

# Charakterisierung der Strömungseigenschaften von Anodenstrukturen für Mikrobrennstoffzellen

## Studienarbeit

im Fachgebiet Technologien der Mikroperipherik

Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration  
Technische Universität Berlin, Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik

Steffen Krumbholz  
Matrikel Nr. 186506

Hochschullehrer: Prof. Dr. Ing. H. Reichl  
Betreuer: Dipl. Ing. St. Wagner



# 1 Inhaltsverzeichnis

2	Die Mikrobrennstoffzelle .....	5
2.1	Motivation .....	5
2.2	Funktion.....	6
2.3	Aufbau .....	7
3	Einfluss der Struktur auf die Brennstoffströmung .....	11
3.1	Elektrisch bedingter Einfluss auf die Strömung .....	11
3.2	Vorbetrachtung zum Strömungsverhalten .....	12
3.3	Einzelner langer Kanal .....	13
3.3.1	Druckverlust .....	13
3.3.2	Reynoldszahl .....	14
3.3.3	Strömungswiderstand .....	15
3.3.4	Beispielrechnung.....	16
3.3.5	Kapillarkräfte .....	18
3.3.6	Schlupf .....	18
3.3.7	Lösung der empirischen Parameter .....	20
3.4	Parallele Kanäle .....	21
3.5	Betrachtung von Kanalkrümmungen .....	22
3.6	Betrachtung einzelner Stege .....	23
3.6.1	Wirbel an Stegkanten .....	23
3.6.2	Druckverlust an Stegkanten.....	24
3.7	Gesamtmodell .....	26
4	Messungen des Druckverlustes .....	29
4.1	Messaufbau .....	29
4.2	Einschaltverhalten .....	30
4.3	Kurvenfit .....	31
4.4	Messung ohne MEA .....	32
4.4.1	Wasserstoff.....	33
4.4.2	Wasser.....	34
4.5	Messung mit MEA .....	36
4.5.1	Vergleich Glas vs. MEA .....	38
4.6	Druckverlust bei kompletten Zellen.....	39
4.7	Ergebnisse in tabellarischer Form .....	40
4.7.1	Messwerte der Messung ohne MEA.....	40

4.7.2	Messwerte der Messung mit MEA .....	42
4.7.3	Messwerte der Messung an kompletten Zellen.....	44
5	Zusammenfassung .....	45
6	Anhang .....	47
6.1	Symbole .....	47
6.2	Mathematica.....	48
6.3	Abbildungen.....	49
6.4	Literatur .....	52

## 2 Die Mikrobrennstoffzelle

### 2.1 Motivation

In der untersuchten Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM–Berlin treten durch den Verzicht auf eine zusätzliche Diffusionsschicht bei hohen elektrischen Strömen Transportprobleme der Reaktanten auf. Die Oberfläche der Drei-Phasen-Grenze ist begrenzt und dadurch können nicht mehr genügend zusätzliche Moleküle Sauerstoff oder Brennstoff zugeführt werden, um die Leistung der Brennstoffzelle weiter zu steigern. Die Reaktionsrate erreicht dadurch ein Maximum und der Zellenstrom kann, wie Abbildung 2.1 zeigt, nicht weiter erhöht werden.

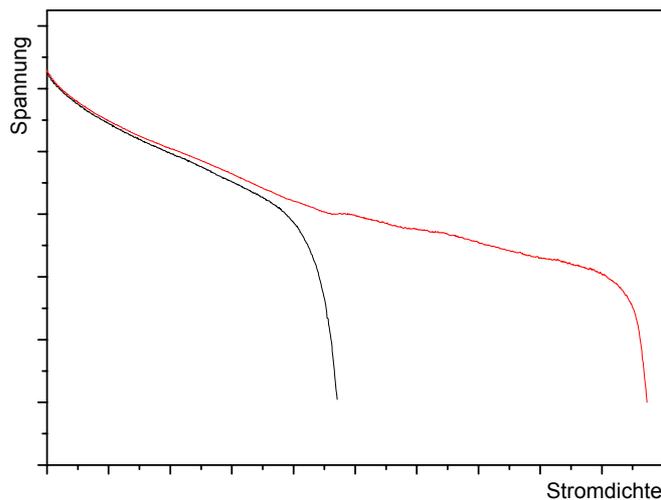


Abbildung 2.1: Qualitativer Verlauf von zwei ausgewählten UI-Kennlinien verschiedener Zellen, deutlich ist rechts der Bereich der Transportprobleme zu erkennen (siehe Text)

Da die Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM–Berlin auf der Luftseite auf die natürliche Konvektion der Luft angewiesen ist, hängt die maximale Leistung der Brennstoffzelle hauptsächlich vom Stofftransport des Sauerstoffes durch Konvektion und Diffusion an der Kathodenseite ab. Die maximale Stromstärke ist damit abhängig von der Strukturierung bzw. des Öffnungsverhältnisses der Kathodenfolie.

Zusätzlich dazu können aber auch auf der Anodenseite Probleme beim Transport des Brennstoffes auftreten. In dieser Arbeit wird daher das Strömungsverhalten von Wasserstoff und Wasser (entspricht im physikalischen Verhalten dem dünner Methanol-Lösungen) im Flowfield untersucht. Die Strömung soll bei minimalem Strömungswiderstand eine optimale Volumenverteilung und Bestromung der Membran erreichen.

## 2.2 Funktion

Eine Brennstoffzelle ist ein System zur katalytischen Verbrennung eines Brennstoffes unter Gewinnung von elektrischem Strom. Im Gegensatz zu Batterien werden die Reaktanten kontinuierlich zugeführt. Brennstoffzellen bestehen im Wesentlichen aus einem protonenleitfähigen Elektrolyten, beidseitig aufgetragenen Katalysatorschichten und ebenfalls beidseitig einer Schicht zur Stromableitung (Elektrodenschicht). Je nach verwendeten Materialien und Anwendungsgebieten lassen sich verschiedene Typen von Brennstoffzellen unterscheiden [LD00].

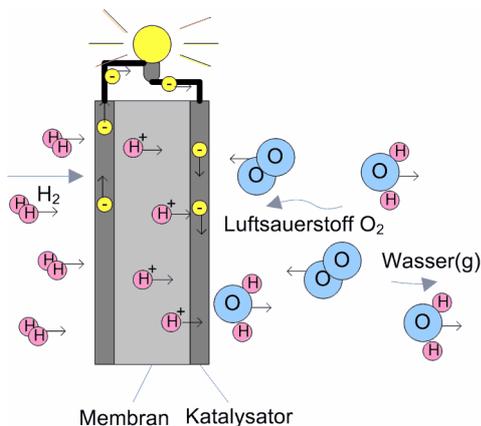


Abbildung 2.2: Funktion einer PEM-Brennstoffzelle

Bei der hier betrachteten Mikrobrennstoffzelle handelt es sich um eine PEM-Zelle (Proton Exchange Membran). Diese gehört zu den Niedertemperaturzellen und ist somit für die Anwendung in portablen Systemen sehr gut geeignet. Bei diesem Zelltyp werden auf der Anodenseite  $H_2$ -Moleküle getrennt und deren  $H^+$ -Ionen durch die Membran geleitet. Die Membran hat eine schlechte Elektronenleitfähigkeit, deshalb müssen die Elektronen den Umweg über den Verbraucher gehen und stehen danach auf der Kathodenseite zur Bildung von Wasser aus den  $H^+$ -Ionen und Sauerstoff zur Verfügung (Abbildung 2.2).

Die chemische Reaktion erfolgt dabei nur an der Drei-Phasen-Grenze von Katalysator, Elektrolyt und Elektrodenschicht. Um diese Fläche optimal zu nutzen, ist es notwendig, den Brennstoff bestmöglich verteilt zuzuführen.

PEM-Brennstoffzellen werden in der Regel mit reinem Wasserstoff betrieben, aber auch Methanol (als DMFC) und Ethanol (als DEFC) sind als Brennstoff möglich. Sie arbeiten bei Temperaturen unter 80°C.

## 2.3 Aufbau

Die bisher entwickelten PEM-Brennstoffzellen haben einen Aufbau aus Brennstoffverteiler – Diffusionsschicht – Katalysatorelektrode – Membran, wie in Abbildung 2.3 dargestellt. In der Mitte liegt die MEA (Membran Elektrode Assembly), sie besteht aus dem Membrankern und beidseitig aufgetragenen Elektroden-Katalysatorschichten.

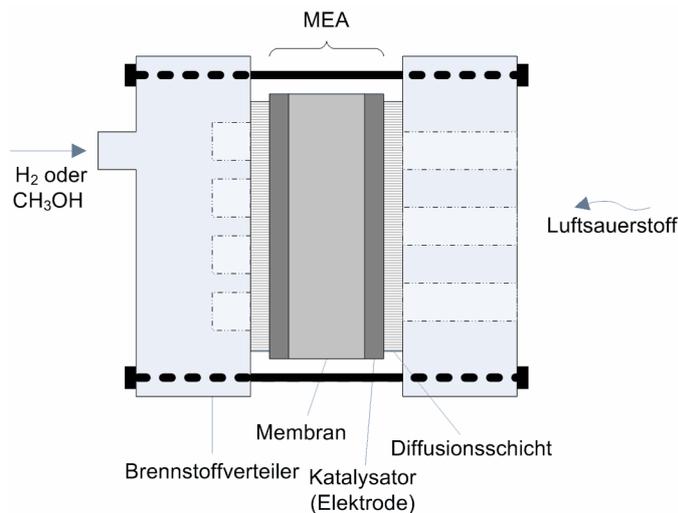


Abbildung 2.3: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle

Dieser Aufbau kann zu einem so genannten Stack mehrfach aufeinander gestapelt werden, um höhere Ausgangsspannungen zu erzeugen. Dabei werden jeweils zwei Brennstoffverteiler zu einer Bipolarplatte zusammengefasst.

Der Brennstoff wird durch Druckbehälter und Flowcontroller/Ventile oder bei flüssigen Medien durch Pumpen zugeführt. Sauerstoff (meist in Form von Luftsauerstoff) kann durch Pumpen oder Ventilatoren in das System gebracht werden.

Bei herkömmlichen Brennstoffzellen sorgt eine Diffusionsschicht (Gas Diffusion Layer (GDL)) für die Feinverteilung der Reaktanten an den Katalysator. Der Brennstoff kann so die Katalysatorschicht ganzflächig auch unter den Stegen der Brennstoffverteiler erreichen. Außerdem ermöglicht die elektrisch leitende Diffusionsschicht auch einen guten Ab- und Antransport der Elektronen. Durch die Verwendung der Diffusionsschicht kann ein recht grobes Flowfield verwendet werden, was in der Herstellung günstig und einfach zu handhaben ist. In der Weiterentwicklung und Miniaturisierung einer PEM-Zelle wurde am Fraunhofer IZM-Berlin ein Aufbau mit Mikroflowfields entwickelt [WA03][WA04]. Das Mikroflowfield übernimmt neben der Stromableitung die Feinverteilung des Brennstoffes, womit eine Diffusionsschicht entfallen kann.

Die Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM-Berlin besteht aus zwei mikrostrukturierten Stromableiterfolien, zwischen denen die MEA eingesetzt wird (Abbildung 2.3). Der Aufbau aus Folien ermöglicht ein besonders flaches System, wie es für viele Anwendungen zur portablen Energieversorgung wünschenswert ist. Außerdem bleibt der Herstellungsaufwand gering, da das System unabhängig von der Anzahl der Einzelzellen immer im Wesentlichen aus drei Folien (2 Stromableiterfolien, MEA) besteht. Die Einzelzellen werden in der Ebene nebeneinander elektrisch in Serie verschaltet. Durch den planaren Aufbau kann der Luftsauerstoff durch natürliche Konvektion genutzt werden, eine zusätzliche Belüftung mit Lüftern kann somit entfallen.

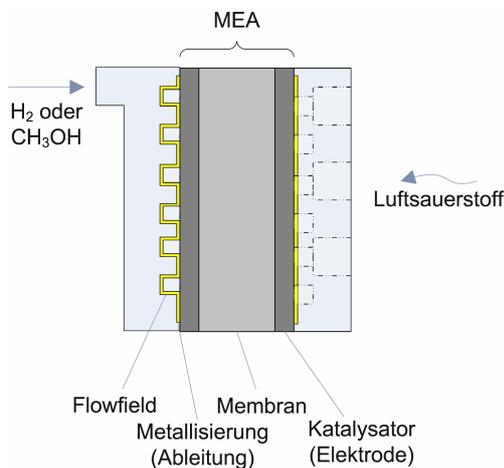


Abbildung 2.4: Aufbau der Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM-Berlin

Die Folien werden durch Technologien der Mikroelektronik in der Größenordnung von einigen Mikrometern strukturiert. In der Anodenfolie wird das Mikroflowfield erzeugt (Abbildung 2.5 links). Dieses sorgt für die Feinverteilung des Brennstoffes an die Katalysa-

torschicht und übernimmt gleichzeitig die Stromableitung, dazu werden sie mit einer Goldschicht metallisiert [SCH01].

