

## Vertiefungsprojekt

verfasst von  
**Alma Kielstein**  
**Julia Gancz**

# Schaltung zur Auswertung von Dehnungsmessstreifen



Verantwortlicher Hochschullehrer:  
Prof. Dr.-Ing Michael J. Vellekoop

Betreut von:  
M.Sc. Martin Oellers

10. Juli 2019



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation und Ziel der Arbeit . . . . .	1
1.2. Ziel der Arbeit . . . . .	1
1.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2. Theoretischer Hintergrund</b>	<b>3</b>
2.1. Dehnmessstreifen . . . . .	3
2.1.1. Widerstandsänderung . . . . .	4
2.2. Biegebalken . . . . .	5
2.2.1. Aufbau des Biegebalkens . . . . .	5
2.2.2. Charakterisierung der Biegebalken . . . . .	6
2.3. Drucksensoren . . . . .	7
2.3.1. Aufbau und Herstellung der Drucksensoren . . . . .	8
2.3.2. Charakterisierung der Drucksensoren . . . . .	10
2.4. Wheatstone Brücke . . . . .	11
2.5. Störgrößen . . . . .	14
2.6. Spannungsversorgung . . . . .	15
2.6.1. Spannungsteiler . . . . .	16
2.6.2. Impedanzwandler . . . . .	17
2.6.3. Inverter . . . . .	18
2.7. Instrumentenverstärker . . . . .	18
2.8. Anzeige/Display . . . . .	19
<b>3. Durchführung</b>	<b>21</b>
3.1. Simulation der Schaltung . . . . .	21
3.1.1. Simulation der Spannungsversorgung . . . . .	21
3.1.2. Simulation der Wheatstone Brücke . . . . .	22
3.1.3. Simulation des Verstärkers . . . . .	25
3.1.4. Simulation der gesamten Schaltung . . . . .	26
3.2. Aufbau des Steckbrettes . . . . .	27
3.2.1. Spannungsversorgung . . . . .	28
3.2.2. Wheatstonebrücke . . . . .	28
3.2.3. Verstärker . . . . .	29
3.2.4. Gesamte Schaltung auf dem Steckbrett . . . . .	30
3.3. Herstellung der Platine . . . . .	32
3.3.1. Schaltung . . . . .	32
3.3.2. Board . . . . .	33
3.3.3. Herstellung . . . . .	34
3.3.4. Fertigung der Platine . . . . .	35
3.4. Fertigung des Gehäuses . . . . .	35
<b>4. Auswertung</b>	<b>39</b>
4.1. Überprüfung der Platine . . . . .	39

<b>5. Fazit</b>	<b>41</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>v</b>

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation und Ziel der Arbeit

Dehnmessstreifen (DMS) wurden 1938 von Edward E. Simmons und Arthur C. Ruge entwickelt und sind heutzutage nach wie vor wichtige Bestandteile in der Technik.

In der Regel besteht ein DMS aus einem metallischen Leiter, der mäanderförmig gelegt ist und jeweils am Ende kontaktiert ist. DMS werden an der Oberfläche von Bauteilen installiert, um die Beanspruchung und Stabilität des Werkstoffes zu bestimmen und werden hauptsächlich an Maschinen, Gebäuden und Konstruktionen eingesetzt. Die Sensoren zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen mechanischen Verformungen des Werkstoffes und einer Widerstandsänderung des Leiters, die als Spannungsänderung gemessen und analysiert wird. Auf diese Weise können verschiedene physikalische Größen, wie Kraft, Weg, Druck oder Schwingungen abgeleitet werden.

In dieser Arbeit werden Sensoren verwendet, die von Dr. Frieder Lucklum, Gerrit Dumstorff und Wiebke Gehlken bzw. Jennifer Hinz am IMSAS hergestellt wurden. Dabei handelt es sich um Biegebalken und Drucksensoren, die jeweils im 3D-Verfahren gedruckt und die Leiterbahnen mittels Siebdruck eingebracht wurden. Beide Arten von Sensoren funktionieren nach dem Prinzip eines Dehnmessstreifens und werden mit Hilfe einer bestimmten Messvorrichtung analysiert und ausgewertet. In der Regel werden besagte Messvorrichtungen neu aufgebaut und dimensioniert, um die Sensoren zuverlässig auslesen zu können. Das bedeutet einen zusätzlichen Aufwand bei der Verwendung der Biegebalken und Drucksensoren. Um diesen Arbeitsschritt zu vereinfachen, wird in dieser Arbeit ein solches Auslesesystem entwickelt. Es wird so ausgelegt, dass Sensoren mit verschiedenen Eigenschaften und Dimensionierungen abgedeckt werden können. Dabei werden Grenzen durch einen bestimmten möglichen Widerstandsbereich gesetzt.

## 1.2. Ziel der Arbeit

Diese Arbeit dokumentiert die Entwicklung der Schaltung, die die Widerstandsänderung von Dehnmessstreifen ausliest. Es handelt sich hierbei um ein Vertiefungsprojekt, das vorsieht, mit Hilfe einer Wheatstoneschen Messbrücke, einer Verstärkerschaltung und einem Arduino als Anzeigegerät verschieden dimensionierte DMS auszulesen. Es zielt also darauf ab, die Sensoren an die Vorrichtung anzuschließen und direkt auslesen zu können.

## 1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit besteht aus weiteren vier Kapiteln. Zunächst werden im Abschnitt [2 Theoretischer Hintergrund](#) Grundkenntnisse erläutert, die wichtig für das Verständnis des Projektes sind. Das darauf folgende Kapitel [3 Durchführung](#) veranschaulicht die genaue Umsetzung der Arbeit. Die Messergebnisse des Aufbaus werden im Abschnitt [4 Auswertung](#) diskutiert. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse ist im Kapitel [5 Fazit](#) zu finden.

## 2. Theoretischer Hintergrund

Im folgenden Kapitel werden wichtige Grundlagen und physikalische Prinzipien von Bauteilen erklärt, die in der Arbeit verwendet werden.

Die verwendeten Biegebalken und Drucksensoren basieren auf dem Prinzip des Dehnungsmessstreifens. Die Funktionsweise von Dehnungsmessstreifen wird daher im folgenden Kapitel 2.1 erläutert. Im Folgenden werden die verwendeten Sensoren in den Abschnitten 2.2.1 und 2.3 näher charakterisiert und das Auslesen der Sensoren mittels einer Wheatstoneschen Brückenschaltung wird in Abschnitt 2.4 erläutert. Dabei werden die Störgrößen dieses Aufbaus im Kapitel 2.5 beleuchtet. Schließlich werden in Abschnitt 2.6 Bauteile vorgestellt, die zur Konzeption der Spannungsversorgung notwendig sind.

...instrumentenverstärker, anzeige

### 2.1. Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen (DMS) werden in vielen technischen Bereichen eingesetzt. Sie werden sowohl zum Messen von Dehnungen bzw. Stauchungen, als auch zum Bau von Aufnehmern für mechanische Messgrößen eingesetzt. Der Aufbau dieser Sensoren besteht aus mäanderförmigen Leiterbahnen, auch Messgitter genannt, die auf ein Trägermaterial aufgebracht sind. Sie erfassen Dehnungen oder Stauchungen des Messkörpers, auf dem sie aufgebracht sind, erfassen. Dabei können Größen wie Kräfte, Drücke oder Drehmomente erfasst werden [18].

Ein entscheidendes Anwendungsgebiet ist dabei das der experimentellen Spannungsanalyse. Dabei erfasst der Dehnungsmessstreifen die mechanischen Spannungen im Messkörper. Auf Grundlage dieser Messergebnisse können schließlich Rückschlüsse auf den Zustand und die Beanspruchung des Messobjektes gezogen werden. In diesem Fall müssen die mechanischen Spannungszustände aus den erfassten Dehnungen berechnet werden. Die gemessenen Dehnungsänderungen drücken sich in der Widerstandsänderung des Dehnungsmessstreifens aus. Diese ist in Abschnitt 2.1.1 genauer ausgeführt.

Der große Vorteil der Dehnungsmessstreifen ist die Umformung der Dehnung in ein elektrisches Signal. Da die mechanische Dehnung eine Widerstandsänderung des DMS hervorruft, wird diese mittels einer Wheatstoneschen Brückenschaltung in Form der Brückenspannung erfasst. Des weiteren können Störeffekte auf diese Weise kompensiert werden. Das Auslesen von DMS mit Hilfe einer Wheatstone Brücke ist in Kapitel 2.4 näher ausgeführt [7].

