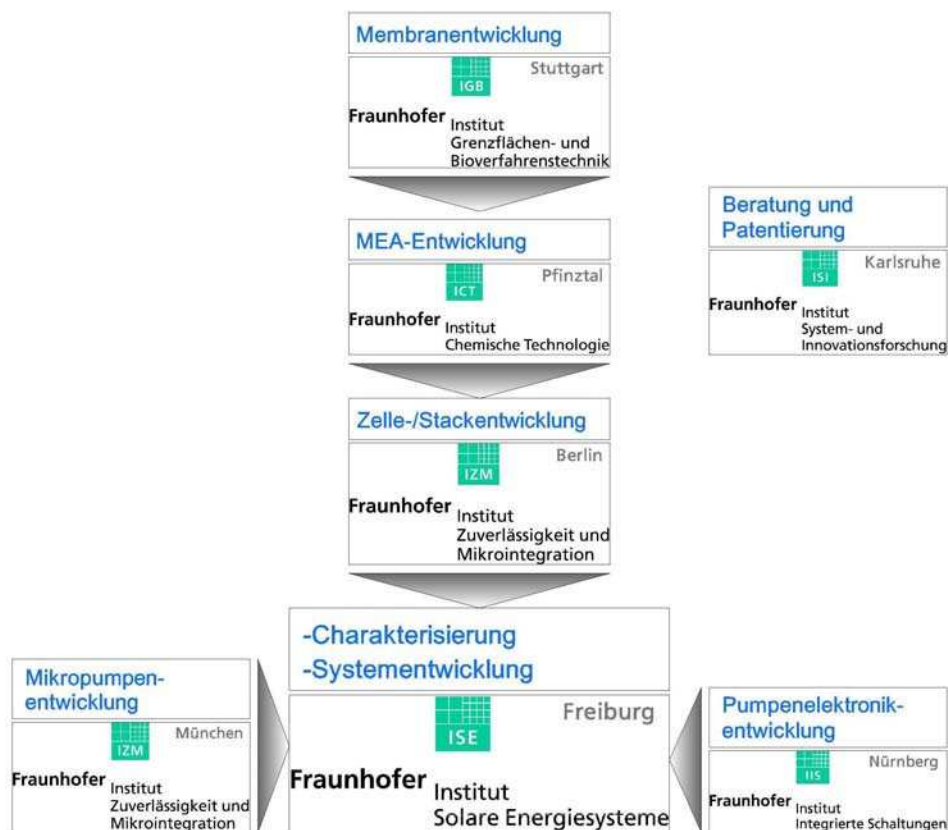


Abbildung 1.1: Forschungsallianz Fraunhofer DEFC

Die Einzelkomponenten dieses Systems werden in einer engen Zusammenarbeit der verschiedenen Institute verwirklicht. Das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) übernimmt dabei die Aufgabe der genauen Analyse und Charakterisierung der Komponenten, sowie die Systementwicklung.

2 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen einzelne Systemkomponenten in einem Teststand erprobt und auf einander abgestimmt werden. Ein Prototypsystem, basierend auf der vorhandenen Entwicklung, soll entworfen und gebaut werden. Bauteile wie der Speicher und das Gehäuse sollen dabei selbstständig dimensioniert, entworfen und konstruiert werden. Als portable Einheit wird das DEFC- System auf der Fachmesse „f-cell“ ausgestellt.

Nach Betrachtung der Funktionsweise einer DEFC, sollen alle Komponenten zunächst hinsichtlich ihrer Aufgabe im System beschrieben werden. Basierend auf den experimentellen Arbeiten kann die Dimensionierung des Speichers und somit die Abmessungen des Systemgehäuses festgelegt werden. Anschließend soll Speicher und Systemgehäuse entsprechend ausgelegt und konstruiert werden. Entwürfe der Bauteile und Konstruktion eines dreidimensionalen Modells soll mit Hilfe des CAD-Programms Inventor von Autodesk erfolgen. Aus den virtuellen Konstruktionen können die Bauteile hergestellt und in das System integriert werden. Das Ergebnis der Arbeit ist ein Prototypensystem basierend auf einer Direkt-Ethanol-Brennstoffzelle (DEFC).

Zu Beginn der 90er Jahre haben Wissenschaftler und Ingenieure die Brennstoffzelle mit Hilfe von weiter entwickelten Technologien leistungstärker und kostengünstiger gebaut. Inzwischen reichen die Einsatzmöglichkeiten vom Fahrzeugantrieb, Hausheizungen und Blockheizkraftwerken mit mehreren 100KW Leistung bis zu dem Bereich der Kleinanwendungen in Geräten wie Handys oder Laptops.

3.2 Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle

Die konventionelle Gewinnung von elektrischer Energie aus chemischen Energieträgern wird durch Verbrennung dieser in einer Wärmekraftmaschine in Verbindung mit einem Generator realisiert. Da die Energie hierbei mehrfach umgewandelt wird, kommt es zu Energieverlusten bei entsprechend geringerem Wirkungsgrad. Dagegen wandelt die Brennstoffzelle die chemische Energie direkt in elektrische Energie um und ist damit potenziell effizienter. Die Energie wird auch nicht wie bei der Primärzelle (Batterie) und der Sekundärzelle (Akkumulator (Akku)) gespeichert, sondern kontinuierlich umgewandelt.

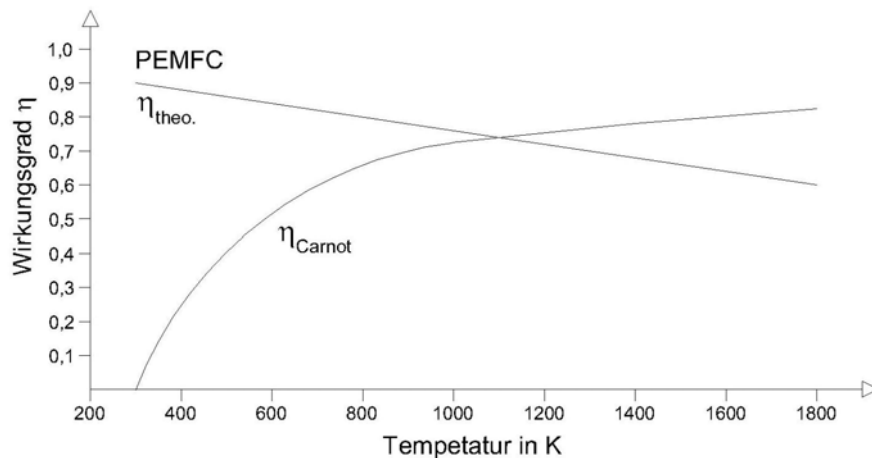


Abbildung 3.2: Vergleich Brennstoffzellen- und Carnot-Wirkungsgrad

Da die chemische Energie eines stetig zugeführten Brennstoffs mit Hilfe eines Oxidationsmittels zu elektrischer Energie umgeformt wird, ist die Brennstoffzelle also ein elektrischer Energiewandler und keine Wärmekraftmaschine. Sie unterliegt deswegen nicht dem Carnot-Wirkungsgrad, der den höchsten Wirkungsgrad darstellt, den eine Wärmekraftmaschine theoretisch erreichen kann.

In Abbildung 3.2 [7] wird deutlich, dass der Carnot-Wirkungsgrad mit zunehmender Temperatur steigt.

Aufgrund der Direktumwandlung der chemischen in elektrische Energie erreicht die Brennstoffzelle dagegen gerade bei geringen Temperaturen ihren maximalen Wirkungsgrad. Deswegen wird der Prozess auch „kalte Verbrennung“ genannt. Katalysatoren werden eingesetzt um die Aktivierungsenergie zu verringern und die Reaktion zu beschleunigen. Mit Brennstoffzellen können Gesamtwirkungsgrade erzielt werden, die je nach Zelltyp zwischen 60% bis 70% (moderne Verbrennungskraftwerke ca. 40%). Der Wirkungsgrad sinkt bei steigender Temperatur und gleicht erst bei ca. 1100K dem Carnot-Wirkungsgrad für Wärmekraftmaschinen.

3.2.1 Aufbau einer Brennstoffzelle

Der Aufbau ist bei allen Brennstoffzellen ähnlich (Abbildung 3.3). Zwischen zwei Elektroden (Anode und Kathode) befindet sich ein Elektrolyt, der den Ionen-Austausch ermöglicht. Die an den Elektroden entstehende Spannung kann über die Bipolarplatten, die über einen äußeren Stromkreis verbunden sind, abgenommen werden. Der Katalysator befindet sich in Form von feinstem Pulver in dem Elektrodenmaterial (in Abbildung 2.3 getrennt dargestellt). Der Katalysator ist notwendig, um die Aktivierungsenergie herab zu setzen und die Moleküle zu ionisieren.

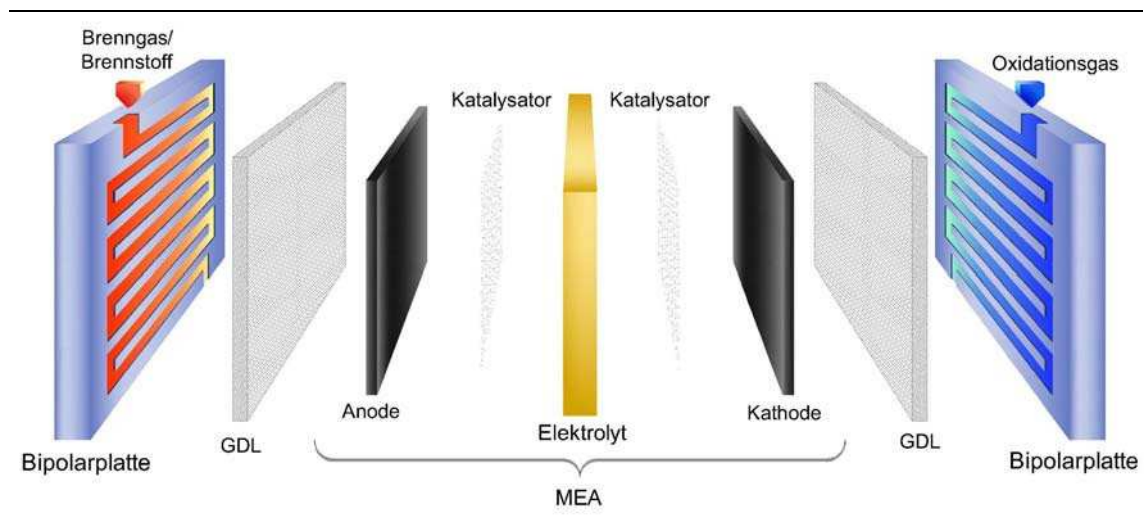


Abbildung 3.3: Aufbau einer Brennstoffzelle

Da die Bipolarplatten oft als Stromabnehmer verwendet werden, sollten sie aus einem leitfähigen, jedoch nicht korrodierenden Material bestehen (z.B. Graphit oder korrosionsfreien Metall). Sie beinhalten eine Kanalstruktur, das sog. „Flow-Field“. Dieses ermöglicht die homogene Verteilung der Reaktionsstoffe auf eine Reaktionsfläche. Des Weiteren dienen die Bipolarplatten zur mechanischen Stabilisierung der Zelle beim Einsatz mehrerer Zellen in einen Brennstoffzellen-Stack. Die Gasdiffusionsschicht (GDL) sorgt mit den groben Graphitfasern für eine weitere Verbesserung der gleich-

mäßigen Verteilung der Reaktanden auf die anliegenden Elektroden. Um den Strom zu den Bipolarplatten leiten zu können, sollte diese auch aus elektrisch gut leitendem Material bestehen. Der Elektrolyt ist eines der wichtigsten Merkmale einer Brennstoffzelle. Er bestimmt den Protonentransport und somit die Trennung der negativen und positiven Ladungsträger. Man unterscheidet zwischen flüssigen (Laugen oder Säuren) oder festen (Keramik oder Polymer) Elektrolyten. Die Einheit von Elektroden, Katalysator und Elektrolyt ist die MEA (Membrane Electrode Assembly).

Brennstoffzellen können zur Erhöhung der Spannung in Reihe und zur Erhöhung des Stroms parallel geschaltet werden. Mehrere miteinander verschaltete Brennstoffzellen werden Stack genannt.

Im späteren Kapiteln werden die Prinzipien und Reaktionsmechanismen einiger Brennstoffzellen näher erläutert. Die Abbildung 3.3 dient dabei als Grundlage.

3.2.2 Strom-Spannungskennlinie (UI-Kennlinie)

Um das Verhalten einer Brennstoffzelle zu beschreiben, werden Strom-Spannungskennlinien verwendet. Bei Belastung einer Brennstoffzelle durch einen externen Verbraucher, das heißt beim Entnehmen eines Stroms über den äußeren Leiterkreis, sinkt die Zellspannung. Wenn nun unterschiedliche Belastungspunkte abgefahren werden, kann eine UI-Kennlinie erstellt und damit die Brennstoffzelle charakterisiert werden. Ein typischer Verlauf einer UI-Kennlinie wird in Abbildung 3.4 gezeigt.

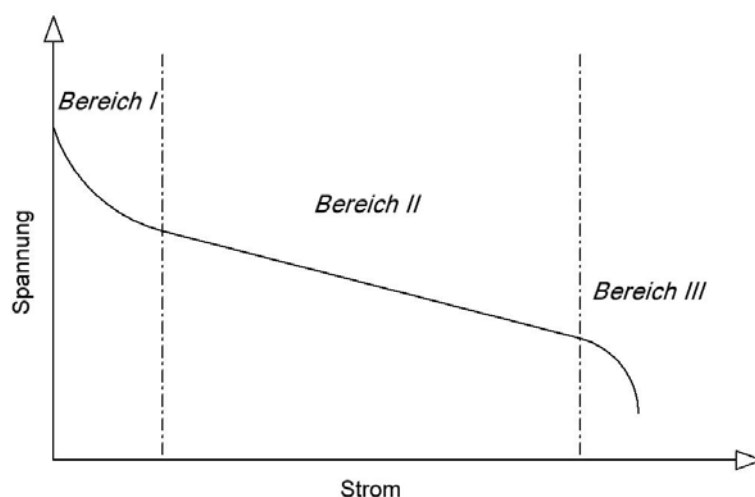


Abbildung 3.4: Charakteristik einer UI-Kennlinie

Das Einstellen unterschiedlicher Lastpunkte kann sowohl galvanostatisch, als auch potentiostatisch ausgeführt werden. Bei der galvanostatischen Belastung wird der

Strom, der fließen soll, eingestellt und die Spannung der Zelle ergibt sich entsprechend. Die potentiostatische Belastung beschreibt den umgekehrten Fall. Hierbei wird die Spannung festgelegt und der Strom stellt sich ein. In beiden Fällen wird die Spannung als Funktion des Stroms durch eine UI-Kennlinie dargestellt. Die Kurve kann in drei Bereiche unterteilt werden:

Bereich I:

Bei niedrigem Strom nimmt die Spannung nichtlinear ab. Elektrokinetische Prozesse bestimmen hier das Verhalten der Zellen. Insbesondere baut sich an den Elektroden durch nicht verbrauchte Ladungsträger eine hohe Spannung auf (Durchtrittsüberspannung), die die Reaktion hemmt.

Bereich II:

Hier dominiert der ohmsche Widerstand der Zelle die Charakteristik („Ohmscher Bereich“). Der Abfall der Spannung ist linear zur Stromstärke und wird hauptsächlich vom Innenwiderstand der Membran verursacht. Des Weiteren führen auch Kontaktwiderstände innerhalb der einzelnen Schichten der Brennstoffzelle zu Spannungsverlusten.

Bereich III:

Bei besonders hohen Stromdichten werden hier große Mengen der Reaktanden verbraucht. Erfolgt der Nachtransport der Reaktanden nicht schnell genug, sinkt deren Konzentration an der Elektrodenoberfläche ab. Dies führt zu einem steilen Abfall der UI-Kennlinie, der so genannten Konzentrationsüberspannung.

3.2.3 Strom- und Leistungsdichte

Zur Bestimmung der maximalen Leistung einer Brennstoffzelle wird neben der UI-Kennlinie auch der Verlauf der Leistung dargestellt (siehe Abbildung 3.5). Die Leistung wird über das unter der Spannungskurve liegende Rechteck definiert. Im Maximum der Kurve befindet sich der Punkt mit der maximalen Leistung (Maximum Power Point – MPP) der Zelle.

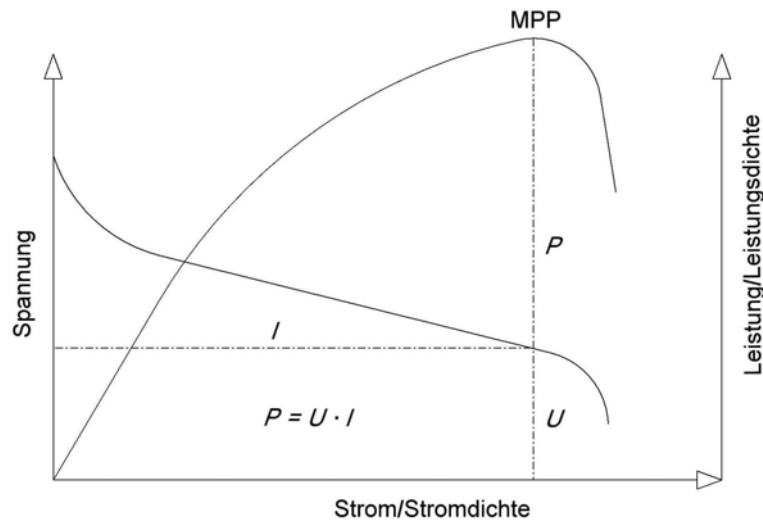


Abbildung 3.5: Strom- und Leistungsdichte

Um die Leistung von Brennstoffzellen mit unterschiedlichen aktiven Flächen besser miteinander vergleichen zu können, wird der von der Zelle produzierte elektrische Strom durch die aktive Fläche geteilt. Das Ergebnis ist die Stromdichte. Wird diese mit der Spannung multipliziert erhält man die Leistungsdichte, je nach Leistungsbereich wird sie in W/cm^2 oder mW/cm^2 angegeben.

3.3 Brennstoffzellentypen

Wie in Tabelle 3.1 [8] dargestellt, kann man heute sechs Typen von Brennstoffzellen nach ihrer Betriebstemperatur einteilen.

Tabelle 3.1: Übersicht der Brennstoffzellentypen

Zell-typ	Brenngas	Elektrolyt	Betriebs-temperatur (°C)	System-wirkungsgrad (%)	Anwendungs-gebiet
Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	Reinst- H ₂	Kalilauge (KOH)	60-90	60	Raumfahrt, Militär
Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)	H ₂ , Erdgas, Methanol	Polymermembran	60-110	60 (H ₂) 40 (CH ₄)	mobile Anwendungen
Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC)	Methanol	Polymermembran	45-100	40	Kleine Tragbare Systeme (Handy, Laptop)
Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	Erdgas, H ₂	Phosphor- säuregel (H ₃ PO ₄)	180-210	50 (H ₂) 40 (CH ₄)	KWK / Kraftwerke
Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)	Erdgas, Kohlegas, Biogas	Alkali-Karbonat-Schmelzen (Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃)	630-650	50-55 (CH ₄) 60-70 (mit Dampfturb.)	KWK / Kraftwerke
Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)	Erdgas, Kohlegas, Biogas, H ₂	Keramik	800-1.000	50-65 60-70 (mit Gasturbinen)	KWK / Kraftwerke

Der Temperaturbereich liegt zwischen ca. 60°C (Niedertemperatur-Brennstoffzellen, z.B. PEMFC, DMFC) und ca. 1.000°C (Hochtemperatur-Brennstoffzelle, z.B. SOFC). Neben dem jeweils verwendeten Ionenleiter (Elektrolyten), der den Namen des Typen bestimmt, unterscheiden sich die Typen auch bezüglich der Brennstoffversorgung, ihres Wirkungsgrades, des möglichen Einsatzgebiets und des Entwicklungsstands.

Eine mit Ethanol betriebene Brennstoffzelle (DEFC) ist noch nicht in diesem Schema erfasst, da sie sich in der Entwicklung befindet und bisher noch keine Anwendung gefunden hat. Geplant ist der Einsatz in der Kleinelektronik, ähnlich der DMFC. Beides sind Niedertemperatur-Brennstoffzellen, die nach demselben Prinzip der elektrochemischen Energieumwandlung einer PEMFC funktionieren (siehe Kapitel 3.4). Im Kapitel 3.5 wird schließlich näher auf die DEFC und ihre Charakteristik eingegangen.

3.4 Funktionsprinzip einer PEMFC

Bei einer PEMFC ist der Elektrolyt eine Polymermembran (Proton Exchange Membran). Diese etwa 0,1mm starke, aus Kunststoff bestehende Membran lässt nur Protonen hindurch.

Die PEMFC besitzt einen edelmetallhaltigen Katalysator, meist aus Platin (Pt), um die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu verbessern.

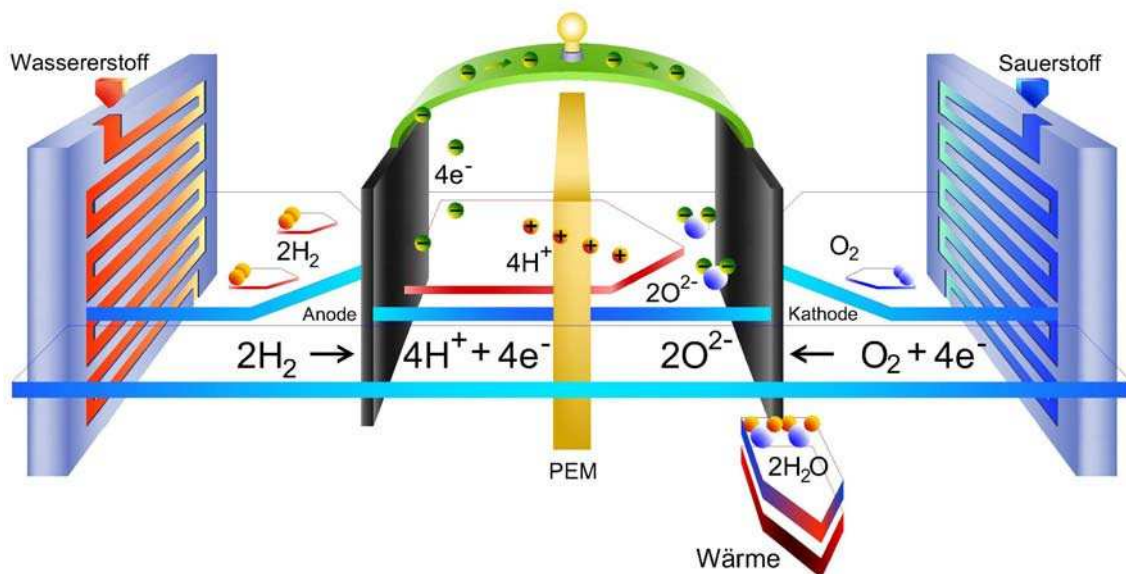
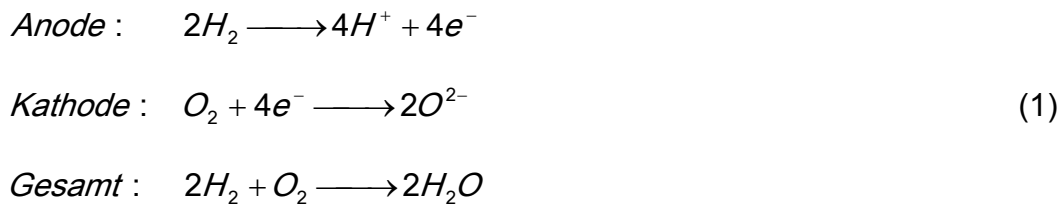


Abbildung 3.6: Funktionsprinzip einer PEMFC

Der molekulare Wasserstoff wird mit Hilfe des Flow-Fields homogen verteilt und kommt in der Anode mit dem Katalysator in Kontakt. Dort wird er in positive und negative Ionen getrennt. Die H⁺- Ionen strömen durch die Membran zur Kathode. Die Elektronen (e⁻) bleiben auf der Anodenseite und bilden dort einen Elektronenüberschuss. Wird nun

die Anode mit der Kathode über einen äußeren Stromkreis an einen Verbraucher (hier: Glühbirne) angeschlossen, können die Elektronen zur Kathode gelangen. An der Kathode strömt Sauerstoff (meistens Luftsauerstoff) auf gleiche Weise zum Katalysator. Auch dieser wird katalytisch gespalten und reagiert dann mit dem ankommenden Elektronen zu O^{2-} -Ionen und dann mit den H^+ -Ionen zu Wasser. Da es sich hierbei um eine exotherme Reaktion handelt, wird Wärmeenergie freigesetzt. Die Reaktionsgleichung lautet folgendermaßen:



3.5 Direkt- Ethanol- Brennstoffzelle (DEFC)

Bei der Direkt-Ethanol-Brennstoffzelle (Direct Ethanol Fuel Cell - DEFC) funktioniert die elektrochemische Energieumwandlung nach den Prinzipien der PEMFC. Allerdings verläuft die Oxidation des Ethanols im derzeitigen Entwicklungsstadium und mit den zurzeit verwendeten Katalysatoren noch unvollständig. Deshalb kann die chemische Energie des Ethanols noch nicht vollständig in elektrische Energie umgewandelt werden. Der Gesamtwirkungsgrad einer DEFC ist deswegen deutlich geringer als der einer PEMFC.

3.5.1 Funktionsprinzip einer DEFC

Bei der Direkt-Ethanol-Brennstoffzelle bezieht sich die Namensgebung nicht auf dem Elektrolyt, sondern auf den verwendeten Brennstoff. Der Elektrolyt ist, wie auch bei einer PEMFC und DMFC, eine Polymermembran. Die Reaktanden werden auf die gleiche Weise zugeführt wie bei einer PEMFC mit dem Unterschied, dass Ethanol im Gegensatz zu Wasserstoff flüssig in die Reaktion eingeht. Die DEFC wird aufgrund des hohen Crossover (siehe Kapitel 3.5.3) nicht mit reinem Ethanol betrieben. Je nach Betriebsweise werden entsprechende molare Lösungen angesetzt. Beim kontinuierlichen Betrieb wird das Ethanol im Kreis gepumpt. Die Lösung wird mit höherem Ethanol-Anteil angesetzt und reichert sich mit der Zeit immer mehr ab. Bei einem nicht kontinuierlichen Betrieb durchströmt die Ethanol-Lösung nur einmal die Zelle (den Stack) und wird in einem separaten Behälter gesammelt. Bei dieser Betriebsweise wird ein Mindestanteil an Ethanol eingesetzt.

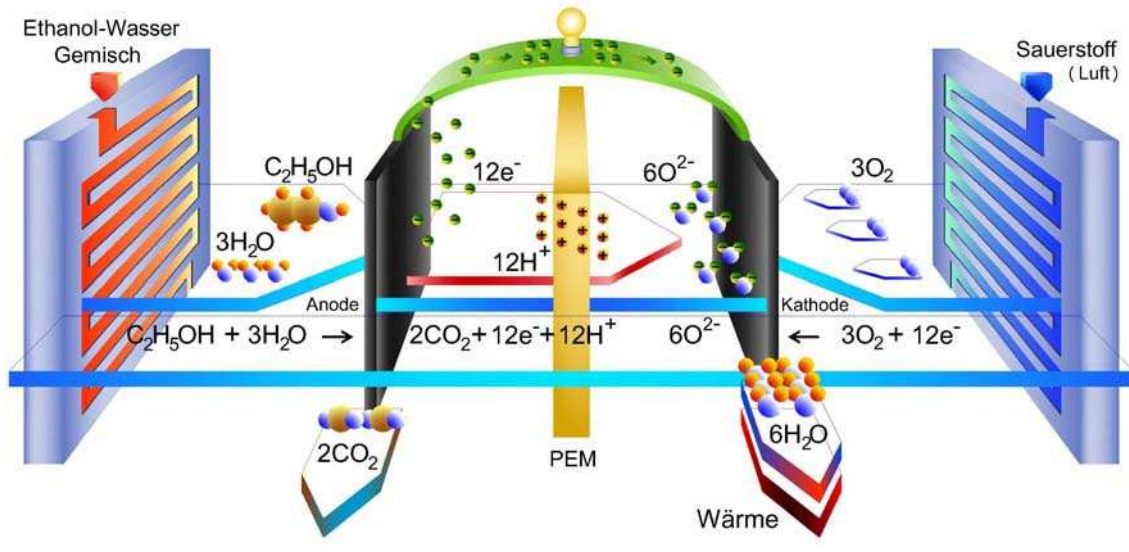
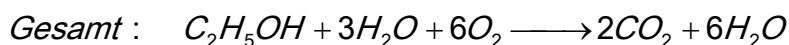
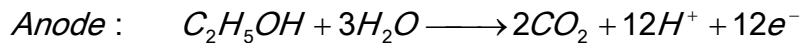


Abbildung 3.7: Funktionsprinzip einer DEFC

Abbildung 3.7 veranschaulicht die Reaktionsmechanismen einer DEFC. Der Sauerstoff (oft Luftsauerstoff) reagiert an der Kathode zu O^{2-} -Ionen. Idealerweise oxidieren an der Anode Ethanol und Wasser zu CO_2 und setzen 12 Ladungsträger frei. Mit 1 Mol Ethanol und 3 Mol Wasser entstehen theoretisch 12 Elektronen und 12 Protonen (siehe Gleichung (2)). Um die gleiche Menge an Ladungsträgern mit einer PEMFC zu erzeugen, benötigt man 6 Wasserstoffmoleküle.