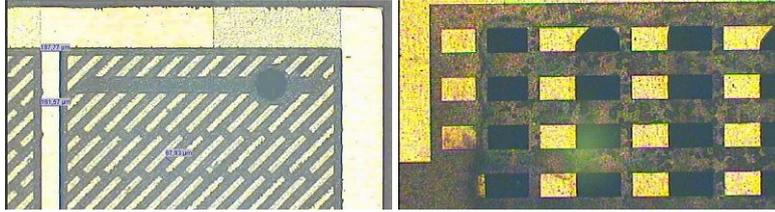


Abbildung 2.5: Links: Teilansicht eines Steg/Kanal-Flowfields der Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM-Berlin, vergrößert; rechts: Teilansicht der Kathodenseite der Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM-Berlin, stark vergrößert

Die Kathodenfolie (Luftseite, Abbildung 2.5 rechts) ist ähnlich strukturiert, hat aber kein eigentliches Flowfield, da die Luft ganzflächig durch natürliche Konvektion zugeführt wird. Stattdessen hat die Kathodenfolie ein gleichmäßiges Raster von (rechteckigen) Öffnungen.

Die Brennstoffzelle wird mit einer geöffneten Deckplatte auf einer Aufnahme verschraubt, der dabei entstehende Anpressdruck stellt letztendlich den elektrischen Kontakt zwischen den Schichten her (Abbildung 2.6).

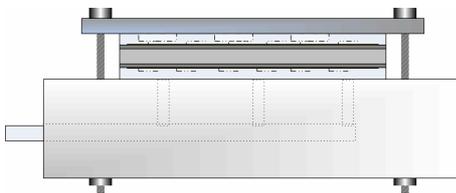


Abbildung 2.6: Gesamtaufbau der Fraunhofer IZM – Brennstoffzelle, die Zufuhr des Brennstoffs erfolgt von unten durch die Aufnahme

Das elektrische Verhalten der Fraunhofer IZM – Mikrobrennstoffzelle wurde in [GR02] ausführlich charakterisiert. Durch Optimierung der Herstellungsprozesse stehen heute Zellen zur Verfügung, die höhere und vor allem untereinander vergleichbare Leistungsdichten liefern. Die Streuung zwischen den Brennstoffzellen untereinander wurde verringert. Dadurch sind jetzt Vergleiche mit verschiedenen Strukturformen und Strukturturen des Flowfields und der Kathodenseite möglich.

Diese Seite wurde freigehalten.

### 3 Einfluss der Struktur auf die Brennstoffströmung

Im Folgenden wird der Einfluss der Flowfield Struktur auf die Brennstoffströmung untersucht. Dabei wird immer von Wasserstoff bzw. Wasser als Medium ausgegangen. Die Annahme von Wasser ist nötig, da der Betrieb als DMFC mit sehr gering molarer Methanollösung als Brennstoff erfolgt. Solch dünne Methanollösungen verhalten sich physikalisch genauso wie reines Wasser.

#### 3.1 Elektrisch bedingter Einfluss auf die Strömung

Wird der Brennstoffzelle im Betrieb Leistung entnommen, entspricht der Verbrauch von H<sub>2</sub>-Molekülen proportional der gelieferten Stromstärke. Dadurch entsteht entlang des Strömungskanals ein kontinuierlicher Abfall des Partialdrucks von Wasserstoff. Über dem gesamten Kanal kommt es dadurch zu einem Druckverlust, der von Versorgungssystem mindestens aufgebracht werden muss, um die gesamte Brennstoffzelle mit Brennstoff zu versorgen.

Der Druckverlust ist im Betrag wiederum linear abhängig von der Stromdichte [LD00]:

$$p_a = p_e (1 - i / i_{\max})$$

$$\Delta p = p_e - p_a$$

$$\Delta p = p_e i / i_{\max}$$

Kann die Brennstoffversorgung diesen nötigen Druck nicht aufbringen, kommt es hier zu einer Brennstoffverarmung.

In dieser Arbeit wird dieser Effekt aber bewusst nicht näher betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass die Versorgung selbst optimal ist. In den Messungen werden außerdem nur unbelastete Zellen charakterisiert, um einen Einfluss durch die Stromentnahme auszuschließen.

## 3.2 Vorbetrachtung zum Strömungsverhalten

Prinzipiell lassen sich viskose und molekulare Strömungen unterscheiden. Bei rein molekularen Strömungen basiert die Bewegung des Mediums im Wesentlichen auf den Kohäsionskräften die zwischen Medium und Kanalwand herrschen. Diese Wirkung wird durch die Knudsenzahl beschrieben. Die Knudsenzahl ist mit Querschnitt  $w$  der Anordnung und mittlerer freier Weglänge  $\lambda$  der Moleküle wie folgt definiert:

$$Kn = \frac{\lambda}{w} \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{\pi k_B T}{2m_0}} . \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Die Strömung ist für  $Kn \ll 1$  im Wesentlichen viskoser Natur (laminare oder turbulente Strömung), für  $Kn \gg 1$  geht man von einer hauptsächlich molekularen Strömung (Massen-transport durch Adhäsion und Kohäsion) aus. [CL04]

Dabei gelten die Stoffkonstanten und Umgebungsbedingungen:

Molekülmasse	$m_{0(H_2)} = 3,35 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$m_{0(H_2O)} = 2,35 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$
Viskosität	$\eta_{(H_2)} = 8,82 \mu \text{ Pas}$	$\eta_{(H_2O)} = 1000 \mu \text{ Pas}$
Boltzmannkonstante	$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	
Temperatur	$T_{\text{ambient}} = 293 \text{ K}$	
Druck	$P_{\text{ambient}} = 1,01 \text{ bar}$	

Nach Rechnung ergibt sich mit (Gl.3.1) bei Raumtemperatur und -druck für Wasserstoff ( $H_2$ ) folgende Knudsenzahl:

$$Kn_{H_2, \text{ambient}} = 0,12 \mu \text{ m} / w . \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Also muss bei Wasserstoff für Kanalquerschnitte kleiner als  $0,1 \mu \text{ m}$  mit molekularer Betrachtung gerechnet werden. Darüber gilt die so genannte Kontinuumsannahme. Da Wasser und dünne Methanol-Lösungen, bei Raumtemperatur flüssig sind, gilt hier ohnehin die Kontinuumsannahme, da die mittlere freie Weglänge der Moleküle in Flüssigkeiten durch die Bindungskräfte wesentlich kleiner als bei Gasen ist.

Die bisher am Fraunhofer IZM-Berlin hergestellten Mikrobrennstoffzellen haben Kanäle mit  $10\text{--}40 \mu \text{ m}$  Höhe und  $25\text{--}200 \mu \text{ m}$  Breite. Diese Dimensionen liegen noch weit über dem Übergangsbereich. Eine molekulare Betrachtung kann daher entfallen.

### 3.3 Einzelner langer Kanal

In der ersten Näherung an den Struktureinfluss wird das Flowfield als ein einzelner langer Mikrokanal betrachtet. Am Fraunhofer IZM–Berlin wurden solche Zellen aufgebaut und mit Wasserstoff charakterisiert.

Die Länge des Kanals und vor allem der Querschnitt haben einen Einfluss auf den Strömungswiderstand. Dieser Einfluss geht in den reibungsbedingten Druckverlust ein. Weiterhin muss der durch die Kanalkrümmung verursachte Anteil berücksichtigt werden. Dieser Anteil ist der so genannte formbedingte Druckverlust und bestimmt maßgeblich den Gesamtverlust in den Steg/Kanal–Flowfields. In den Mäanderformen geht der formbedingte Druckverlust durch die Anzahl der Windungen des Mäanders in den Gesamtverlust ein.

#### 3.3.1 Druckverlust

Wie Winnacker und Küchler [WK04] für Mikrokanäle feststellen, gilt für den Druckverlust in einem geraden Kanal die Formel nach Darcy–Weisbach

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho u^2 L}{2w} \quad [\text{kg/ms}^2 = \text{Pa}]. \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $u$ , dem Kanalquerschnitt  $w$  (äquivalenter Durchmesser) und Kanallänge  $L$ .  $\lambda$  ist ein dimensionsloser Widerstandsbeiwert, der charakteristisch für die Anordnung ist. In ihm gehen die Geometrie und die Oberflächenbeschaffenheit ein.

In rechteckigen Querschnitten bestimmt die kleinere Kantenlänge das Strömungsverhalten maßgeblich. Für die Mikrobrennstoffzelle wird für den Kanalquerschnitt  $w$  die Kanalhöhe  $h$  eingesetzt. Die Kanalhöhe ist in der Regel kleiner als die Kanalbreite. Mit  $\dot{V} = A \cdot u$  und  $u = \dot{V} / hw$  ist

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho L \dot{V}^2}{2h^2 w^2 w} = \frac{\lambda \rho L \dot{V}^2}{2h^3 w^2}. \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Makroskopisch kann man für laminare Rohrströmungen  $\lambda=64/Re$  annehmen, allgemein berechnet sich  $\lambda$  sowohl für laminare als auch für turbulente Strömungen nach Colebrook-White zu

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71h}\right). \quad (G1.3.5)$$

Dabei ist  $Re$  die Reynoldszahl,  $k/h$  die relative Rauheit der Kanalwände. Eine geringe Rauigkeit der Kanalwände wirkt sich demnach positiv auf das Strömungsverhalten aus. Die Wandrauigkeit kann bei der Herstellung der Mikrostrukturen in gewissen Grenzen durch Optimierung der Prozessparameter beeinflusst werden. Die Rauigkeit der MEA kann dagegen nicht beeinflusst werden, stellt aber durch die große Oberfläche einen nicht zu vernachlässigen Einfluss auf die Strömung dar.

In der Regel wird der Widerstandsbeiwert  $\lambda$  aber empirisch ermittelt und so finden sich in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben, je nach untersuchtem Model. Der verwendete Ansatz ist dabei immer

$$\lambda = a \cdot Re^{-b}. \quad (G1.3.6)$$

mit den zu bestimmenden Konstanten  $a$  und  $b$ , wobei  $b$  meist mit 1 bestimmt wird:

$$\lambda = a / Re. \quad (G1.3.7)$$

### 3.3.2 Reynoldszahl

Die Reynoldszahl beschreibt die Form einer Strömung und ermöglicht den Vergleich ähnlicher Strömungen in verschiedenen Anordnungen. Sie verknüpft die Stoffwerte (Dichte  $\rho$  und Viskosität  $\eta$ ) mit der Kanalgeometrie (äquivalenter Durchmesser  $W \triangleq h$ ) und mit  $u = \dot{V} / hw$  ist

$$Re = \frac{uw}{\nu} = \frac{\rho uh}{\eta} = \frac{\rho \dot{V}}{w\eta}. \quad (G1.3.8)$$

Allgemein nimmt mit abnehmenden Kanaldimensionen der Einfluss der Reibungskräfte gegenüber den Trägheitskräften innerhalb des Mediums zu. Daher liegen in Mikrostrukturen in der Regel laminare Strömungen vor. Die Reynolds-Zahlen  $Re$  haben typischerweise Werte zwischen 10 und 100, wobei der Umschlagpunkt zur turbulenten Strömung bei 200 bis 700 beobachtet wurde. [WK04]

### 3.3.3 Strömungswiderstand

Betrachtet man die Strömung durch ein beliebiges System, kann man das äußere Verhalten sehr gut mit dem Strömungswiderstand beschreiben. Dieser wird analog zum elektrischen Widerstand entwickelt nach

$$R = \frac{U}{I} . \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Die Spannung  $U$  entspricht der Potentialdifferenz über das System und im Falle einer fluidischen Strömung der Differenz von Eingangs- und Ausgangsdruck  $\Delta p$ . Der Strom  $I$  ist äquivalent zum Volumenstrom  $\dot{V}$  des Mediums.

Damit ist der Strömungswiderstand mit der Kanalquerschnittsfläche  $A$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $u$ :

$$R_s = \frac{\Delta p}{\dot{V}} \quad (\text{Gl. 3.10})$$

mit  $\dot{V} = A \cdot u$ ,  $u = \dot{V} / hw$ .