### 2.1.1. Widerstandsänderung

Der ohmsche Widerstand eines Leiters ergibt sich aus dem spezifischen Widerstand  $\rho$ , der Länge des Leiters  $l$  und der Querschnittsfläche  $A$  [14]:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

Durch Verformung eines metallischen Leiters ändert sich dessen Widerstand  $R$  durch die Änderung seiner Geometrie und durch den piezoresistiven Effekt. Demnach ändern sich seine Länge  $l$ , die Querschnittsfläche  $A$  und sein spezifischer Widerstand  $\rho$ . Diese Änderungen sind in Abbildung 2.1 skizziert.

Der piezoresistive Effekt bedeutet eine Deformation des Kristallgitters des Materials. Diese Deformation führt zu einer veränderten Leitfähigkeit, da sie die geometrischen Maße des Leiters auf atomarer Ebene beeinflusst. Der piezoresistive Effekt tritt bei jedem Material auf, ist jedoch bei Halbleitermaterialien sehr viel ausgeprägter, als bei Metallen. Für Metalle kann der Effekt vernachlässigt werden, da hier die geometrische Verformung in der Regel deutlich stärker ist [17].

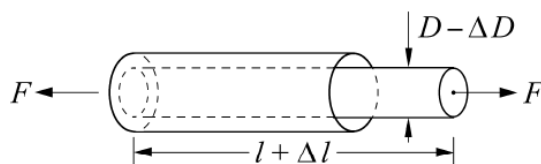


Abbildung 2.1.: Formänderung einer Leiterbahn der Länge  $l$  und dem Durchmesser  $D$  unter der Krafteinwirkung  $F$  [14]

Wird ein DMS gedehnt, so nimmt sein Widerstand zu. Eine Dehnung bedeutet, dass sich die Länge der Leiterbahn streckt und somit auch der Querschnitt geringer wird.

Wird er gestaucht (im Grunde eine negative Dehnung), so nimmt sein Widerstand ab. Hier entsteht der gegenteilige Effekt. Die Leiterbahnen werden zusammengestaucht und der Querschnitt vergrößert sich [7].

Entscheidend dabei ist, dass die Änderung des relativen elektrischen Widerstands  $\frac{\Delta R}{R}$  proportional zur relativen Verformung  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  des Dehnungsmessstreifen ist [4].

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

Dabei ist der k-Faktor eine Materialkonstante, die die Dehnungsempfindlichkeit eines Materials beschreibt und die Verformung des Querschnitts enthält [19].

Halbleiter weisen in der Regel eine deutlich höhere Empfindlichkeit vor, als Metalle.



## 2.2. Biegebalken

Eine in dieser Arbeit verwendete Art von Sensoren ist die der Biegebalken. Sensoren, die auf dem Prinzip von Biegebalken basieren, sind sehr vielseitig einsetzbar. Sie reagieren mit mechanischer Auslenkung auf verschiedene Einflüsse, wie magnetische, elektrische, thermische und chemische Signale oder physische Belastungen und Strömungen. Biegebalken werden in verschiedenen Größenordnungen eingesetzt. Während sie in der Mikromechanik dazu dienen, verschiedene Partikel zu detektieren oder als Fingerabdrucksensoren eingesetzt werden, kommen sie in größeren Dimensionen beispielsweise in elektronischen Waagen zum Einsatz oder werden als Beschleunigungssensoren verwendet. Es handelt sich also um Kraftsensoren, die eine sehr hohe Sensitivität aufweisen können. Ein solcher Biegebalken ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

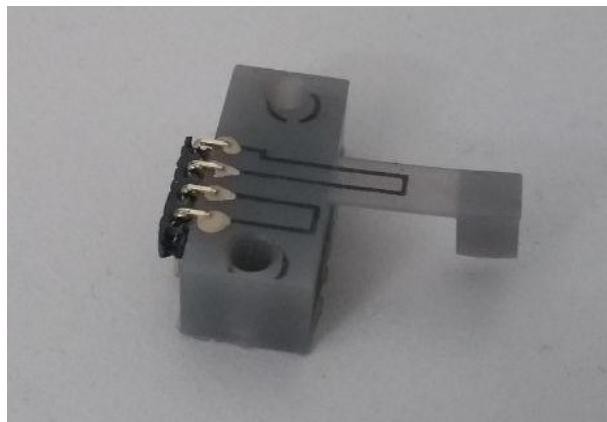


Abbildung 2.2.: Biegebalken mit aufgedruckten Widerständen und Kontaktierung

Die Sensitivität hängt unter anderem vom Herstellungsprozess und dem verwendeten Material ab. Die hier verwendeten Biegebalken sind mittels additiver Fertigung hergestellt. Dabei handelt es sich um das schichtweise Auftragen geeigneten Materials, wie Kunststoffe, Kunstharze oder anderen Stoffen. In diesem Fall wurde Kunststoff verwendet. Der 3D-Druck bringt eine hohe Gestaltungsfreiheit mit sich, deren Genauigkeit allerdings je nach verfügbaren Geräten ungenau sein kann [19].

### 2.2.1. Aufbau des Biegebalkens

Der Biegebalken des Sensors ist auf einer Seite fest eingebaut, während das andere Ende frei steht. Auf Krafteinwirkung reagiert der Biegebalken, indem sich der verbaute Balken verformt.

Auf dem Biegebalken ist ein Dehnungsmessstreifen aufgebracht, welcher die Verformung des Trägermaterials, also des Balkens misst. Ein einfacher Dehnungsmessstreifen besteht in der Regel aus einem dünnen Widerstandsdraht. Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, wird dieser mäanderförmig auf einem Trägermaterial angeordnet, um auf kleiner Fläche eine

möglichst große Verformung erreichen zu können. Für das Aufbringen auf dem Balken sind die Geraden  $g$  die relevanten Abschnitte, während die Kurven  $d_g$  in der Auslegung des Designs zu vernachlässigen sind. Sie werden in der Regel breiter und großzügiger ausgelegt, um die Toleranzen in der Herstellung mittels Siebdruck berücksichtigen zu können[4].

Die oberflächlichen Dehnungsänderungen des Materials übertragen sich also auf die Leiterbahnen, deren Widerstandsänderung ausgelesen werden kann. Somit wird auch die Verformung des Trägermaterials mittels der Widerstandsmessung erfasst[17].

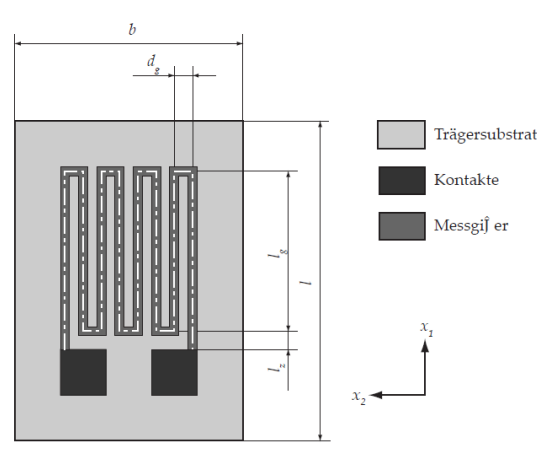


Abbildung 2.3.: mäanderförmige Anordnung der Leiterbahnen [17]

Der Kunststoffkörper inklusive Biegebalken wird durch die additive Fertigung Schicht für Schicht aufgebaut. Es wird lichtempfindliches Material verwendet, welches sich durch die Bestrahlung mit UV-Licht verfestigt. Die finale Abhärtung findet in einem UV-Ofen statt. Die Widerstände bzw. Leiterbahnen, die sich auf der Oberfläche des Biegebalkens befinden, sind durch Siebdruck aufgebracht. Die dafür benötigte Struktur wird auf eine Folie gedruckt und mit Hilfe dieser Maske wird die Form der Widerstände als Struktur in das Sieb für den Siebdruck übertragen. Damit lässt sich der Biegebalken mit den Widerstandsstrukturen bedrucken. Nach weiterem Aushärten kann der DMS schließlich verschaltet werden. Für die Verschaltung werden Stiftleisten durch Kleben befestigt. Der Kontakt zwischen Widerstand und Stiftleiste besteht aus Silbertinte. Nun können die DMS ausgelesen werden[19].

### 2.2.2. Charakterisierung der Biegebalken

Die verwendeten Dehnungsmessstreifen weisen unter Krafteinwirkung ein bestimmtes Verhalten auf. Dieses ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Es werden verschieden hohe Kräfte auf einen Biegebalken ausgeübt. Dabei wird die einwirkende Kraft für etwa fünf Sekunden gehalten, sobald der gewünschte Wert erreicht ist. Anschließend wird die Belastung wieder aufgehoben.

Je stärker die Kraft ist, die aufgewendet wird, um einen DMS zu dehnen, desto höher ist die resultierende Brückenspannung der Wheatstoneschaltung, welche zum Auslesen des

Sensors verwendet wird. Dabei handelt es sich um einen linearen Zusammenhang.