Die Oxidationsreaktion ist jedoch viel komplexer, als die der PEMFC und somit eine große Herausforderung für die Forscher und Entwickler. Die Entwicklung eines idealen Katalysators zur vollständigen Umwandlung des Ethanols zu CO_2 erscheint deshalb sehr schwierig.

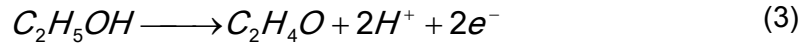
3.5.2 Ethanol-Oxidationsreaktion

In der Praxis läuft die Anodenreaktion nicht vollständig ab. Es entstehen Zwischenprodukte. Die Ethanol-Oxidation ist sehr komplex und wird intensiv erforscht. Bezug nehmend auf einige Erkenntnisse werden die Hauptaspekte zusammengefasst dargestellt.

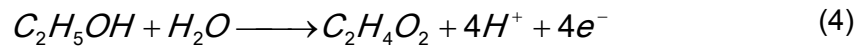
Acetaldehyd, Essigsäure und CO_2 werden in der Literatur unter den verschiedensten Versuchsbedingungen überwiegend als wichtigste Reaktionsprodukte der Ethanoloxi-

dation bestätigt [9], [10], [11]. Im Folgenden werden die Reaktionen der drei möglichen Reaktionsprodukte dargestellt.

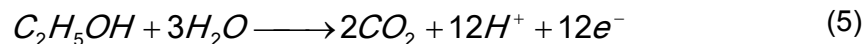
Bei der partiellen Reaktion von Ethanol zu Acetaldehyd werden lediglich zwei Protonen und zwei Elektronen freigesetzt:



Ist das Reaktionsprodukt Essigsäure, erhöht sich die Zahl der Ladungsträger auf vier, wobei die zusätzlichen Protonen und Elektronen, sowie das zweite Sauerstoffatom der Essigsäure, von einem Wassermolekül bereitgestellt werden:



Bei der idealen Reaktion wird das Ethanol zu CO_2 umgesetzt und es werden 12 Ladungsträger freigesetzt:



Ziel der Forschung ist die komplette Reaktion zu CO_2 . Auf diese Weise würden keine Zwischenprodukte entstehen und es könnten alle zwölf Ladungsträger separiert werden. Untersucht werden dabei unterschiedliche Betriebsweisen, Katalysatoren und Materialien, um diese Reaktion zu begünstigen. Die Reaktionskinetik kann durch folgende Faktoren beeinflusst werden:

1. Betriebstemperatur
2. Katalysatorzusammensetzung und Belegung
3. Belastung der Zelle

Da Platin (Pt) als Katalysator nicht die gewünschten Oxidationsraten von Ethanol begünstigt, wurden an der Anode Platinverbindungen wie Platin/Ruthenium (Pt/Ru) und Platin/Zinn (Pt/Sn) getestet [12]. Diese führen zu einer Verbesserung der Reaktionskinetik.

In der Literatur werden unterschiedliche Angaben zur Produktanalyse gemacht. Song et al. [13] fand heraus, dass bei einer Betriebstemperatur von $90^\circ C$ „sehr geringe“ Mengen CO_2 entstehen. Mittels Gaschromatographie (GC) stellt er an einem Pt/Ru

Katalysator 95% Essigsäure und 5% Acetaldehyd fest und an einem Pt/Sn Katalysator 73% Essigsäure und 27% Acetaldehyd. Zhou et al. [14] besagt hingegen, dass bei gleichem Katalysator und gleicher Betriebstemperatur, CO₂ und Essigsäure die Hauptprodukte der Ethanol-Oxidation sind. Arico et al. [15] stellte 96% CO₂ bei einer Betriebstemperatur von 145°C fest.

Als weitere Literatur wird Bezug auf die Veröffentlichung von Guangchun Li et al. [16] genommen. Es wurde eine Analyse aufgrund von Titration vorgenommen. Die Katalysatoren Pt/Ru (4:1) und Pt/Sn (1:1) wurden bei einer Betriebstemperatur von 80°C und mit einer 1molaren Ethanol-Lösung getestet. Die Zelle wurde bei unterschiedlichen Strömen eine Stunde lang belastet. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: Produktanalyse einer 1molaren Ethanol-Lösung (Betriebstemperatur 80°C)

	Pt/Ru	Pt/Ru	Pt/Sn	Pt/Sn
Stromdichte in mA/cm ²	60	20	60	30
Zellspannung in mV	139	356	137	281
CO₂ in %	10,4	8,4	6,7	6,7
Essigsäure in %	50,7	98	55,6	76,8
Acetaldehyd in %	38,7	0	37,7	16,5

Bezüglich dieser Ergebnisse lässt sich erkennen, dass bei diesen Bedingungen überwiegend Essigsäure entsteht. Die Erhöhung der Zellspannung bewirkt eine Begünstigung der Reaktion zu Essigsäure, jedoch keine Verbesserung der Reaktion zu CO₂.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die genauen Mengen der entstehenden Reaktionsprodukte nicht allgemein benannt werden können. Die Entstehung dieser drei Produkte ist jedoch aufgrund der Literatur bestätigt.

3.5.3 Ethanol und Sauerstoff Crossover

Um eine hohe Leistungsausbeute zu erreichen werden die Spannungsverluste einer Direkt-Ethanol-Brennstoffzelle betrachtet. Dabei spielt der Crossover-Effekt eine wesentliche Rolle und wird an dieser Stelle näher erläutert.

Bedingt durch die Permeabilität der Membran bezüglich Ethanol und Sauerstoff können diese Stoffe zur gegenüberliegenden Elektrode gelangen. Ethanol wird an der Kathode oxidiert und Sauerstoff an der Anode reduziert. Aufgrund der produzierten bzw. verbrauchten Ladungsträger bildet sich ein so genanntes Mischpotenzial an den Elektroden aus. Dieses Mischpotenzial führt zu Verringerung der Zellspannung und somit zu

Leistungsverlusten [17]. Es werden neue Materialien für Membranen erforscht, die einen niedrigen Crossover gegenüber Ethanol und Sauerstoff aufweisen und gleichzeitig eine gute Leitfähigkeit für Protonen besitzen.

3.5.4 Bestimmung des theoretisch benötigten Volumenstroms der Ethanol-Lösung

Um einen zu hohen Crossover von Ethanol zu vermeiden werden Ethanol-Lösungen verwendet. Zur Einschätzung des Volumenstroms, den die DEFC benötigt, wird mit Hilfe des Faradayschen Gesetzes eine Gleichung zur Ermittlung des theoretischen Volumenstroms für eine Lösung hergeleitet. Zunächst muss die Gleichung zur Berechnung des Volumenstroms für reinen Ethanol erstellt werden. Mit dieser kann im zweiten Schritt, über die Bildung eines Verhältnisses die Gleichung zur Ermittlung des Volumenstroms einer Ethanol-Lösung erweitert werden.

Das Faradaysche Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen elektrischer Ladung und der an einer Elektrode abgeschiedenen Stoffmenge.

$$m = \frac{M \cdot Q}{z \cdot F} \quad (6)$$

Hierbei bedeutet:

m : Masse

M : Molmasse

Q : elektrische Ladung

z : Ladungszahl

F : Faraday-Konstante: 96485,339C/mol [18]

Die Faraday-Konstante ist eine Naturkonstante, errechnet aus der Avogadro-Konstante und der Elementarladung. Sie beschreibt die Ladungsmenge, die ein Mol eines Stoffes besitzt.

Um den Volumenstrom bezüglich der Stromstärke zu bestimmen, wird die Gleichung (6) mit folgenden Gleichungen erweitert.

$$Q = I \cdot t \quad (7)$$

Hierbei bedeutet:

I : Stromstärke

t : Zeit

$$m = V \cdot \rho \quad (8)$$

Hierbei bedeutet:

V : Volumen

ρ : Dichte

Durch Einsetzen der Gleichungen (7) und (8) in Gleichung (6) und Umstellen nach V_x/t kann der theoretische Volumenstrom direkt berechnet werden.

$$\dot{V}_x = \frac{V_x}{t} = \frac{M_x}{z \cdot F \cdot \rho_x} \cdot I \quad (9)$$

Hierbei bedeutet:

\dot{V}_x : Theoretischer Volumenstrom des Reaktionsstoffes x

V_x : Volumen des Reaktionsstoffes x

M_x : Molmasse des Reaktionsstoffes x

ρ_x : Dicht des Reaktionsstoffes x

Mit Gleichung (9) kann, abhängig von der zu erreichenden Stromstärke und der Anzahl der an der Reaktion beteiligten Ladungsträger, der theoretisch benötigte Volumenstrom des Reaktionsstoffes für eine Zelle berechnet werden. Beim Beziehen der Gleichung auf Ethanol kann der theoretische Volumenstrom von Ethanol folgendermaßen berechnet werden:

$$\dot{V}_{\text{EtOH}} = \frac{M_{\text{EtOH}}}{z \cdot F \cdot \rho_{\text{EtOH}}} \cdot I \quad (10)$$

Hierbei bedeutet:

\dot{V}_{EtOH} : Theoretischer Volumenstrom von Ethanol

M_{EtOH} : Molmasse von Ethanol: 46,07mol/l

ρ_{EtOH} : Dichte von Ethanol: 0,79kg/l

Die Dichte von Ethanol wird bei Umgebungsbedingungen (20°C) angegeben [18].

Herleitung einer Gleichung zur Bestimmung des Volumenstroms einer Lösung

Zur Herleitung einer Formel, mit der der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Molarität der Lösung bestimmt werden kann, wird zunächst die Stoffmengenkonzentration

bestimmt. Das Stoffmengenverhältnis beschreibt das Verhältnis des Volumens eines Stoffes bestimmter Stoffmenge zum Volumen der Lösung dieses Stoffes.

$$c_x = \frac{n_x \cdot V_{m,x}}{V_{x\text{-Lsg.}}} \quad (11)$$

c_x : Stoffmengenverhältnis des Reaktionsstoffes x

n_x : Stoffmenge des Reaktionsstoffes x

$V_{m,x}$: Molares Volumen der Reaktionsstoffes x

$V_{x\text{-Lsg.}}$: Volumen der Lösung des Reaktionsstoffes x

Das molare Volumen kann über die Molmasse und die Dichte eines Stoffes berechnet werden.

$$V_{m,x} = \frac{M_x}{\rho_x} \quad (12)$$

Das in Gleichung (11) gebildete Stoffmengenverhältnis entspricht dem Verhältnis des Volumenstroms des reinen Reaktionsstoffes (siehe Gleichung (9)) und dem Volumenstroms der Lösung.

$$\frac{n_x \cdot V_{m,x}}{V_{x\text{-Lsg.}}} = \frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_{x\text{-Lsg.}}} \quad (13)$$

Hierbei bedeutet:

$\dot{V}_{x\text{-Lsg.}}$: Theoretischer Volumenstrom der Lösung des Reaktionsstoffes x

Durch Einsetzen der Gleichungen (9) und (12) kann die Gleichung zur Berechnung des theoretischen Volumenstroms einer Lösung erstellt werden.

$$\dot{V}_{x\text{-Lsg.}} = \frac{V_{x\text{-Lsg.}}}{n_x \cdot z \cdot F} \cdot I \quad (14)$$

Berechnung des theoretischen Volumenstroms für eine Ethanol-Lösung

Beim Anwenden der Gleichung (14) bezogen auf Ethanol kann der theoretische Volumenstrom abhängig von der Konzentration der Lösung und der zu erreichenden Stromstärke berechnet werden.

$$\dot{V}_{\text{EtOH,Lsg.}} = \frac{V_{\text{EtOH,Lsg.}}}{n_{\text{EtOH}} \cdot z \cdot F} \cdot I \quad (15)$$

Hierbei bedeutet:

$\dot{V}_{\text{EtOH,Lsg.}}$: Theoretischer Volumenstrom einer Ethanol-Lösung

$V_{\text{EtOH,Lsg.}}$: Volumen der Ethanol-Lösung

n_{EtOH} : Stoffmenge von Ethanol

Da nicht bekannt ist wie viele Ladungsträger bei der Ethanol-Oxidation freigesetzt werden, ist z eine nicht genau definierbare Größe. Im schlechtesten Fall reagiert Ethanol vollständig zu Acetaldehyd und es werden lediglich zwei Ladungsträger gebildet.

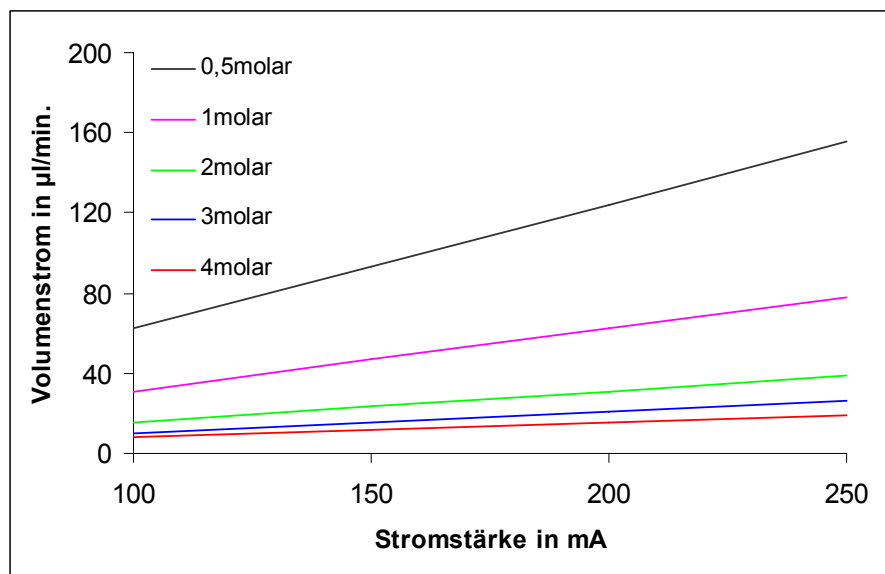


Abbildung 3.8: Volumenstrom in Abhängigkeit zur Stromstärke bei unterschiedlichen Molaritäten bei $z=2$

Um die theoretisch berechneten Größen variabel zu belassen werden die Berechnungen in der Abbildung 3.8 als Grafik dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei höheren Molaritäten die Steigung des Volumenstroms bezogen auf die Erhöhung der Stromstärke abnimmt. Mit steigender Konzentration der Lösung nimmt der Volumenstrom ab, wobei der Unterschied ab einer 2molaren Lösung sehr gering ist.

Bei einer Verbesserung der Oxidationsreaktion zu CO_2 könnten mehr Ladungsträger separiert werden, was zu einer Steigerung der Ladungszahl z führt. Da z im Nenner der Gleichung (15) steht, wird der Mindestvolumenstrom geringer.

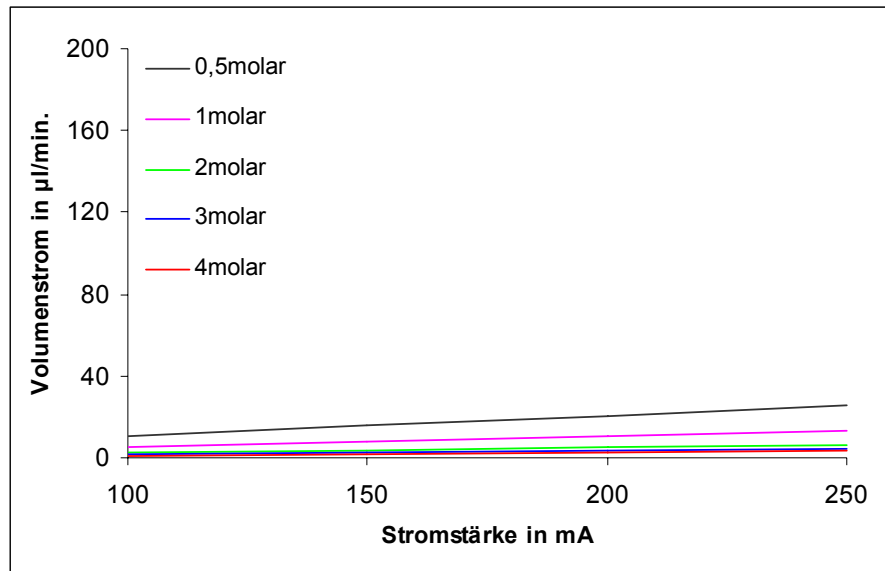


Abbildung 3.9: Volumenstrom in Abhängigkeit zur Stromstärke bei unterschiedlichen Molaritäten bei $z=12$

Zum Vergleich ist in Abbildung 3.9 der theoretische Volumenstrom für die komplette Umwandlung des Ethanol's zu CO_2 mit Freisetzung von 12 Ladungsträgern dargestellt. Bei verwenden der gleichen Skalierung kann der Unterschied der Volumenstromänderung deutlich gemacht werden.

4 Systemkomponenten

Bevor auf die experimentellen und konstruktiven Arbeiten eingegangen wird, werden in diesem Kapitel die Systemkomponenten vorgestellt. Dabei wird die Funktion der Komponenten im System beschrieben.

4.1 Anordnung der Systemkomponenten

In einem System stehen alle Komponenten in einem Bezug zueinander. Einige sind fluidisch und andere elektronisch miteinander verbunden. In Abbildung 4.1 ist die Anordnung der einzelnen Komponenten schematisch dargestellt.

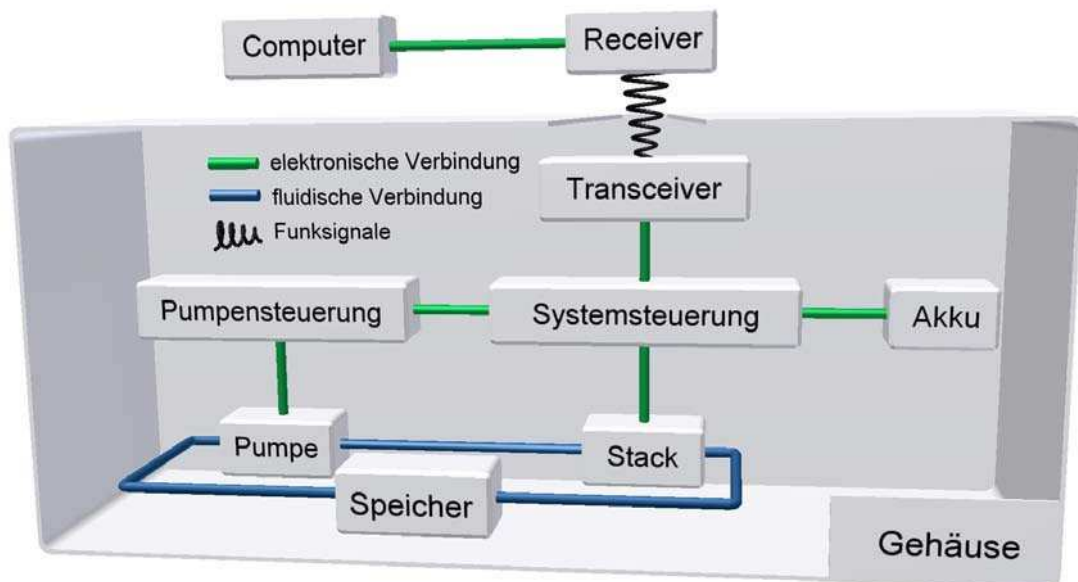


Abbildung 4.1: Aufbau der Systemkomponenten

Die zentrale Komponente bildet der Stack. Dieser stellt die für das System benötigte elektrische Energie zur Verfügung. Der Knotenpunkt des Systems ist die Systemsteuerung. Mittels dieser werden alle Komponenten miteinander verschaltet und geregelt. Der Speicher wird in Form eines Doppelspeichers realisiert, der die frische Ethanol-Lösung und die verbrauchte getrennt speichert. Das Prinzip eines Doppelspeichers ist im 4.1.7 näher erläutert. Dieser wird zusammen mit dem Gehäuse für dieses System speziell konstruiert und gebaut. Um die Ethanol-Lösung zu fördern kommt eine Pumpe zum Einsatz. Als Anwendung werden ein Sender (Transceiver) und ein Empfänger (Receiver) verwendet. Der Transceiver befindet sich im System und sendet Messdaten, bezüglich der Leistung des Stack, via Funksignale an einen Receiver. Am Computer können diese Daten visualisiert und gespeichert werden.

4.1.1 Stack

Der Stack wurde am Fraunhofer IZM Berlin in Zusammenarbeit mit anderen Fraunhofer Instituten entwickelt und zusammengebaut. Es handelt sich um einen selbstatmenden Stack bestehend aus vier elektronisch in Reihe geschalteten Zellen. Selbstatmend bedeutet, dass die Kathode offen zur Umgebung liegt und der Luftsauerstoff nur aufgrund von Zirkulation an die Kathode geführt wird. Dazu ist eine Belüftungsstruktur mit 4x4mm Kanälen an der offenen Kathode angebracht. In Abbildung 4.2 ist der Aufbau des DEFC-Stacks dargestellt. Da der Stack symmetrisch aufgebaut ist, wurde nur der obere Bizeller (zwei Zellen) genauer beschrieben. Im System werden jeweils zwei Zellen gleichzeitig mit Ethanol-Lösung durchströmt. Die beiden Bizeller sind über die Ethanol-Anschlüsse fluidisch in Reihe geschaltet.

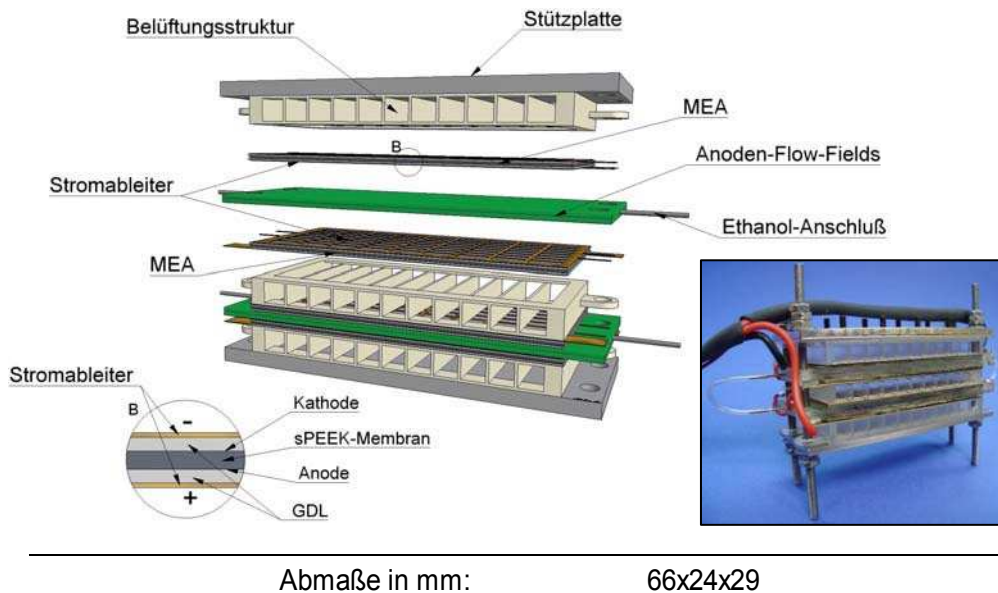


Abbildung 4.2: Aufbau der DEFC-Stacks

Die im Stack eingesetzte MEA ist eine Entwicklung des Fraunhofer ICT. Sie beinhaltet eine sPEEK (Sulfonated Poly (ether ether ketone)) Membran. Eine wichtige Eigenschaft dieser Membran ist ihr geringe Permeabilität gegenüber Ethanol mit entsprechend niedrigerem Cross-Over [19]. In der MEA befinden sich die Anode und Kathode. Bedingt durch die Verbesserung der Ethanol-Oxidation wird ein Katalysator bestehend aus Platin/Ruthenium (Pt/Ru) und Platin/Zinn (Pt/Sn) eingesetzt. Die Stromableiter bestehen aus Edelstahl mit einer Goldbeschichtung und haben eine Dicke von 150µm. Über diese sind die einzelnen Zellen in Reihe geschaltet. Das anodische Flow-Field besteht aus Stereolithographie-Polymer (Nylon) und ist in Form von drei ineinander verschlachten Mäanderstrukturen ausgeführt (siehe Abbildung 4.3) [20].



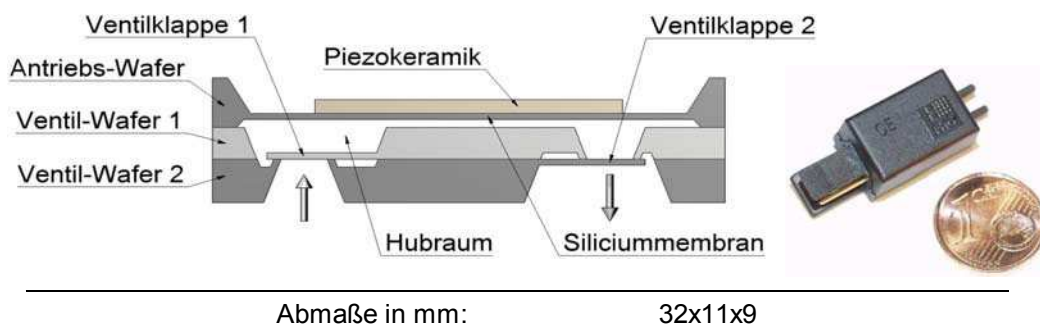
Abmaße in mm: 66x24x3

Abbildung 4.3: Anoden Flow-Field in Form von drei Mäanderkanälen

Diese Struktur wurde aufgrund des niedrigen Druckabfalls gewählt. Die beiden Stützplatten bestehen aus rostfreiem Edelstahl und dienen der Stabilisierung des Stacks sowie der Verpressung der einzelnen Zellen.

4.1.2 Pumpe

Bei der Pumpe handelt es sich um eine Mikromembranpumpe aus Silicium-Wafern. Sie ist eine Entwicklung des Fraunhofer IZM in München und dient im System zur Förderung der Ethanol-Lösung.



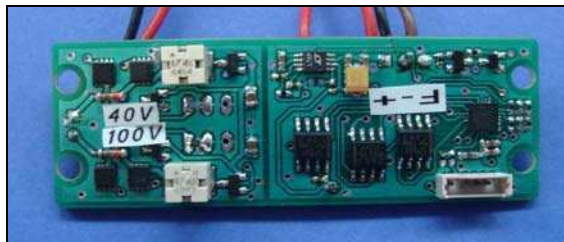
Abmaße in mm: 32x11x9

Abbildung 4.4: Pumpprinzip der Mikromembranpumpe

Im Spritzgussgehäuse, rechts in Abbildung 4.4 zu sehen, befindet sich ein $7 \times 7 \times 1 \text{ mm}^3$ großer Pumpenchip der aus drei aufeinander liegenden Silicium Wafern aufgebaut ist. Angetrieben durch eine Piezokeramik verändert die Siliciummembran ihre Form und vergrößert somit den Hubraum. Durch den erzeugten Unterdruck öffnet sich die Ventilklappe 1 und lässt das zu pumpende Medium in den Hubraum strömen. Beim Entspannen der Membran wird das Ventil 2 geöffnet, so dass das Medium gefördert wird (siehe Abbildung 4.4). Es wird pro Pumpzyklus ein Hubvolumen von ca. 270 Nanoliter gepumpt. Die Pumpen sind durch die kleine Geometrie sehr empfindlich gegen Partikelverschmutzung und sollten nur mit vor geschalteten Filter (Porengröße $\leq 5 \mu\text{m}$) betrieben werden [21]. Zur Bestimmung der Position der Pumpe im System werden unterschiedliche Betriebsweisen geprüft (siehe Kapitel 5.2).