So ergibt sich nach Einsetzen von (Gl.3.4) (Druckverlust nach Darcy) in (Gl.3.10)

$$R_s = \frac{\Delta p}{\dot{V}} = \frac{\frac{\lambda \rho L \dot{V}^2}{2h^3 w^2}}{\dot{V}} = \frac{\lambda \rho L \dot{V}}{2h^3 w^2} . \quad (\text{Gl. 3.11})$$

Daraus folgt, dass man erwartungsgemäß eine Reduzierung des Strömungswiderstandes erreicht, wenn man tiefere (größere Höhe  $h$ ) oder weitere Kanalstrukturen einsetzt.

### 3.3.4 Beispielrechnung

Fasst man die bisherigen Erkenntnisse zusammen, ergeben sich für einen lang gestreckten Mäander unter Vernachlässigung der Rauigkeit ( $k=0$ ) bei folgenden Parametern und Abmessungen:

Dichte	$\rho(\text{H}_2) = 0,0899 \text{ kg/m}^3$ $\rho(\text{H}_2\text{O}) = 1000 \text{ kg/m}^3$
Viskosität	$\eta(\text{H}_2) = 8,82 \mu\text{Pas}$ $\eta(\text{H}_2\text{O}) = 1 \text{ mPas}$
Kanalhöhe	$h = 30 \mu\text{m}$
Kanalweite	$w = 100 \mu\text{m}$
Kanallänge	$L = 170 \text{ mm}$
Volumenstrom	$\dot{V} = 3 \text{ sccm} = 3 \text{ ml/min} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$

für Wasserstoff, bei 3 sccm (ml/min)

$$R_s = \frac{\lambda \rho L \dot{V}}{2h^3 w^2} = 4,066 \times 10^{11} \lambda \text{ kg/m}^4\text{s}$$

$$\Delta p = R_s \dot{V} \approx 0,2033 \lambda \text{ mbar.} \quad (\text{Gl. 3.12})$$

Unter der Annahme für  $\lambda$  nach Colebrook-White (Gl.3.5) ergeben sich aber gerade für Wasser extrem hohe Drücke, die aus den geringen Abmessungen resultieren. Stattdessen wird  $\lambda$  daher weiter unten mit dem empirischen Ansatz (Gl.3.7) ermittelt.

Für Wasser oder dünne Methanollösungen berechnen sich mit (Gl.3.12) und (Gl.3.5) für einen Volumenfluss von 3 sccm:

$$R_s = \frac{\lambda \rho L \dot{V}}{2h^3 w^2} = 3,25 \times 10^{14} \text{ kg/m}^4\text{s}$$

$$\Delta p = R_s \dot{V} \approx 160 \text{ bar.}$$

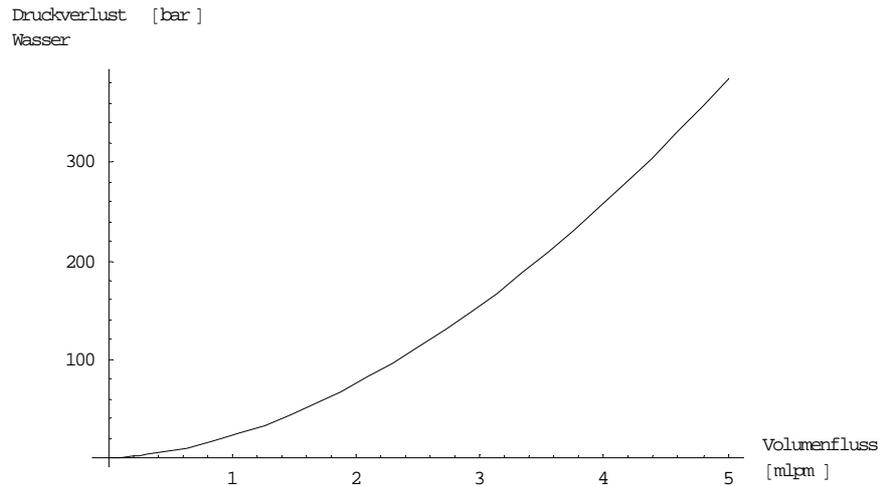


Abbildung 3.1: Theoretischer Verlauf des Druckverlustes bei Wasser, Grundlage ist die Rechnung nach Darcy im makroskopischen Ansatz.

Der Druckverlust ist eigentlich noch größer, wenn man die Reibungsverluste an der Kanalwand berücksichtigt. Deren Rauigkeit blieb hier aber unberücksichtigt.

Der Druck, der nach diesem Ansatz nötig wäre, um Wasser durch den ganzen Kanal zu befördern, ist nicht realisierbar. Daraus folgt, dass man die Mikrobrennstoffzellen mit einem durchgehenden Mäanderkanal nur mit hohem Aufwand bzw. mit flüssigen Medien überhaupt nicht betreiben könnte.

Allerdings wurden Brennstoffzellen mit den verwendeten Dimensionen aufgebaut und sowohl mit Wasserstoff als auch Methanollösungen betrieben. Die Messungen des Druckverlustes ergaben für Wasserstoff ein  $\Delta p$  von einigen 10 bis knapp 100 mbar. Wasser und Methanollösungen zeigten einen Druckverlust um 400 bis 800mbar bei 3ml/min.

Zur Erklärung des geringen Druckverlustes müssen Kapillarkräfte und Schlupf näher betrachtet werden.

### 3.3.5 Kapillarkräfte

Kapillarkräfte wirken in Mikrokanälen selbstbefüllend für benetzende Medien. Die Kapillarkraft beruht darauf, dass das benetzende Medium durch relativ hohe Kohäsionskräfte (Fluid – Wand) bestrebt ist, die Kanalwände zu benetzen. Dabei wird das Fluid vollständig in den Kanal gezogen. Da bei Verwendung von flüssigen Medien (Wasser) keine relevante Gegenkraft überwunden werden muss, erfolgt dieser Vorgang solange, bis der ganze Kanal geflutet ist.

Zum kontinuierlichen Durchströmen der Struktur hat die Kapillarkraft aber keinen Beitrag, da der Kanal ja dann vollständig benetzt ist. Insofern lässt sich dieser Effekt nicht verwenden, um die Reduzierung des Druckverlustes zu erklären.

Ist die Kanaloberfläche hydrophob, kann der große Kontaktwinkel den im Folgenden beschriebenen Schlupf begünstigen.

### 3.3.6 Schlupf

Arkilic et al. haben für die Berechnung von fluidischen Mikrosystemen die Berücksichtigung von Schlupf an Kanalwänden untersucht [ARK01]. Nach dieser Theorie wird die Stetigkeit der Strömungsgeschwindigkeit an der Kanalwand fallen gelassen und das Geschwindigkeitsprofil direkt an der Kanalwand mit größer Null angenommen.

Nach diesem Ansatz ist

$$\frac{\dot{V} \rho}{\Delta p} = \frac{h^3 w \bar{P}}{12 \eta L R T} + \frac{h^3 w P_0}{12 \eta L R T} \frac{2 - \sigma}{\sigma} Kn \quad (G1.3.13)$$

R ist die Gaskonstante, T die Temperatur. Kn ist die Knudsenzahl, P<sub>0</sub> ist der Umgebungsdruck,  $\bar{P}$  ist der mittlere Druck des Mediums im gesamten System. In beiden Summanden erkennt man mit RT/P die allgemeine Gasgleichung, welche die Kompressibilität des Mediums berücksichtigt. Die Gasgleichung lässt sich nach der entsprechend indizierten Dichte des Mediums auflösen. Es gilt:

$$R = \frac{P V}{m T} ; V = \frac{m}{\rho} ; \quad (G1.3.14)$$

Mit der Vereinfachung, dass bei der Anwendung in Mikrobrennstoffzellen der Eingangsüberdruck maximal etwa 300 bis 500 mbar im Wesentlichen sogar unter 100 mbar beträgt, kann man annehmen, dass die auftretende Kompression die lokale Dichte des Mediums nur geringfügig ändert. Damit kann man in allen Termen die gleiche Dichte annehmen und erhält:

$$\frac{\rho \dot{V}}{\Delta p} = \frac{h^3 w \rho}{12 L \eta} + \frac{h^3 Kn w \rho (2 - \sigma)}{12 L \eta \sigma} . \quad (\text{Gl. 3.15})$$

Wobei  $h$  und  $w$  die Kanalgeometrie und  $L$  die Kanallänge ist. Der so genannte Schlupfkoeffizient  $\sigma$  ist im makroskopischen Bereich 1. Da die Temperatur jetzt ebenfalls nicht mehr berücksichtigt wird, muss man sicher stellen, dass diese im gesamten Kanal konstant ist. Auf Grund der geringen Systemgröße ist diese Forderung aber zumindest näherungsweise erfüllt.

Wenn man (Gl.3.15) nach  $\Delta p$  umstellt erhält man:

$$\Delta p = \frac{12 L \eta \sigma \dot{V}}{h^3 w (\sigma + Kn (2 - \sigma))} . \quad (\text{Gl. 3.16})$$

Gleichung (Gl.3.16) zeigt eine lineare Abhängigkeit vom Volumenfluss, welche durch die Messungen bestätigt wird. Außerdem geht bei diesem Ansatz die Rauigkeit der Oberfläche nicht in die Berechnung ein. Da die Theorie beim Schlupf davon ausgeht, dass das Medium ohne oder mit nur sehr geringer Reibung über der Oberfläche gleitet, haben lokale Unebenheiten scheinbar keine Auswirkung auf den Gesamtwiderstand.

Auch [HA04] beschreibt die drastische Reduzierung des Druckverlustes durch Schlupf. Durch die Mikrostrukturen herrschen relative Wandrauigkeiten im Bereich der freien Weglänge der Moleküle. So kommt es lokal zu hohen Knudsenzahlen, wodurch verstärkt molekulare Effekte auftreten. An dieser Stelle kann sich eine unterschiedliche Oberflächenrauigkeit eventuell stark auswirken. Eine endgültige Klärung dieser Erscheinung fehlt aber noch.

### 3.3.7 Lösung der empirischen Parameter

Der Koeffizientenvergleich von (Gl.3.16) mit dem Ansatz nach Darcy (Gl.3.4) ergibt für den empirischen Ansatz (Gl.3.7):

$b = 1$  und

$$a = \frac{24\sigma}{\sigma + Kn(2 - \sigma)} \quad (\text{Gl. 3.17})$$

Der Einfluss des Schlupfes wird in Abbildung 3.2 sehr deutlich. Im makroskopischen Bereich ( $\sigma=1$ ) ist der Widerstandsbeiwert  $a$  relativ konstant, im System mit Schlupf ( $\sigma < 0,2$ ) geht der Widerstandsbeiwert sehr schnell gegen Null.

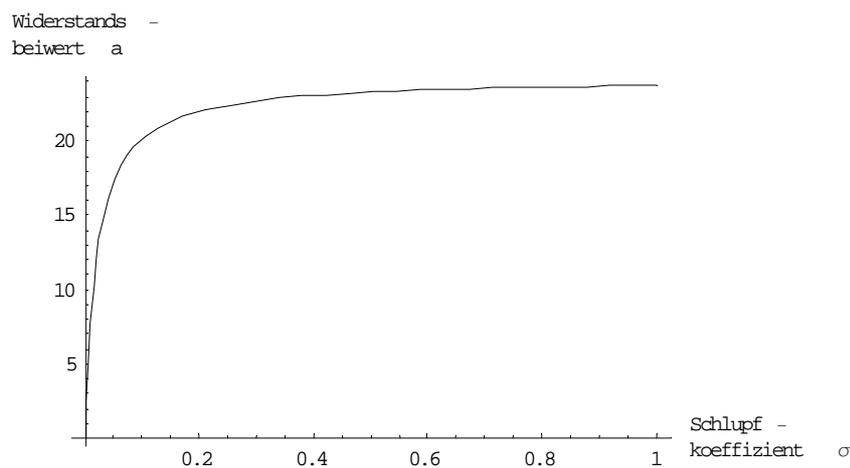


Abbildung 3.2: Einfluss des Schlupfkoeffizienten auf den Widerstandsbeiwert, gerechnet für Wasser mit  $Kn=0,01$

### 3.4 Parallele Kanäle

In der zweiten Näherung wird das Flowfield als parallele Anordnung gleichartiger Mikrokanäle betrachtet. Es wurden Mikrobrennstoffzellen mit drei parallelen Mäanderstrukturen als Dreizeller realisiert.

Der Ansatz zur Rechnung ergibt sich aus der Parallelschaltung von Widerständen:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (\text{Gl. 3.18})$$

Da alle Kanäle gleichartig sind ergibt sich:

$$\frac{1}{R_s} = n \frac{1}{R_1} \quad \text{bzw.} \quad R_s = \frac{R_1}{n} \quad (\text{Gl. 3.19})$$

$R_1$  ist der Strömungswiderstand eines Kanals und wird wie im Abschnitt 3.3 berechnet.