In der Graphik ist ebenfalls zu erkennen, dass die zu messende Brückenspannung nicht zurück zum Ausgangswert sinkt, wenn die Krafteinwirkung auf den Biegebalken wieder aufgehoben wird. Die Biegung des Balkens bleibt nach der Dehnung teilweise bestehen. Somit ist die Wheatstonebrücke, in die der DMS integriert ist, nicht mehr abgeglichen und die Spannung ist ungleich Null. Daraus lässt sich schließen, dass der Widerstand durch die Biegung plastisch verformt wird und somit seinen Wert ändert. Ein weiterer Grund können Hystereseeffekte sein. Dies sollte nur bei zu hoher Belastung auftreten, lässt sich in diesem Fall allerdings auch bei geringen Krafteinwirkungen beobachten [19]. **belastungsgrenze nochmal aus Bachelorarbeit raussuchen**

Aufgrund dieser Zusammenhänge können DMS als Sensoren mit hoher Sensitivität zur Erfassung von Krafteinwirkung und Deformationen bei verschiedenen Materialien eingesetzt werden.

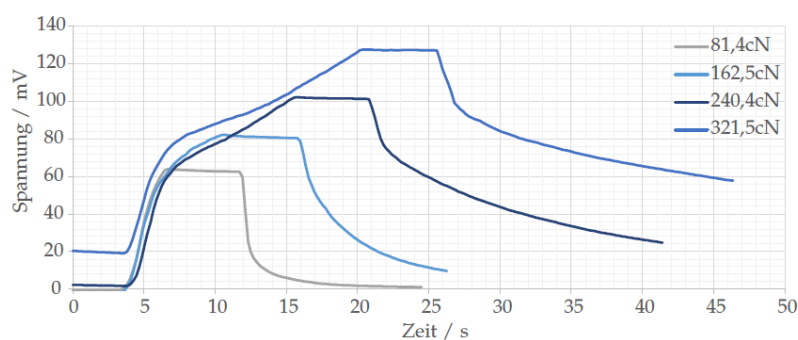


Abbildung 2.4.: Brückenspannung eines Biegebalkens in Abhängigkeit zur Zeit bei verschiedenen Kräften [19]

Des weiteren kann auch die Eigenresonanz der Biegebalken bestimmt werden. Je geringer die Dicke des Balkens und je flexibler das Material ist, desto kleiner ist die Eigenresonanz. Aufgrund dessen kann der Biegebalken als Beschleunigungssensor verwendet werden, da sich in dem Frequenzbereich, in dem keine Eigenresonanz herrscht, die Brückenspannung nicht verändert. Diese Eigenschaft ist für das Ziel dieser Arbeit allerdings nebensächlich. Hier wird der DMS als Kraftsensor und zur Detektion von Verformung eingesetzt.

## 2.3. Drucksensoren

Die hier verwendeten Drucksensoren basieren auf dem Prinzip der Dehnungsmessstreifen und somit auch auf dem piezoresistiven Effekt.

Drucksensoren werden in sehr vielen verschiedenen Arbeitsbereichen angewendet. Darunter befinden sich beispielsweise die Automobilbranche, die Medizintechnik oder die Automatisierungstechnik.

Ähnlich den DMS sind die Drucksensoren additiv, also mittels 3D-Druck hergestellt. Dies bringt einige Vorteile durch Reduzierung der Komplexität und Dauer in der Herstellung. Nähere Ausführungen dazu sind in Abschnitt 2.3.1 zu finden.

Der Druck  $p$  als physikalische Messgröße wird als skalare Größe Kraft  $F$  pro Fläche  $A$  definiert:

$$p = \frac{F}{A} \text{ für } \vec{F} \perp \vec{A} \quad (2.3)$$

formel richtig formatieren

Der Drucksensor nimmt den gemessenen Druck über eine Membran auf und formt ihn in ein elektrisches Signal um. Wie in Abbildung 2.5 zu erkennen ist, bedeutet eine Krafteinwirkung auf die Membran, dass auf der Oberfläche sowohl Dehnung, als auch Stauchung auftritt.

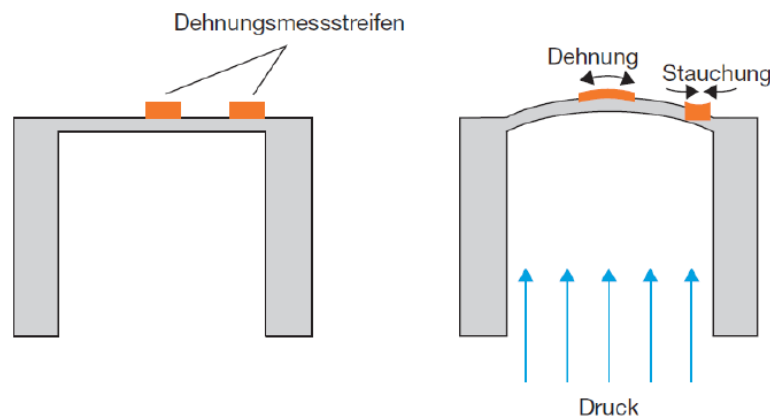


Abbildung 2.5.: Verformung der Sensormembran unter Druckeinwirkung [6]

Da die Verformung auf einer kreisförmigen Membran also nicht einheitlich ist, muss auch die Struktur der DMS so angepasst werden, dass sie dennoch eindeutig erfasst werden kann. Eine solche Struktur ist für eine runde Membran mit entsprechendem Dehnungsverhalten eine rosettenförmige Anordnung der Leiterbahnen des DMS. Diese Form ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

### 2.3.1. Aufbau und Herstellung der Drucksensoren

Wie in den Abbildungen 2.7a bzw. 2.7b zu sehen ist, besteht ein Drucksensor aus einer Membran, deren Dicke deutlich kleiner sein muss, als die Fläche. Diese ist auf einen zylinderförmigen Druckkörper aufgebracht, der einen Hohlraum hat. Über den Hohlraum wird die Druckzufuhr des Sensors realisiert. Diese erfolgt über einen Schlauch, der mit einem Adapter montiert wird. Dafür muss ein Innengewinde in den Druckkörper eingefügt werden.

Das Design und die Größe der Drucksensoren sind so gewählt, dass die Aufbringung der Widerstände, und die Kontaktierung problemlos möglich ist. Des weiteren muss der

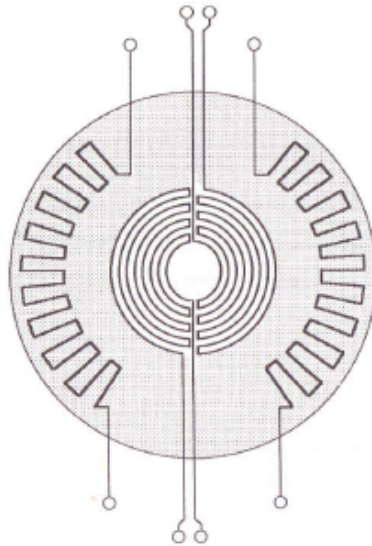


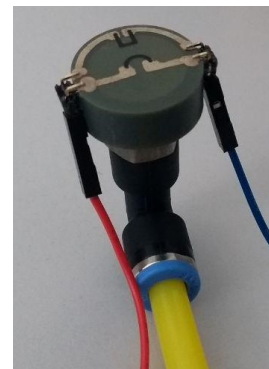
Abbildung 2.6.: Beispiel für die Anordnung eines DMS in Membranrosetten [6]

Druckkörper ausreichend groß sein, um die Druckzufuhr und somit auch das Innengewinde integrieren zu können.

Das Verfahren zur Herstellung mittels 3D-Druck ähnelt dem der Dehnungsmessstreifen. Zunächst muss ein Modell erstellt werden, auf dessen Grundlage der 3D-Drucker den Sensor produzieren kann. Nach der Reinigung und dem Aushärten in einem UV-Ofen erhält man einen Druckkörper. Es fehlen noch die DMS auf der Oberfläche und die Kontaktierung der Sensoren. Die DMS werden im Siebdruckverfahren in einer Halbbrückenschaltung auf die Oberfläche gedruckt. Auch für diesen Arbeitsschritt ist es erforderlich, vorerst eine Maske für die entsprechende Form der DMS zu erstellen. Mit Hilfe der Vorgaben durch die Maske, können die Widerstandsstrukturen ebenfalls mit Siebdruck auf die Oberfläche aufgebracht werden. Anschließend härten die Strukturen beim Backen im Ofen aus und werden mit Stiftleisten kontaktiert.