4.1.3 Pumpensteuerung

Die Pumpensteuerung ist eine Entwicklung des Fraunhofer IIS. Sie wurde speziell für das System entworfen und gebaut. Ihre Abmaße entsprechen denen des Stack, so dass sie problemlos an den Stack angebaut werden kann. Die benötigte Versorgungsspannung liegt zwischen 3,0V und 5,5V. Über die Veränderung der Frequenz wird die Fördermenge eingestellt (Frequenzbereich: 1-200Hz) [22].

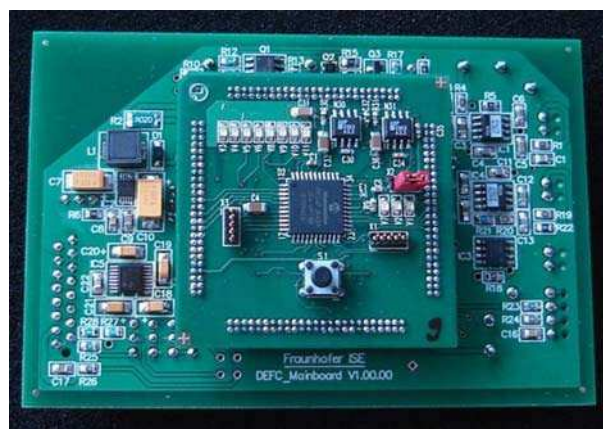


Abmaße in mm: 66x24x10

Abbildung 4.5: Pumpensteuerung

4.1.4 Systemsteuerung

Die Systemsteuerung ist am Fraunhofer ISE entwickelt worden. Sie wurde gleichzeitig mit dem Gehäuse entworfen und berücksichtigt die entsprechenden Kriterien. Die Anschlüsse sind alle von unten an die Platine geführt, so dass die Kabel nicht sichtbar in das System integriert sind (siehe Abbildung 6.5). Die Abmaße der Platine werden während des Konstruierens des Gehäuses festgelegt, um eine optimale Integrierung in das Gehäuse zu realisieren. Im System regelt die Systemsteuerung Ströme der einzelnen Komponenten.



Abmaße in mm: 105x70x35

Abbildung 4.6: Systemsteuerung

4.1.5 Anwendung

Im System werden Daten vom Stack über die Systemsteuerung an ein Transceiver Modul (encean TCM 120) übermittelt. Der Transceiver ist im System eingebaut und kann die Daten vom Stack online aufnehmen und an einen Receiver senden. Der Receiver ist an einen Computer angeschlossen und empfängt die hochfrequenten Signale. Die Daten können von Computer erfasst und mit einer Software ausgewertet werden. Beide Bauteile sind in Abbildung 4.7 zu sehen [23].



Abmaße TCM in mm: 42x28x5

Abbildung 4.7: Transceiver Modul (rechts) und Receiver Modul (links)

4.1.6 Akku

Um die vom Stack erzeugte Energie speichern zu können, wird ein Lithium Poly Akkumulator eingesetzt. Er ist an die Systemsteuerung angeschlossen und wird von dieser gesteuert. Die Nennspannung liegt bei ca. 3,7V. Die Speicherkapazität beträgt 650mAh.



Abmaße in mm: 40x35x5

Abbildung 4.8: Akkumulator

4.1.7 Speicher

Für den Portablen Einsatz des Systems wird für die Ethanol-Lösung ein Speicher benötigt. Dieser wird am Fraunhofer ISE für das System entwickelt und gebaut. Der Speicher soll als Doppelspeicher ausgeführt werden. Dies bedeutet, dass die Ethanol-Lösung nicht im Kreis gepumpt wird. Die verbrauchte Ethanol-Lösung (Abwasser) wird in einem separaten Behälter aufgefangen. Das Prinzip eines Doppelspeichers ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Je nach Anordnung können der Ethanolbehälter und der Abwasserbehälter als separate Bauteile oder in einem Bauteil realisiert werden.

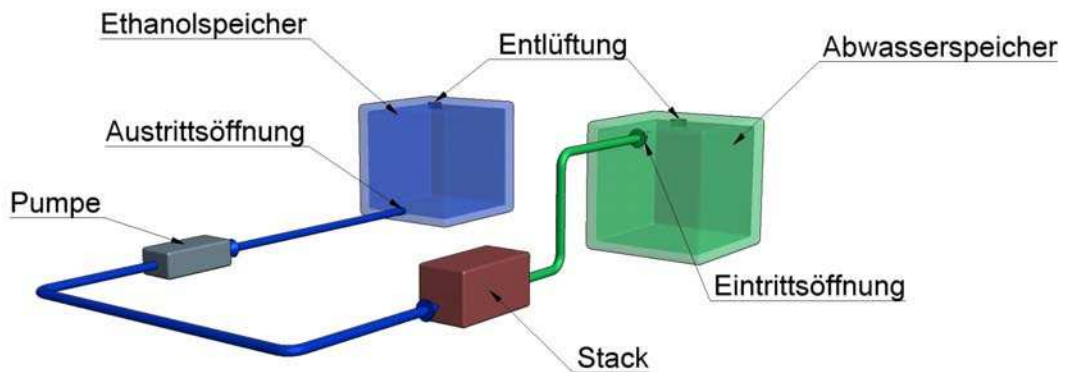


Abbildung 4.9: Prinzip eines Doppelspeichers

Zur optimalen Ausnutzung des Volumens sollte sich die Austrittsöffnung am untersten Punkt des Ethanolbehälters, die Eintrittsöffnung dagegen am obersten Punkt des Abwasserbehälters befinden. Damit sich kein Druck aufbaut, müssen Entlüftungsöffnungen vorgesehen werden. Die Entlüftungsöffnung des Ethanolbehälters kann gleichzeitig zum Befüllen des Speichers dienen. Falls der Abwasserbehälter nicht über die Entlüftungsöffnung entleert werden kann, sollte eine weitere Öffnung am untersten Punkt des Speichers vorgesehen werden.

Für die Dimensionierung der Größe des Speichers sind die experimentellen Arbeiten ausschlaggebend. Über die Festlegung der Durchflussmenge kann das Volumen des Speichers bestimmt werden. Dabei soll eine Betriebsdauer von 5h, ohne Entleerung des Speichers, sichergestellt werden. Die Konstruktion und Realisierung ist in Kapitel 6.1 näher beschrieben.

4.1.8 Gehäuse

Um die Systemkomponenten zu integrieren wird ein Gehäuse benötigt. Das Prototypensystem wird in Form eines Exponates realisiert. Als Ausstellungstück muss es bestimmte Bedingungen erfüllen. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen an das Gehäuse zusammengefasst:

1. Angemessenes Design
2. Blickfang der Hauptkomponenten
3. Peripherie nicht sichtbar
4. Luftzirkulation Stack
5. Ausfluss Reaktionswasser
6. Ideale Positionierung der Komponenten
7. Unauffällige Integration des Speichers

Das Gehäuse wird am Fraunhofer ISE entworfen und entwickelt. Die Konstruktion und Realisierung des Systemgehäuses bezüglich der aufgestellten Kriterien ist im Kapitel 6.1 beschrieben.

Designfindung

Mittels der oben genannten Kriterien wird ein Systemdesign entwickelt. Entsprechend des zweiten Kriteriums sind die Komponenten Stack, Systemelektronik, Pumpensteuerung und Transceiver sichtbar ins Gehäuse integriert. Mit Hilfe des CAD-Programms Inventor von Autodesk werden aus den geometrischen Abmaßen aller Komponenten virtuelle Modelle erstellt und im System angeordnet. In Abbildung 4.10 ist das Ergebnis der Designfindung dargestellt. Weitere Entwürfe zur Designfindung sind im Anhang zu finden (siehe Anhang Seite A-1 und A-2).

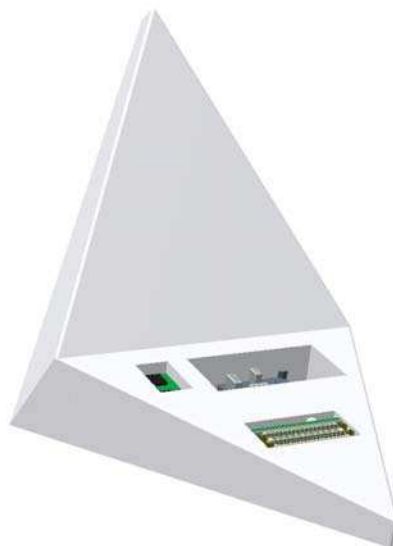


Abbildung 4.10 DEFC-Design

Als Enddesign wird eine symmetrische Dreieckform gewählt. Bezüglich des siebten Kriteriums kann der Speicher in den oberen Teil des Designs eingebaut werden. Auf die freie Fläche kann die Werbebezeichnung aufgeführt werden.

4.2 Leistungsbilanz des Systems

Zur Abschätzung des Leistungsbedarfs werden die benötigten Ströme der einzelnen Bauteile gemessen und in einer Bilanz dargestellt. Zur Gewährleistung einer Spannung von 3,7V (entsprechend der Nennspannung des Akkus), wird ein DC/DC Wandler eingesetzt (siehe Abbildung 4.11).

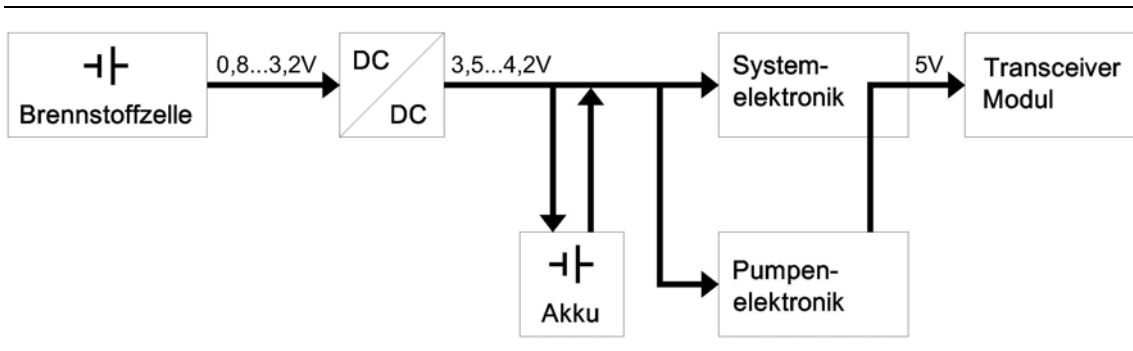


Abbildung 4.11: Schaltbild des Systems

Je nach Arbeitspunkt des Stacks variiert der Wirkungsgrad des DC/DC Wandlers $\eta_{DC/DC}$ zwischen 0,74 und 0,88. In Tabelle 4.1 werden die Ausgangsströme am DC/DC Wandler für eine angenommene Stackleistung von 200mW bestimmt. Diese Leistung wird für das System erwartet und somit hier angenommen.

Tabelle 4.1: Ausgangsstrom des Stacks für $P_{Stack} = 200mW$

U_{Stack} in V	I_{Stack} in mA	$\eta_{DC/DC}$	I_{out} bei 3,7V
1,00	200,000	0,830	44,865
1,20	166,667	0,840	45,405
1,40	142,857	0,845	45,676
1,60	125,000	0,852	46,054
1,80	111,111	0,857	46,324
2,00	100,000	0,860	46,486

Zum besseren Verständnis werden die einzelnen Ströme als Bilanz beispielhaft bei einer Stackspannung von 1,2V in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Pumpenelektronik, Pumpe und Systemsteuerung werden als Stromabnehmer zusammengefasst. Die Pumpe verbraucht beim Betrieb zusammen mit allen Steuerungselementen 8,1mA.

Wenn die Pumpe ausgeschaltet wird, fließt nur ein Strom von 4,1mA. Da der Transceiver nur beim Funken Strom benötigt, beläuft sich die mittlere Aufnahme auf 4,3mA.

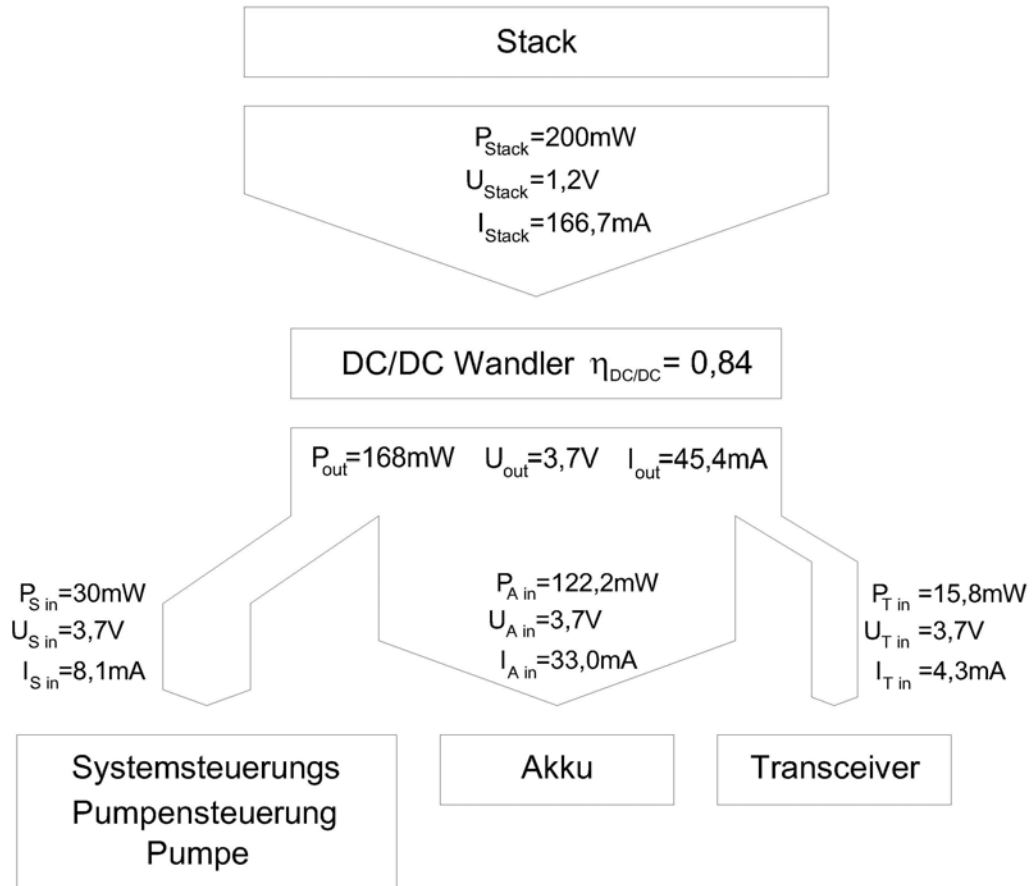


Abbildung 4.12: Leistungsbilanz des DEFC-Systems

Bei der Bilanz wurde angenommen, dass die Pumpe ständig läuft und der Transceiver (Sendemodul) ständig funkt. Unter der Voraussetzung, dass der Stack 200mW leistet, würden bei dieser Betriebsweise 33mA in den Akku fließen und diesen aufladen.

5 Experimentelle Arbeiten

In diesem Kapitel werden Stack und Mikropumpe näher charakterisiert, um eine optimale Leistungsausbeute des Stacks zu gewährleisten, sowie Parameter für die Dimensionierung der Bauteile die in Kapitel 6 konstruiert werden, zu bestimmen.

5.1 DEFC-Stack

Es werden zwei baugleiche Stacks betrachtet, die interne Bezeichnung lautet DEFC 24 und DEFC 25. Bei Stack DEFC 24 wird die optimale Leistungsausbeute bezüglich der Molarität und des Volumenstroms der Ethanol-Lösung bestimmt. Bei Stack DEFC 25 werden, entsprechend der Ergebnisse des Stack 24, die Parameter eingestellt und der Betriebspunkt festgelegt.

5.1.1 Charakterisierung des DEFC-Stack 24

Folgende Parameter beeinflussen die Leistungsfähigkeit und das Betriebsverhalten des Stacks:

1. Betriebstemperatur
2. Temperatur der zugeführten Ethanol-Lösung
3. Molarität der zugeführten Ethanol-Lösung
4. Durchfluss der zugeführten Ethanol-Lösung
5. Sauerstoffzufuhr

Im System soll der selbsttätige Stack bei Umgebungstemperatur betrieben und die Ethanol-Lösung nicht temperiert zugeführt werden. In diesem Fall sind die Molarität und der Durchfluss der Ethanol-Lösung die einzigen variablen Parameter. Die zum Einsatz kommende Mikropumpe hat einen sehr engen Leistungsbereich bedingt durch den Frequenzbereich der Ansteuerung der Pumpe. Daher werden nur real umsetzbare Volumenströme bei der Auslegung des Stacks betrachtet. Im bereits bestehenden Teststand wird der Stack bezüglich dieser Parameter getestet und ausgelegt. Der Aufbau ist für beide Versuchsabläufe gleich und wird in Abbildung 5.1 dargestellt.

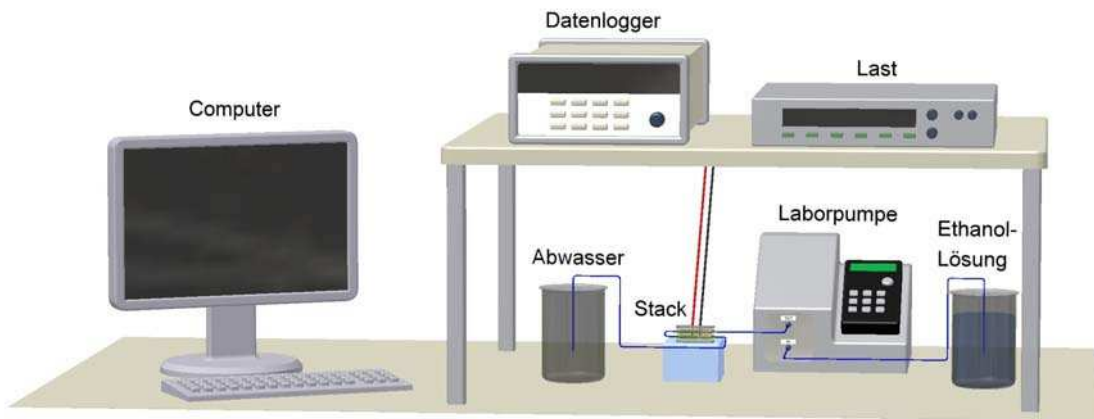


Abbildung 5.1: Aufbau des DEFC-Messstandes

Mit Hilfe eines Datenloggers werden die Messdaten aufgenommen und am Computer mit der Software LabVIEW visualisiert. Die Steuerung des Teststandes erfolgt ebenfalls über ein in LabVIEW entwickeltes Messprogramm. So kann die Last zur Einstellung unterschiedlicher Belastungsstufen angesteuert werden. Es wird sowohl die Spannung des gesamten Stack, als auch die jeder einzelnen Zelle im Sekundentakt aufgezeichnet. Des Weiteren wird die Temperatur über ein Thermoelement bestimmt. Die Ethanol-Lösung wird mit einer Laborpumpe gefördert. An der Laborpumpe können unterschiedliche Volumenströme eingestellt werden. Die beiden Bizeller des Stack werden, entsprechend der späteren Systemkonstellation, fluidisch in Reihe geschaltet.

Durchführung und Ergebnisse

Insgesamt werden vier unterschiedliche Molaritäten (0,5 bis 2molar) getestet. In der Abteilung durchgeführte Voruntersuchungen zeigten, dass höhere Molaritäten zu einer sehr starken Quellung der Membran führen und sich negativ auf die Leistungsfähigkeit und Haltbarkeit des Stacks auswirken können. Mit jeder Lösung werden drei Volumenströme eingestellt (0,8ml/min; 1,3ml/min; 2,3ml/min). Die Förderleistung der Pumpen ist aufgrund des Frequenzbereiches der Ansteuerung beschränkt (siehe Kapitel 4.1.3). Somit werden in diesem Zusammenhang keine höheren Volumenströme betrachtet.

Zu Anfang jeder Messreihe wird die entsprechende molare Lösung angesetzt und bei jedem Volumenstrom eine Kennlinie aufgenommen. Die Belastung wird galvanostatisch vollzogen. Am Computer werden die entsprechenden Laststufen eingestellt und die Messdaten mit Hilfe der Software Labview visualisiert und auf den Computer gespeichert. Um die Zellen nicht zu beschädigen wird der Test beim Unterschreiten der Zellspannung von 180mV beendet. Mit dieser Methodik werden die folgenden Testdaten gewonnen.

Zunächst werden die Kennlinien unterschiedlicher Volumenströme bei bestimmten Molaritäten miteinander verglichen.

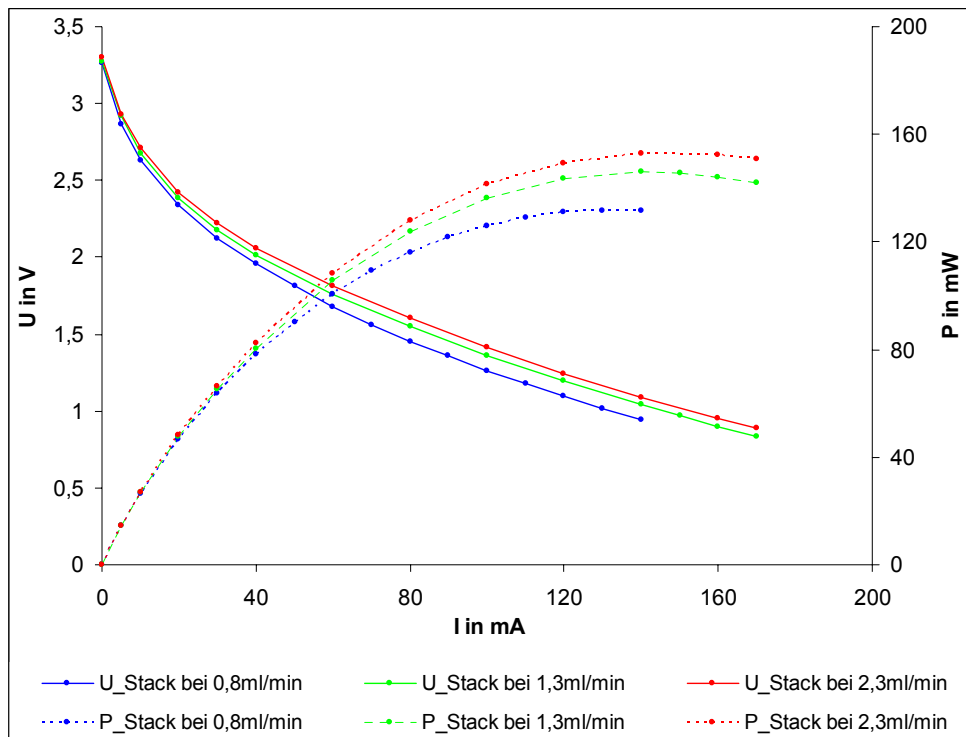


Abbildung 5.2: UI-Kennlinien unterschiedlicher Volumenströmen bei einer 1molaren Ethanol-Lösung

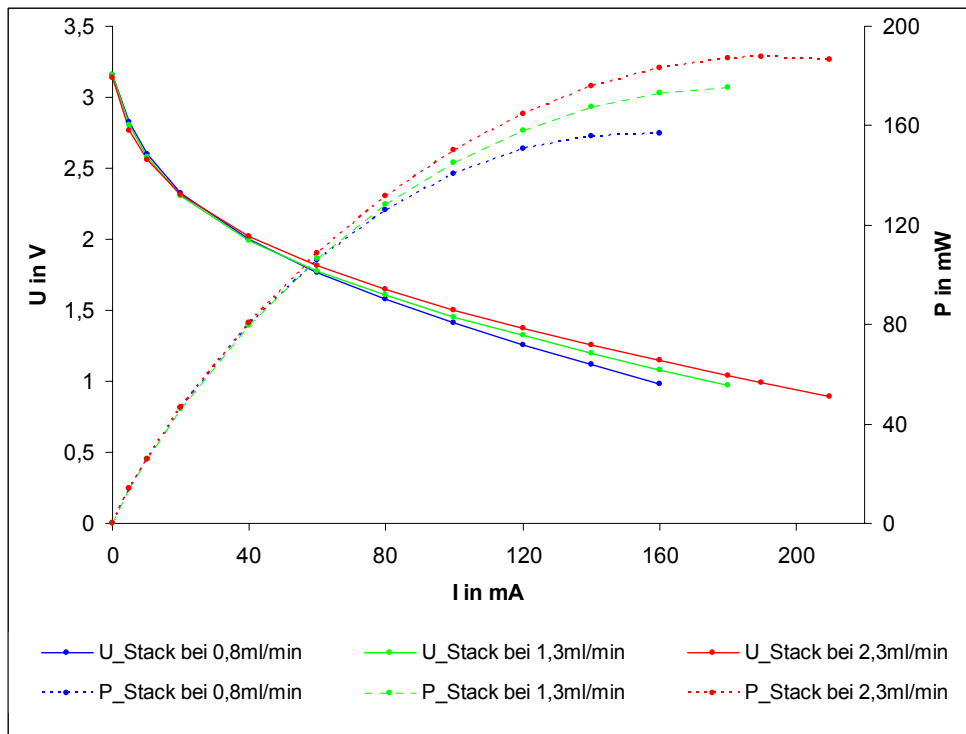


Abbildung 5.3: UI-Kennlinien unterschiedlicher Volumenströmen bei einer 2molaren Ethanol-Lösung

Bei allen Molaritäten konnte das gleiche Verhalten bezüglich der Erhöhung des Volumenstroms beobachtet werden. Mit der Erhöhung des Durchflusses steigt die Leistung des Stacks an. Allgemein ist zu beobachten, dass mit dem Anstieg des Volumenstroms sowie mit der Erhöhung der Molarität auch die Leistung ansteigt. Um dies etwas besser zu verdeutlichen, wird der MPP als Funktion der Molarität für die verschiedenen Volumenströme in Abbildung 5.4 dargestellt. Bei Kennlinien, die den MPP nicht erreicht haben, wird die Höchstleistung gewählt. Die kompletten Messdaten und die nicht aufgeführten Kennlinien sind im Anhang aufgeführt (siehe Anhang Seite A-3).

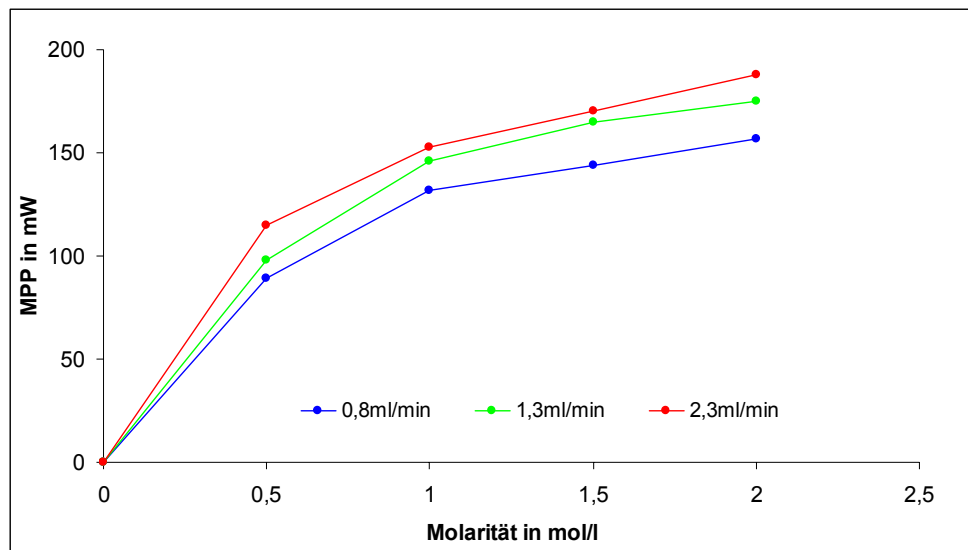


Abbildung 5.4: MPP in Abhängigkeit zur Molarität für unterschiedliche Volumenströme

In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Erhöhung des Volumenstroms von 1,3ml/min auf 2,3ml/min einen Anstieg des MPP um 7,2% im Durchschnitt bewirkt. Bezogen auf die Molarität steigt der MPP zwischen 1mol/l und 2mol/l linear um ca. 10% an.

Für die Dimensionierung des Speichers bedeutet eine Verdopplung des Volumenstroms auch eine Verdopplung des Speichervolumens. Somit ist die Leistungsausbeute bei 1,3ml/min ausreichend und für das Volumen angemessen. Die höchste Leistung wird bei einer 2molaren Lösung erreicht. Diese Ethanol-Lösung wird somit im System eingesetzt.