Für den Druckverlust kann man genauso verfahren und erhält

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho L \dot{V}^2}{n \cdot 2h^3 w^2} \quad (\text{Gl. 3.20})$$

Durch den geänderten Aufbau ändert sich natürlich die Kanallänge. Ein einzelner Kanal im Dreizeller ist kürzer als der Kanal eines Einzellers (Abbildung 3.3). Auf Grund der Linearen Abhängigkeit  $\Delta p(L)$  muss sich  $R_{S3}/R_{S1}$  genauso verhalten wie das Verhältnis  $(L_3/3)/L_1$ .

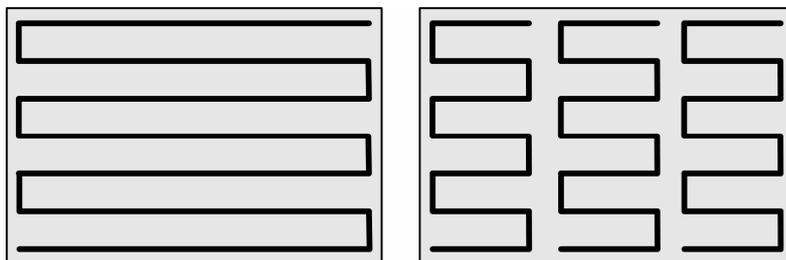


Abbildung 3.3: Mäanderstrukturen Einzeller (links), Dreizeller (rechts).

### 3.5 Betrachtung von Kanalkrümmungen

Krümmungen des Strömungskanals erzeugen genauso wie die Stege einen formbedingten Strömungswiderstand. Es entstehen Wirbel und andere sekundäre Strömungen, die der Hauptströmung Energie entziehen. Dieser Widerstand lässt sich mit dem Widerstandsbeiwert  $C_w$  durch die (Gl.3.21) ausdrücken.

$$\Delta p = C_w \frac{\rho u^2}{2} = C_w \frac{\rho \dot{V}^2}{2h^2 w^2} \quad (\text{Gl. 3.21})$$

Der Widerstandsbeiwert hängt dabei von den Dimensionen der Krümmung ab und wird in der Regel empirisch ermittelt. Erfahrungswerte liegen im Bereich um 0,5 für runde Krümmungen und bei etwa 2 für kantige Krümmungen. Gerade bei scharfkantigen Krümmungen wirkt sich das Verhältnis von Kanalweite und „Krümmungsradius“ deutlich aus (Abbildung 3.4).

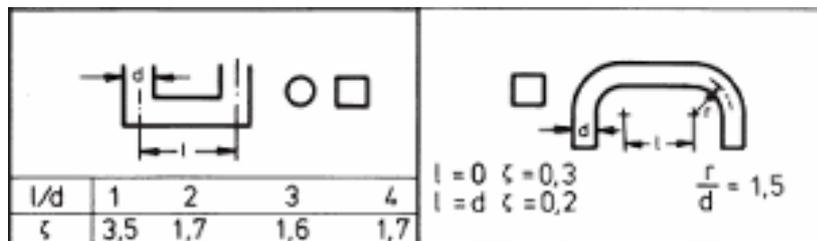


Abbildung 3.4:  $C_w$ -Werte ( $\zeta$ ) kantiger und gerundeter Umkehrung (aus [GRxx])

Bei den verwendeten Mäanderstrukturen gibt es etwa 20 spitzwinklige Umkehrungen. Dies verdeutlicht den starken Anteil der Kanalform am gesamten Druckverlust der Mäanderstrukturen.

Der Druckverlust errechnet sich mit der Anzahl  $m$  entsprechend:

$$\Delta p = m C_w \frac{\rho \dot{V}^2}{2h^2 w^2} \quad (\text{Gl. 3.22})$$

## 3.6 Betrachtung einzelner Stege

### 3.6.1 Wirbel an Stegkanten

An einer Stegkante entstehen durch die plötzliche Änderung des scheinbaren Kanalvolumens Wirbel, welche der Strömung Energie entziehen. Je scharfkantiger eine Kante dabei ist, desto eher folgt eine Ablösung der Grenzschicht, was letztendlich die Ursache der Wirbelentstehung darstellt.

Bei genügender Ausrundung der Geometrie kann man die Ablösung der Grenzschicht eingrenzen und so Wirbel eindämmen oder sogar verhindern. In jedem Fall gibt es einen erheblichen Druckverlust im Staupunkt an der Stirnseite und auf der dazu abgewandten Seite der Struktur.

Bei den länglichen Stegen entstehen sowohl hinter der zurückspringenden Stufe am Ende eines Steges als auch im Staupunkt und an der Seite Wirbel. Für den Druckverlust ist hauptsächlich der Energieverlust im Staupunkt vorn verantwortlich.

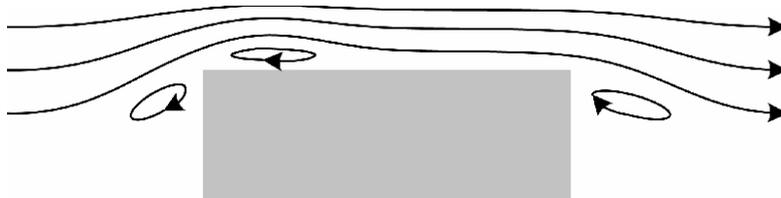


Abbildung 3.5: Wirbel an rechteckigem Hindernis, deutlich ausgeprägt nach jeder Kante und im Staupunkt, Strömung von links nach rechts

Abbildung 3.5 zeigt den Strömungsverlauf an einem rechteckigen Hindernis. Es bilden sich nach jeder Kante und im Staupunkt vor dem Körper Wirbel. Die Anordnung ist symmetrisch und kann für ein komplettes Flowfield wiederholt gezeichnet werden (Abbildung 3.6).

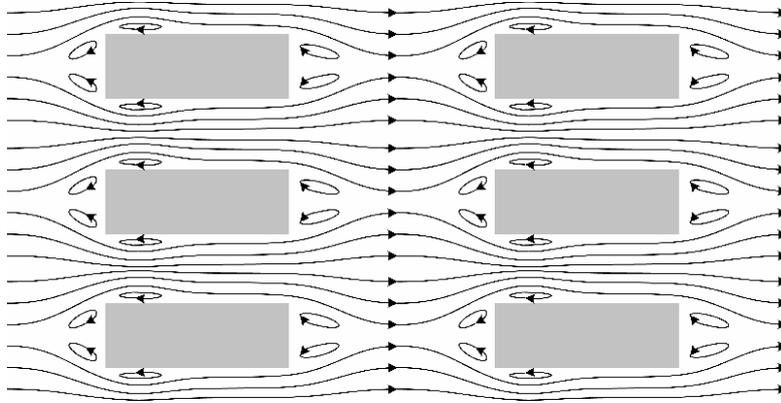


Abbildung 3.6: Wirbel im Steg/Kanal-Flowfield, Strömung von links nach rechts

### 3.6.2 Druckverlust an Stegkanten

Zur Betrachtung der Umströmung eines Steges wird vom allgemeinen Verhalten der Umströmung von Körpern ausgegangen. Dabei summieren sich der innere Reibungswiderstand des Fluids (Newtonsche Reibungskraft)  $F_R$  und der Druckwiderstand/ Staudruck  $F_D$  zum Strömungswiderstand  $F_W$ :

$$F_W = F_R + F_D . \quad (G1.3.23)$$

Da die Reibungskraft schwer zu berechnen ist, werden üblicher Weise beide Kräfte zusammengefasst und der so genannte Widerstandsbeiwert  $C_w$  experimentell ermittelt. Man setzt die Gesamtkraft als proportional zu Staudruck und Stirnfläche an und erhält mit der Fluidichte  $\rho$ , der Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und der Stirnfläche des Körpers  $A$  für die Gesamtkraft:

$$F_W = C_w A \frac{\rho u^2}{2} . \quad (G1.3.24)$$

Der Druckverlust ergibt sich aus dem Verhältnis der Widerstandskraft zur Fläche und ist damit gleich dem Staudruck mal Widerstandsbeiwert:

$$\Delta p = C_w \frac{\rho u^2}{2} = C_w \frac{\rho \dot{V}^2}{2h^2 w^2} . \quad (G1.3.25)$$

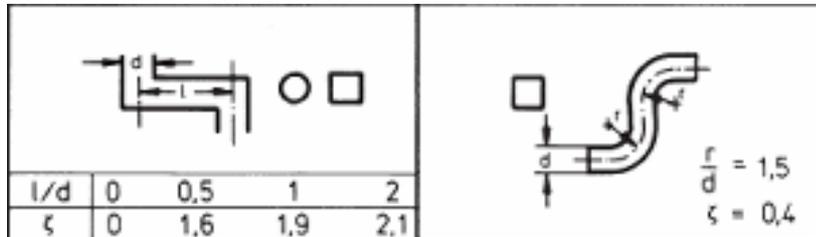


Abbildung 3.7:  $C_w$ -Werte ( $\zeta$ ) kantiger und gerundeter Kante  
(aus [GRxx])

Für einen einzelnen Steg kann man eine Knieanordnung wie in Abbildung 3.7 links ansetzen. Damit errechnet sich der Druckverlust des gesamten Flowfields nach der Anzahl der Stege  $m$  mal dem einzelnen Widerstand:

$$\Delta p = m C_w \frac{\rho \dot{V}^2}{2h^2 w^2} . \quad (G1.3.26)$$

Beim realisierten Steg/Kanal-Flowfield der Fraunhofer IZM – Mikrobrennstoffzelle runden sich die scharfen Kanten der Designmaske durch die Anwendung der Mikrofertigungstechnologien relativ ab. Der Rundungsradius liegt in der Größenordnung der Kanalweite. Es ist daher eher der Widerstandsbeiwert der gerundeten Kante anzunehmen.

Weiterhin kann man annehmen, dass die große Anzahl der Stege nicht den gleichen Einfluss haben wie ein einzelner Steg mit den Abmaßen der Summe der kleinen Stege. Bei der großen Anzahl kleiner Stege entstehen sofort kleine Wirbel und eine turbulente Strömung die leichter an den folgenden Stegen vorbeiströmen kann. Die Strömung hat in der Vorstellung bei vielen kleinen Hindernissen mehr Ausweichmöglichkeiten als bei einem großen Hindernis.

Der Gesamtwiderstand der Einbauten ist im Flowfield also wesentlich kleiner anzunehmen. Demnach muss man einen relativ kleinen Wert für  $C_w$  annehmen oder ihn empirisch ermitteln.

### 3.7 Gesamtmodell

Für alle Flowfield Strukturen setzt sich der Druckverlust in der Mikrobrennstoffzelle aus den Reibungsverlusten nach Darcy auf Grund der Gesamtlänge des Kanals und der Summe der Formverluste aller Umkehrungen (bei Mäandern) bzw. Stegen zusammen.

$$\Delta p = \frac{\Delta p_{\text{Darcy}}}{n} + m \cdot \Delta p_{\text{Form}} \quad (\text{Gl. 3.27})$$

$$\Delta p = \frac{L \dot{V}^2 \lambda \rho}{2 h^3 w^2 n} + m \cdot C_w \frac{\rho \dot{V}^2}{2 h^2 w^2}$$

$$\Delta p = \frac{\rho \dot{V}^2 \left( \frac{L \lambda}{n} + h m C_w \right)}{2 h^3 w^2} . \quad (\text{Gl. 3.28})$$

Der Widerstandsbeiwert  $C_w$  ist immer kleiner 1 und nur empirisch zu ermitteln.  $m$  ist die jeweilige Anzahl von Umkehrungen oder die Anzahl von Stegen in einem Kanal.  $n$  ist Anzahl paralleler Kanäle bei Mäanderstrukturen. Damit verbleiben in dieser Gleichung die Kanaldimensionen und der empirische Faktor  $\lambda=f(\text{Re})$ . Das Medium wird durch die Dichte  $\rho$  und den Volumenfluss  $\dot{V}$  berücksichtigt.

Mit (Gl.3.16) ( $\Delta p$  mit Lösung für  $\lambda$ ) vervollständigt sich der Druckverlust zu

$$\Delta p = \frac{\dot{V} \left( \frac{a}{n} L w \eta + h m \rho \dot{V} C_w \right)}{2 h^3 w^2} \quad (\text{Gl. 3.29})$$

mit

$$a = \frac{24 \sigma}{\sigma + \text{Kn}(2 - \sigma)} .$$

$\rho$  und  $\eta$  sind konstante Stoffparameter des Mediums.  $L$ ,  $h$  und  $w$ , sowie  $C_w$ ,  $m$  und  $n$  sind konstante Parameter der Geometrie des Flowfields. Weiterhin werden die Transportphänomene durch den Schlupfkoeffizienten  $\sigma$  berücksichtigt.