(a)



(b)

Abbildung 2.7.: Verschaltung des Drucksensors (a) ohne und (b) mit Druckanschluss und elektrischer Verbindung

### 2.3.2. Charakterisierung der Drucksensoren

Die Auslenkung der Membran unter Druckeinwirkung wird anhand der Brückenspannung der Wheatstoneschen Schaltung erfasst. Die Änderung der Brückenspannung entsteht durch die Widerstandsänderung der DMS bei Druckbelastung. Durch längeres Halten des eingebrachten Luftdrucks versucht die Messung den Hystereseeffekt zu berücksichtigen. Die Brückenspannung steigt, wenn der Druck größer wird. Dabei handelt es sich näherungsweise um einen linearen Zusammenhang. Je dünner eine Membran ist, desto höher ist die Brückenspannung und umgekehrt. Bei gleichem Druck ist die Brückenspannung eines Sensors mit dickerer Membran niedriger. Die Brückenspannung nimmt also bei zunehmender Membrandicke ab. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.8 zu erkennen.

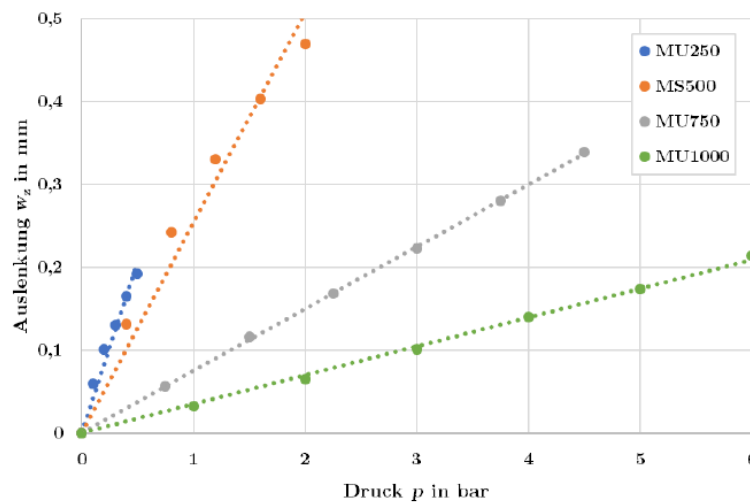


Abbildung 2.8.: Gemessene Brückenspannung in Abhängigkeit des Drucks  $p$  [6]

Die Drucksensoren weisen eine sogenannte elastische Hysterese auf [Zitat BA S.43]. Diese ist in Abbildung 2.9 zu erkennen. Nach mehrfacher Belastung der Drucksensoren mit 2 bar und einem bestimmten Zeitraum, in dem der Sensor unbelastet ist (ab 60. Sekunde), treten elastische Nachwirkungen auf. Hier sinkt die Brückenspannung weiterhin ab. Mit steigender Anzahl der Druckbelastung verringert sich das Absinken. Das führt dazu, dass die Ausgangsbrückenspannung für die darauf folgende Druckbelastung erhöht ist. Das Verhalten des Drucksensors wird also durch Hysterese beeinflusst. Da die Spannung bzw. die Membran nach der Druckbelastung nicht in ihre Ursprungsform zurückkehrt, lässt sich aus diesem Verhalten zusätzlich auf eine plastische Verformung schließen. Die Hintergründe dieser Effekte sind im Kapitel 2.5 nachzulesen.

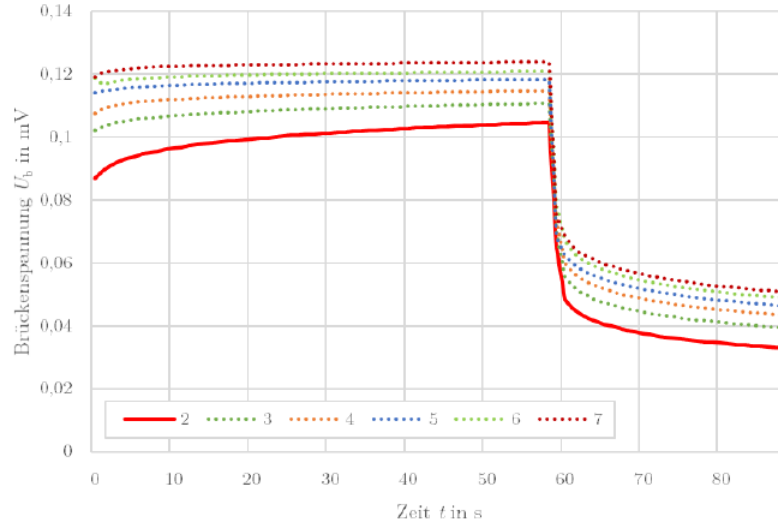


Abbildung 2.9.: Brückenspannung eines Drucksensors bei mehrfacher Belastung [6]

## 2.4. Wheatstone Brücke

Die Widerstandsvariation eines Dehnmessstreifen durch Krafteinwirkung ist sehr klein und schwer zu erfassen. Um die Messung genauer vornehmen zu können, wird die Widerstandsänderung mittels einer Wheatstone Brücke in eine Spannungsänderung umgewandelt [7].

Die Wheatstonesche Brückenschaltung besteht aus zwei parallel geschalteten Spannungsteilern, hat also die Widerstände  $R_1$  bis  $R_4$  integriert. Die Brücke wird mit einer Eingangsspannung  $U_q$  versorgt und  $U_b$  stellt die widerstandsabhängige Ausgangsspannung dar.

Gemessen wird bei dieser Anordnung der Spannungsunterschied  $U_b$  zwischen den Spannungsteilern. Die Ausgangsspannung ergibt sich zu Null, wenn alle vier Widerstände identisch sind. In diesem Fall ist die Messbrücke abgeglichen. Sind die Widerstandswerte nicht gleich, so ist die Änderung der Ausgangsspannung ein Maß für den Widerstandsunterschied. Es können also auch kleine Widerstandsänderungen, wie die des DMS, erfasst und berechnet werden.

Aufgrund von beiden Spannungsteilern ergibt sich für die abfallende Spannung an den Widerständen  $R_2$  und  $R_4$ :

$$U_2 = U_q \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{und} \quad U_4 = U_q \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (2.4)$$

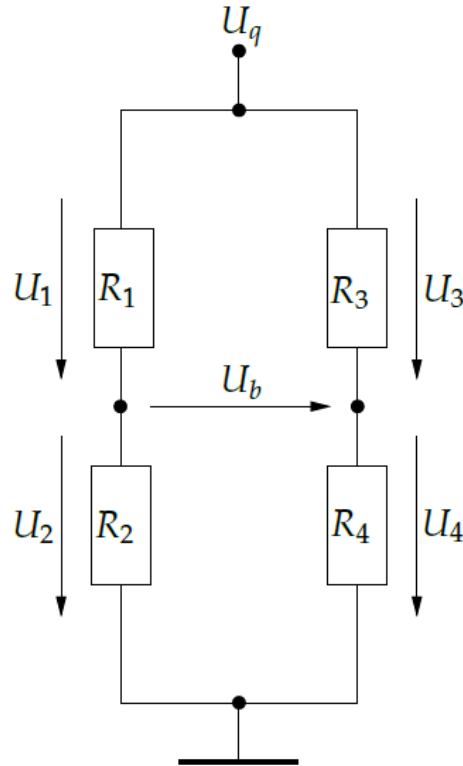


Abbildung 2.10.: Aufbau einer Wheatstonesche Brückenschaltung [19]

Aufgrund der Kirchhoff'sche Maschengleichung gilt:

$$U_b = U_2 - U_4 \quad (2.5)$$

Es ergibt sich somit die Brückenspannung  $U_b$ :

$$U_b = U_q \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = U_q \cdot \left( \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \right) \quad (2.6)$$

Damit die Brücke abgeglichen ist, muss  $U_b = 0$  sein. Aus Gleichung 2.6 folgt:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (2.7)$$

In Abbildung 2.10 sind vier Widerstände zu sehen. In der Regel ist mindestens einer der Widerstände ein Dehnungsmessstreifen. So entstehen drei verschiedenen Klassifizierungen von Wheatstone Brücken.