5.1.2 Bestimmung des Arbeitspunktes für den DEFC-Stack 25

Im Bezug auf die in Kapitel 5.1.1 festgelegten Parameter für die Fördermenge und Molarität wird der Betriebspunkt des Einsatz-Stacks bestimmt. Dazu wird der Stack DEFC 25 in den Teststand eingebaut und in Betrieb genommen.

Durchführung und Ergebnisse

Die Vorgehensweise gleicht dem vorhergehenden Test. Die Kennlinie wird auf gleiche Weise erstellt. Eine 2molare Ethanol-Lösung wird mit 1,3ml/min durch den Stack gepumpt und die Kennlinie galvanostatisch aufgenommen.

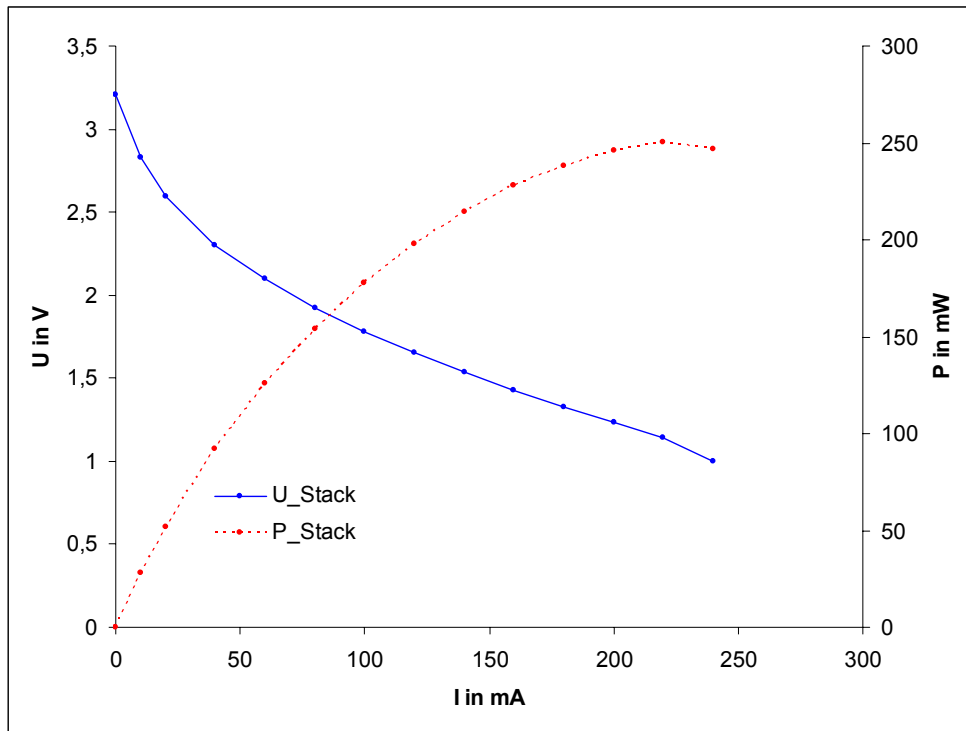


Abbildung 5.5: UI-Kennlinien einer 2molaren Ethanol-Lösung bei 1,3ml/min

Um einen stabilen Betrieb zu garantieren wird der Arbeitspunkt bei 80% des MPP festgelegt. Bei einem MPP von 250mW wäre der Arbeitspunkt bei 200mW und entsprechend bei 120mA und 1,65V.

Beim Vergleich dieser Ergebnisse mit der Leistungsbilanz (siehe Kapitel 4.2) wird deutlich, dass die Leistung in diesem Arbeitspunkt für den Betrieb des Systems ausreichend ist.

5.2 Charakterisierung der Silicium-Mikropumpe

Im System dient die Mikropumpe der Beschickung des Stacks mit einer Ethanol-Lösung. Um diese zu charakterisieren wurden einige Tests vorgenommen und die Betriebsweise analysiert.

Es werden 3 Pumpen auf Stabilität im Dauerbetrieb, Gegendruck und Ansaugleistung getestet. Bezüglich der Ergebnisse aus Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 werden die Pumpen mit einer Frequenz von 100Hz angesteuert. Bei dieser Frequenz liefern die Pumpen den benötigten Volumenstrom von ca. 1,3ml/min.

Beim Testen der Pumpen soll ein Filter eingesetzt werden, um die Pumpe vor Verunreinigungen zu schützen. Da sich - bedingt durch den Filter - ein sehr hoher Druckabfall aufbaut und dieser sehr große Schwankungen in der Leistung der Pumpen verursacht, wird das deionisierte Wasser (Di-Wasser) vor jedem Versuch vorgefiltert. Alle Experimente werden gravimetrisch durchgeführt, das bedeutet, dass der Volumenstrom über die Masse mit Hilfe einer Präzisionswaage ermittelt wird. Dazu wird im Vorfeld die Dichte des zum Einsatz kommenden deionisierten Wassers ermittelt (0,9883g/ml). Mit Hilfe der Gleichung (16) kann der Volumenstrom für die einzelnen Messreihen ermittelt werden. Für die Darstellung der Testaufbauten wird eine Zeichnerische Darstellung der einzelnen Messstände bevorzugt. Einige fotografische Abbildungen der Pumpenexperimente sind im Anhang hinterlegt (siehe Anhang Seite A-20).

$$\dot{V} = \frac{m}{t} \rho_{Di-Wasser} \quad (16)$$

5.2.1 Verhalten beim Dauerbetrieb

Um zu bestimmen wie stabil die Leistung der Pumpen ist, werden sie in diesem Versuch über längere Zeit in Betrieb genommen. Dabei wird der Volumenstromänderung in bestimmten Intervallen betrachtet.

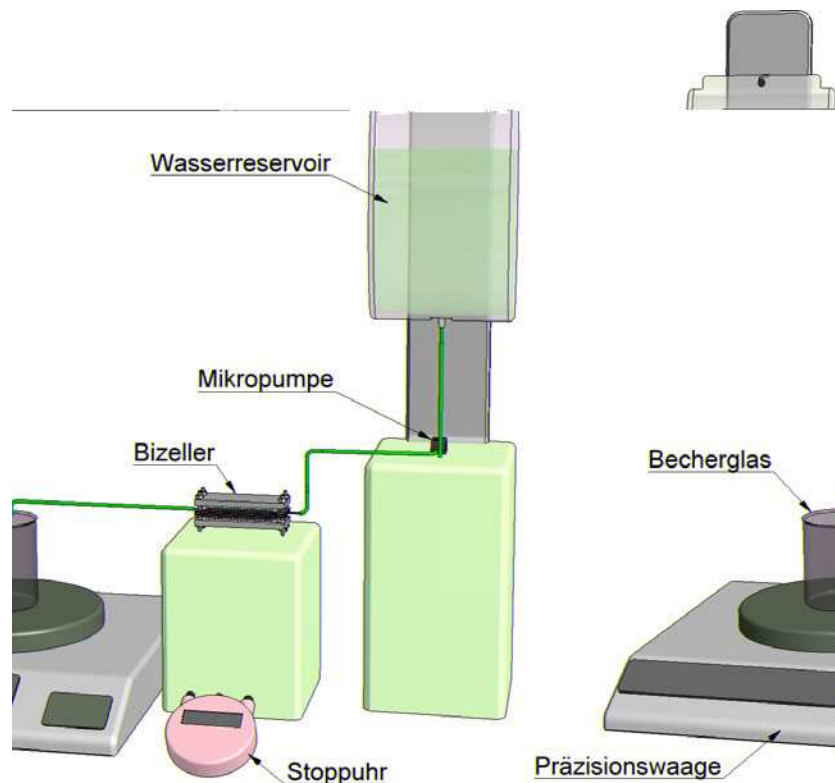


Abbildung 5.6: Aufbau des Dauertests

Durchführung und Ergebnisse

Um reale Bedingungen zu simulieren, wird das Di-Wasser durch einen Bizeller (Stack, bestehend aus zwei Zellen) gepumpt. Der Stack des Einsatzsystems besteht aus zwei Bizeller, die fluidisch in Reihe geschaltet sind. Der Speicher wird mit gefiltertem Di-Wasser befüllt und in einer Höhe von ca. 10cm über die Pumpe gehängt. Der Bizeller befindet sich ca. 5cm unter der Pumpe. Hinter dem Bizeller wird das Wasser in ein Becherglas gepumpt. Das Becherglas befindet sich auf einer Präzisionswaage. Alle 10 Minuten wird ein Wert online abgelesen und dokumentiert. Aus der jeweiligen Massendifferenz wird die Volumenstromänderung bestimmt.

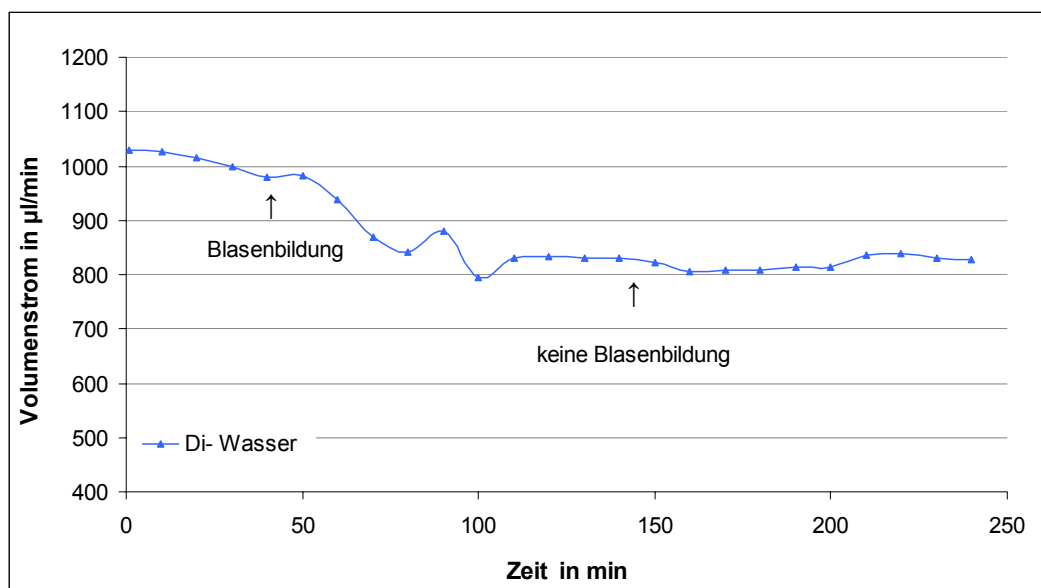


Abbildung 5.7: Dauertest der Pumpe 151G1 031

Während der Durchführung des Tests sind Luftblasen im Schlauch zu beobachten. Bei entsprechender Größe werden sie vom Strom mitgerissen. Der Verlauf in Abbildung 5.7 zeigt einen Abfall an den Stellen wo die Blasen auftreten. Nach ca. zwei Stunden Laufzeit sind keine Blasen mehr zu beobachten und der Volumenstrom bleibt, abgesehen von kleinen Schwankungen, stabil bei ca. 800µl/min.

Um diese Beobachtung zu bestätigen wird der Versuch mit abgekochtem Di-Wasser wiederholt. Es wird angenommen, dass nach dem Abkochen des Di-Wassers keine bzw. geringe Mengen an gelösten Gasen im Wasser enthalten sind. Das Wasser wird vor dem Einsatz wieder auf Raumtemperatur abgekühlt und gefiltert. Die restlichen Bedingungen bleiben gleich.

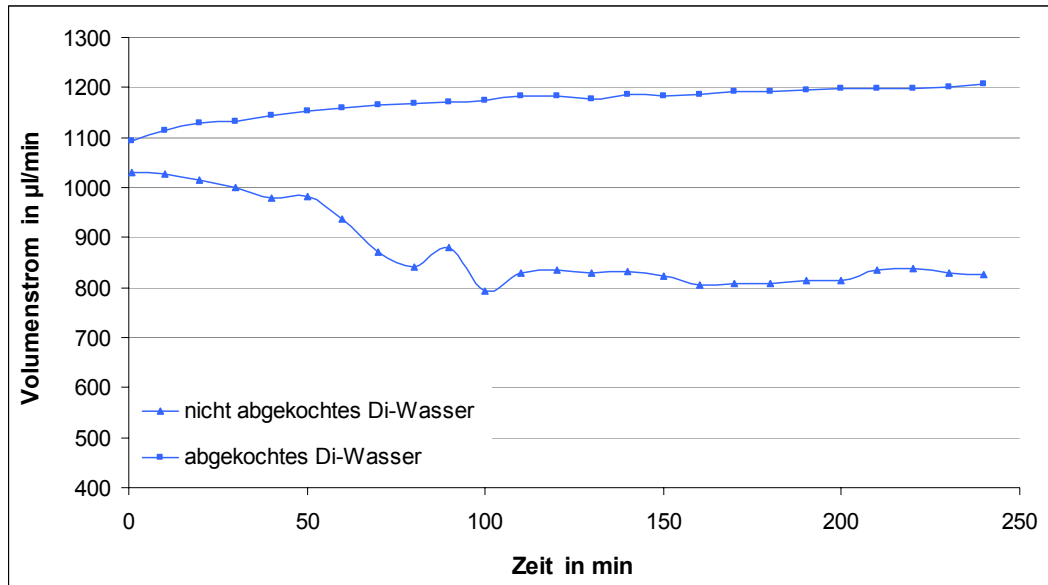


Abbildung 5.8: Vergleich zwischen abgekochtem und nicht abgekochtem Di-Wasser

Aus der Betrachtung der Ergebnisse lässt sich schließen, dass die Blasenbildung einen Einfluss auf die Leistung der Pumpe hat. Während des gesamten Versuchs werden keine Blasen im Schlauch beobachtet. Auf längere Zeit betrachtet, bewirkt das Abkochen des Wassers einen Anstieg des Volumenstroms um ca. 50%. Um allgemeine Aussagen machen zu können, müssen diese Versuche mit weiteren Pumpen belegt werden. Somit werden zwei weitere Pumpen mit abgekochtem und nicht abgekochtem Di-Wasser getestet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.9 zusammengefasst. Die kompletten Messtabellen sind im Anhang aufgeführt (siehe Anhang Seite A-4 bis A-9).

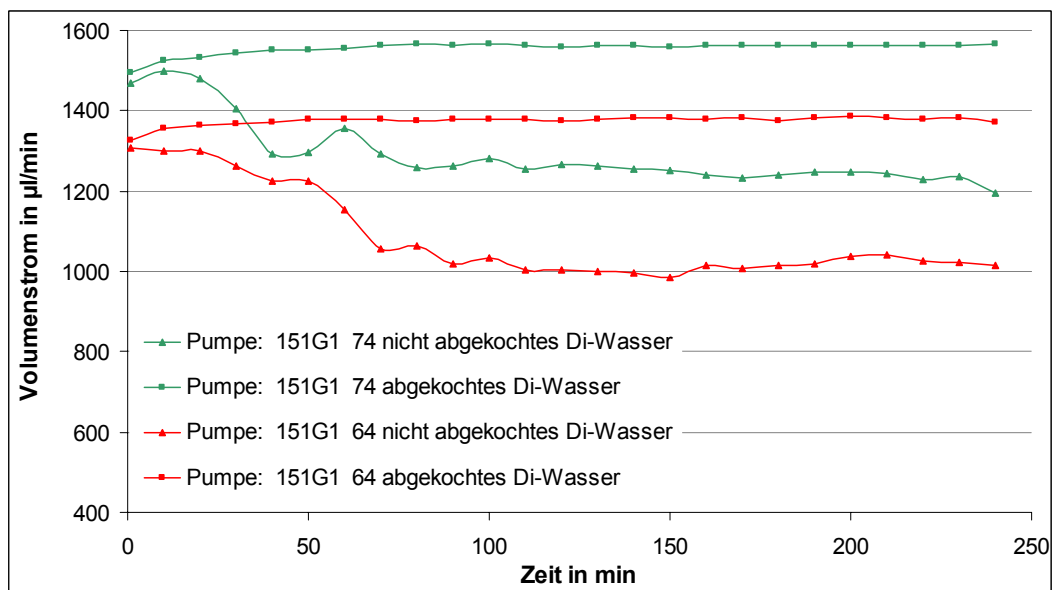


Abbildung 5.9: Dauertest der Pumpen 151G1 64 und 151G1 74 mit abgekochtem und nicht abgekochtem Di-Wasser

Auch bei den Tests mit weiteren Pumpen zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Die Pumpen fördern auf längere Zeit ca. 400ml/min mehr, als bei Betrieb mit Blasenbildung. Somit lässt sich grundsätzlich feststellen, dass die gelösten Gase in der Flüssigkeit einen Einfluss auf die Leistung der Mikropumpe haben. Auch ist allgemein zu beobachten, dass die Gesamtleistung der baugleichen Pumpen zwischen 1200ml/min und 1600ml/min variieren.

Bezüglich der Ergebnisse dieser Versuche wird im Folgenden das gelöste Gas aus dem Di-Wasser entfernt, bevor es zum Einsatz kommt.

5.2.2 Volumenstromänderung bezogen auf Pumphöhe

Mittels des in Abbildung 5.10 gezeigten Aufbaus wurde die Variation bezogen auf die Pumphöhe untersucht.

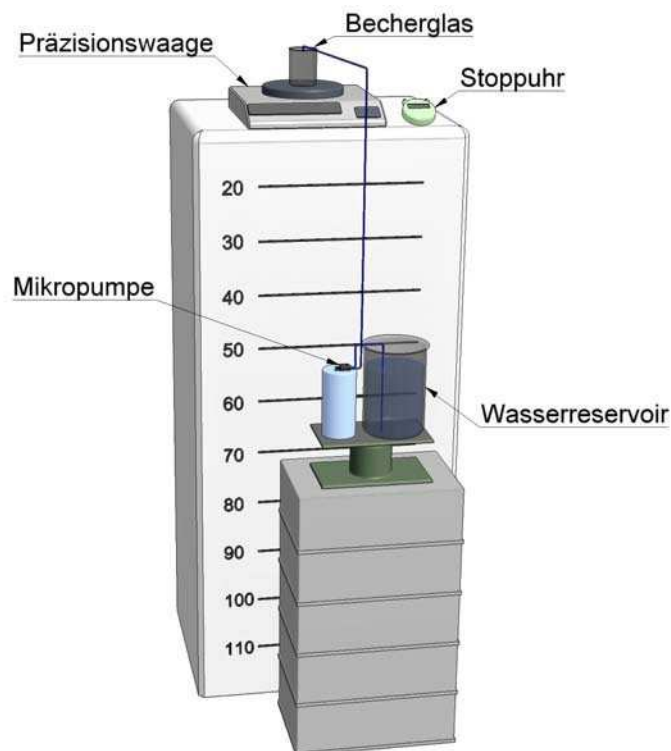


Abbildung 5.10: Aufbau zur Ermittlung der Förderleistung bezogen auf die Pumphöhe

Durchführung und Ergebnisse

Um nur den Gegendruck zu testen, befinden sich Pumpe und zu förderndes Medium auf einer Höhe. Der Wasserspeicher wird dann zusammen mit der Pumpe nach jeder Messung um 10cm erniedrigt. Mit Hilfe des verstellbaren Ständers kann der Wasserspiegel genau auf die bemaßte Linie justiert. Während der Höhenverstellung bleibt die Pumpe angeschlossen und wird erst am Ende der kompletten Prüfung ausgetauscht.

Das gepumpte Wasser sammelt sich in einem auf der Präzisionswaage stehenden Becherglas, mit einer Stoppuhr wird die Zeit erfasst. Jede Messung dauert drei Minuten, und in jeder Minute wird ein Wert aufgenommen (insgesamt drei Werte pro Messung und Pumpe). Aus den Messwerten kann der Volumenstrom mit Hilfe der Gleichung (15) und der Dichte berechnet werden. Aus den drei Werten kann der Mittelwert gebildet und die Standardabweichung bestimmt werden. In Abbildung 5.11 ist der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Pumphöhe dargestellt. Die kompletten Messtabellen sind im Anhang gezeigt (siehe Anhang Seite A-10 bis A-12).

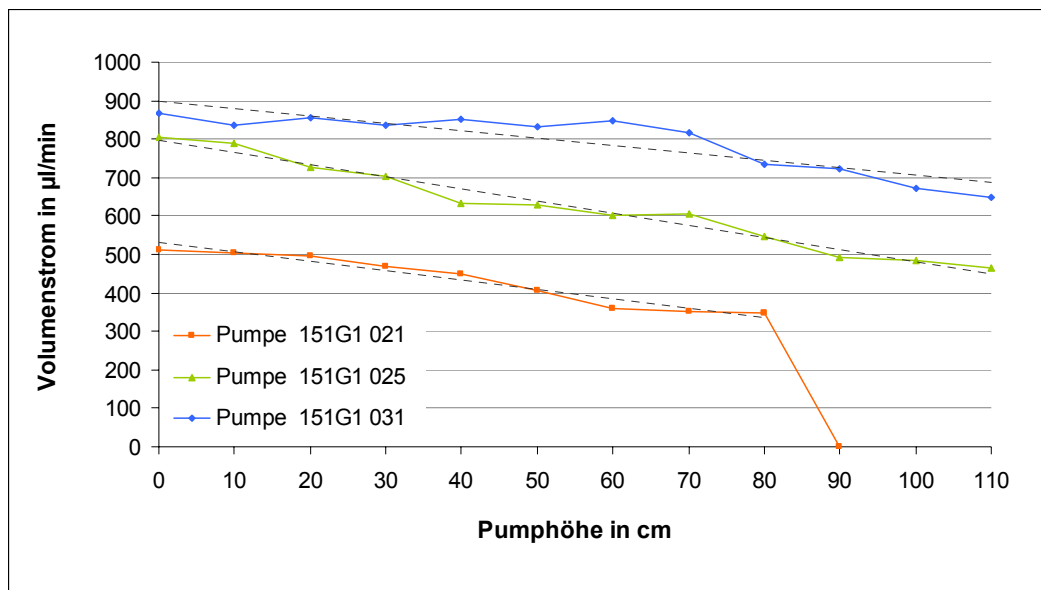


Abbildung 5.11: Volumenstromänderung bezogen auf die Pumphöhe

Zunächst kann die Variation der Volumenströme auch bei diesen Tests beobachtet werden. Die Fördermengen der drei baugleichen Pumpen variieren beim Betrieb ohne Gegendruck zwischen 500 und 900 µl/min. Bei allen Pumpen erkennt man einen proportionalen Abfall bezogen auf die Pumphöhe. Die Pumpe 151G1 021 hat bis zur Pumphöhe von 80cm einen Leistungsabfall von 25µl/min/10cm Höhenzunahme. Bei einer Pumphöhe von 90cm kommt sie gegen den statischen Druck des Wassers nicht mehr an und fördert überhaupt nicht mehr. Beim Vergrößern der Pumphöhe kann beobachtet werden, dass die Flüssigkeit rückwärts durch die Pumpe gedrückt wird. Sie war nach diesem Test nicht mehr funktionsfähig und konnte bei weiteren Prüfungen nicht mehr eingesetzt werden. Die Pumpe 151G1 025 zeigt einen durchschnittlichen Leistungsabfall von 32µl/min/10cm Höhenzunahme und die Pumpe 151G1 031 nur 20µl/min/10cm Höhenzunahme.

Da dieser Versuch zeitlich vor dem Dauertest (Kapitel 5.2.1) gemacht wurde, ist hierbei mit nicht abgekochtem Wasser getestet worden. Des Weiteren sind andere Pumpen

zum Einsatz gekommen, da sie nach diesem Test nicht mehr funktionsfähig waren. Die Pumpe 151G1 031 ist die einzige Pumpe, die bei allen Tests eingesetzt werden konnte.

5.2.3 Volumenstromänderung bezogen auf die Ansaughöhe

Zur Beschreibung der Ansaugleistung wurden die Pumpen in verschiedenen Ansaughöhen getestet. Mit Hilfe des in Abbildung 5.12 dargestellten Aufbaus wird der Versuch durchgeführt.

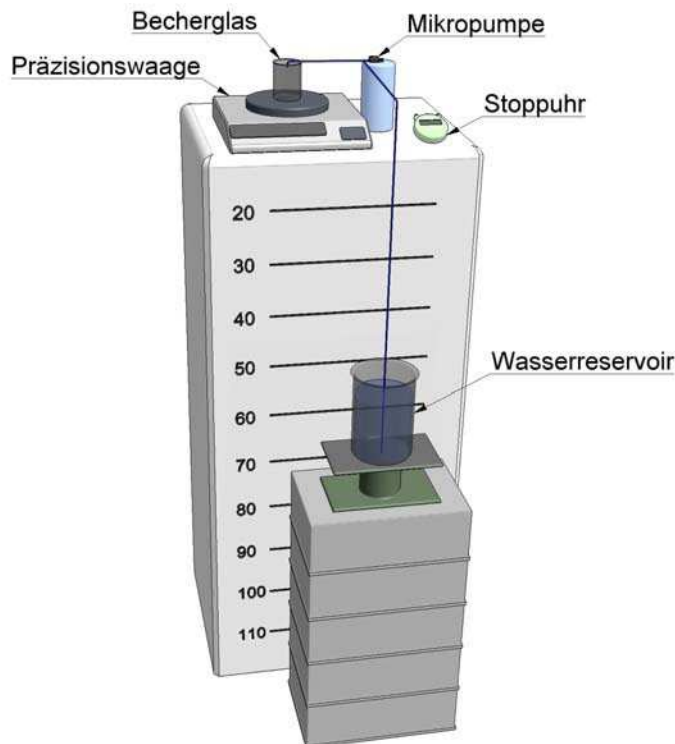


Abbildung 5.12: Aufbau zur Ermittlung der Pumpleistung bezogen auf die Ansaughöhe

Durchführung und Ergebnisse

Um die Ansaugleistung zu ermitteln, muss sich die Pumpe immer auf der gleichen Höhe wie das Ende des Schlauchs am Auslass befinden. Analog zu Kapitel 5.2.2 wird auch bei diesem Versuch die Höhe variiert. Abgekochtes und gefiltertes Di-Wasser dient als Fördermedium. Die Masse des geförderten Wasser wird mit der Präzisionswaage aufgenommen und die Zeit mit einer Stoppuhr erfasst. Mit der gewonnenen Erfahrung bei den vorherigen Tests kann die Messmethodik vereinfacht werden. Auf jedem Niveau bekommt die Pumpe eine Eingewöhnungszeit von ca. 10 Minuten, dann wird 10 Minuten lang gemessen. Nach jeder Messreihe wird die Ansaughöhe vergrößert (von 0 bis 110cm). Auch hier bleibt die Pumpe während der Höhenverstellung

angeschlossen und erst nach Beenden der Testreihe kann sie ausgetauscht werden. In Abbildung 5.13 ist der Volumenstrom in Abhängigkeit der Ansaughöhe dargestellt. Die kompletten Messtabellen sind dem Anhang beigelegt (siehe Anhang Seite A-13)

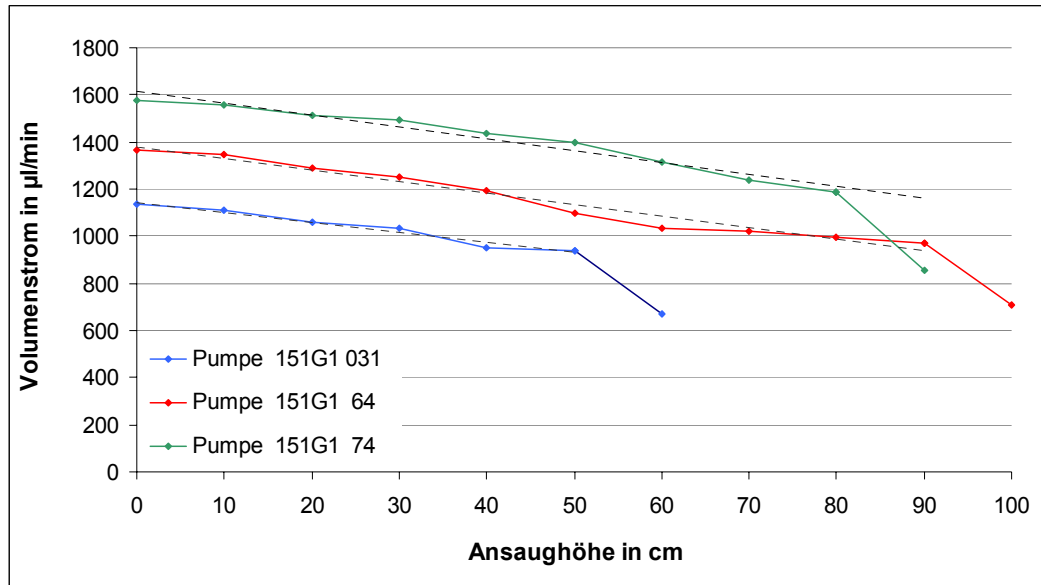


Abbildung 5.13: Volumenstromänderung bezogen auf die Ansaughöhe

Es wird ein proportionaler Abfall des Volumenstroms mit steigender Ansaughöhe festgestellt. Der durchschnittliche Abfall beträgt ca. $40\mu\text{l}/\text{min}/10\text{cm}$ Höhenzunahme. Ab einer bestimmten Ansaughöhe fällt die Leistung rapide ab. An dieser Stelle wird die Messung abgebrochen, um die Pumpen nicht zu beschädigen. Bei welcher Ansaughöhe der Endpunkt liegt, ist pumpenspezifisch und kann nicht verallgemeinert werden. Beim Vergleich mit dem Test bezüglich des Verhaltens auf die Pumphöhe zeigt dieser Test eine kleinere Streuung der einzelnen Messwerte. Dies und die höhere Gesamtleistung der Pumpe 151G1 031 lassen sich auf die Verwendung von gasarmen Di-Wasser zurückführen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse aus den Pumpentests ableiten:

- Die Pumpen weisen eine hohe Sensibilität bezüglich der Ansaughöhe und Pumphöhe auf.
- Im System sollten die Pumpen möglichst geringem Gegendruck und Ansaugdruck ausgesetzt werden.
- Das zu fördernde Medium sollte möglichst geringe Anteile an gelösten Gasen beinhalten.