Unberücksichtigt ist immer noch, dass der auftretende Schlupf auch die Umströmung der Einbauten beeinflusst und den Druckverlust auch an dieser Stelle reduziert. Hier besteht weiter Forschungsbedarf.

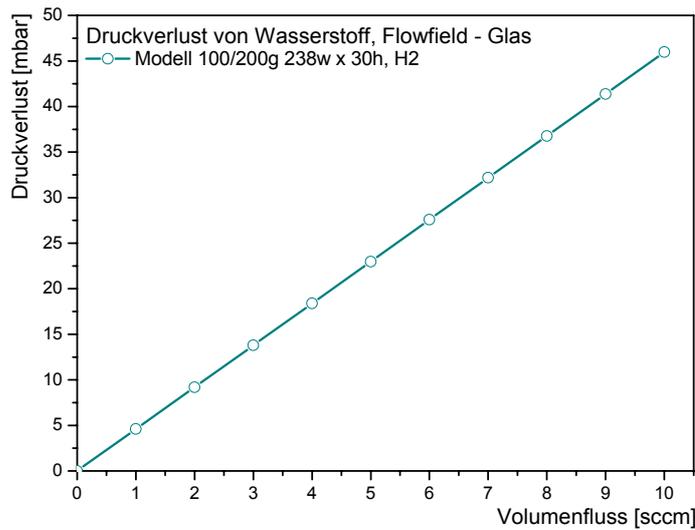


Abbildung 3.8: Theoretischer Verlauf des Druckverlustes bei Wasserstoff, für einen einzelnen Mäander mit 20 Windungen. Kanalquerschnitt ist  $w \times h = 250 \times 30\mu\text{m}$ ,  $C_w=0.5$ ,  $\sigma=0,00001$ .

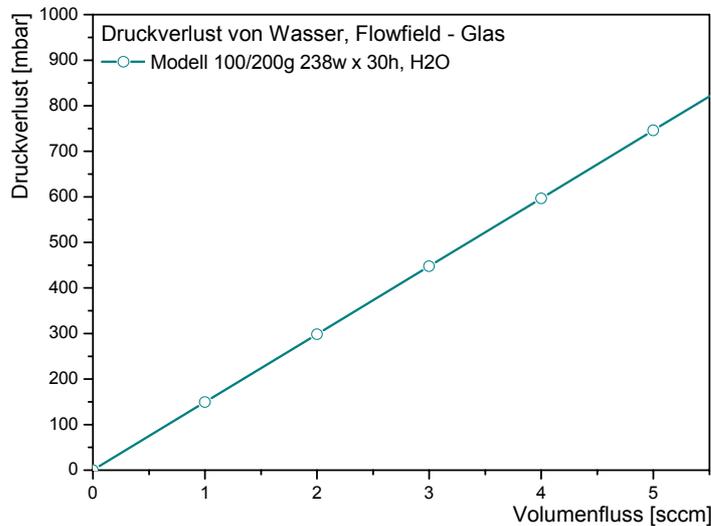


Abbildung 3.9: Theoretischer Verlauf des Druckverlustes bei Wasser, für einen einzelnen Mäander mit 20 Windungen. Kanalquerschnitt ist  $w \times h = 250 \times 30\mu\text{m}$ ,  $C_w=0.2$ ,  $\sigma=0,00001$ .

Abbildung 3.8 und Abbildung 3.9 zeigen den theoretischen Verlauf des Druckverlustes für Wasserstoff bzw. Wasser in einem einzelnen Mäander. Die exakten Werte hängen stark vom

Widerstandsbeiwert  $C_w$  und dem Schlupfkoeffizienten  $\sigma$  ab. Die Darstellung kann also zunächst nur analytisch interpretiert werden. Die Werte der numerischen Lösung sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Volumenfluss [sccm]	Druckverlust von Wasserstoff [mbar]	Druckverlust von Wasser [mbar]
1,0	4,60	149
2,0	9,20	298
3,0	13,8	448
4,0	18,4	597
5,0	23,0	746
6,0	27,6	895
7,0	32,2	1040
8,0	36,8	1190
9,0	41,4	1340
10,0	46,0	1490

Tabelle 3.1: Zu erwartender Druckverlust nach (Gl.3.29) für einen einzelnen Mäander. Kanalquerschnitt ist  $w \times h = 250 \times 30 \mu\text{m}$ .

## 4 Messungen des Druckverlustes

### 4.1 Messaufbau

Die Messung des Druckverlusts wurde mit einem Differenzdruck-Sensor bzw. Handmessgerät durchgeführt. Bei den Messungen mit Wasserstoff wurde der Sensor MPX5100 verwendet. Für die Messungen mit Wasser kam das Handmessgerät MP330 von Proemtec zum Einsatz. Des Weiteren wurden die Messwerte am Messplatz für Wasserstoff mit einem Labview-Programm protokolliert, welches auch die Steuerung der Wasserstoffzufuhr regulierte. Bei dem Messplatz für Wasser wurde ein Labview-Programm eingesetzt, um die Pumpe zu steuern. Bei dieser handelt es sich um eine MZR4605.

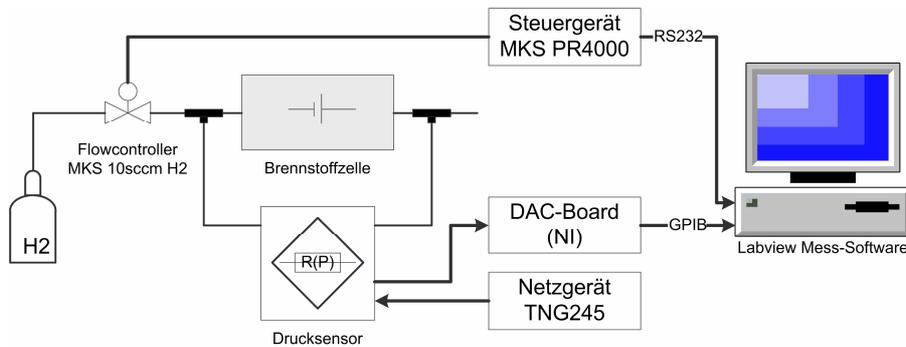


Abbildung 4.1: Messaufbau zur Bestimmung des Druckverlustes an Mikro-brennstoffzellen bei Verwendung von Wasserstoff als Medium.

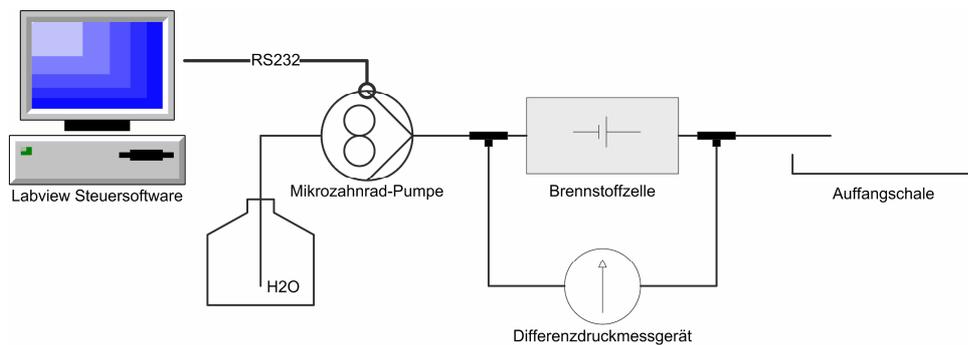


Abbildung 4.2: Messaufbau zur Bestimmung des Druckverlustes an Mikro-brennstoffzellen bei Verwendung von Wasser als Medium.

## 4.2 Einschaltverhalten

Zu Beginn jeder Messung befindet sich eine unbestimmte Menge Luft im gesamten Fluid-System. Diese Luft muss erst ausgetrieben werden, bevor die Messung den tatsächlichen Druckverlust wiedergibt und sich der gesuchte Messwert einstellt. Die Zeit die dazu nötig ist, hängt von der Größe des Luftvolumens und der Flussrate des zu untersuchenden Mediums ab.

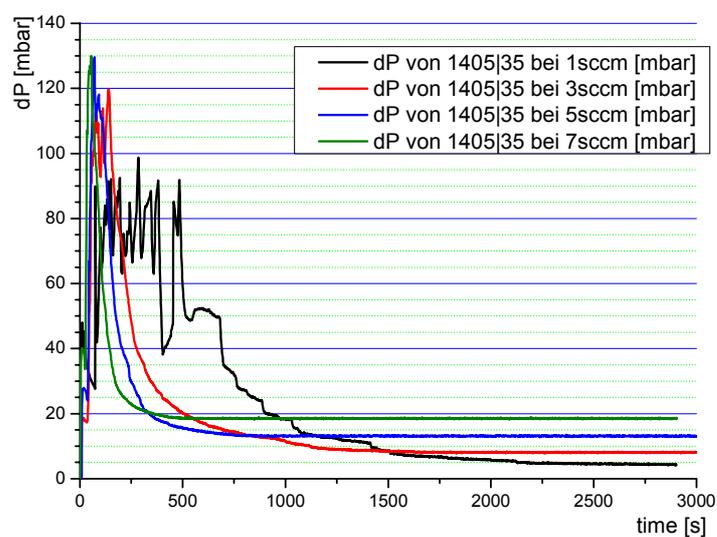


Abbildung 4.3: Einschaltverhalten des Druckverlustes bei Wasserstoff

Abbildung 4.3 zeigt den zeitlichen Verlauf des Druckverlustes an einer Brennstoffzelle mit verschiedenen Flussraten. Deutlich ist zu sehen, wie der Messwert bei höherem Volumenfluss (sccm) eher erreicht wird.

### 4.3 Kurvenfit

Alle betrachteten Strukturvarianten wurden mit dem Gesamtmodell berechnet, um einen Vergleich mit den durchgeführten Messungen zu ermöglichen. Dazu wurden die unbekanntesten Parameter Schlupf  $\sigma$  und der Widerstandsbeiwert  $C_w$  als Fitparameter bestimmt.

Der Schlupf wurde für alle Messungen mit  $\sigma=0.00001$  angenähert. In der Literatur konnten keine Werte für diesen Parameter gefunden werden, die den angenäherten Wert untermauern würden.

Für den Widerstandsbeiwert  $C_w$  wurde nach Medium und Form (Mäander bzw. Stege) unterschieden und die folgenden Werte ermittelt:

	Mäanderumkehrung	Steg im Steg/Kanal-Flowfield
Wasserstoff	0,5	0,2
Wasser	0,24	0,00054

Tabelle 4.1: Widerstandsbeiwerte der untersuchten Strukturen.

Dabei fällt besonders der Wert für die Kombination von Wasser in Steg/Kanal-Flowfields auf. Der Wert ist hier extrem klein. Das lässt vermuten, dass durch die starke Wirbelbildung die einzelnen Stege an Einfluss verlieren. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die tatsächlichen Effekte genauer zu bestimmen. Diese können in dieser Arbeit allerdings nicht durchgeführt werden, da dieses den zeitlichen Rahmen sprengen würde.

## 4.4 Messung ohne MEA

Um im Vergleich den Einfluss der MEA auf das Strömungsverhalten zu ermitteln, wurde der Druckverlust des Flowfields bei vereinfachtem Aufbau der Zellen ermittelt. Dazu wurden Anodenfolien auf Aufnahmen geklebt und auf die Anodenfolien jeweils eine Glasplatte gepresst. Dieses „Sandwich“ ist dann ähnlich aufgebaut wie die kompletten Prototypen der Fraunhofer IZM – Mikrobrennstoffzelle.

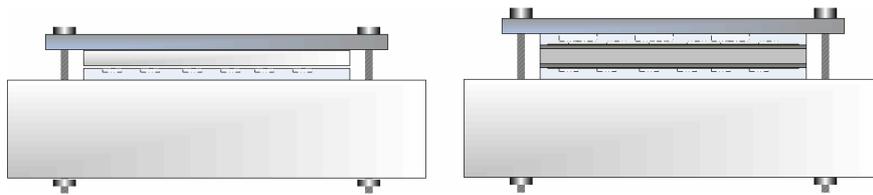


Abbildung 4.4: Messaufbau der Brennstoffzellen, links: nur für Druckversuche mit Glasplatte (oben) auf Anodenfolie, rechts: kompletter Aufbau für die elektrische Charakterisierung. Die Zelle selbst ist stark vergrößert dargestellt.

Da der Messplatz nach Abbildung 4.1 zum Zeitpunkt dieser Messungen noch nicht zur Verfügung stand, wurden die Messungen ohne MEA ebenfalls mit dem Handmessgerät MP330 durchgeführt.