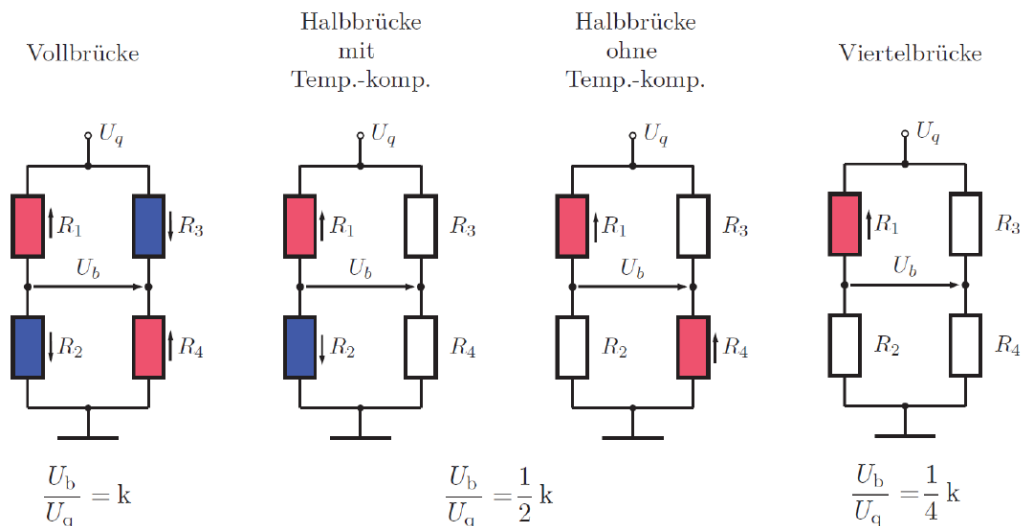


Abbildung 2.11.: Klassifizierung von Wheatstone Brücken und die entsprechenden Sensitivitäten [19]

### Vollbrücke

Die Vollbrücke setzt sich aus vier Dehnungsmessstreifen zusammen. Die größte Sensitivität  $k$  wird erreicht, wenn die Widerstände  $R_1$  und  $R_4$  gedehnt und  $R_2$  und  $R_3$  gestaucht werden (aber auch umgekehrt). Die Vollbrücke hat eine lineare Ausgangskennlinie und als großen Vorteil die Temperaturkompensation. In der Vollbrücke steigen alle Widerstände gleichzeitig, wenn der Widerstand durch Temperatur steigt. Da sich diese Entwicklung für alle Widerstände beobachten lässt, entstehen keine Differenzen und somit bleibt die Brücke weiterhin abgeglichen.

### Halbbrücke

Bei der Halbbrücke sind nur zwei der vier Widerstände Dehnungsmessstreifen. Sie kann sowohl mit als auch ohne Temperaturkompensation aufgebaut werden. Liegen die DMS auf einer Diagonalen, so ist die Brücke temperaturkompensiert, sonst nicht. Die Halbbrücke weist die halbe Sensitivität  $k$  der Vollbrücke auf.

### Viertelbrücke

Die Viertelbrücke besteht aus nur einem DMS und weist daher auch die geringste Sensitivität auf, nämlich ein Viertel der Sensitivität  $k$  der Vollbrücke. Auch der Aufbau einer Temperaturkompensation ist schwerer zu realisieren. Eine Möglichkeit ist es, die übrigen Widerstände sehr nah am DMS zu positionieren, damit sie den gleichen Temperaturbedingungen unterliegen. Ansonsten kann nicht unterschieden werden, ob eine Widerstandsänderung durch Dehnung oder Temperaturänderung zustande kommt. Ein weiterer Nachteil ist,

dass die Viertelbrücke eine nichtlineare Ausgangskennlinie besitzt. Dies kann bei kleinen Widerstandsänderungen allerdings vernachlässigt werden.

### 2.5. Störgrößen

Dehnungsmessstreifen sind verschiedenen Störeffekten ausgesetzt. Wie bereits erwähnt, ist dies der Grund dafür, dass sie mit Hilfe einer Wheatstonebrücke ausgelesen werden. Auf diese Weise wird beispielsweise einer Verzerrung der Ergebnisse durch Temperaturschwankungen entgegengewirkt. Jenseits der Temperaturstörung finden sich allerdings auch Effekte, wie das sogenannte Kriechen, die Querempfindlichkeit oder Hysterese. Im Folgenden sollen einige dieser Störeffekte beleuchtet werden, um die Ergebnisse später besser bewerten zu können.

#### Temperatur

Bei der Betrachtung der Auswirkungen von Temperaturschwankungen gibt es mehrere Effekte, die beachtet werden müssen.

Auf der einen Seite können DMS stark temperaturabhängig sein. In diesem Fall ändert sich der Widerstandswert auf Grund von thermischen Effekten anstelle von plastischen oder elastischen Verformungen. Dies betrifft allerdings meist vor allem Halbleiter-DMS. Ein Großteil des Temperaturfehlers wird durch die Wheatstone'sche Brückenschaltung kompensiert. Des weiteren kann man davon ausgehen, dass dieser Fehler gering gehalten wird, wenn alle Elemente der Messbrücke in räumlicher Nähe zueinander auf einem Chip installiert sind.

Auf der anderen Seite dehnt sich auch das Material, auf dem DMS montiert sind, bei steigenden Temperaturen. Diese Veränderung soll nicht erfasst werden, solange sie dem natürlichen Verhalten des Materials entspricht. Eine Möglichkeit, dem vorzubeugen, sind sogenannte angepasste DMS. Ziel davon ist, einen zusätzlichen Temperatureffekt des DMS zu erzeugen. Dieser besteht aus einem gegensätzlichen Verhalten bzw. Signal zum Dehnungseffekt. Er soll also dafür sorgen, die Ausgangssignale, die allein durch Temperaturveränderung hervorgerufen werden, zu kompensieren. Allerdings funktioniert auch diese Form der Kompensation meist nicht vollständig und berücksichtigt nur bestimmte Temperaturbereiche. Eine vollständige Temperaturkompensation ist tatsächlich nur mit einer Vollbrücke zu erreichen [7].

#### Kriechen

Das Kriechen bezeichnet die zeit- und temperaturabhängige plastische Verformung von Werkstoffen. Unter plastischer Verformung versteht man eine irreversible Verformung von Feststoffen. Bei Dehnungsmessstreifen tritt das Kriechen durch die Federwirkung des

Messgitters und die Haltekraft von Trägerfolie und Klebstoff auf. In der Regel hat das Kriechen des Klebstoffes den größten Einfluss. Der Effekt kann ebenso im verwendeten Trägermaterial auftreten. Die hier verwendeten DMS sind auf Kunststoff aufgetragen. Auch hier tritt der Effekt des Kriechens auf. Die Molekülketten können bei äußerer Belastung eine plastische Verformung aufweisen. Diese hängt meist von der Herstellung des Materials, dem Grundpolymer und der Belastung ab.

Diese Gleichzeitigkeit kann jedoch auch Vorteile mit sich bringen. Das Kriechverhalten des DMS kann an das Kriechen des Federkörperwerkstoffes angepasst werden und somit kompensieren sich die Effekte.

Für viele Materialien ist der Kriecheffekt so gering, dass er vernachlässigt werden kann [11].

### Querempfindlichkeit

Die Querempfindlichkeit beschreibt den Effekt, dass sich Widerstandsänderungen eines DMS auch messen lassen, wenn dieser nicht in Längs- sondern in Querrichtung beansprucht wird. Sie beschreibt also die Empfindlichkeit einer Messeinrichtung, mit der diese auf andere Größen reagiert, als die zu messende. Die Messergebnisse variieren in diesem Fall also auch, wenn sich die Störgrößen ändern anstelle der Messgröße.

Ziel ist es, diesen Effekt möglichst gering zu halten. Entscheidend ist diesbezüglich die Art der DMS. Während Draht-DMS in der Regel höhere Querempfindlichkeiten besitzen, ist es relativ einfach, diese für Folien-DMS gering zu halten. Da es sich bei den hier verwendeten DMS um Folien-DMS handelt, kann dieser Effekt also vernachlässigt werden [13].

### Hysterese

Der Hystereseeffekt tritt nicht beim Dehnungsmessstreifen selbst auf. Er entsteht meist im Trägermaterial, auf dem der DMS aufgebracht ist.

Allgemein ausgedrückt handelt es sich bei der Hysterese um ein bestimmtes Verhalten eines Systems, bei dem die Ausgangsgröße nicht allein von der unabhängig veränderlichen Eingangsgröße, sondern auch von dem vorherigen Zustand der Ausgangsgröße abhängt. Dadurch entsteht eine sogenannte Hystereseschleife. Dabei handelt es sich um eine verzögerte Änderung der Wirkung, wenn zuvor die Ursache geändert wurde [5].

## 2.6. Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung der Schaltung wird durch eine 9V Blockbatterie, einen Spannungsteiler, einen Impedanzwandler und einen Inverter realisiert. Es wird eine Versorgungsspannung von  $\pm 6V$  generiert. Die  $+6V$  werden gewählt, da das Ausgangssignal später an einem Display angezeigt werden soll. In der Regel können Displays Eingangssignale bis 5V

verarbeiten. Die Wahl dieser Versorgungsspannung wird das Eingangssignal auf ungefähr 5V begrenzen.

### 2.6.1. Spannungsteiler

Der Spannungsteiler ist eine Reihenschaltung von Widerständen, durch die eine elektrische Spannung aufgeteilt werden kann. Die Gleichspannungsquelle, deren Versorgungsspannung aufgeteilt werden soll, ist die 9V Blockbatterie. Dies entspricht der Spannung  $U$  in Abbildung 2.12. Die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  werden so dimensioniert, dass die resultierende Spannung  $U_2$  bei etwa 5V liegt.