6 Konstruktive Arbeiten

Im Anschluss an die experimentellen Arbeiten werden die Konstruktion des Doppelspeichers und des Gehäuses erläutert. Mit Hilfe des CAD-Programms Inventor 2008 von Autodesk werden dreidimensionale Modelle erstellt. Diese dienen der visuellen Darstellung des Gesamtkonzepts sowie der genauen Dimensionierung der Komponenten. Im Folgenden werden die Konstruktionen und die Verfahren zur Realisierung der einzelnen Bauteile beschrieben.

6.1 Konstruktion des Systemgehäuses

Zunächst wird das Verfahren zur Herstellung des Gehäuses festgelegt (siehe Kapitel 6.1.1). Das Gehäuse wird in zwei Bereiche unterteilt. Der hintere Bereich dient der Unterbringung des Speichers und der vordere Bereich beinhaltet alle elektronischen Bauteile (siehe Abbildung 6.1). Um sicher zu stellen, dass keine Flüssigkeit aus dem Speicher an die elektronischen Bauteile gelangt, werden diese beiden Bereiche räumlich voneinander getrennt.

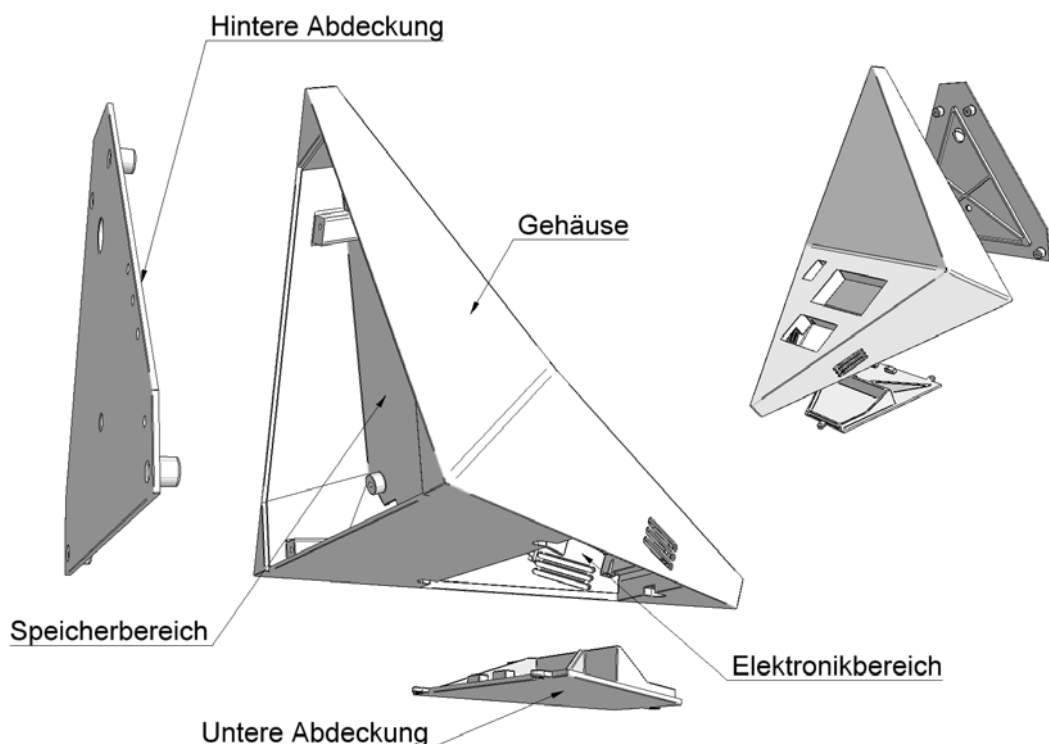


Abbildung 6.1: Komponenten und Bereiche des Gesamtgehäuses

Das Gesamtgehäuse setzt sich aus drei wesentlichen Bauteilen zusammen. Die Komponenten bestehen aus Gehäuse, unterer und hinterer Abdeckung.

6.1.1 Wahl des Herstellungsverfahrens

Um eine möglichst freie Formgestaltung realisieren zu können, wird das Rapid Prototyping Verfahren gewählt. Durch Recherche wird das selektive Lasersintern (SLS), als Verfahrensart des Rapid Prototypings verwendet. Hierbei werden die Bauteile mit Hilfe eines Lasers aus einem Pulvermaterial gesintert. Dieses Schichtbauverfahren bietet die Möglichkeit auch komplexe Formen zu realisieren und ist somit ideal zum Herstellen von Prototypen. An das Material werden keine besonderen Anforderungen gestellt, da es im Normalfall zu keinem Kontakt mit aggressiven Flüssigkeiten kommt und nur unter Umgebungstemperaturen betrieben wird. Zum Einsatz von Gewindebuchsen muss das Material geringen mechanischen Belastungen standhalten. Des Weiteren sollte die Oberfläche zur Weiterverarbeitung (Lackieren) geeignet sein. Das Gehäuse und die Abdeckungen werden von einer externen Firma gefertigt, oberflächenbehandelt und lackiert. Nach einem Beratungsgespräch mit dieser Firma wurde das Sintermaterial Polyamid 2200 (PA2200) [24] gewählt.

6.1.2 Speicherbereich

Zur Dimensionierung der Größe des gesamten Systems ist das Volumen des Speichers eine wichtige Bezugsgröße. Um dieses zu bestimmen wird Bezug auf die Ergebnisse des Dauertest der Mikropumpen in Kapitel 5.2.1 genommen. Die Volumenströme liegen zwischen 1,2ml/min und 1,6ml/min. Bei einem Betrieb von 5h wird ein Volumen von 360ml bis 480ml benötigt. Für die Konstruktion wird das Volumen zu 500ml festgelegt. Zusammen mit dem Abwasservolumen entsteht ein Gesamt-Nettovolumen von 1000ml. Um zunächst das Gehäuse zu konstruieren wird das Bruttovolumen des Doppelspeichers festgelegt. Dieses muss groß genug sein, um den gesamten Speicher zu beinhalten. Die detaillierte Konstruktion des Speichers ist in Kapitel 6.2 beschrieben. Die Form des Bruttovolumens entspricht der Form des Gehäusedesigns, dabei ist in die Rückwand eine Vertiefung zur einfachen Montage des Speichers vorgesehen (siehe Abbildung 6.2).

Für den späteren Betrieb ist es wichtig, dass das untere Volumen (Abwasservolumen) etwas größer dimensioniert wird, um zu gewährleisten, dass das gesamte obere Volumen (Ethanol-Lösung) hineinpasst. Die Pumpe könnte sonst während des Betriebs durch den entstehenden Druck beschädigt werden.

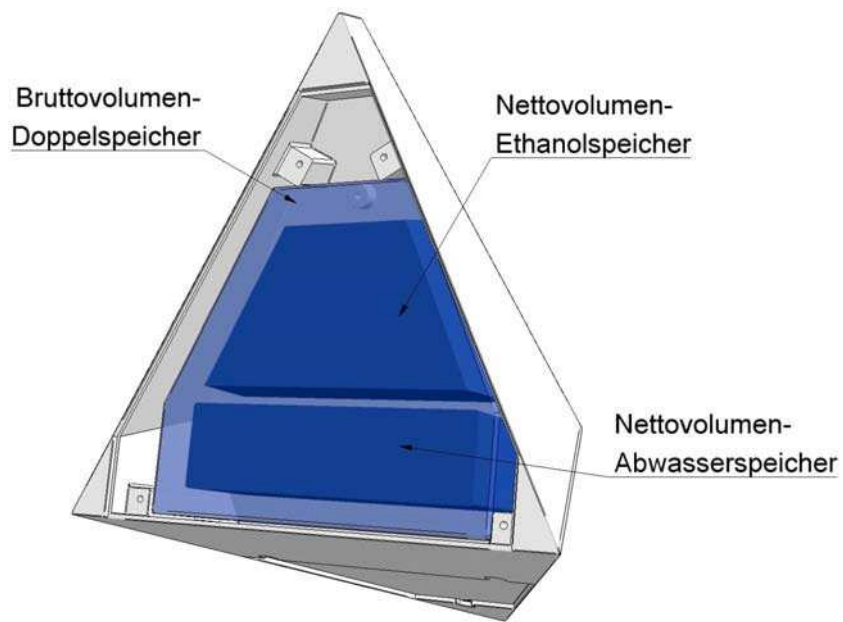


Abbildung 6.2: Auslegung des Speicherbereichs

Zur Befestigung der hinteren Abdeckung und des Speichers werden Erhebungen an das Gehäuse angebracht. In diese werden Bohrungen für M3 (metrisches Gewinde 3mm) Gewindebuchsen vorgesehen. Die Dimensionierung der Bohrungen wird mit Hilfe eines Produktdatenblattes der Buchsen festgelegt [25]. Die Passung der Befestigungspunkte des Speichers werden mit dessen Konstruktion in Kapitel 6.2.3 festgelegt.

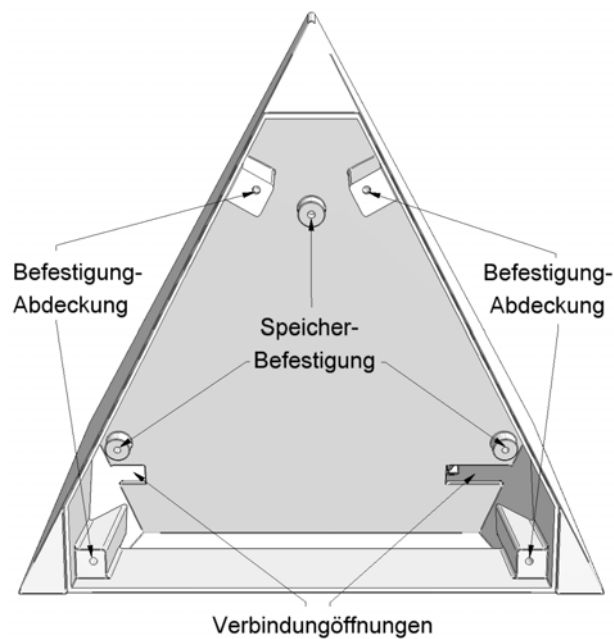


Abbildung 6.3: Charakteristika des Speicherbereiches

Zwischen dem Elektronikbereich und dem Speicherbereich befindet sich eine räumliche Verbindung in Form von zwei Öffnungen. Durch diese Öffnungen kann der Speicher mit dem fluidischen Kreislauf verbunden werden. Des Weiteren können die Bedienungselemente in der hinteren Abdeckung über diese Öffnungen mit der Systemsteuerung verbunden werden. Die Abmaße des Systemgehäuses sind im Anhang (siehe Anhang Seite A-14).

6.1.3 Hintere Abdeckung

Zum Verschließen des Speicherbereiches dient eine Abdeckung. Dabei werden zwei Öffnungen zur Bedienung des Speichers vorgesehen. Des Weiteren werden vier Bohrungen zur Befestigung des Hauptschalters und der drei Drucktaster eingefügt. Diese Bedienungselemente werden mit der Steuerung verbunden und in die hintere Abdeckung des Systemgehäuses eingebaut (siehe Abbildung 6.4), so dass sie von außen bedient werden können. Mit dem Hauptschalter kann das System ein- und ausgeschaltet werden. Die Taster dienen der separaten Zuschaltung der Pumpe, des Stacks und der Anwendung

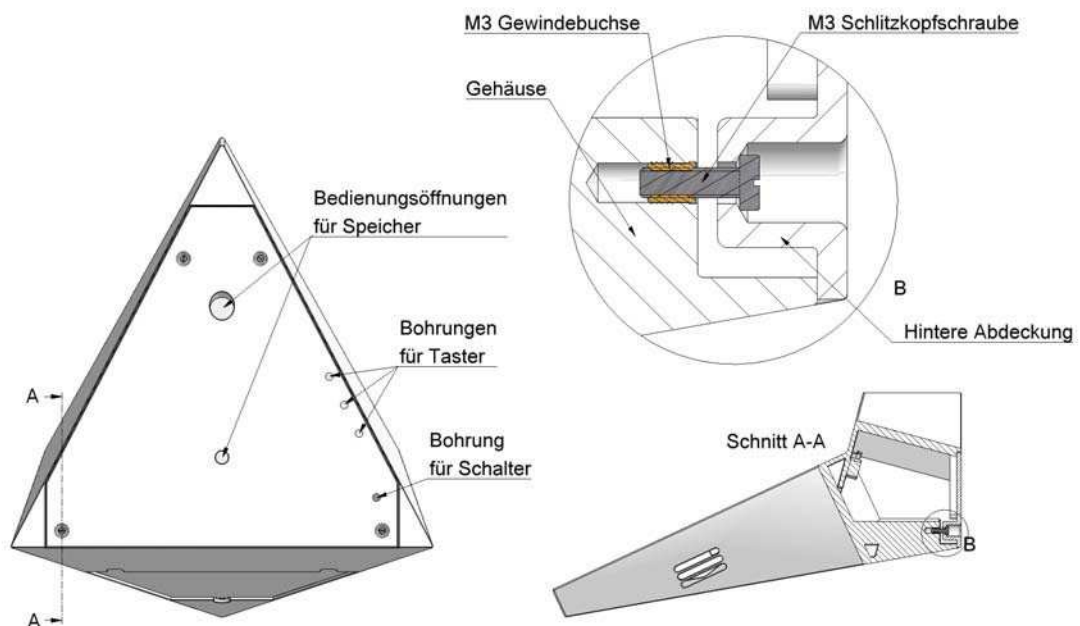


Abbildung 6.4: Darstellung und Befestigung der hinteren Abdeckung

Die hintere Abdeckung ist als Blechteil ausgeführt. Zur Vermeidung von Verformungen beim Herstellungsprozess wird eine 5mm hohe Stabilisierungsstruktur konstruiert (siehe Anhang A-14). Die Abdeckung wird mit M3 Edelstahl-Schlitzkopfschrauben an vier Punkten des Gehäuses befestigt.

6.1.4 Elektronikbereich

Im Elektronikbereich sind Stack, Systemsteuerung, Pumpensteuerung und Transceiver als sichtbare und Akku, Pumpe als nicht sichtbare Komponenten untergebracht. Aufgrund der in Kapitel 4.1.8 aufgeführten Kriterien wird der Stack in den vorderen Bereich eingebaut. In dieser Position ist durch das Vorsehen von Lüftungsschlitzen eine Zirkulation der Luft durch den Stack gewährleistet. Zum Schutz der Steuerungsplatine und des Transceivers werden entsprechende Plexigläser eingebaut.

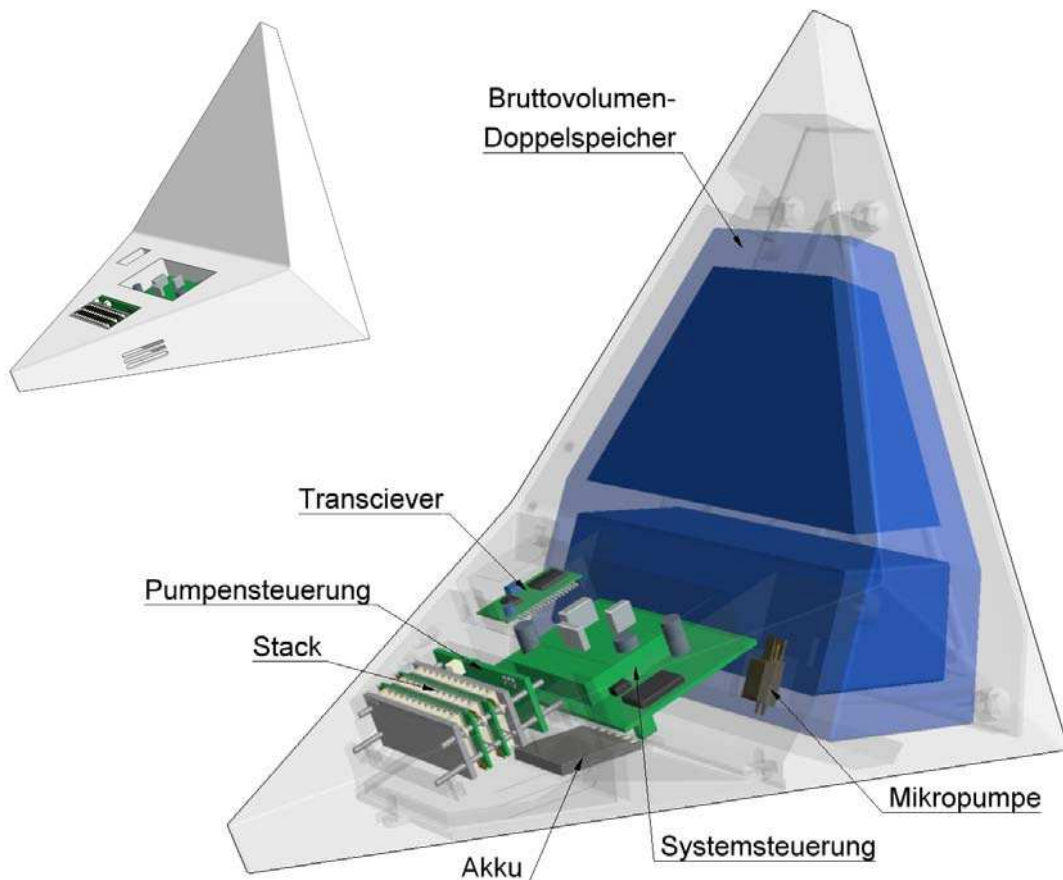


Abbildung 6.5: Anordnung der Systemkomponenten im Gehäuse

Gemäß den Ergebnissen aus den Pumpentests ist die Positionierung der Pumpe, mit Hinblick auf geringe Ansaug- und Pumphöhen, berücksichtigt. Sie ist mit dem Stack auf gleicher Höhe angebracht, und der Ethanol Speicher befindet sich oberhalb der Pumpe. In Abbildung 6.5 ist die Anordnung der einzelnen Komponenten im Elektronikbereich dargestellt.

Befestigung der Komponenten im vorderen Bereich

Bei der Befestigung wird darauf geachtet, dass sie für alle Komponenten auf gleiche Art ausgeführt ist. Dabei wird eine Befestigungsart entwickelt, die universell einsetzbar

ist. Mittels Metalllaschen werden die Bauteile festgehalten. Durch Verdrehen der Laschen können die Bauteile eingesetzt oder ausgebaut werden (siehe Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7). Alle Laschen sind mit M2 Schlitzschrauben am Gehäuse befestigt. Die Schrauben werden in M2 Gewindebuchsen eingeschraubt. Ein Produktdatenblatt beschreibt die notwendigen Dimensionierungsgrößen für die Gewindebuchsen [26].

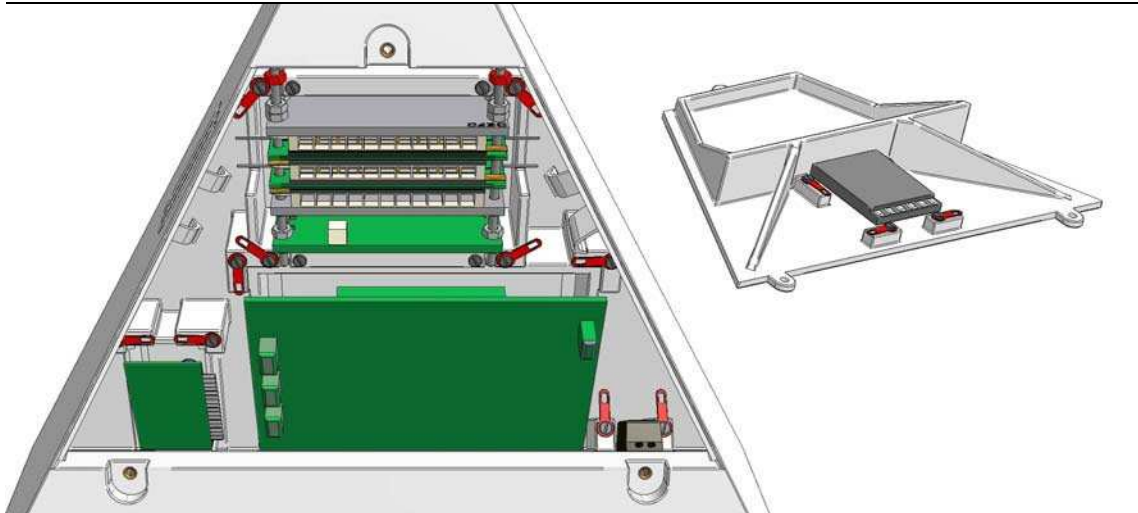


Abbildung 6.6: Befestigung der Komponenten im offenen Zustand

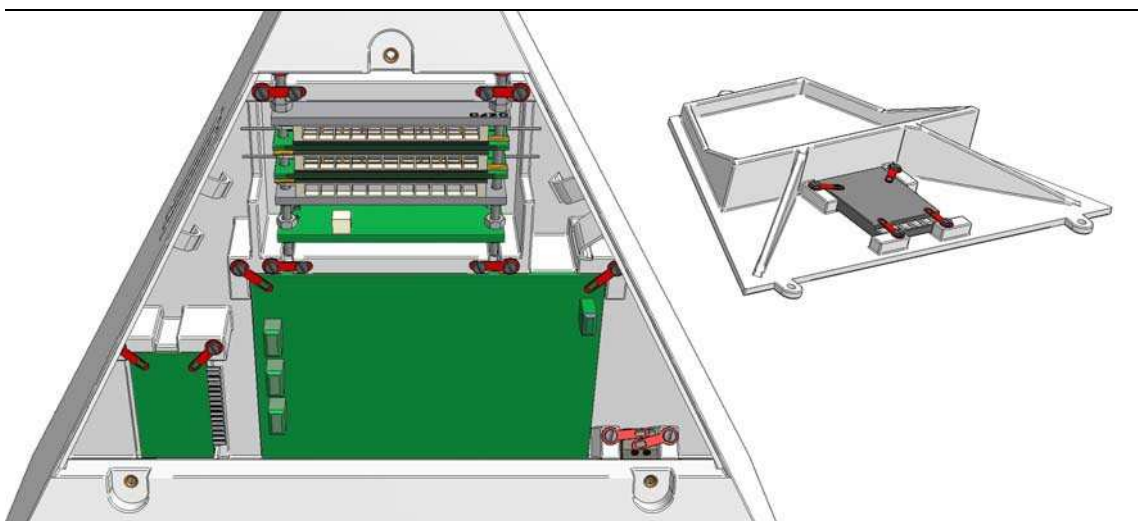


Abbildung 6.7: Befestigung der Komponenten im geschlossenen Zustand

Der Akku wurde in die untere Abdeckung eingebaut. Die genaue Konstruktion des unteren Deckels wird in Kapitel 6.1.5 beschrieben.

Eine spezielle Befestigung besitzt der Stack. Die Gewindestangen werden in vorgesehene Schlitze eingelassen und an einer Seite, entsprechend der rot markierten Muttern in Abbildung 6.6 befestigt. Die Metalllaschen dienen der Sicherung des Stack vor Absinken.

Kabel- und Schlauchführung

Bezüglich des dritten Kriteriums in Kapitel 4.1.8 werden Führungskanäle für die Verlegung der Schläuche und Kabel im Bereich der Lüftungsschlitze vorgesehen. Da das Design der Systemsteuerung im gleichen Zeitraum entwickelt wird, können alle Anschlüsse an der unteren Seite der Platine angebracht werden. In dieser Anordnung ist es möglich alle Kabel unterhalb der Platinen und somit unsichtbar für den Betrachter zu verlegen.

6.1.5 Untere Abdeckung

In der unteren Abdeckung befinden sich die Befestigung für den Akku und eine Vorrichtung zum Auffangen des Produktwassers. Zur Stabilisierung des Deckels sind zwei Stützen vorgesehen. An drei Punkten wird der Deckel mit M3 Schrauben am Gehäuse befestigt.

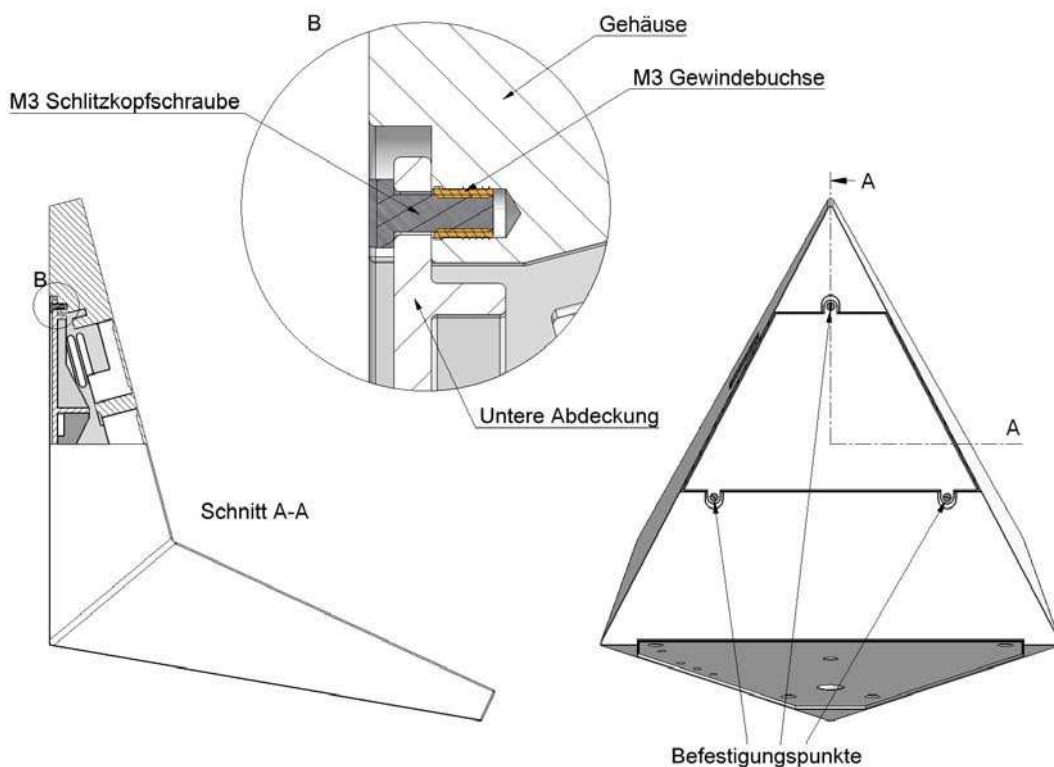


Abbildung 6.8: Darstellung und Befestigung der unteren Abdeckung

Um das Hervorstehen der Schraubenköpfe zu vermeiden wird der gesamte Deckel um 2mm nach innen versetzt eingebaut. In Abbildung 6.8 ist die Befestigung der unteren Abdeckung detailliert dargestellt. Die Abmaße der unteren Abdeckung dem Anhang beigefügt (siehe Anhang Seite A-14).