#### 4.4.1 Wasserstoff

Für Wasserstoff als Medium zeigt Abbildung 4.5 den Druckverlust in Abhängigkeit vom eingepreßten Volumenstrom. Man erkennt sehr gut die lineare Abhängigkeit vom Volumenfluss.

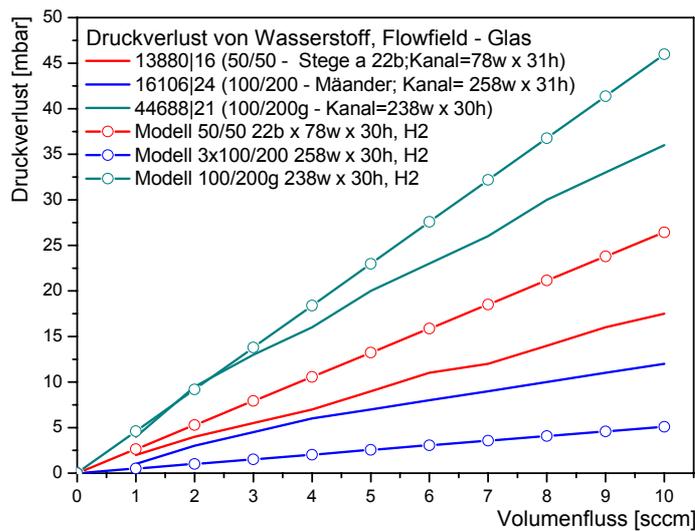


Abbildung 4.5: Druckverlust von Wasserstoff im System Flowfield – Glas in Abhängigkeit vom Volumenstrom: einzelner Mäander (oliv), drei gleiche Mäander (blau) und Steg/Kanal-Flowfield (rot),

Der Druckverlust ist bei dem einzelnen durchgehenden Mäander wesentlich höher als beim Dreizeller oder bei den Steg/Kanal-Flowfield.

#### 4.4.2 Wasser

Das Ergebnis des gleichen Experiments mit Wasser ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Es wurden dieselben Anodenfolien verwendet, wie für den Versuch mit Wasserstoff.

Es ist zu sehen, dass sich die Mikrobrennstoffzelle auch als Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) verwenden lässt, da der Druckverlust für Wasser bei geringen Flussraten im technisch vertretbaren Rahmen liegt.

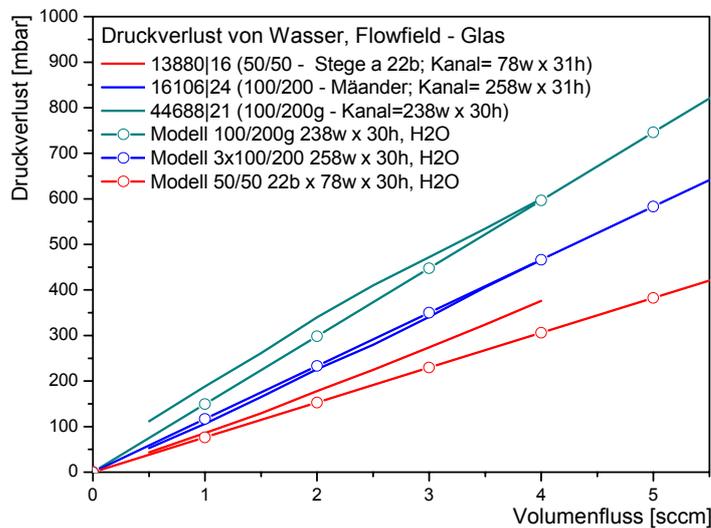


Abbildung 4.6: Druckverlust von Wasser im System Flowfield - Glas in Abhängigkeit vom Volumenstrom: einzelner Mäander (oliv), drei gleiche Mäander (blau) und Steg/Kanal-Flowfield (rot)

Wie zu erwarten war, zeigt sowohl die Steg-Struktur als auch das Flowfield mit drei parallelen Mäandern einen deutlich geringeren Druckverlust als das Flowfield mit einem einzigen Mäander. Insgesamt zeigt diese Messreihe die beste Übereinstimmung mit den berechneten Werten.

Bei den untersuchten Mäanderstrukturen ist  $L_3/3=20\text{mm}$  (Dreizeller) und  $L_1=170\text{mm}$  (Einzeller) also  $R_{S3}/R_{S1}=(L_3/3)/L_1=0,12$ . Der Strömungswiderstand des Dreizellers ist in dieser Überlegung demnach etwa nur ein Neuntel so groß wie beim Einzeller. Dagegen ist das Verhältnis  $R_{S3}/R_{S1}$  in den Messungen 0,2 bis 0,4 für Wasserstoff und 0,5 bis 1 für

Wasser. Der Strömungswiderstand ist beim Dreizeller also fast halb so groß wie der des Einzellers. Bei Wasser nähern sich die Widerstände für höhere Volumenflüsse sogar noch weiter an.

Da die Anzahl der Kanten und Schleifen im dreiteiligen Mäander vergleichbar mit der im einteiligen Mäander ist, ist anzunehmen, dass diese den Strömungswiderstand stärker bestimmen, als die Kanallänge.

Es wird deutlich, dass bei zunehmenden Wasser-Durchflüssen der Druckverlust in allen Mäander-Strukturen ähnlich stark steigt und die Differenz der beiden Kurven nahezu gleich bleibt. In der Schlussfolgerung hat nicht nur die Anzahl und Länge der Kanäle überwiegen- den Einfluss auf das Strömungsverhalten, sondern sehr deutlich auch der sich ähnelnde Kanalverlauf. Der Kanalverlauf der gegebenen Mäandervarianten (Abbildung 4.7) ist tatsächlich durch eine vergleichbare Anzahl von Wendungen charakterisiert.

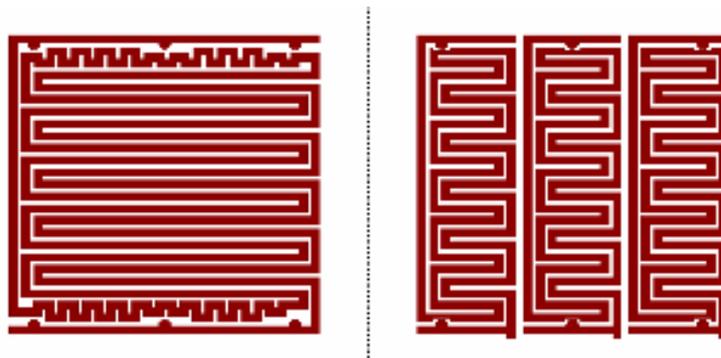


Abbildung 4.7: Realisierte Mäanderstrukturen der Mikrobrennstoffzelle. Einzelner durchgehender Mäander (links) mit 170mm Gesamtlänge und 20 Hauptwindungen, drei gleiche Mäander (rechts) mit jeweils 60mm Länge und 22 Windungen. Die Darstellung ist invertiert, damit der Kanalverlauf deutlicher wird.

## 4.5 Messung mit MEA

Als zweite Messreihe wurde der Druckverlust bei montierter MEA bestimmt. Hierzu wurde der gleiche Aufbau wie unter 4.3 verwendet. Allerdings wurde zwischen Anodenfolie und Glasplatte die MEA geklebt. Diese Klebmontage entsprach genau der wie beim Herstellen der kompletten Zellen.

Gemessen wurde wiederum der Druckverlust von Wasserstoff (Abbildung 4.8) und Wasser (Abbildung 4.9). Für die Messung mit Wasserstoff stand der automatisierte Messplatz nach Abbildung 4.1 zur Verfügung, weshalb die folgenden Messreihen damit aufgenommen wurden.

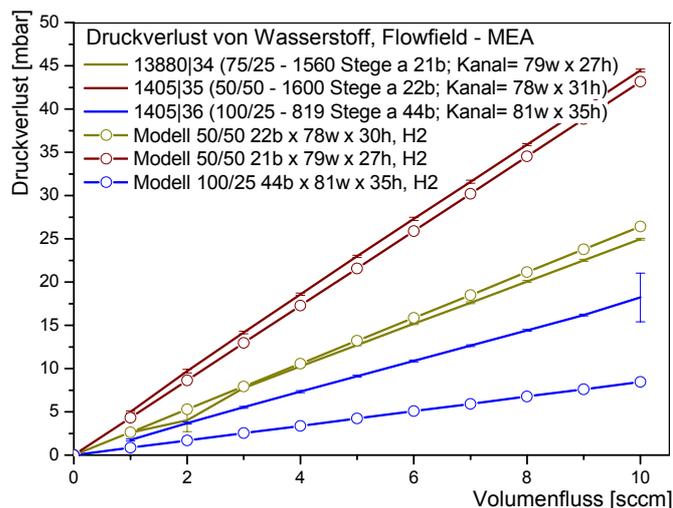


Abbildung 4.8: Druckverlust von Wasserstoff im System Flowfield - MEA in Abhängigkeit vom Volumenstrom: Drei Steg/Kanal-Flowfields mit unterschiedlicher Steganzahl und Kanalgeometrie

Das Ergebnis der Messung zeigt eine Zunahme des Druckverlustes bei größerer Steganzahl. Allerdings liegen die Messungen für die beiden Flowfields mit 1600 bzw. 1560 Stegen scheinbar unrealistisch weit auseinander. Da auch die Stegbreiten und Kanalabmessungen annähernd gleich groß sind, kann der starke Unterschied im Druckverlust nicht mit der Geometrie erklärt werden. In Frage kommt hier die Oberflächenrauigkeit. Die 50/50-Struktur wurde etwas länger geätzt, bis die Kanalweite der der 75/25-Struktur entspricht. Dadurch kann sich die Oberflächenrauigkeit deutlich unterscheiden. Die Oberflächenrauigkeit beeinflusst den Benetzungswinkel der Kanalwand mit dem Fluid, und hat wie oben

diskutiert auch einen Einfluss auf den Schlupf. Auch hier muss in der Zukunft weiter geforscht werden.

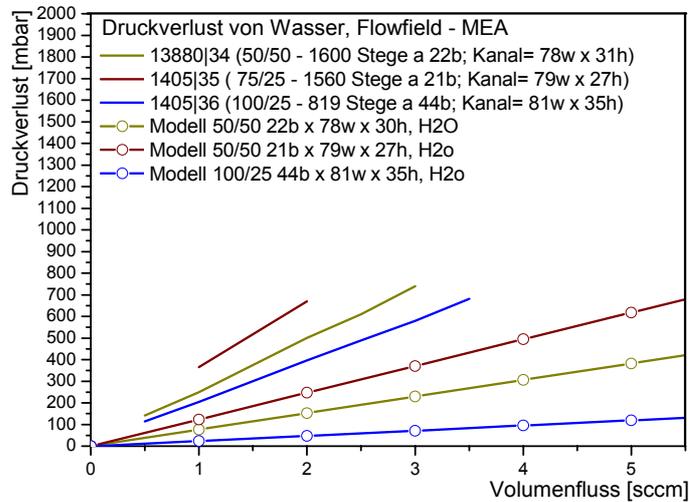


Abbildung 4.9: Druckverlust von Wasser im System Flowfield – MEA in Abhängigkeit vom Volumenstrom: 3 Steg/Kanal-Flowfields mit unterschiedlicher Steganzahl und Kanalgeometrie

Bei Wasser verhalten sich die Messungen konsistent zu denen mit Wasserstoff. Allerdings ist der gemessene Druckverlust wesentlich größer als erwartet. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die Wechselwirkung von MEA und Wasserströmung stärker ist als angenommen. Durch die starke Verwirbelung an der großen Stegzahl könnte sich die lokale Fließgeschwindigkeit stark reduzieren und damit den Einfluss von Schlupf reduzieren.

### 4.5.1 Vergleich Glas vs. MEA

Im Vergleich zum Aufbau Flowfield-Glas kann man beim Einbau der MEA davon ausgehen, dass sich der Druckverlust deutlich erhöht. Dies liegt daran, dass einerseits Glas und MEA sehr unterschiedliche Oberflächenrauheiten haben. Andererseits wird die MEA zu einem gewissen Grad in das Flowfield gepresst und reduziert damit die Kanalhöhe deutlich. Bei der Kathalysatorschicht der MEA von etwa 8–10µm kann sich die Kanalhöhe (bei 30µm Höhe) etwa um ein Drittel reduzieren.

Abbildung 4.10 zeigt deutlich, dass der Druckverlust mit eingebauter MEA mehr als doppelt so hoch ist wie beim System Flowfield-Glas.