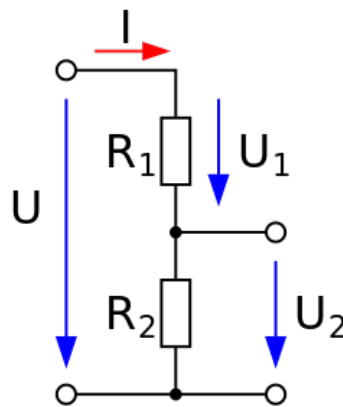


Abbildung 2.12.: einfacher, unbelasteter Spannungsteiler

Nach dem Ohmschen Gesetz lässt sich der Strom  $I$  folgendermaßen bestimmen:

$$I = \frac{U}{R_{ges}} = \frac{U}{R_1 + R_2} \quad (2.8)$$

Da der Strom  $I$  einer Reihenschaltung durch alle Bauteile gleich groß sein muss, ergibt sich für die Teilspannung  $U_2$  über  $R_2$  folgender Zusammenhang:

$$U_2 = I \cdot R_2 \quad (2.9)$$

Durch Umformung erhält man das Verhältnis zwischen der Eingangsspannung  $U$  und der Ausgangsspannung  $U_2$  in Abhängigkeit von den Teilwiderständen.

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow \frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.10)$$

Durch weiteres Umformen gelangt man zu folgendem Verhältnis [3]:

$$R_1 \cdot U_2 = R_2 \cdot U_1 \quad (2.11)$$

Mit der vorgesehenen Versorgungsspannung  $U = 9V$  und der gewünschten Teilspannung  $U_2 = 6V$  ergibt sich  $U_1 = U - U_2 = 3V$ . Setzt man die Werte ein ergibt sich für die Widerstände folgendes:

$$R_1 \cdot 6V = R_2 \cdot 3V \quad (2.12)$$

$$2R_1 = R_2 \quad (2.13)$$

Da nun das Verhältnis beider Widerstände zueinander bestimmt ist, werden der Widerstand  $R_1 = 3,28k\Omega$  und  $R_2 = 6,78k\Omega$  ausgewählt. Überprüft man die Ausgangsspannung  $U_2$  rechnerisch, so erhält man folgenden Wert:

$$U_2 = 9V \cdot \frac{6,78k\Omega}{3,28k\Omega + 6,78k\Omega} = 6,066V \quad (2.14)$$

### 2.6.2. Impedanzwandler

Der Spannungsteiler soll die gesamte Schaltung versorgen, weshalb die Anschlüsse von  $R_2$  belastet werden müssen. Da dies die bisherige Berechnung verzerren würde, wird ein Impedanzwandler dazwischen geschaltet.

Ein Impedanzwandler sorgt dafür, dass die Impedanz einer Quelle an die des Verbrauchers angepasst wird. In diesem Fall wird ein Operationsverstärker zu einem Impedanzwandler verschaltet. Dabei wird der invertierende Eingang direkt mit dem Ausgang verbunden, wie in Abbildung 2.13 veranschaulicht ist. Diese direkte Gegenkopplung entspricht einem Verstärkungsfaktor von 1. Die Eingangsspannung entspricht also der Ausgangsspannung. Da der Eingangswiderstand bei einem Impedanzwandler im Verhältnis zum Ausgangswiderstand sehr groß ist, kann der Impedanzwandler als Puffer eingebaut werden. Auf diese Weise wird die Spannungsquelle nur minimal belastet und in der Spannungshöhe kaum beeinflusst [2][14].

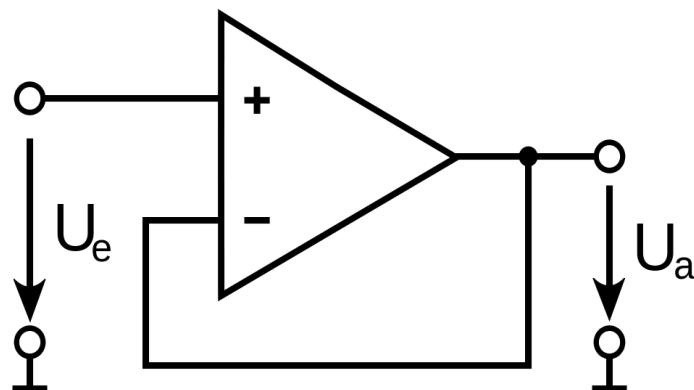


Abbildung 2.13.: Impedanzwandler

### 2.6.3. Inverter

Da der Operationsverstärker des Schaltungsaufbaus mit einer symmetrischen Spannung versorgt werden muss, wird die Spannung von  $6V$  mit einem Inverter zu  $-6V$  transformiert.

Ein invertierender Verstärker, wie in Abbildung 2.14a zu sehen, verstärkt die Eingangsspannung  $U_e$  mit dem Spannungsverstärkungsfaktor  $v = -\frac{R_2}{R_1}$ . Damit ergibt sich für die Ausgangsspannung  $U_a$  folgender Zusammenhang [2]:

$$U_a = v \cdot U_e = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e \quad (2.15)$$

Der Inverter wird hier lediglich dafür eingesetzt, die Spannung zu invertieren, es wird also der Faktor  $v = 1$  benötigt. Für die Verstärkungsschaltung bedeutet dies, dass die Widerstände gleich groß gewählt sein müssen:  $R_1 = R_2$  [14].

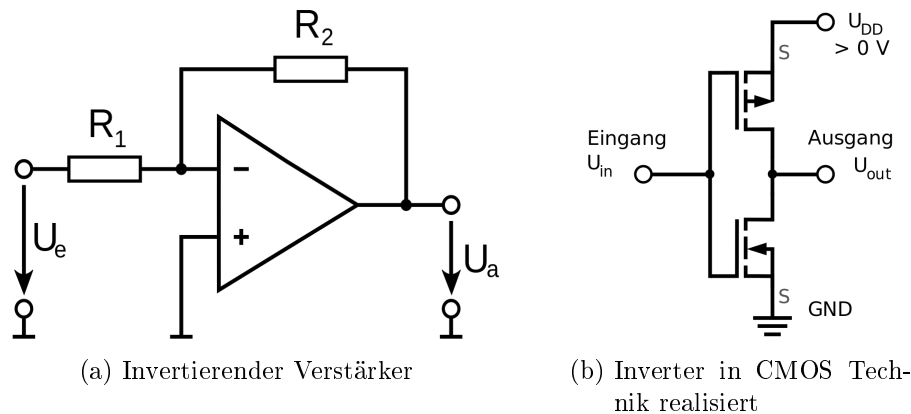


Abbildung 2.14.: Arten der Realisierung von Invertiern

Inverter können ebenfalls als integrierte Schaltung realisiert werden. Dies entspricht einem Nicht-Gatter in CMOS-Logik, also basierend auf einem p-Kanal und einem n-Kanal MOSFET. Diese Variante ist in Abbildung 2.14b dargestellt [1].

In der Schaltung wird der Verstärker *ICL7660* verwendet. Dabei handelt es sich um einen CMOS switched-capacitor Spannungswandler, der positive Eingangsspannungen invertieren, teilen oder multiplizieren kann.

functional block diagram aus datenblatt S.4?

Quelle4: ICL7660 Switched-Capacitor Voltage Converters - Maxim

## 2.7. Instrumentenverstärker

Um den Spannungsverlauf der Messbrücke anzeigen zu können, ist es notwendig, einen Instrumentenverstärker dazuzuschalten. Schließlich ist auch das Signal der Messbrücke sehr klein. Für diesen Aufbau wird der Instrumentenverstärker INA 129 verwendet, dessen

Blockschaltbild in Abbildung 2.15b zu finden ist.

Bei einem Instrumentenverstärker handelt es sich um eine besonders präzise Operationsverstärkerschaltung, die meist als integrierter Schaltkreis hergestellt ist. Entsprechend Abbildung 2.15a handelt es sich bei dem verwendeten Instrumentenverstärker um eine Schaltung, die aus drei Operationsverstärkern besteht [14].

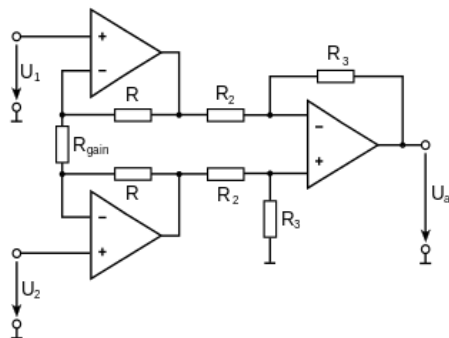
Das vorgeschaltete Potentiometer  $R_{gain}$  bzw.  $R_G$  regelt den Verstärkungsfaktor. Je kleiner der vorgeschaltete Widerstandswert, desto größer ist die Verstärkung und andersherum. Dem Datenblatt des Instrumentenverstärkers INA 129 ist zu entnehmen, dass eine Verstärkung von 1 bis 10000 möglich ist. Dies ist auch in Abbildung 3.5b zu entnehmen.