6.2 Konstruktion des Ethanol-Doppelspeichers

In diesem Kapitel wird die Konstruktion des Ethanol-Speichers geschildert. Wie unter Kapitel 4.1.7 beschrieben, wird der Speicher als Doppelspeicher ausgeführt. Das Design des Gehäuses bestimmt die Form des Speichers. Da die Größe des Nettovolumens auf 1000ml festgelegt wurde, muss die entsprechende Geometrie an dieses Volumen angepasst werden. Für die Konstruktion des Speichers wird zunächst das Verfahren zur Herstellung festgelegt, anschließend werden die einzelnen Komponenten dimensioniert. Dabei muss beachtet werden, dass die geometrischen Abmaße nicht größer als das Bruttovolumen werden, da der Speicher sonst nicht ins Gehäuse passt.

6.2.1 Materialwahl und Herstellungsverfahren

Erfahrungen, die in der Abteilung mit vorhergehenden ähnlichen Systemen gesammelt werden konnten, haben zur Wahl des Herstellungsverfahrens und des Material beigetragen. Der Speicher ist aus zwei Hauptkomponenten realisiert. Das Gehäuse, bestehend aus einem Kunststoff wird aus dem Vollmaterial gefräst. Der Deckel besteht aus rostfreiem Edelstahl (Werkstoff Nr.: 1. 4571 [27]). Eine Schnurdichtung gewährleistet die Dichtigkeit zwischen den beiden Komponenten. Der Kunststoff, aus dem das Speichergehäuse besteht, muss bestimmte technische und chemische Anforderungen erfüllen:

- Beständigkeit gegenüber Ethanol, Acetaldehyd und Essigsäure.
- Festigkeit bezüglich der Verarbeitung
- Beschaffungsmöglichkeiten

Bezug nehmend auf das Kapitel 3.5.2 in dem die mögliche Zusammensetzung des Abwassers beschrieben wurde, ist das Auftreten von Acetaldehyd und Essigsäure sehr wahrscheinlich. Da die Ethanol-Lösung lediglich 2mol Ethanol auf einen Liter Wasser besitzt, würde theoretisch, bei vollständiger Umwandlung des Ethanols zu Essigsäure, höchstens eine 11,4% Essigsäure entstehen. Das Acetaldehyd hat seinen Siedepunkt bei 20°C und liegt bei Umgebungstemperatur sowohl in gelöster als auch gasförmiger Form vor und kann somit nicht genau bestimmt werden. Angenommen, dass das Ethanol vollständig zu Acetaldehyd ungewandelt wird, dann wäre im Abwasser unter 20°C ca. 11,3% Acetaldehyd vorhanden. Mit Hilfe von Tabellen [28] kann das Material bezüglich der Beständigkeit gegenüber den entsprechenden Stoffen betrachtet werden. Mit Einbeziehung der Beschaffungsmöglichkeit wird als Material das zu 30% glasfaserverstärkte Polybutylenterephthalat (PBT GF 30) verwendet. Durch die Glasfaserver-

stärkung ist das Material stabiler und kann somit besser verarbeitet werden [29]. Mittels angefertigter technischer Zeichnungen wird der Doppelspeicher gefertigt.

6.2.2 Verschlussystem des Speichers

Um eine gleichmäßige Druckverteilung des Deckels auf die Runddichtung zu garantieren, werden dreißig M3-Edelstahl-Zylinderkopfschrauben eingesetzt. Sie werden in M3-Gewindebuchsen eingeschraubt, welche sich in den dafür vorgesehenen Löchern des Speichergehäuses befinden (siehe Abbildung 6.9). Die Dimensionierungsgrößen für den Einsatz von Buchsen wurden einem Produktdatenblatt entnommen [25]. Die Position der Schrauben ist so gewählt, dass ein Kontakt zwischen der Flüssigkeit und den Schrauben ausgeschlossen ist. Hierdurch können keine Verschmutzungen in das Speicherinnere gelangen.

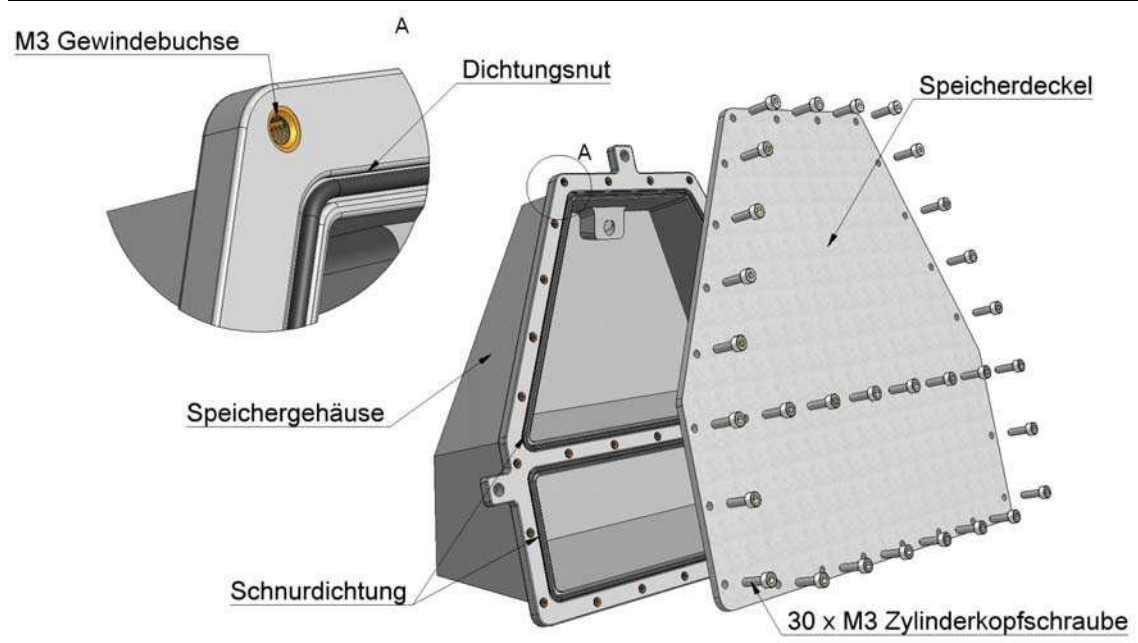


Abbildung 6.9: Aufbau der Speicherkomponenten

Bei der Dichtung handelt es sich um eine Flourkautschuk (FPM – Viton). Die Tiefe und Breite der Nut wird mit Hilfe eines Kataloges [30] dimensioniert.

6.2.3 Einbau des Speichers in das Systemgehäuse

Bei der Befestigung des Speichers am Systemgehäuse wird darauf geachtet, dass die schwere Edelstahlplatte nach innen in die Vertiefung eingebaut wird. In dieser Anordnung wird der Schwerpunkt nach vorne verlagert und das gesamte Gehäuse steht stabiler (siehe Abbildung 6.10).

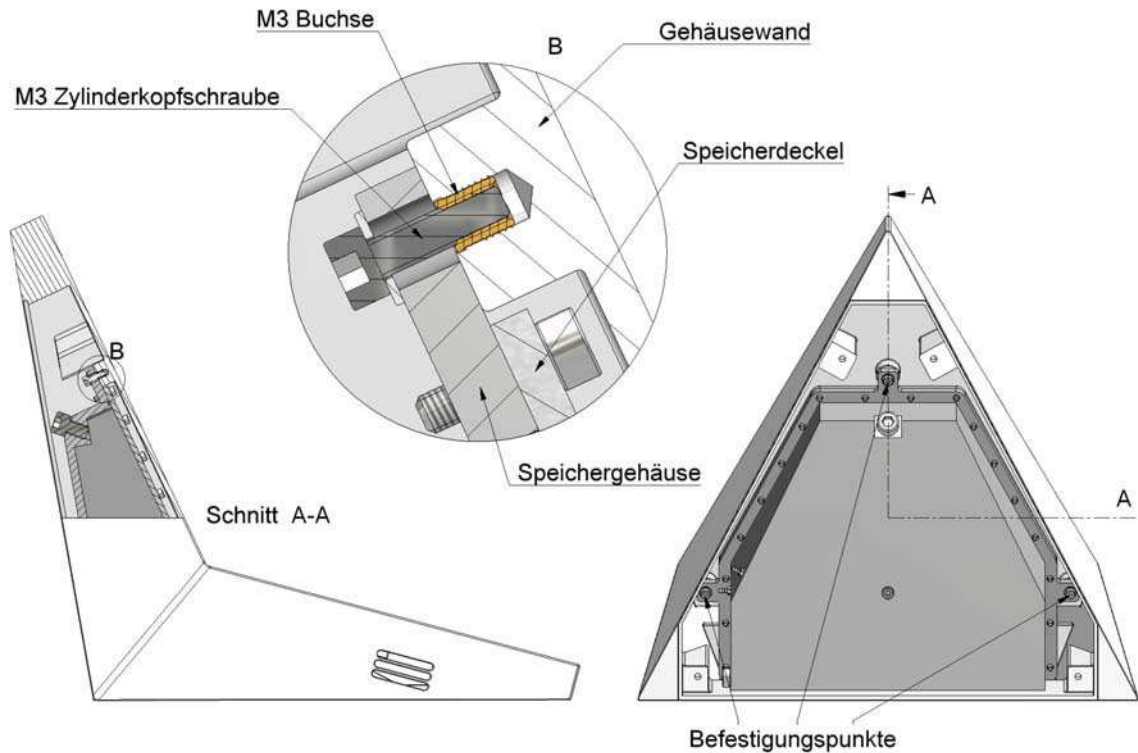


Abbildung 6.10: Darstellung der Befestigung des Speichers mit dem Gehäuse

Wie schon in Kapitel 6.1.2 beschrieben wird der Speicher an drei Punkten befestigt. Die Befestigung wird in gleiche Art realisiert wie die der Abdeckung. In Erhebungen werden M3 Gewindebuchsen eingesetzt (Dimensionierung gemäß [25]). Mit Hilfe von M3 Edelstahl-Zylinderkopfschrauben wird der Speicher befestigt.

6.2.4 Zentrale Öffnungen des Speichers

Entsprechend dem in Kapitel 4.1.7 beschriebenen Prinzip eines Doppelspeichers werden die Öffnungen positioniert. Der Ethanol-Speicher verfügt über eine Befüllungsöffnung im oberen Teil und einer Austrittsöffnung im unteren Teil (Abbildung 6.11). Durch die Austrittsöffnung gelangt die Ethanol-Lösung über die Mikropumpe zum Stack. Damit dem Speicher die gesamte Lösung entnommen werden kann befindet sich die Austrittsöffnung am untersten Punkt des Speichers. Die Befüllungsöffnung befindet sich hingegen am obersten Punkt des Speichers. Diese dient auch der Entlüftung des Speichers.

In Abbildung 6.11 ist der Doppelspeicher in einer Schnittansicht dargestellt. Dabei befindet er sich in der eigentlichen Einbauposition im Gehäuse. In dieser Ansicht sind alle vorhandenen Öffnungen zu erkennen.

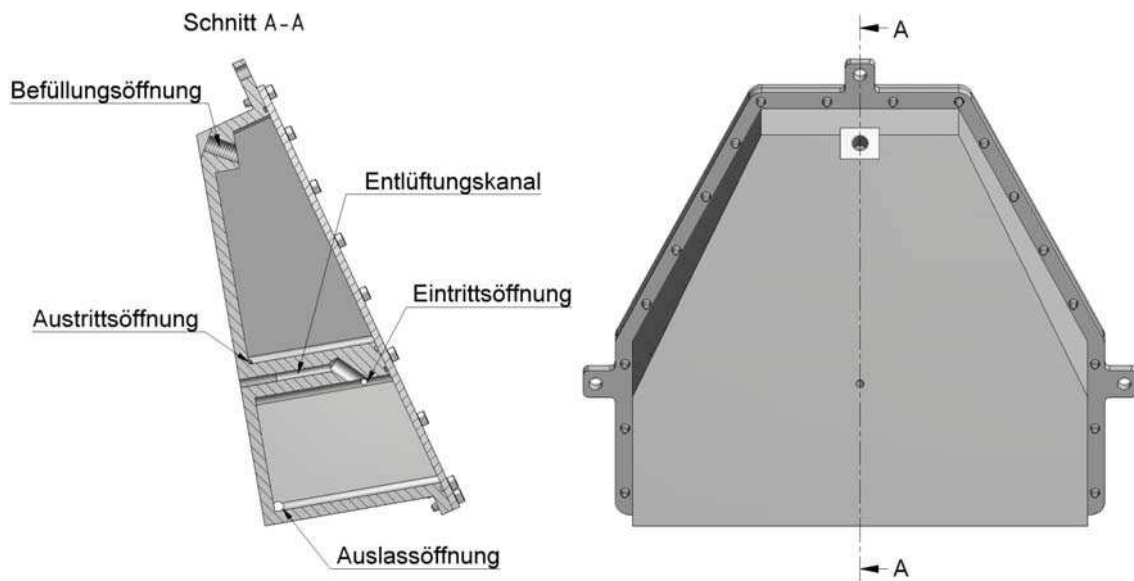


Abbildung 6.11: Darstellung der Öffnungen des gesamten Speichers

Der Abwasser-Speicher besitzt drei Öffnungen. Über die Eintrittsöffnung gelangt das aus dem Stack kommende Abwasser in den Speicher, über die Auslassöffnung kann er entleert werden. Zusätzlich muss eine Entlüftungsöffnung vorgesehen werden, damit sich beim Betrieb kein Überdruck im Abwasser-Speicher bildet. Eintritts- und Belüftungsöffnung befinden sich am obersten Punkt des Speichers. Die Auslassöffnung besitzt einen größeren Durchmesser und befindet sich am untersten Punkt des Speichers, damit er leicht entleert werden kann.

Alle Öffnungen des Ethanol- und des Abwasserspeichers besitzen metrische Gewinde und können beim Transport des Systems mit Zylinderkopfschrauben aus Edelstahl und O-Ringdichtungen verschlossen werden. An die Ein- und Austrittsöffnungen werden Schlauchtüllen angebracht. An diese können Schläuche befestigt werden, die die Ethanol-Lösung zum Stack hin- und zurücktransportieren.

Damit der Speicher beim Befüllen nicht aus dem Gehäuse entfernt werden muss, befindet sich die entsprechende Öffnung auf der Rückseite. Die Entlüftungsöffnung des Abwasser-Speichers befindet sich ebenfalls auf der Rückseite, damit sie vor der Inbetriebnahme geöffnet werden kann, ohne die hintere Abdeckung des Gehäuses zu entfernen.

Ausführliche Konstruktionszeichnungen mit allen Bemaßungen der Bauteile des Doppelspeichers sind im Anhang (siehe Anhang Seite A-15 bis A-18).

6.3 Zusammenfügung aller Systemkomponenten

Nach der Herstellung werden alle Komponenten zusammengefügt und in Betrieb genommen. Ende September wird das System auf der Fachmesse „f-cell“ ausgestellt. Für die Präsentation des kompletten Systems wird eine Beschriftung auf den oberen Teil angebracht. In Abbildung 6.12 ist ein fotografisches Abbild des fertigen portablen Prototypensystems zu sehen.



Abbildung 6.12: Gesamtdarstellung des DEFC-Systems

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der experimentellen und konstruktiven Arbeiten werden in diesem Kapitel zusammenfassend dargestellt. Hierbei wird das gebaute Prototypsystem als zentrales Ergebnis der Diplomarbeit besonders hervorgehoben. Weiterhin werden vorläufige Aussagen über die Funktionstüchtigkeit der untersuchten Systemkomponenten getroffen und diskutiert, wo diesbezüglich noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Einleitend werden die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen und konstruktiven Arbeiten zusammengefasst.

7.1.1 Charakterisierung der Systemkomponenten

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der Systemkomponenten Stack und Pumpe tragen maßgeblich zur Dimensionierung der konstruierten Systemkomponenten Speicher und Gehäuse bei. Es konnte gezeigt werden, dass die optimale Betriebsweise des Stacks und der Pumpe von unterschiedlichen Parametern abhängig ist.

Pumpe

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Pumpen funktionsfähig sind und sich für den Einsatz in einem DEFC-System eignen. Sie zeigen jedoch auch, dass die Leistung der Pumpe von bestimmten Parametern beeinflusst wird. So kommt es z.B. in Folge von Blasenbildung in der Flüssigkeit, also durch die Anwesenheit von gelösten Gasen, zu einer deutlichen Verringerung des Volumenstroms. Bei der Verwendung von abgekochtem Wasser bleibt der Volumenstrom während der Langzeitprüfung konstant (siehe Kapitel 4.2.1).

Es konnte gezeigt werden, dass die Förderleistung der Pumpe von der Positionierung der Komponenten abhängig ist. Der Volumenstrom nimmt proportional ab, wenn die Pumpe die zu fördernde Flüssigkeit ansaugen oder nach oben pumpen muss. Des Weiteren wurde festgestellt, dass ab einer pumpenspezifischen Ansaughöhe (ca. 80-100cm) die Förderleistung einbricht und zur Beschädigung der Pumpe führen kann (siehe Kapitel 4.2.2 und 4.2.3). Optimaler Betrieb ist also dann gewährleistet, wenn die Pumpe möglichst auf gleicher Höhe mit der zu fördernden Flüssigkeit, also am untersten Punkt des EthanolSpeichers und auf gleicher Höhe mit dem Stack eingebaut ist. Diese Erkenntnis wurde bei der Anordnung der verschiedenen Komponenten im Proto-

typsystem berücksichtigt. Zur Entlastung ist die Pumpe ca. 8cm unterhalb der Ethanol-speichers angeordnet (siehe Abbildung 6.5).

Stack

Mittels Variation des Volumenstroms und Molarität der Ethanol-Lösung wurden die Betriebsparameter zur höchsten Leistungsausbeute festgelegt und der Betriebspunkt des Stacks ermittelt. Sowohl eine höhere Molarität, als auch ein größerer Volumenstrom führen zu einer höheren Leistung (siehe Kapitel 4.1).

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben ergeben, dass für die Anwendung im Prototypsystem ein Volumenstrom von 1,3µl/min und eine Molarität von 2 mol/l optimal sind. Höhere Volumenströme haben nur noch eine geringe Leistungssteigerung zur Folge, gleichzeitig steigt mit der Erhöhung des Volumenstroms auch das Volumen des Ethanol-Speichers. Bezug nehmend auf die theoretische Berechnung des Volumenstroms in Kapitel 3.5.4, kann gezeigt werden, dass es theoretisch möglich ist mit noch niedrigeren Volumenströmen den gleichen Strom zu bekommen wie bei den Experimenten. In diesem Fall wird jedoch die optimale Leistungsausbeute betrachtet und somit ein höherer Volumenstrom eingesetzt. Auch höhere Molaritäten führen nicht mehr zu einer nennenswerten Leistungssteigerung. Es wird vermutet, dass bedingt durch die hohe Ethanolkonzentration eine starke Quellung der Membran ausgelöst wird. Diese könnte zu einer mechanischen Belastung des Stacks führen. Über den ermittelten Wert für den optimalen Volumenstrom für das System erfolgte im Anschluss die Dimensionierung des Volumens für den Ethanol-Speicher und somit die Festlegung der Größe des gesamten Systemgehäuses.

7.1.2 Prototypsystem

Mit dem gebauten Prototypsystem kann die Funktionsweise eines DEFC-Systems anschaulich dargestellt werden.

Die Anforderungen bezüglich des Designs und der Funktionalität (siehe Kapitel 3.1.8) wurden bei der Konstruktion berücksichtigt und werden vom Prototypsystem erfüllt. So sind z.B. der Stack, Transceiver Modul (Funkmodul), Pumpensteuerung und die Platine der Systemsteuerung sichtbar in das System integriert, um hervorzuheben, dass es sich bei ihnen um die zentralen Systemkomponenten handelt.

Aufgrund seiner kompakten Bauweise kann das System problemlos transportiert werden und eignet sich besonders zur Demonstration auf Messen oder Tagungen. Das Volumen des Ethanol-Speichers wurde so dimensioniert, dass es ausreichend Ethanol-Lösung fasst, um während einer Ausstellung den Stack fünf Stunden zu betreiben. Die Anwendung des Systems, bestehend aus Transceiver und Receiver, veranschaulicht

nicht nur, dass das System Energie bereitstellt, sondern liefert kontinuierlich Daten über den aktuellen Betriebszustand des Stacks.

Im Rahmen der Präsentation des aktuellen Stands des DEFC-Projekts wurde das System im September dieses Jahres auf der Fachmesse „f-cell“ in Stuttgart ausgestellt.

7.2 Ausblick

Mittels der Zusammenarbeit der unterschiedliche Fraunhofer Institute war es möglich das erste portable Prototypensystem basierend auf der Direkt-Ethanol-Brennstoffzelle zu realisieren. Um die Anwendung der Direkt-Ethanol-Brennstoffzellen in der Klein-elektronik zu etablieren, müssten folgende Kriterien weiterentwickelt und erforscht werden:

1. Leistungssteigerung der Zelle
2. Komplette Ethanol-Oxidation zu CO_2
3. Förderung der Ethanol-Lösung im Kreislauf
4. Kleinere Abmaße der Systemkomponenten

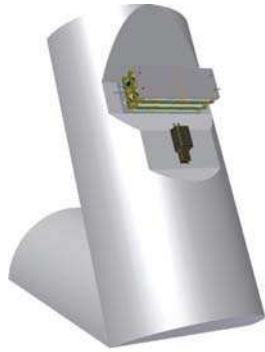
An erster Stelle steht die Leistungssteigerung. Die effizientere Umwandlung der in Ethanol enthaltenen chemischen Energie in elektrische Energie ist für den Einsatz der DEFC in der Klein-elektronik sehr wichtig. Mit einer idealen Umwandlung des Ethanols zu CO_2 würden keine Zwischenprodukte entstehen. Dies hätte eine Erhöhung der Leistungsausbeute und Erniedrigung der Geruchsbelastung durch Essigsäure zu Folge. Im Kapitel 3.5.4 wird gezeigt, dass der theoretisch bestimmte Mindestvolumenstrom mit der Verbesserung der Oxidationsreaktion sinkt. Im Zusammenhang mit der Förderung der Ethanol-Lösung im Kreislauf kann eine längere Betriebsdauer realisiert werden. Des Weiteren könnte das reine Ethanol gespeichert und während des Betriebs zudosiert werden. Somit könnte die Betriebsdauer erhöht und gleichzeitig das Volumen des Speichers verkleinert werden. Der Abwasserspeicher würde ganz wegfallen.

Die Pumpenelektronik wurde bei der Entwicklung auf die Größe des Stacks reduziert und kann somit platzsparend an diesen angebaut werden. Bei der Festlegung einer bestimmten Frequenz und somit eines festen Volumenstroms der Lösung könnten einige Bauteile der Pumpensteuerung vernachlässigt werden. Dies würde zu einer weiteren Verkleinerung der Steuerungsplatine der Pumpe führen. Bei der Systemsteuerung ist auch eine Reduzierung der Größe erstrebenswert. Am Fraunhofer IZM wird derzeit an einer Weiterentwicklung der Mikropumpe gearbeitet, die bestehend aus einem Chip in den Stack direkt eingebaut werden soll. Somit könnten das gesamte System kompakter gemacht werden.

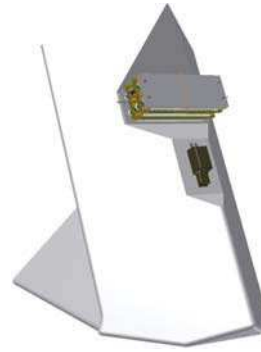
Mit der Entwicklung des ersten portablen DEFC-Systems wurde die Basis einer neuen Brennstoffzelle gelegt. Es sind noch einige Hindernisse zu bewältigen, um eine markt-reife Produktion von Direkt-Ethanol-Brennstoffzellen zu realisieren. Die Erfahrungen, die mit diesem Projekt gesammelt wurden, können maßgeblich dazu beitragen diese Hindernisse zu überwinden.

Anhang

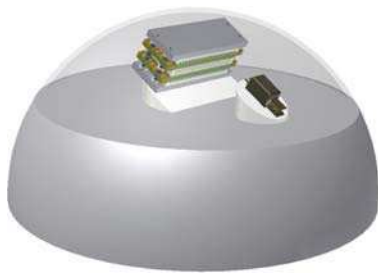
A Designentwürfe



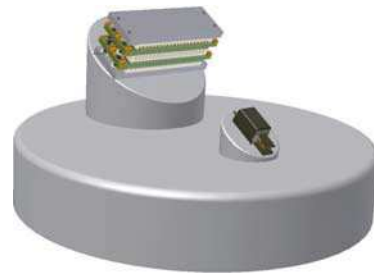
Halbkreisprofilform



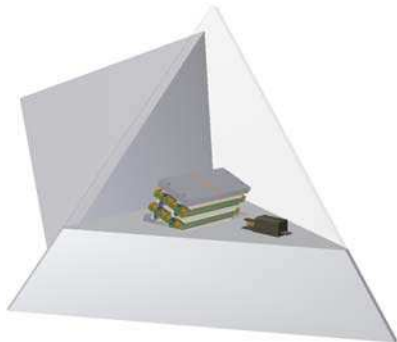
Dreieckprofilform



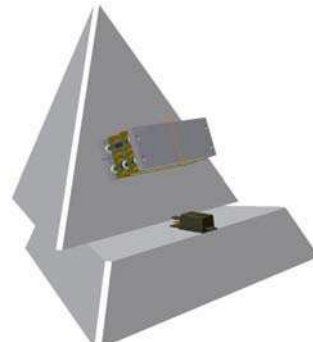
Kugelform



Zylinderform



Tetraederform 1

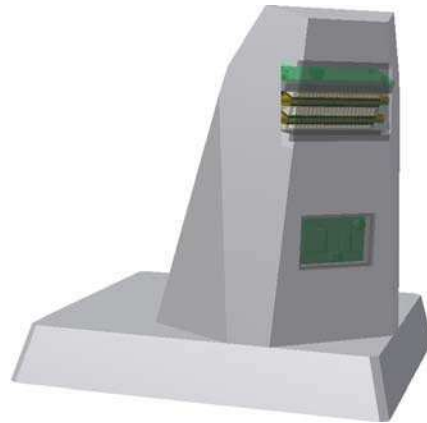


Tetraederform 2

Abbildung A.1: Gegenüberstellung unterschiedlicher Formgebungen



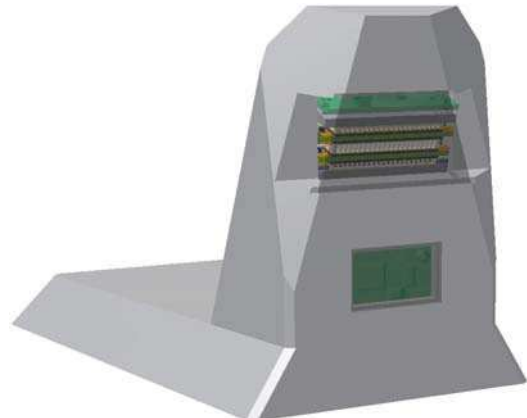
Vorderseite: Rechteckdesign 1



Rückseite: Rechteckdesign 1



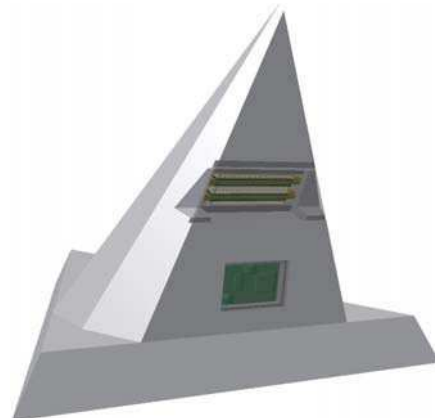
Vorderseite: Rechteckdesign 2



Rückseite: Rechteckdesign 2



Vorderseite: Dreieckdesign



Rückseite: Dreieckdesign

Abbildung A.2: Gegenüberstellung unterschiedlicher Designentwürfe

B Messdaten und Tabellen

B.1 Stack

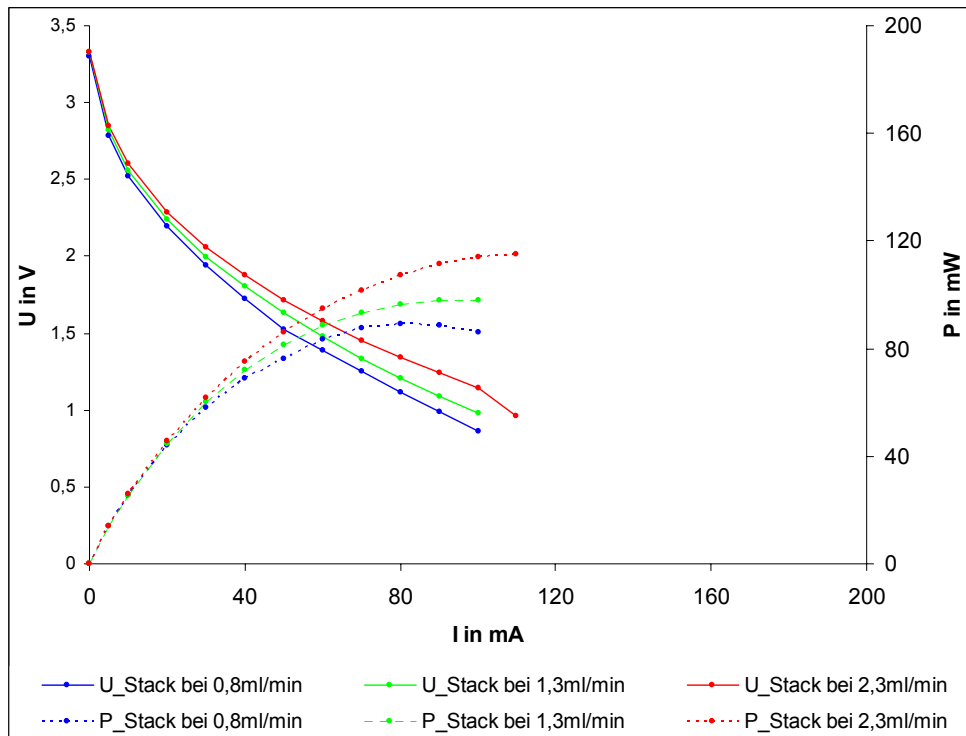


Abbildung A.3: UI-Kennlinien unterschiedlicher Volumenströmen bei 0,5molare Ethanol-Lösung