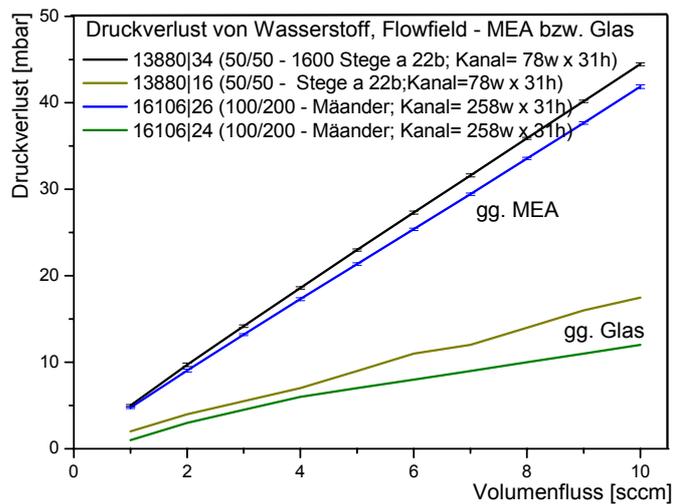


Abbildung 4.10: Druckverlust von Wasserstoff, Vergleich der Systeme Flowfield - MEA und Flowfield - Glas.

## 4.6 Druckverlust bei kompletten Zellen

Zum Vergleich wurden zusätzlich Messungen an komplett aufgebauten Mikrobrennstoffzellen durchgeführt. Dazu wurden Zellen aus den vorhandenen Prüfständen des Instituts verwendet. Um den Druckverlust der Strömung ohne die verbrauchsbedingte Verarmung der Reaktanten zu messen, wurden die Zellen im Leerlauf ohne Stromentnahme betrieben.

Der Volumenfluss wurde dabei von Hand an einem Flowcontroller in Intervallen variiert, während der Druckverlust vom Messsystem protokolliert wurde. Abbildung 4.11 zeigt den Verlauf der einzelnen Messreihen.

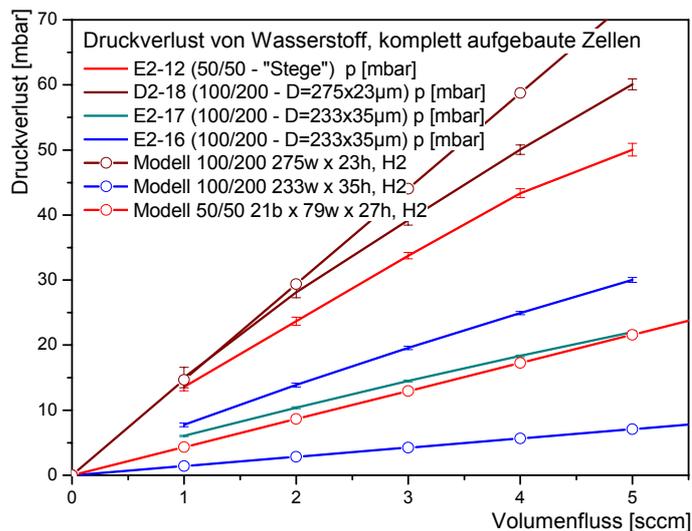


Abbildung 4.11: Druckverlust von Wasserstoff bei komplett aufgebauten Brennstoffzellen in Abhängigkeit vom Volumenstrom.

Die lineare Abhängigkeit des Druckverlustes vom Volumenstrom wird wieder sehr deutlich. Die Werte entsprechen ungefähr denen aus der Messung mit dem einfachen Aufbau mit MEA.

Mit Wasser konnten diese Zellen nicht vermessen werden, da sie noch für weitere Versuche benötigt wurden und eine Kontamination mit Wasser diese, wenn nicht zerstört, so doch zumindest nachhaltig negativ beeinflusst hätte.

## 4.7 Ergebnisse in tabellarischer Form

### 4.7.1 Messwerte der Messung ohne MEA

Volumenfluss [sccm]	H2 gg. Glas					
	50/50 – Stege a 22b Kanal=78w x 31h		100/200g Mäander Kanal=238w x 30h		100/200 Mäander Kanal= 258w x 31h	
	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	13880 16	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	44688 21	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	16106 24
1	2,64	2	4,60	4	0,51	1
2	5,29	4	9,20	9,5	1,02	3
3	7,93	5,5	13,8	13	1,53	4,5
4	10,6	7	18,4	16	2,03	6
5	13,2	9	23,0	20	2,54	7
6	15,9	11	27,6	23	3,05	8
7	18,5	12	32,2	26	3,56	9
8	21,1	14	36,8	30	4,07	10
9	23,8	16	41,4	33	4,58	11
10	26,4	17,5	46,0	36	5,09	12

Tabelle 4.2: Druckverlust von Wasserstoff [mbar] ausgewählter Flow-fieldstrukturen gegen Glas. Kanalabmessungen in  $\mu\text{m}$ .

Volumenfluss [sccm]	H2O gg. Glas					
	50/50 – Stege a 22b Kanal=78w x 31h		100/200g Mäander Kanal=238w x 30h		100/200 Mäander Kanal= 258w x 31h	
	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	13880 16	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	44688 21	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	16106 24
1	76,5	86	149	188	117	106
2	153	178	298	340	233	226
3	230	274	448	472	350	341
4	306	376	597	600	466	466
5	383		746		583	

Tabelle 4.3: Druckverlust von Wasser [mbar] ausgewählter Flowfieldstrukturen gegen Glas. Kanalabmessungen in  $\mu\text{m}$ .

## 4.7.2 Messwerte der Messung mit MEA

Volumenfluss [sccm]	H2 gg. MEA					
	50/50 – Stege a 22b Kanal= 78w x 31h		75/25 – Stege a 21b Kanal= 79w x 27h		100/25 – Stege a 44b Kanal= 81w x 35h	
	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	13880 34	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	1405 35	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	1405 36
1	2,64	2,60	4,60	5,00	0,85	1,75
2	5,29	4,02	9,20	9,71	1,69	3,69
3	7,93	7,75	13,8	14,2	2,54	5,53
4	10,6	10,3	18,4	18,6	3,39	7,33
5	13,2	12,7	23,0	23,0	4,23	9,12
6	15,9	15,2	27,6	27,3	5,08	10,9
7	18,5	17,6	32,2	31,6	5,93	12,7
8	21,1	20,1	36,8	35,9	6,77	14,4
9	23,8	22,5	41,4	40,2	7,62	16,2
10	26,4	25,0	46,0	44,5	8,46	18,2

Tabelle 4.4: Druckverlust [mbar] von Wasserstoff ausgewählter Flowfieldstrukturen gegen MEA. Kanalabmessungen in  $\mu\text{m}$ .

Volumenfluss [scrm]	H2O gg. MEA					
	50/50 – Stege a 22b Kanal= 78w x 31h		75/25 – Stege a 21b Kanal= 79w x 27h		100/25 – Stege a 44b Kanal= 81w x 35h	
	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	13880 34	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	1405 35	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	1405 36
1	76,5	366	124	250	23,9	205
2	153	670	247	501	47,7	397
3	230		371	740	71,6	580
4	306		494		95,4	
5	383		618		119	

Tabelle 4.5: Druckverlust [mbar] von Wasser ausgewählter Flowfieldstrukturen gegen MEA. Kanalabmessungen in  $\mu\text{m}$ .

### 4.7.3 Messwerte der Messung an kompletten Zellen

Volumenfluss [sccm]	H2 bei kompletten Zellen							
	50/50 – Stege a 22b Kanal= 78w x 31h		100/200 Mäander D=275x23µm		100/200 Mäander D=233x35µm		100/200 Mäander D=233x35µm	
	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	E2-12	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	D2-18	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	E2-17	Gesamtmodell nach (Gl.3.29)	E2-16
1	4,32	13,6	14,7	15,0	1,42	6,04	1,42	7,75
2	8,63	23,7	29,4	28,1	2,83	10,4	2,83	13,8
3	12,9	33,8	44,1	39,2	4,25	14,5	4,25	19,6
4	17,3	43,4	58,7	50,0	5,67	18,4	5,67	24,9
5	21,6	50,0	73,4	60,1	7,08	22,0	7,08	30,0

Tabelle 4.6: Druckverlust [mbar] von Wasserstoff ausgewählter Flow-fieldstrukturen in komplett aufgebauten Zellen. Kanalabmessungen in µm.

## 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Ansätze zur Berechnung des Druckverlustes in Mikrobrennstoffzellen gezeigt. Es wird deutlich, dass die Größe der verwendeten Kanäle und deren Verlauf, sowie eventuelle Einbauten einen großen Einfluss auf den Druckverlust haben. Weiterhin wurde der in der Forschung bisher wenig diskutierte Effekt des Schlupfes an Kanalwänden untersucht und sein Auftreten praktisch nachgewiesen. Nach der klassischen makroskopischen Theorie wären die bei der Mikrobrennstoffzelle verwendeten Dimensionen der Kanäle und Steg/Kanal-Flowfields nicht für den Betrieb mit flüssigen Medien geeignet. Nur mit Berücksichtigung des Schlupfes lässt sich der unerwartet geringe Druckverlust bei den charakterisierten Zellen auch theoretisch erklären.

Für die Verwendung in DMFC scheint der einzelne Mäander einen zu hohen Druckverlust zu erzeugen. Der Vorteil der Mäander für DMFC ist aber darin zu sehen, dass der sich aufbauende Druck von etwa 400 mbar bei 3 ml/min Kohlendioxid-Blasen aus der Brennstoffzelle austreiben kann, die durch die chemische Reaktion in der Zelle entstehen. Bei Steg/Kanal-Designs baut sich der hierfür benötigte lokale Druck erst bei wesentlich höheren Flussraten auf. Flowfields im Steg-Design eignen sich besser für Anwendungen, bei der keine hohen Drücke zur Brennstoffversorgung aufgebracht werden können. Zum Beispiel sind im Kleinleistungsbereich Systeme mit Mikropumpen oder mit kapillarer Dosierung, sowie Wasserstoffsysteme auf Diffusionsbasis denkbar.

Es gibt starke Unterschiede in den  $C_w$ -Werten, welche eventuell an den ungeklärten Einflüssen des Schlupfes an den Einbauten liegen, sowie an der sehr hohen Zahl von Stegen, welche gerade bei Wasser wahrscheinlich zu sehr starker Verwirbelung der Strömung führen und den Widerstand am einzelnen Steg dadurch stark herabsetzen. Beide Effekte müssen in der Zukunft durch ausführliche Messungen weiter untersucht werden. Ebenfalls notwendig scheint eine exakte Erfassung der Reduzierung der Kanalhöhe durch das Einpressen der MEA in die Kanalstrukturen. Ebenfalls ungeklärt ist der Einfluss von Rauigkeiten. Hier sollten sowohl die Kanalwände als auch die MEA auf einen entsprechenden Einfluss näher untersucht werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit erlauben eine gute Abschätzung des minimalen Druckverlustes von mikrostrukturierten Brennstoffzellen. Damit können Aussagen zur Machbarkeit von verschiedenen Flowfield-Designs und deren Einsatzmöglichkeiten getroffen werden.

Diese Seite wurde freigehalten.