Da teilweise mit sehr kleinen Differenzen seitens der Wheatstoneschen Ausgangssignale gearbeitet wird, wird ein vorgeschaltetes Potentiometer mit einem maximalen Wert von  $4,7k\Omega$  ausgewählt. Dies deckt ein Verstärkungsfenster von etwa  $G = 15$  bis  $G = 10000$  ab. Allerdings wird nicht davon ausgegangen, derart hohe Verstärkungsfaktoren wirklich einzusetzen.

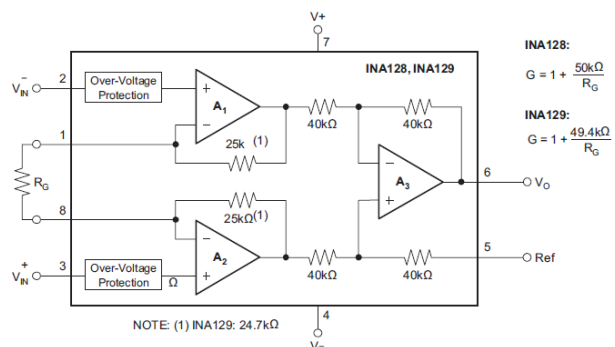
An den jeweiligen positiven Eingängen  $U_1$  bzw.  $V_{IN}^-$  und  $U_2$  bzw.  $V_{IN}^+$  der ersten beiden OPVs liegen die Signale an, deren Differenz verstärkt wird. Im vorliegenden Schaltungsaufbau liegen an diesen Eingängen die Ausgangssignale der Wheatstonebrücke an.

Das Ausgangssignal  $U_a$  bzw.  $V_O$  entspricht dem Signal, welches schließlich auf dem Display angezeigt werden soll.

Die symmetrische Versorgungsspannung von  $\pm 6V$  liegt an den Anschlüssen  $V+$  und  $V-$  an. Diese ist jedoch nur in Abbildung 2.15b vermerkt.



(a) Aufbau eines Instrumentenverstärkers



(b) Funktionales Blockschaltbild von INA 129 [16]

Abbildung 2.15.: Funktion von Instrumentenverstärkern

## 2.8. Anzeige/Display





## 3. Durchführung

### 3.1. Simulation der Schaltung

Der erste Schritt dieser Arbeit beinhaltet eine Simulation der Schaltung mit dem Programm *LT Spice*. Die Simulation dient der Überprüfung der später aufgebauten Platine. Sie ist die Grundlage für einen direkten Vergleich zwischen Messergebnissen unter idealisierten Bedingungen und den tatsächlich gemessenen Ergebnissen. Diese berücksichtigen, dass Störeffekte auf die Bauteile wirken, welche im Abschnitt "[Störgrößen](#)" erläutert werden.

Die Schaltung besteht aus einer Wheatstonebrücke, in der die jeweiligen Sensoren (DMS/-Drucksensoren) eingesetzt sind, sowie einer Verstärkerschaltung, die dafür sorgt, dass die Spannungsausgabe der Sensoren auf einer Anzeige dargestellt werden kann. Die Spannungsversorgung ist mit Hilfe einer 9V Blockbatterie, einem Spannungsteiler, einem Impedanzwandler und einem Inverter gewährleistet. Die Betrachtung und Simulation der einzelnen Schaltungsabschnitte sind in den folgenden Unterkapiteln [3.1.1](#) bis [3.1.3](#) zu finden.

#### Schaltplan der gesamten Schaltung

#### 3.1.1. Simulation der Spannungsversorgung

Zunächst wird die Spannungsversorgung simuliert, indem bei *LT Spice* ein Spannungsteiler und ein Impedanzwandler aufgebaut werden. Der Spannungsteiler wird an eine Blockbatterie angeschlossen (9V Gleichspannungsquelle) und die daraus resultierende 6V Spannung wird in den Impedanzwandler eingespeist. Für die Simulation in *LT Spice* wird der Simulationsbefehl "Transient" verwendet, um eine simulierte Spannungs- und Stromkurve darstellen zu können. Die Simulation startet bei 2 Sekunden und stoppt bei 10s. Die Genauigkeit der Schritte beträgt 1ms. Wie in der Simulation [3.1](#) zu erkennen ist, sind die Ausgangsspannung des Impedanzwandlers mit  $V(n002) = 6,065598V$  und die Spannung des Spannungsteilers mit  $V(n003) = 6,065594V$  nahezu identisch. Die Ausgangsspannung des Impedanzwandlers versorgt nun also die gesamte Schaltung mit der erforderlichen Spannung, die durch den Spannungsteiler eingeführt wurde.

Die hiermit gewährleistete Versorgungsspannung versorgt die Wheatstonebrücke und den Instrumentenverstärker. Dieser Verstärker ist auf eine symmetrische Spannungsversorgung angewiesen, also positive und negative Gleichspannung des gleichen Betrages (in diesem Fall  $\pm 6V$ ). Aus diesem Grund wird für die Bereitstellung dieser negativen Spannung auf einen Inverter zurückgegriffen. Auch dieser wird durch die Ausgangsspannung des Impedanzwandlers versorgt.

Für die Simulation wird der Inverter *LTC1044* der Firma *Analog Devices* verwendet, der vergleichbar ist mit dem Inverter *ICL7660* der Firma *Renesas*, welcher im tatsächlichen Aufbau verwendet wird. Der Aufbau dieser Schaltung und die Wahl des Kondensators erfolgen nach Angaben des Herstellers [\[8\]](#).

Wie erwartet, lässt sich aus [Abbildung 3.2b](#) ablesen, dass die Ausgangsspannung  $V(n006)$

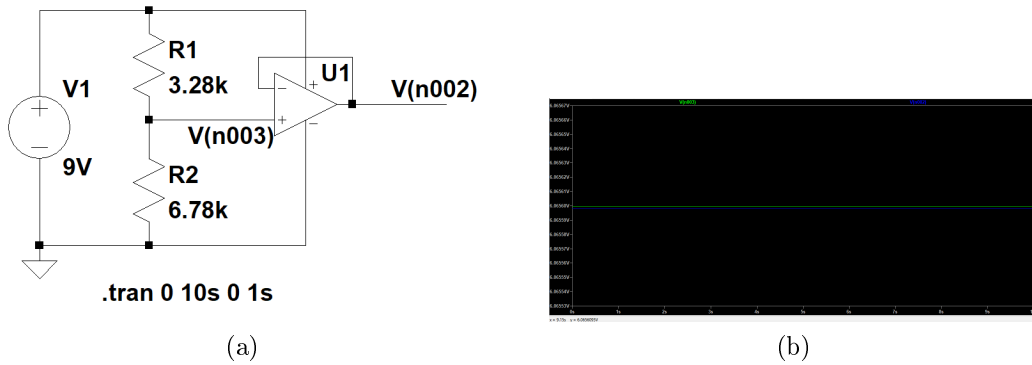
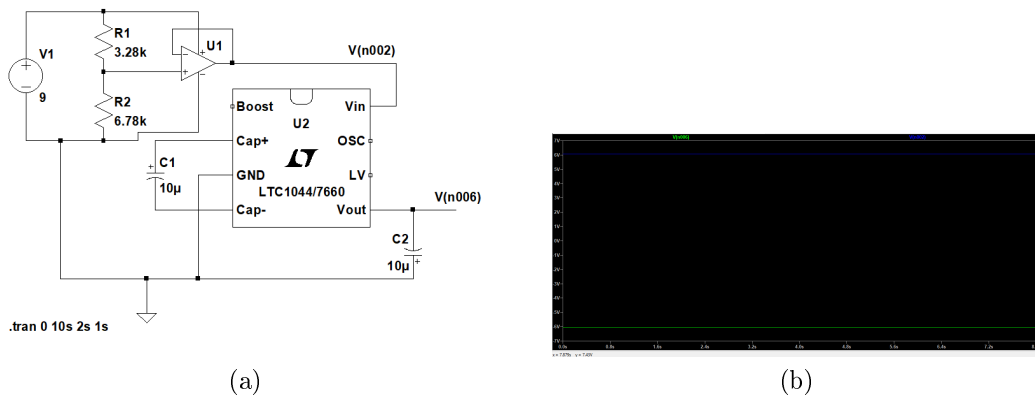


Abbildung 3.1.: Simulation des Impedanzwandlers

mit  $-6,0655643V$  das negative Äquivalent zur Ausgangsspannung des Spannungsteilers bzw. Eingangsspannung des Inverters mit  $V(n002) = 6,065598V$ . Damit ist eine symmetrische Spannungsversorgung für den Instrumentenverstärker gegeben.