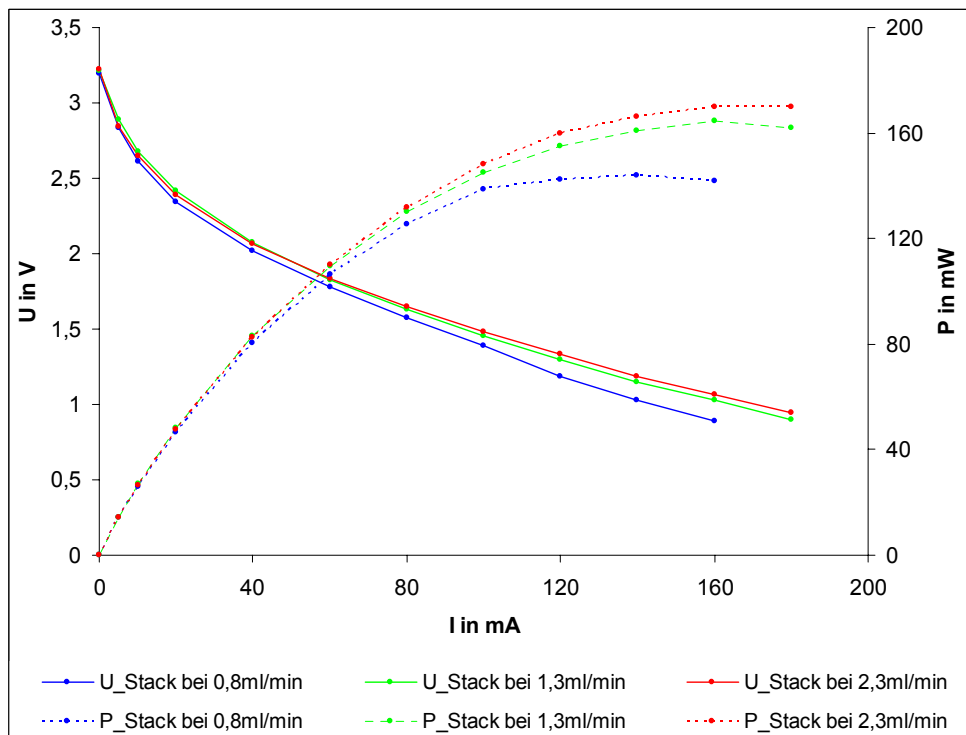


Abbildung A.4: UI-Kennlinien unterschiedlicher Volumenströmen bei 1,5molare Ethanol-Lösung

B.2 Mikropumpe

Tabelle A.1: Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 031 mit nicht abgekochtem Wasser

Zeit in min	Masse in g	Δ Volumenstrom in $\mu\text{l}/\text{min}$	Bemerkung
1	1,018	1030,1	Blasenbildung am Pump- ende. Nicht eingegriffen!
10	10,156	1027,4	
20	20,199	1016,2	
30	30,080	999,8	
40	39,752	978,7	
50	49,459	982,2	
60	58,716	936,7	
70	67,316	870,2	
80	75,623	840,5	
90	84,333	881,3	
100	92,184	794,4	
110	100,378	829,1	
120	108,623	834,3	Keine Blasen mehr im Schlauch! Zelle?
130	116,822	829,6	
140	125,034	830,9	
150	133,159	822,1	
160	141,115	805,0	
170	149,094	807,3	
180	157,084	808,5	
190	165,120	813,1	
200	173,173	814,8	
210	181,440	836,5	
220	189,719	837,7	
230	197,924	830,2	
240	206,102	827,5	
Mittelwert:		875,4	
Standardab.:		80,5	

Tabelle A.2: Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 031 mit abgekochtem Wasser

Zeit in min	Masse in g	Δ Volumenstrom in $\mu\text{l}/\text{min}$	Bemerkung
1	1,082	1094,3	Den ganzen Test über keine Blasenbildung beobachtet !!!
10	10,988	1113,8	
20	22,136	1128,0	
30	33,335	1133,2	
40	44,640	1143,9	
50	56,021	1151,6	
60	67,479	1159,4	
70	78,980	1163,7	
80	90,528	1168,5	
90	102,090	1169,9	
100	113,693	1174,0	
110	125,399	1184,5	
120	137,081	1182,0	
130	148,701	1175,8	
140	160,413	1185,0	
150	172,104	1183,0	
160	183,835	1187,0	
170	195,622	1192,7	
180	207,410	1192,8	
190	219,223	1195,3	
200	231,060	1197,7	
210	242,898	1197,8	
220	254,729	1197,1	
230	266,611	1202,3	
240	278,528	1205,8	
Mittelwert:		1171,2	
Standardab.:		29,2	

Tabelle A.3: Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 74 mit nicht abgekochtem Wasser

Zeit in min	Masse in g	Δ Volumenstrom in $\mu\text{l}/\text{min}$	Bemerkung
1	1,452	1469,2	Blasenbildung am Pump- ausgang
10	14,784	1498,9	
20	29,423	1481,2	
30	43,312	1405,3	
40	56,075	1291,4	
50	68,870	1294,6	
60	82,266	1355,5	
70	95,026	1291,1	
80	107,465	1258,6	
90	119,959	1264,2	
100	132,627	1281,8	
110	145,015	1253,5	
120	157,539	1267,2	
130	170,001	1261,0	
140	182,419	1256,5	
150	194,772	1249,9	
160	207,016	1238,9	
170	219,184	1231,2	
180	231,435	1239,6	
190	243,760	1247,1	
200	256,089	1247,5	
210	268,386	1244,3	
220	280,542	1230,0	
230	292,748	1235,1	
240	304,572	1196,4	

Mittelwert:	1291,6
Standardab.:	83,3

Tabelle A.4: Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 74 mit abgekochtem Wasser

Zeit in min	Masse in g	Δ Volumenstrom in $\mu\text{l}/\text{min}$	Bemerkung
1	1,478	1495,2	Den ganzen Test über keine Blasenbildung beobachtet !!!
10	15,054	1526,3	
20	30,217	1534,3	
30	45,481	1544,5	
40	60,814	1551,5	
50	76,141	1550,8	
60	91,519	1556,0	
70	106,954	1561,8	
80	122,428	1565,7	
90	137,884	1563,9	
100	153,351	1565,0	
110	168,776	1560,8	
120	184,171	1557,7	
130	199,606	1561,8	
140	215,028	1560,8	
150	230,420	1557,7	
160	245,852	1561,8	
170	261,277	1561,1	
180	276,707	1561,6	
190	292,143	1562,1	
200	307,583	1562,6	
210	323,028	1563,1	
220	338,479	1563,6	
230	353,934	1564,1	
240	369,394	1564,6	

Mittelwert: 1555,1

Standardab.: 15,8

Tabelle A.5: Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 64 mit nicht abgekochtem Wasser

Zeit in min	Masse in g	Δ Volumenstrom in $\mu\text{l}/\text{min}$	Bemerkung
1	1,292	1307,3	Blasenbildung am Pump- ausgang
10	12,858	1300,3	
20	25,720	1301,5	
30	38,189	1261,6	
40	50,278	1223,2	
50	62,390	1225,6	
60	73,778	1152,3	
70	84,217	1056,2	
80	94,722	1062,9	
90	104,785	1018,3	
100	114,990	1032,5	
110	124,904	1003,2	
120	134,808	1002,1	
130	144,674	998,3	
140	154,520	996,3	
150	164,250	984,5	
160	174,284	1015,3	
170	184,230	1006,3	
180	194,253	1014,2	
190	204,337	1020,3	
200	214,577	1036,2	
210	224,851	1039,5	
220	234,984	1025,3	
230	245,086	1022,2	
240	255,111	1014,3	

Mittelwert:	1084,8
Standardab.:	112,2

Tabelle A.6: Messwerte des Dauertest der Pumpe 151G1 64 mit abgekochtem Wasser

Zeit in min	Masse in g	Δ Volumenstrom in $\mu\text{l}/\text{min}$	Bemerkung
1	1,311	1326,5	Den ganzen Test über keine Blasenbildung beobachtet !!!
10	13,385	1357,4	
20	26,876	1365,1	
30	40,377	1366,1	
40	53,930	1371,3	
50	67,545	1377,6	
60	81,187	1380,4	
70	94,828	1380,3	
80	108,420	1375,3	
90	122,033	1377,4	
100	135,677	1380,6	
110	149,305	1378,9	
120	162,902	1375,8	
130	176,513	1377,2	
140	190,169	1381,8	
150	203,831	1382,4	
160	217,470	1380,0	
170	231,135	1382,7	
180	244,715	1374,1	
190	258,361	1380,8	
200	272,067	1386,8	
210	285,745	1384,0	
220	299,366	1378,2	
230	313,024	1382,0	
240	326,582	1371,9	
Mittelwert:		1375,0	
Standardab.:		12,0	

Tabelle A.7: Messreihe des Mikropumpentests: Volumenstromänderung bezogen auf die Pump-
höhe

Pumphöhe = 0

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
1	0,501	0,789	0,838	506,9	798,3	847,9
2	1,018	1,592	1,723	515,0	805,4	871,7
3	1,534	2,407	2,621	517,4	811,8	884,0
Mittelwert:				513,1	805,2	867,9
Standardab.:				5,5	6,7	18,3

Pumphöhe = 10cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
1	0,492	0,766	0,815	497,8	775,1	824,6
2	1,005	1,569	1,659	508,4	793,8	839,3
3	1,514	2,351	2,499	510,6	792,9	842,9
Mittelwert:				505,6	787,3	835,6
Standardab.:				6,9	10,6	9,7

Pumphöhe = 20cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
1	0,481	0,707	0,836	486,7	715,4	845,9
2	0,981	1,430	1,698	496,3	723,5	859,1
3	1,485	2,203	2,555	500,9	743,0	861,8
Mittelwert:				494,6	727,3	855,6
Standardab.:				7,2	14,2	8,5

Pumphöhe = 30cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
1	0,455	0,689	0,821	460,4	697,2	830,7
2	0,929	1,383	1,657	470,0	699,7	838,3
3	1,400	2,096	2,504	472,2	706,9	844,5
Mittelwert:				467,5	701,3	837,9
Standardab.:				6,3	5,1	6,9

Pumphöhe = 40cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
1	0,435	0,653	0,834	440,2	660,7	843,9
2	0,908	1,226	1,693	459,4	620,3	856,5
3	1,339	1,829	2,547	451,6	616,9	859,1
Mittelwert:				450,4	632,6	853,1
Standardab.:				9,7	24,4	8,1

Messdaten und Tabellen

Pumphöhe = 50cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g
1	0,392	0,621	0,809
2	0,812	1,245	1,651
3	1,227	1,850	2,491

Mittelwert:
Standardab.:

151G1 021	151G1 025	151G1 031
Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
396,6	628,4	818,6
410,8	629,9	835,3
413,8	624,0	840,2
<u>407,1</u>	<u>627,4</u>	<u>831,3</u>
9,2	3,1	11,3

Pumphöhe = 60cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g
1	0,349	0,585	0,82
2	0,716	1,21	1,684
3	1,091	1,784	2,539

Mittelwert:
Standardab.:

151G1 021	151G1 025	151G1 031
Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
353,1	591,9	829,7
362,2	612,2	852,0
368,0	601,7	856,4
<u>361,1</u>	<u>601,9</u>	<u>846,0</u>
7,5	10,1	14,3

Pumphöhe = 70cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g
1	0,349	0,610	0,801
2	0,680	1,200	1,619
3	1,063	1,767	2,420

Mittelwert:
Standardab.:

151G1 021	151G1 025	151G1 031
Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
353,1	617,2	810,5
344,0	607,1	819,1
358,5	596,0	816,2
<u>351,9</u>	<u>606,8</u>	<u>815,3</u>
7,3	10,6	4,4

Pumphöhe = 80cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g
1	0,364	0,543	0,728
2	0,673	1,073	1,456
3	0,98	1,630	2,175

Mittelwert:
Standardab.:

151G1 021	151G1 025	151G1 031
Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
368,3	549,4	736,6
340,5	542,9	736,6
330,5	549,8	733,6
<u>346,4</u>	<u>547,3</u>	<u>735,6</u>
19,6	3,9	1,8

Pumphöhe = 90cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g
1		0,489	0,707
2		0,967	1,421
3		1,453	2,165

Mittelwert:
Standardab.:

151G1 021	151G1 025	151G1 031
Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
0,0	494,8	715,4
0,0	489,2	718,9
0,0	490,1	730,2
<u>0,0</u>	<u>491,4</u>	<u>721,5</u>
0,0	3,0	7,8

Messdaten und Tabellen

Pumphöhe = 100cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
1		0,479	0,651	0,0	484,7	658,7
2		0,949	1,334	0,0	480,1	674,9
3		1,440	2,016	0,0	485,7	680,0
Mittelwert:				0,0	483,5	671,2
Standardab.:				0,0	3,0	11,1

Pumphöhe = 110cm

Pumpenr.	151G1 021	151G1 025	151G1 031	151G1 021	151G1 025	151G1 031
Zeit in min	Masse in g	Masse in g	Masse in g	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min	Volumenstrom in µl/min
1		0,454	0,63	0,0	459,4	637,5
2		0,924	1,288	0,0	467,5	651,6
3		1,396	1,951	0,0	470,8	658,0
Mittelwert:				0,0	465,9	649,0
Standardab.:				0,0	5,9	10,5

Tabelle A.8: Zusammenfassung der Messwerte aus der Messreihe: Volumenstromänderung bezogen auf die Pumphöhe

		Volumenstrom in µl/min		
Pumphöhe in cm		Pumpe 151G1 021	Pumpe 151G1 025	Pumpe 151G1 031
0		513,1	805,2	867,9
10		505,6	787,3	835,6
20		494,6	727,3	855,6
30		467,5	701,3	837,9
40		450,4	632,6	853,1
50		407,1	627,4	831,3
60		361,1	601,9	846,0
70		351,9	606,8	815,3
80		346,4	547,3	735,6
90		0,0	491,4	721,5
100		0,0	483,5	671,2
110		0,0	465,9	649,0

Tabelle A.9: Messreihe des Mikropumpentests: Volumenstromänderung bezogen auf die Ansaughöhe

	Höhe in cm	Zeit in min	Masse in g	Volumenstrom in $\mu\text{l}/\text{min}$
Pumpe 151G1 031	0	10,03	11,282	1138,5
	10	10,10	11,055	1107,9
	20	10,06	10,532	1059,7
	30	10,11	10,316	1032,1
	40	10,07	9,468	951,0
	50	10,08	9,346	938,2
	60	10,08	6,698	672,6
Pumpe 151G1 64	0	10,03	13,509	1362,8
	10	10,07	13,368	1343,7
	20	10,04	12,826	1292,0
	30	10,12	12,497	1249,9
	40	10,05	11,825	1190,5
	50	10,07	10,927	1098,3
	60	10,02	10,260	1036,1
	70	10,03	10,116	1020,2
	80	10,00	9,848	996,5
	90	10,07	9,641	969,1
	100	10,00	7,011	709,4
Pumpe 151G1 74	0	10,03	15,654	1579,2
	10	10,08	15,501	1556,0
	20	10,03	15,012	1514,4
	30	10,10	14,912	1493,9
	40	10,02	14,225	1436,5
	50	10,09	13,925	1396,4
	60	10,01	13,021	1316,0
	70	10,03	12,302	1240,6
	80	10,00	11,760	1189,9
	90	10,07	8,501	854,5

C Konstruktionszeichnungen

C.1 Abmaße Systemgehäuse

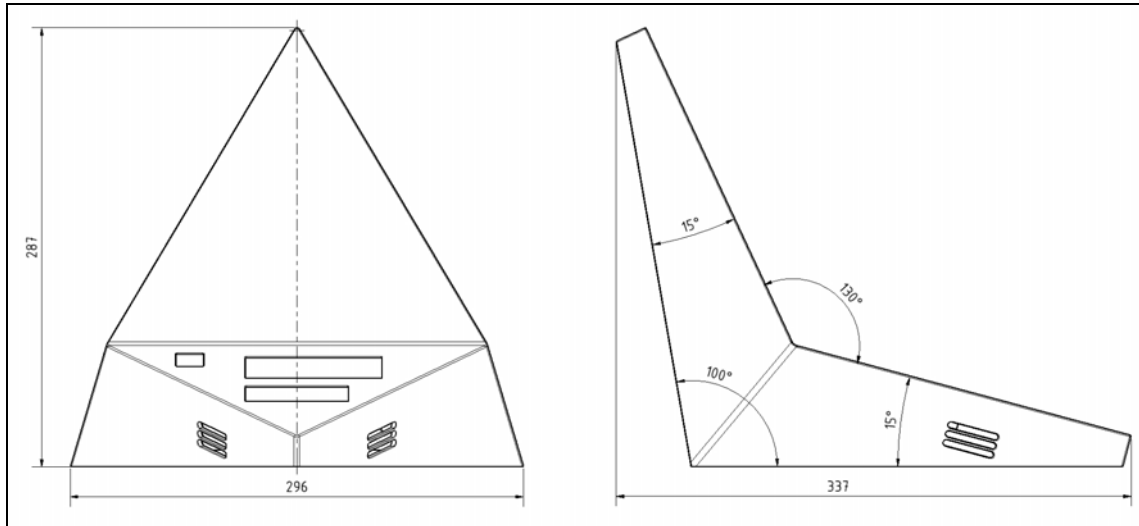


Abbildung A.5: Abmaße des Gehäuses

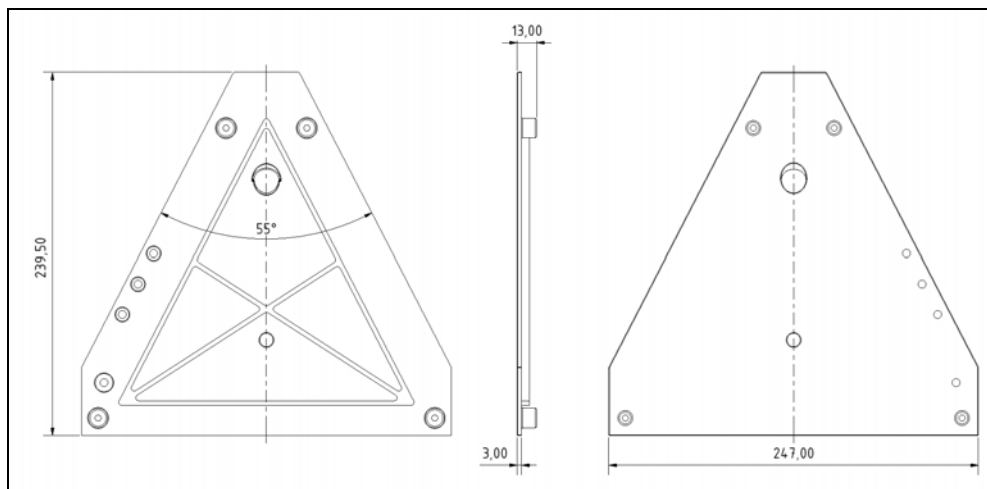


Abbildung A.6: Abmaße der hinteren Abdeckung

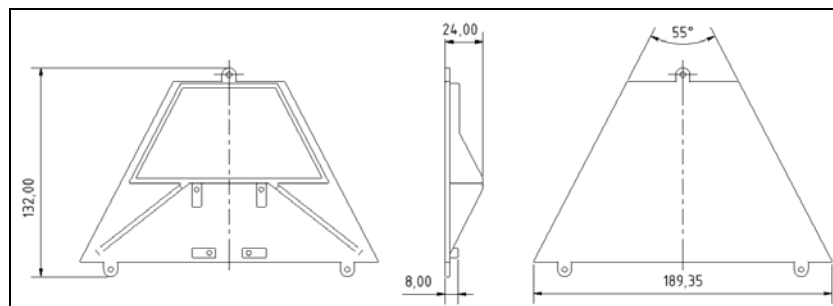
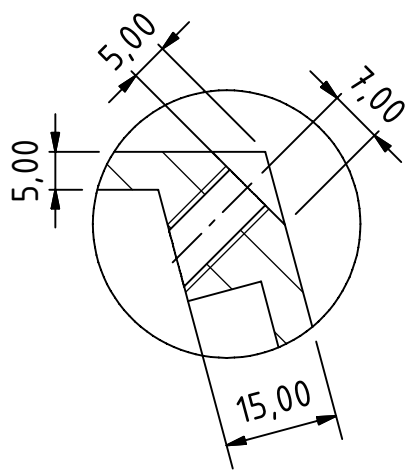


Abbildung A.7: Abmaße der unteren Abdeckung

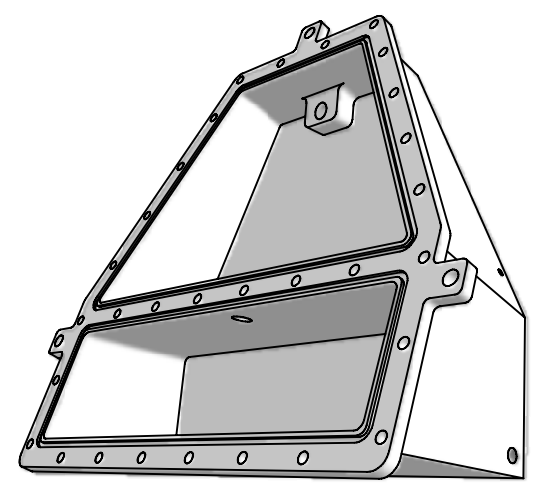
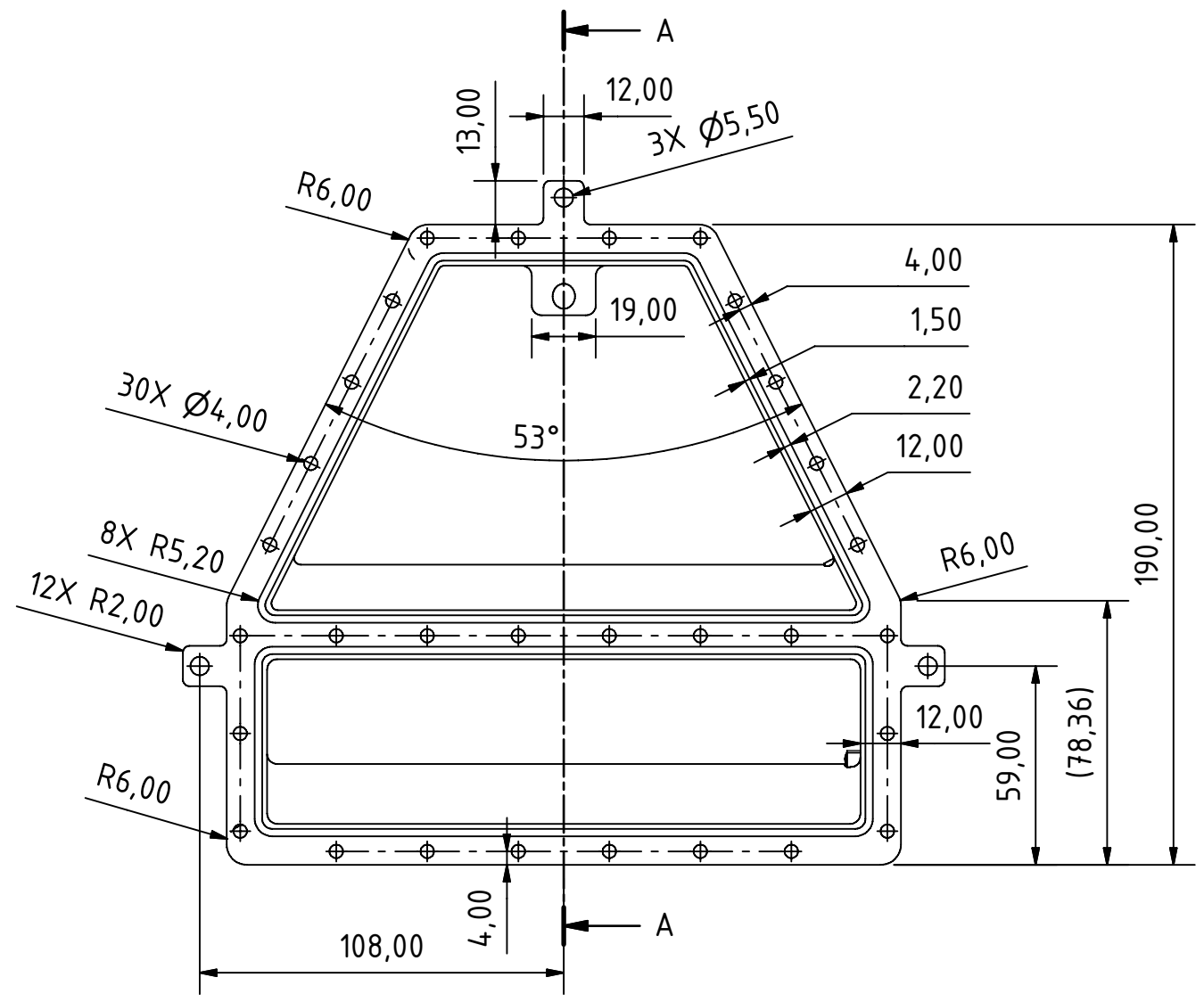
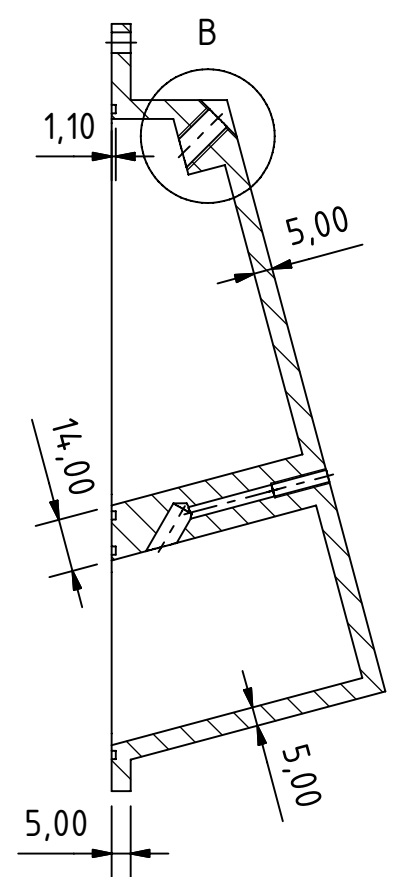
6 5 4 3 2 1

D C B A

Ansicht B (1:1)