## 6 Anhang

### 6.1 Symbole

$m_0$ .....	Molekülmasse
$\eta$ .....	dynamische Viskosität
$\nu$ .....	kinematische Viskosität
$\rho$ .....	Dichte
$k_B$ .....	Boltzmannkonstante = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$
$T$ .....	Temperatur
$P$ .....	Druck
$I$ .....	el. Strom
$i$ .....	el. Stromdichte
$i_1$ .....	Maximale el. Stromdichte
$A$ .....	Kanalquerschnitt (-fläche)
$w$ .....	Kanalquerschnitt (-weite)
$h$ .....	Kanalhöhe (bzw. -tiefe)
$l$ .....	Kanallänge
$V$ .....	Volumen
$\dot{V}$ .....	Volumenstrom
$u$ .....	Strömungsgeschwindigkeit
$R_s$ .....	Strömungswiderstand
$C_w$ .....	Widerstandsbeiwert von Einbauten
$\sigma$ .....	Schlupfkoeffizient

## 6.2 Mathematica

### Gesamtmodell

```

Modell:
Kn =  $\frac{\eta}{wP} \sqrt{\frac{\pi kT}{2m_0}}$ ; a =  $\frac{24\sigma}{Kn(2-\sigma) + \sigma}$ ;  $\Delta p = \frac{\dot{V}(aL/nw\eta + hm\rho\dot{V}C_w)}{2h^3w^2}$ ;
 $\dot{V} = m\dot{V}pm / 60000000$ ;  $\Delta mbar = \Delta p / 100$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ];

Naturkonstanten:
"für alle gleich"; k = 1.38 10^-23; R = 8.314472; P = 101000; T = 293;
Cwmh = 0.5 / m\dot{V}pm; Cwsh = 0.2 / m\dot{V}pm; Cwmw = 0.24 / m\dot{V}pm; Cwsw = 0.00054 / m\dot{V}pm;  $\sigma = .$ ; ch = 0.00001;  $\sigma w = 0.00001$ ; mea = 13 10^-6;

Geometrieparameter:
"-----"
"44688: 1 Mäander H2 238x30"
Cw = Cwmh; h = 30 10^-6; w = 238 10^-6; L = 170 10^-3; n = 1; m = 20; "h2";  $m_0 = 3.35 10^-27$ ;  $\rho = 8.99 10^-2$ ;  $\eta = 8.82 10^-6$ ;  $\sigma = ch$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasserstoff"}]
"-----"
"44688: 1 Mäander H20 238x30"
Cw = Cwmw; h = 30 10^-6; w = 238 10^-6; L = 170 10^-3; n = 1; m = 20; "h2o";  $m_0 = 53.2 10^-27$ ;  $\rho = 1000$ ;  $\eta = 1 10^-3$ ;  $\sigma = \sigma w$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasser"}]
"-----"
"16106: 3 Mäander H2 258x31"
Cw = Cwmh; h = 31 10^-6; w = 258 10^-6; L = 60 10^-3; n = 3; m = 22; "h2";  $m_0 = 3.35 10^-27$ ;  $\rho = 8.99 10^-2$ ;  $\eta = 8.82 10^-6$ ;  $\sigma = ch$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasserstoff"}]
"-----"
"16106: 3 Mäander H20 258x31"
Cw = Cwmw; h = 31 10^-6; w = 258 10^-6; L = 60 10^-3; n = 3; m = 22; "h2o";  $m_0 = 53.2 10^-27$ ;  $\rho = 1000$ ;  $\eta = 1 10^-3$ ;  $\sigma = \sigma w$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasser"}]
"-----"
"d2-18: 3 Mäander H2 275x23 mea-13"
Cw = Cwmh; h = 23 10^-6; mea; w = 275 10^-6; L = 60 10^-3; n = 3; m = 22; "h2";  $m_0 = 3.35 10^-27$ ;  $\rho = 8.99 10^-2$ ;  $\eta = 8.82 10^-6$ ;  $\sigma = ch$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasserstoff"}]
"-----"
"E2-16,17: 3 Mäander H2 233x35 mea-13"
Cw = Cwmh; h = 35 10^-6; mea; w = 233 10^-6; L = 60 10^-3; n = 3; m = 22; "h2";  $m_0 = 3.35 10^-27$ ;  $\rho = 8.99 10^-2$ ;  $\eta = 8.82 10^-6$ ;  $\sigma = ch$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasserstoff"}]
"-----"
"13880: Stege H2 50/50 22b 78x31"
Cw = Cwsh; b = 22 10^-6; h = 31 10^-6; mea; w = 78 10^-6; L = 7 10^-3; n = 8; m = 200; "h2";  $m_0 = 3.35 10^-27$ ;  $\rho = 8.99 10^-2$ ;  $\eta = 8.82 10^-6$ ;  $\sigma = ch$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
(*Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasserstoff"}]*)
"-----"
"13880: Stege H20 50/50 22b 78x31"
Cw = Cwsw; b = 22 10^-6; h = 31 10^-6; mea; w = 78 10^-6; L = 7 10^-3; n = 8; m = 200; "h2o";  $m_0 = 53.2 10^-27$ ;  $\rho = 1000$ ;  $\eta = 1 10^-3$ ;  $\sigma = \sigma w$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasser"}]
"-----"
"1405|35: Stege H2 50/50 21b 79x27"
Cw = Cwsh; b = 21 10^-6; h = 27 10^-6; mea; w = 79 10^-6; L = 7 10^-3; n = 8; m = 200; "h2";  $m_0 = 3.35 10^-27$ ;  $\rho = 8.99 10^-2$ ;  $\eta = 8.82 10^-6$ ;  $\sigma = ch$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasserstoff"}]
"-----"
"1405|35: Stege H20 50/50 21b 79x27"
Cw = Cwsw; b = 21 10^-6; h = 27 10^-6; mea; w = 79 10^-6; L = 7 10^-3; n = 8; m = 200; "h2o";  $m_0 = 53.2 10^-27$ ;  $\rho = 1000$ ;  $\eta = 1 10^-3$ ;  $\sigma = \sigma w$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasser"}]
"-----"
"1405|36: Stege H2 100/25 44b 81x35"
Cw = Cwsh; b = 21 10^-6; h = 35 10^-6; mea; w = 81 10^-6; L = 7 10^-3; n = 8; m = 100; "h2";  $m_0 = 3.35 10^-27$ ;  $\rho = 8.99 10^-2$ ;  $\eta = 8.82 10^-6$ ;  $\sigma = ch$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasserstoff"}]
"-----"
"1405|36: Stege H20 100/25 44b 81x35"
Cw = Cwsw; b = 21 10^-6; h = 35 10^-6; mea; w = 81 10^-6; L = 7 10^-3; n = 8; m = 100; "h2o";  $m_0 = 53.2 10^-27$ ;  $\rho = 1000$ ;  $\eta = 1 10^-3$ ;  $\sigma = \sigma w$ ;
 $\Delta mbar = m\dot{V}pm (h m m\dot{V}pm \rho Cw / 60000000 + 48 L / n P w^2 \eta \sigma / (2 P w \sigma - \sqrt{2 \pi \eta (-2 + \sigma) \sqrt{k T / m_0}})) / (12000000000 h^3 w^2)$ ; Simplify[ $\Delta mbar$ ]
Plot[ $\{\Delta mbar\}$ , {m\dot{V}pm, 0, 5}, AxesLabel -> {"Volumenfluss\n[m\dot{V}pm]", "Druckverlust[mbar]\nwasser"}]
"-----"

```

## 6.3 Abbildungen

Abbildung 2.1: Qualitativer Verlauf von zwei ausgewählten UI-Kennlinien verschiedener Zellen, deutlich ist rechts der Bereich der Transportprobleme zu erkennen (siehe Text) .....	5
Abbildung 2.2: Funktion einer PEM-Brennstoffzelle.....	6
Abbildung 2.3: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle .....	7
Abbildung 2.4: Aufbau der Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM-Berlin .....	8
Abbildung 2.5: Links: Teilansicht eines Steg/Kanal-Flowfields der Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM-Berlin, vergrößert; rechts: Teilansicht der Kathodenseite der Mikrobrennstoffzelle des Fraunhofer IZM-Berlin, stark vergrößert .....	9
Abbildung 2.6: Gesamtaufbau der Fraunhofer IZM – Brennstoffzelle, die Zufuhr des Brennstoffs erfolgt von unten durch die Aufnahme .....	9
Abbildung 3.1: Theoretischer Verlauf des Druckverlustes bei Wasser, Grundlage ist die Rechnung nach Darcy im makroskopischen Ansatz. ....	17
Abbildung 3.2: Einfluss des Schlupfkoeffizienten auf den Widerstandsbeiwert, gerechnet für Wasser mit $Kn=0,01$ .....	20
Abbildung 3.3: Mäanderstrukturen Einzeller (links), Dreizeller (rechts). ....	21
Abbildung 3.4: $C_w$ -Werte ( $\zeta$ ) kantiger und gerundeter Umkehrung (aus [GRxx]) .....	22
Abbildung 3.5: Wirbel an rechteckigem Hindernis, deutlich ausgeprägt nach jeder Kante und im Staupunkt, Strömung von links nach rechts.....	23
Abbildung 3.6: Wirbel im Steg/Kanal-Flowfield, Strömung von links nach rechts.....	24
Abbildung 3.7: $C_w$ -Werte ( $\zeta$ ) kantiger und gerundeter Kante (aus [GRxx]).....	25
Abbildung 3.8: Theoretischer Verlauf des Druckverlustes bei Wasserstoff, für einen einzelnen Mäander mit 20 Windungen. Kanalquerschnitt ist $w \times h = 250 \times 30\mu\text{m}$ , $C_w=0.5$ , $\sigma=0,00001$ .....	27

Abbildung 3.9: Theoretischer Verlauf des Druckverlustes bei Wasser, für einen einzelnen Mäander mit 20 Windungen. Kanalquerschnitt ist $w \times h = 250 \times 30 \mu\text{m}$ , $C_w = 0.2$ , $\sigma = 0,00001$ . .....	27
Abbildung 4.1: Messaufbau zur Bestimmung des Druckverlustes an Mikrobrennstoffzellen bei Verwendung von Wasserstoff als Medium. ....	29
Abbildung 4.2: Messaufbau zur Bestimmung des Druckverlustes an Mikrobrennstoffzellen bei Verwendung von Wasser als Medium. ....	29
Abbildung 4.3: Einschaltverhalten des Druckverlustes bei Wasserstoff .....	30
Abbildung 4.4: Messaufbau der Brennstoffzellen, links: nur für Druckversuche mit Glasplatte (oben) auf Anodenfolie, rechts: kompletter Aufbau für die elektrische Charakterisierung. Die Zelle selbst ist stark vergrößert dargestellt. ....	32
Abbildung 4.5: Druckverlust von Wasserstoff im System Flowfield – Glas in Abhängigkeit vom Volumenstrom: einzelner Mäander (oliv), drei gleiche Mäander (blau) und Steg/Kanal-Flowfield (rot), .....	33
Abbildung 4.6: Druckverlust von Wasser im System Flowfield – Glas in Abhängigkeit vom Volumenstrom: einzelner Mäander (oliv), drei gleiche Mäander (blau) und Steg/Kanal-Flowfield (rot) .....	34
Abbildung 4.7: Realisierte Mäanderstrukturen der Mikrobrennstoffzelle. Einzelner durchgehender Mäander (links) mit 170mm Gesamtlänge und 20 Hauptwindungen, drei gleiche Mäander (rechts) mit jeweils 60mm Länge und 22 Windungen. Die Darstellung ist invertiert, damit der Kanalverlauf deutlicher wird. ....	35
Abbildung 4.8: Druckverlust von Wasserstoff im System Flowfield – MEA in Abhängigkeit vom Volumenstrom: Drei Steg/Kanal-Flowfields mit unterschiedlicher Steganzahl und Kanalgeometrie .....	36
Abbildung 4.9: Druckverlust von Wasser im System Flowfield – MEA in Abhängigkeit vom Volumenstrom: 3 Steg/Kanal-Flowfields mit unterschiedlicher Steganzahl und Kanalgeometrie .....	37
Abbildung 4.10: Druckverlust von Wasserstoff, Vergleich der Systeme Flowfield – MEA und Flowfield – Glas. ....	38

Abbildung 4.11: Druckverlust von Wasserstoff bei komplett aufgebauten Brennstoffzellen in  
Abhängigkeit vom Volumenstrom..... 39

## 6.4 Literatur

[LD00] J.Larminie, A.Dicks, *Fuel Cell System Explained*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2000

[WA03] S.Wagner, R.Hahn, J.Grillmayer, H.Gaul, H.Reichl, *Development of thin film and micro patterning technologies for miniaturized planar fuel cells*, Proc. Micro System Technologies 2003, October 7–8, 2003, München, Germany, pp. 303–311

[WA04] S.Wagner, R.Hahn, S.Krumbholz, H.Reichl, *A MEMs Based Planar Micro Fuel Cell with selfbreathing Cathode Side*, Electronics Goes Green 2004+, Berlin, Germany, September 6–8, 2004, pp. 617–622

[SCH01] Stephan Schwerzel, *Design von Mikrobrennstoffzellen für die Herstellung mit Mikrostrukturierungstechnologien*, Studienarbeit am Fraunhofer IZM, Berlin, 2001

[GR02] Jürgen Grillmayer, *Charakterisierung von planaren PEM Mikrobrennstoffzellen*, Diplomarbeit am Fraunhofer IZM, Berlin, 2002

[CL04] G.Class, A.G.Class, *Stömung von Gasen in prismatischen Kanälen konstanter Temperatur bei beliebigen Knudsen-Zahlen*, Karlsruhe, 2004

[WK04] Winnacker, Küchler, *Chemische Technik: Prozesse und Produkte, Band 2: Neue Technologien*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004

[ARK01] E.B.Arkilic, K.S.breuer, M.A.Schmidt, *Mass flow and tangential momentum accommodation in silicon micromachined channels*, J. Fluid Mech. vol.437 pp.29–43, 2001

[HA04] Oliver Hausner, *Modellierung von Strömungen in Mikrokanälen*, 2004

[GRxx] Reinhard Grundmann, *Grundlagen der Ventilatorentechnik*, Aachen