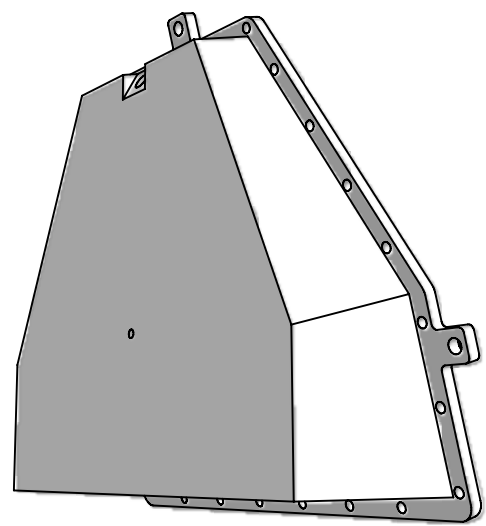
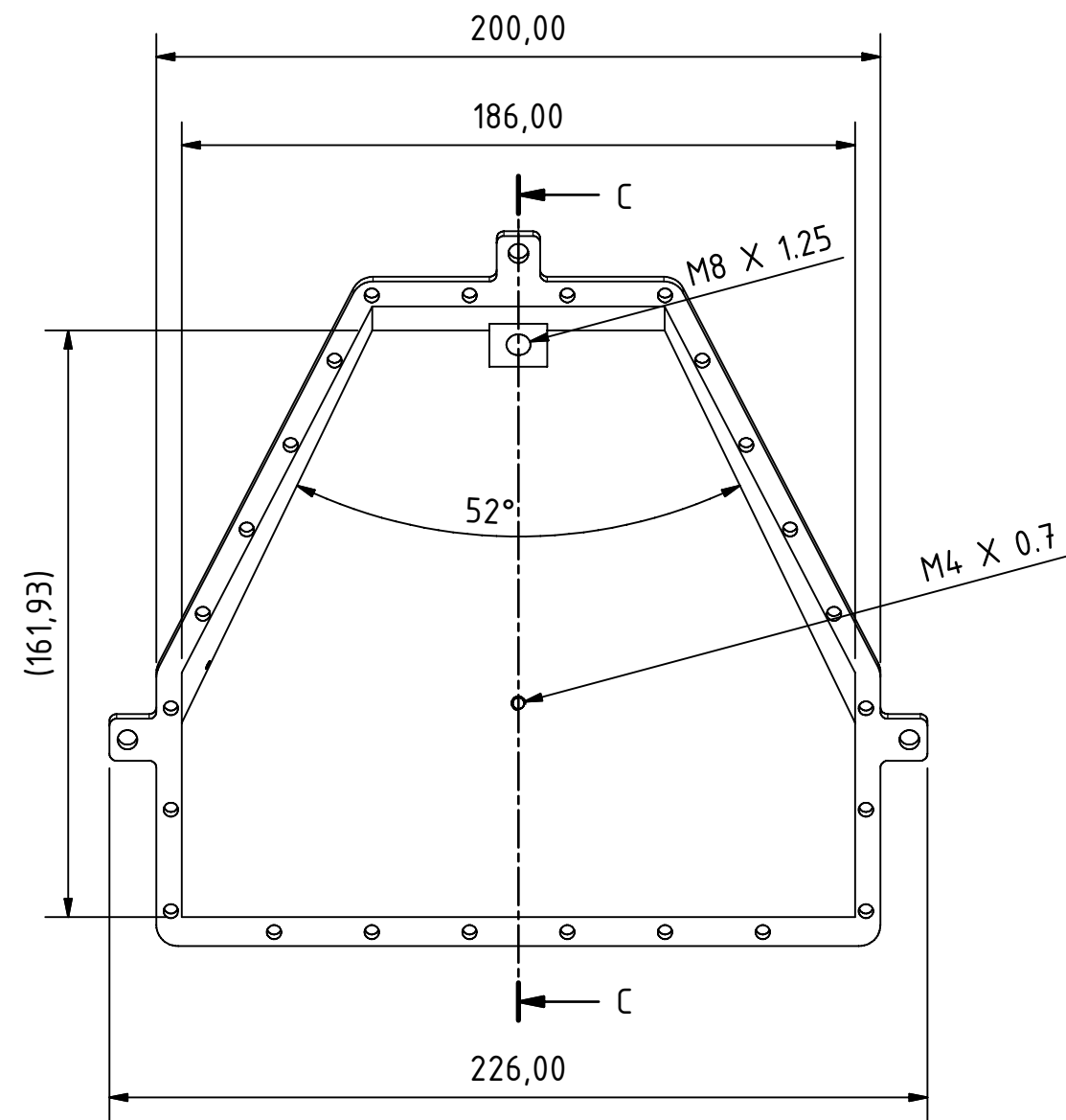
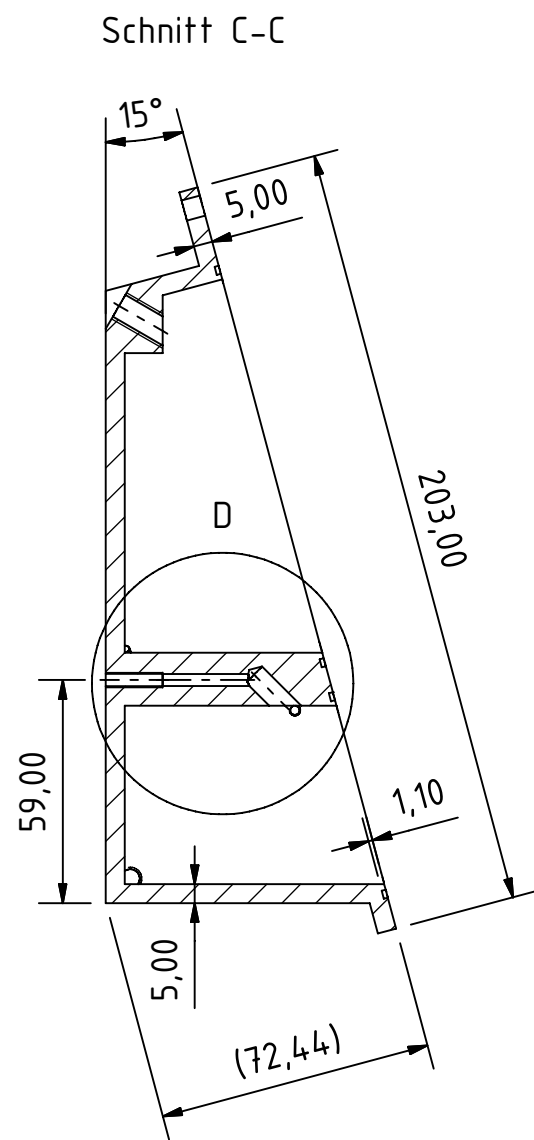
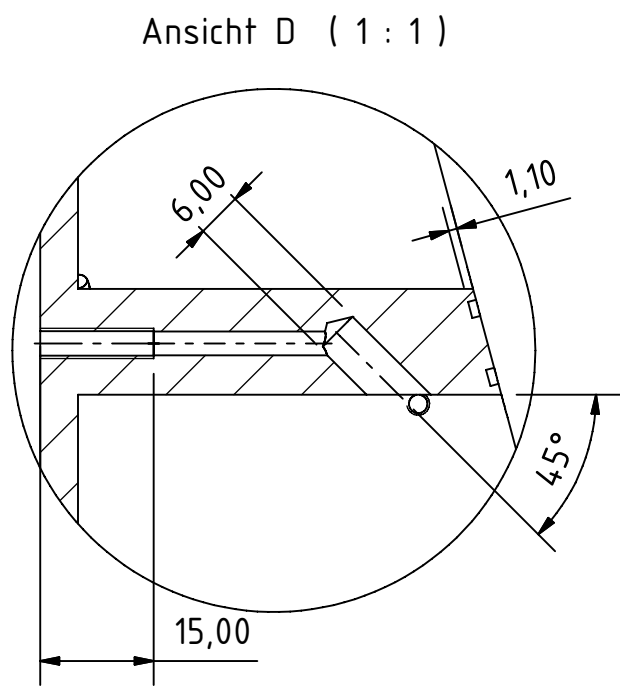
Schnitt A-A



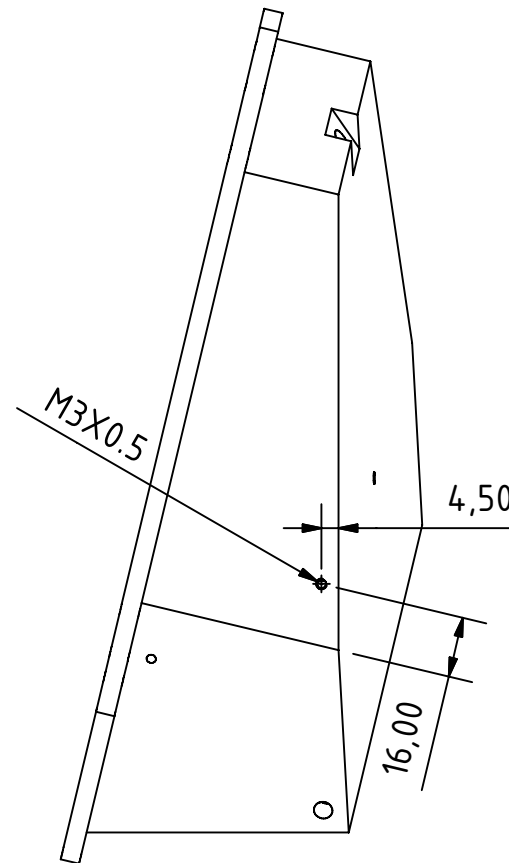
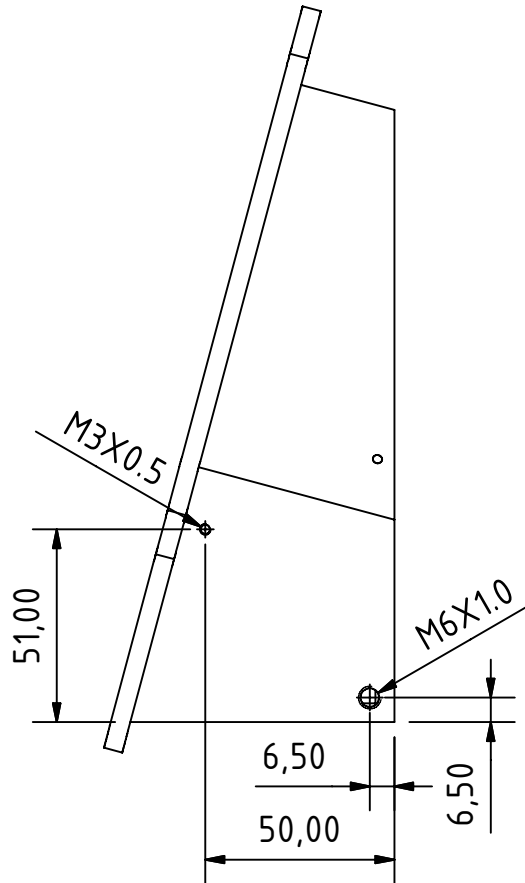
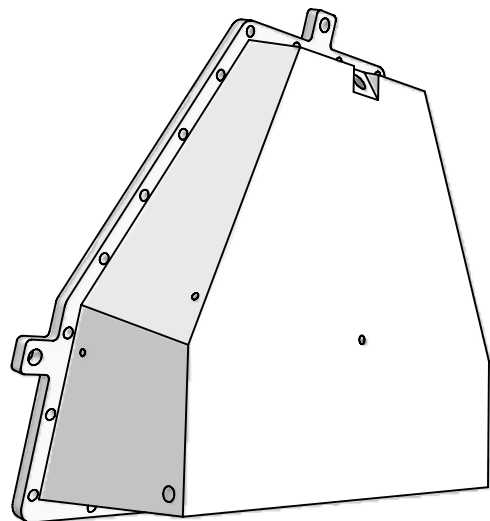
Bohrungspositionen entsprechend dem Speicherdeckel
 Bohrungen im Vollmaterial 6 X Ø=4,0mm; Tiefe=8mm
 Unbemaßte Radien R=3,0mm

				zul. Abw.		Maßstab 1:2		
				Iso-2768-f		PBT 30 GF		
				Datum	Name	Speichergehäuse Ansicht 1		
				Gezeichnet	28.07.2008			Halaburda
				Kontrolliert				
				Norm				
						A-16		
						A3		
Status	Änderungen	Datum	Name					

6 5 4 3 2 1



				zul. Abw.		Maßstab 1:2		
				Iso-2768-f		PBT GF 30		
				Datum	Name	Speichergehäuse Ansicht 2		
				Gezeichnet	28.07.2008			Halaburda
				Kontrolliert				
				Norm				
						A-17		
						A3		
Status	Änderungen	Datum	Name					



				zul. Abw.		Maßstab 1:2		
				Iso-2768-f		PBT GF 30		
				Datum	Name	Speichergehäuse Ansicht 3		
				Gezeichnet	28.07.2008			Halaburda
				Kontrolliert				
				Norm				
							A-18	
							A4	
Status	Änderungen	Datum	Name					

D Fotos

D.1 Messstandaufbau

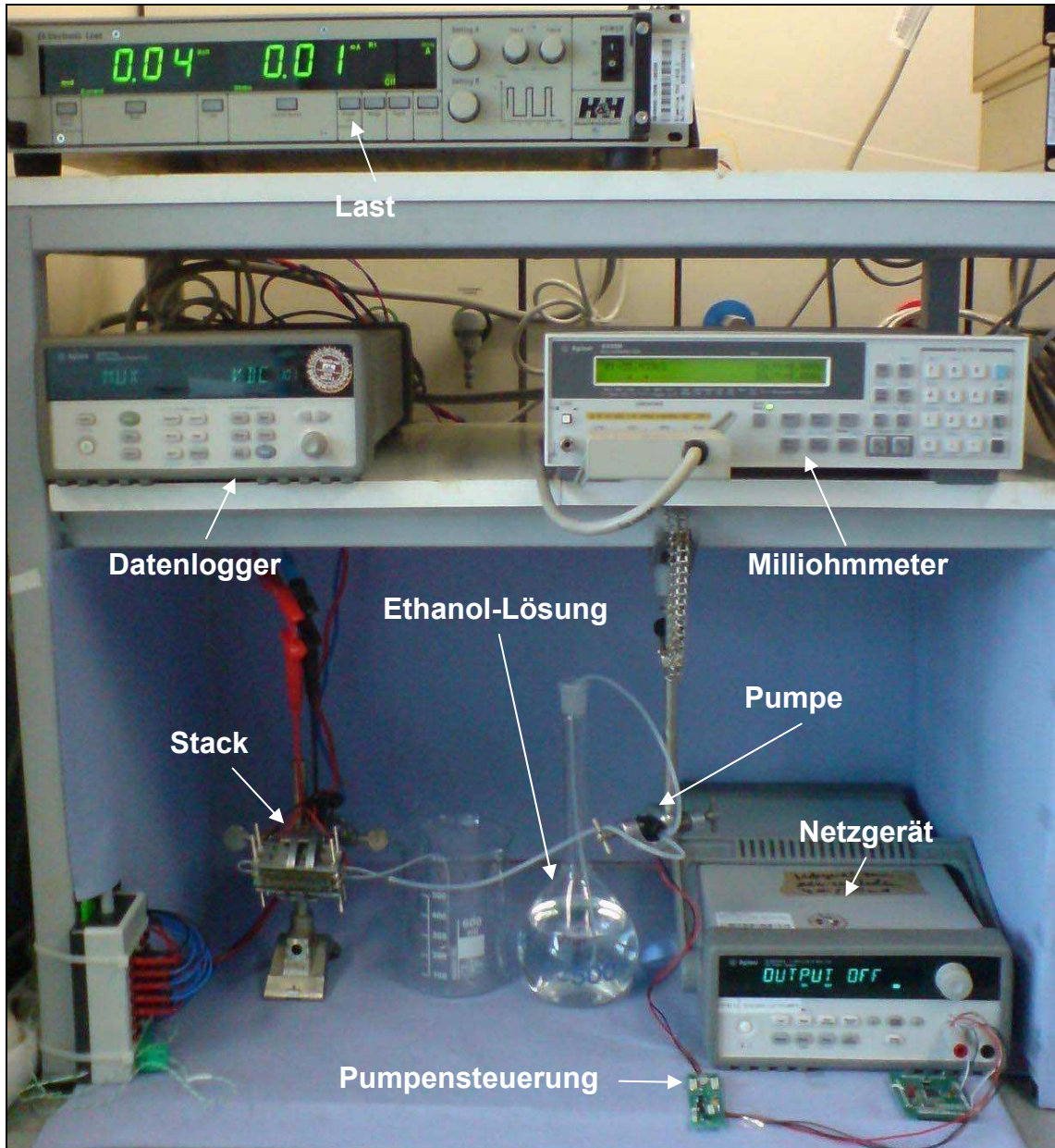


Abbildung A.12: Aufbau des Teststands für die Charakterisierung des Stacks



Abbildung A.13: Messaufbau zur Bestimmung der Volumenstromänderung bezogen auf die Ansaughöhe

D.2 Systemkomponenten

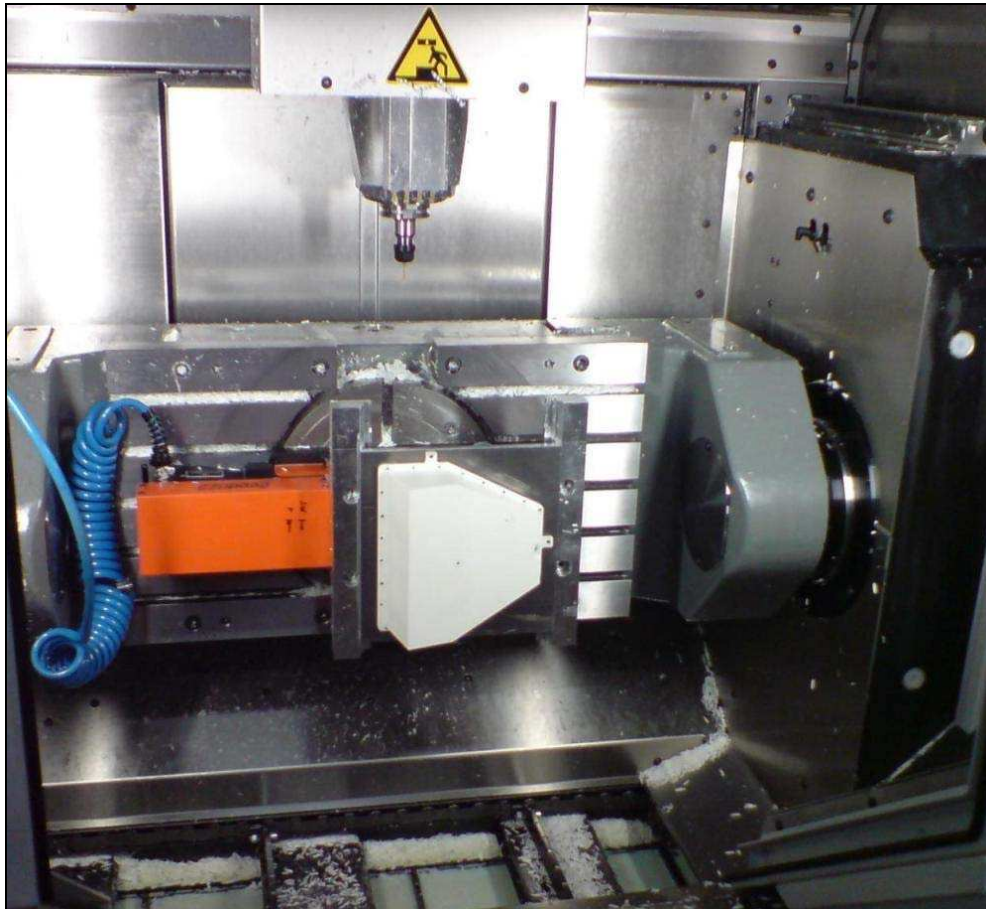


Abbildung A.14: Speichergehäuse eingespannt in der Fräsbank

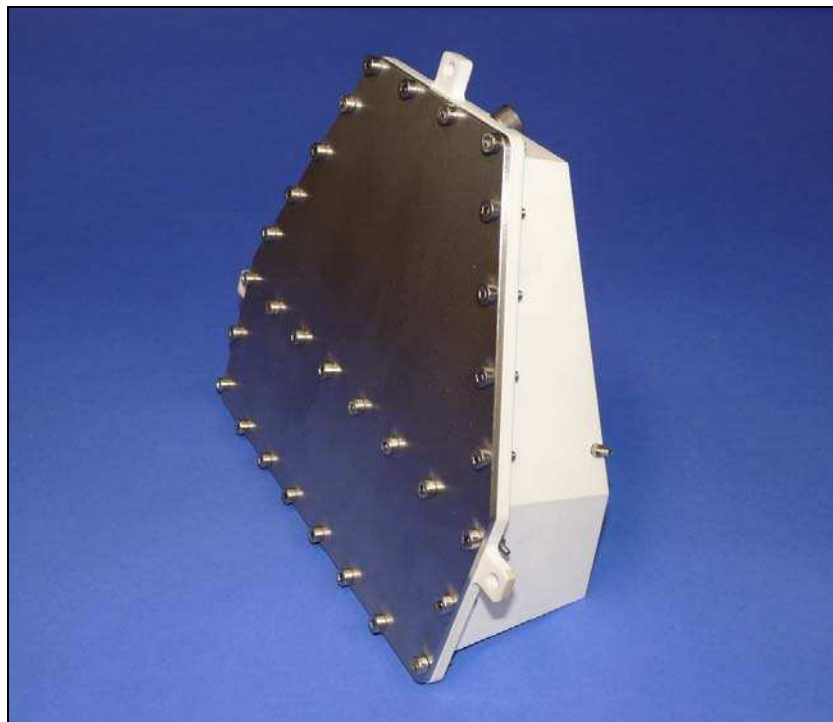


Abbildung A.15: Fotografisches Abbild des fertig gestellten Doppelspeichers



Abbildung A.16: Fotografische Abbilder des Systemgehäuses

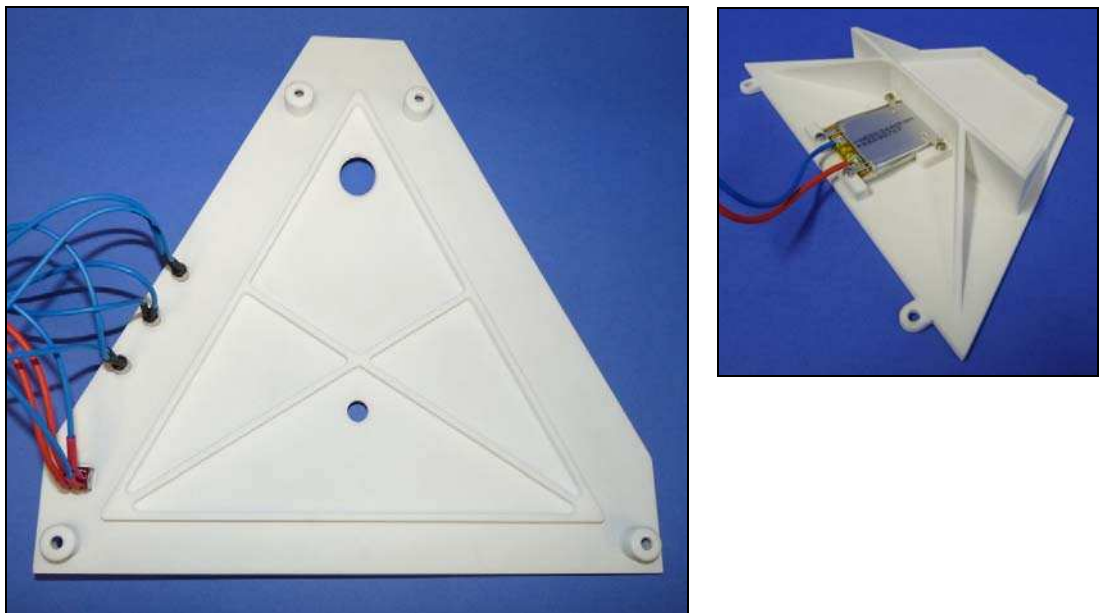


Abbildung A.17: Fotografische Abbilder der hinteren und unteren Abdeckung

Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Maria Wurm, Horst Baumann: *Energiesysteme der Zukunft*. Forschungszentrum Jülich GmbH, April 2007.
- [2] J. Falbe, M. Regitz (Hrsg.): *Römpp Chemie Lexikon*. 10. Auflage, Band 2, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1996.
- [3] Sven Geitmann: *Wasserstoff & Brennstoffzellen – Die Technik von morgen*. Hydrogeit Verlag, Kremmen 2004 (2. Auflage).
- [4] Peter Kurzweil: *Brennstoffzellentechnik*. Vieweg Verlag, September 2003 (1. Auflage).
- [5] Artikel: *Ein wiederentdecktes Prinzip der Stromerzeugung*. www.diebrennstoffzelle.de, letzter Zugriff: Mai 2008.
- [6] Richard Zahoransky: *Energietechnik Systeme zur Energieumwandlung*. Vieweg+Teubner Verlag, 2007.
- [7] Broschüre: *Stationäre Brennstoffzellen*. Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE): www.asue.de, letzter Zugriff: Juni 2008.
- [8] Vorlesungs-Skript: *Brennstoffzellen 2007*. www.tfd.uni-hannover.de, letzter Zugriff: April 2008).
- [9] M. H. Shao and R. R. Adzic: *Electrooxidation of ethanol on a Pt electrode in acid solutions: in situ ATR-SEIRAS study*. *Electrochimica Acta*, 2005.
- [10] F. Vigier, C. Coutanceau, F. Hahn, E. M. Belgsir, and C. Lamy: *On the mechanism of ethanol electro-oxidation on Pt and PtSn catalysts: electrochemical and in situ IR reflectance spectroscopy studies*. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2004.
- [11] H. Wang, Z. Jusys, and R. J. Behm: *Ethanol electro oxidation on a carbon-supported Pt catalyst: Reaction kinetics and product yields*. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004.

- [12] C. Lamy, S. Rousseau, E. M. Belgsir, C. Coutanceau, and J. M. Leger: *Recent progress in the direct ethanol fuel cell: development of new platinum-tin electrocatalysts.* *Electrochimica Acta*, 2004.
- [13] S. Song, W. Zhou, Z.H. Zhou, L.H. Jiang, G.Q. Sun, Q. Xin, V. Leontidis, S.Kontou, P.Tsiakaras, Int. J.: *Hydrogen Energy*. 2005.
- [14] W.J. Zhou, B. Zhou, W.Z. Li, Z.H. Zhou, S.Q. Song, G.Q. Sun, Q. Xin, S. Douvartzides, A. Goula, P.Tsiakaras: *Journal of Power Sources*. 2004.
- [15] A.s. Arico, P. Creti, P.L. Antonucci, V. Antonucci: *elektrochemical Solid State Letter*. 1998.
- [16] Guangchun Li, Peter G. Pickup: *Analysis of performance losses of direct ethanol fuel cells with the aid of reference electrode.* *J. of P. S.*, 2006.
- [17] Marco Meyer: Diplomarbeit Physik: *Modellierung und experimentelle Charakterisierung einer Direktethanolbrennstoffzelle (DEFC)*. März 2008.
- [18] Committee on Data for Science and Technology (CODATA): www.physics.nist.gov. Stand 2006.
- [19] Statusbericht Direct Ethanol Fuel Cell: Membran- und MEA-Entwicklung. Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Januar 2008.
- [20] Statusbericht Direct Ethanol Fuel Cell: Zelldesign und Zellaufbau. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Februar 2008.
- [21] Informations sheet: Piezoelectrically actuated micro diaphragm pump. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, April 2002
- [22] Statusbericht Direct Ethanol Fuel Cell: Demonstrator und Elektronikentwicklung. Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen, Mai 2008.
- [23] Data sheet: EnOcean Transceiver Module. EnOcean GmbH, Stand: September 2007.

- [24] Produktinformation: *P/PA2200-Pulver*. EOS GmbH Electro Optical Systems, Stand: April 2008.
- [25] Produktdatenblatt: *BancLok® - MV M3 Gewindebuchse*. Kerb Konus Vertriebs GmbH, www.kerbkonus.de, Stand: Juni 2008.
- [26] Produktdatenblatt: *BancLok® - MV M2 Gewindebuchse*. Kerb Konus Vertriebs GmbH, www.kerbkonus.de, Stand: Juni 2008.
- [27] Produktdatenblatt: *Werkstoff 1. 4571 nach EN 10088-2*. VASTAD Edelstahl Handels GmbH, Stand: Juni 2008.
- [28] Gottfried W. Ehrenstein, Sonja Pongratz: *Beständigkeit von Kunststoffen*, Carl Hansa Verlag, München 2007 (1. Auflage).
- [29] Datenblatt: *TECADUR PBT GF 30*. Ensinger GmbH, Stand: Oktober 2008.
- [30] Produktkatalog: *Simrit*. Freudenberg Simrit KG, Ausgabe 2001.