Abbildung 3.2.: Simulation des Spannungsteilers und des Inverters bei *LT Spice*

### 3.1.2. Simulation der Wheatstone Brücke

Ein weiterer Teil der Schaltung ist die Wheatstonebrücke. Diese wird zunächst ausführlich gezeichnet. Die Abbildung 3.3a veranschaulicht die vollständige Schaltung, wobei der Widerstandswert von  $5,7k\Omega$  des DMS ein Beispiel für den Eigenwert eines DMS ist. Der Eigenwiderstand gibt den Widerstand eines DMS an, wenn er weder gedehnt, noch gestaucht wird. Die Eigenwerte der zur Verfügung stehenden Sensoren sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

$R_1, R_2$  und  $R_3$  repräsentieren drei in Reihe geschaltete Potentiometer. Sie sind so gewählt, dass sie den größten Eigenwiderstand der DMS ausgleichen können. Bei einem maximalen Eigenwert von  $22,07k\Omega$  ist dies bei drei Potentiometern zu je etwa  $10k\Omega$  gewährleistet.

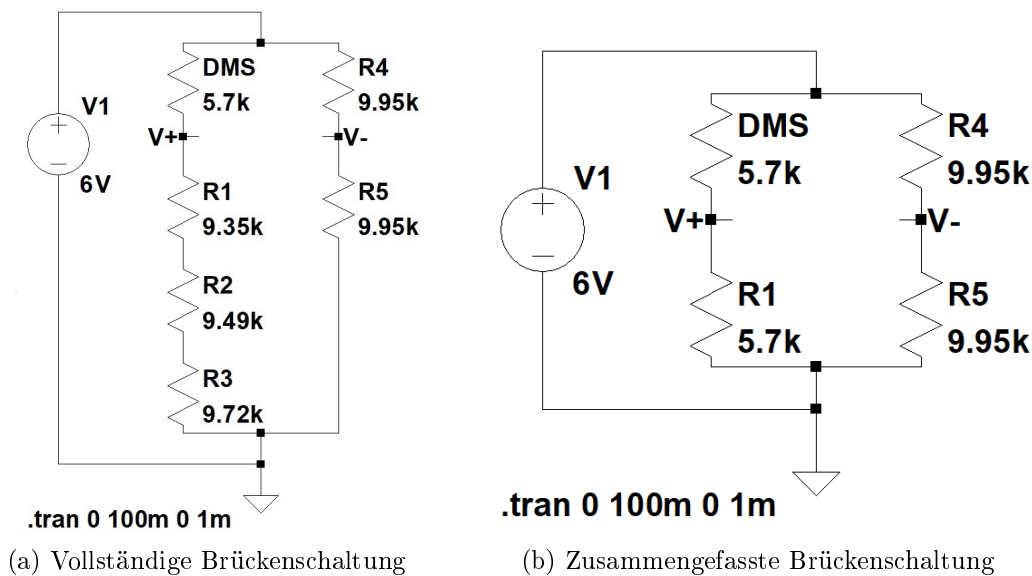
Zur Darstellung in Abbildung 3.3a sind jeweils die höchstmöglichen Werte der Potentiometer eingestellt. An die Brücke wird eine Versorgungsspannung von  $V_1 = 6V$  angelegt. Dies

Sensor	Eigenwiderstand
DMS 1	$9,07k\Omega$
DMS 2	$26,5k\Omega$
DMS 3	$6,0k\Omega$
Drucksensor 1	$0,43k\Omega$
Drucksensor 2	$1,127k\Omega$

Tabelle 3.1.: Eigenwiderstände der jeweils angeschlossenen Sensoren

repräsentiert die Versorgungsspannung, die im vorherigen Kapitel 3.1.1 hergeleitet ist.

Für die Simulation in *LT Spice* wird der Simulationsbefehl "Transient" verwendet, um eine simulierte Spannungs- und Stromkurve darstellen zu können. Die Simulation startet bei 0 Sekunden und stoppt bei  $100ms$ . Die Genauigkeit der Schritte beträgt  $1ms$ .

Abbildung 3.3.: Simulation der Wheatstone Brücke bei *LT Spice*

Werden die Potentiometer  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  als  $R_1$  zusammengefasst, so sieht die Brücke übersichtlicher aus, wie in Abbildung 3.3b dargestellt. Der Wert des Potentiometers wird nun so angepasst, dass er möglichst gleich groß ist, wie der Eigenwert des DMS. Die Brücke ist in diesem Fall abgeglichen. Es entsteht also keine Spannung zwischen den Knoten  $V_+$  und  $V_-$ , da die Differenz zwischen den entsprechenden Widerstandswerten gegen 0 angenähert wird. Wie in Gleichung 2.7 gezeigt wurde, gilt:

$$DMS * R_5 = R_1 * R_4 \quad (3.1)$$

Nachdem die Brücke abgeglichen wurde, wird der DMS Wert manuell geändert. Diese Widerstandsänderung entspricht je nach eingegebenem Wert entweder einer Dehnung oder Stauchung des Bauteils. Abbildung 3.4a und 3.4b sowie die Tabelle 3.2 zeigen die entsprechenden Ergebnisse. Wichtig zu beachten sind die unterschiedlichen Brückenspannungen,

die entstehen. Entsprechend Abbildung 2.10, den Gleichungen in 2.4 und Gleichung 2.5, folgt für die Brückenspannung ( $V_+ - V_-$ ) in LT Spice:

$$U_b = (V_+) - (V_-) \quad \text{mit} \quad V_+ = V_1 \cdot \frac{R_1}{DMS + R_1} \quad (3.2)$$

Mit den folgenden Simulationsergebnissen (siehe Tabelle 3.2) kann das Verhalten der DMS veranschaulicht werden.

Wird der DMS gedehnt, so vergrößert sich der Widerstand des Bauteiles und die linke Knotenspannung  $V_+$  wird kleiner. Es ergibt sich also eine negative Brückenspannung  $U_b$ . Bei einer Stauchung des DMS hingegen passiert genau das Gegenteil. Der Widerstand verkleinert sich und  $V_+$  wird größer. Die entstehende Brückenspannung  $U_b$  ist nun also positiv.

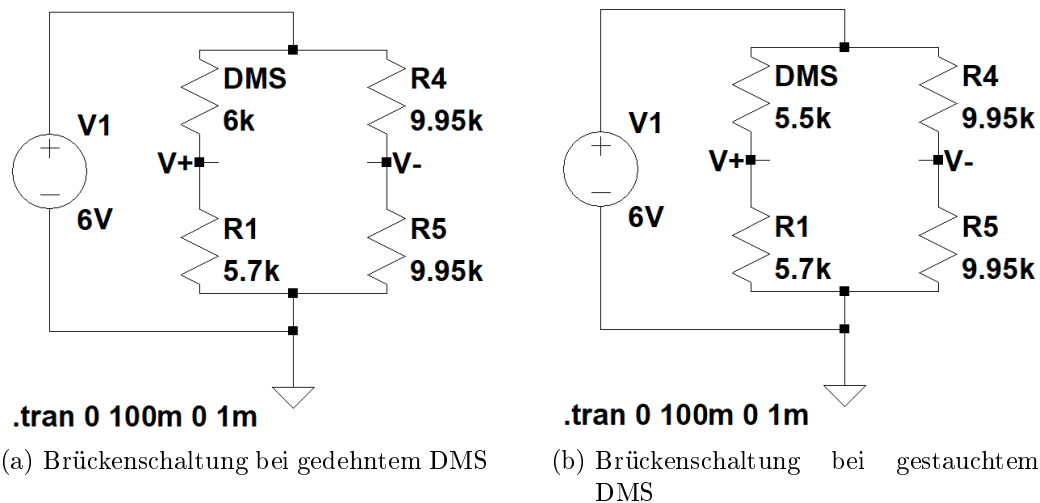


Abbildung 3.4.: Simulation der Brückenschaltung

DMS	$V_+ - V_-$	$V_+$	$V_-$
5,7k $\Omega$	0V	2,5V	3V
6,7k $\Omega$	-241,935mV	2,758V	3V
7,7k $\Omega$	-447,761mV	2,552V	3V
8,7k $\Omega$	-625mV	2,375V	3V
9,7k $\Omega$	-779,221mV	2,221V	3V
10,7k $\Omega$	-914,634mV	2,085V	3V

Dehnung des DMS

DMS	$V_+ - V_-$	$V_+$	$V_-$
5,7k $\Omega$	0V	3V	3V
4,7k $\Omega$	288,46mV	3,288V	3V
3,7k $\Omega$	638,298mV	3,638V	3V
2,7k $\Omega$	1,071V	4,071V	3V
1,7k $\Omega$	1,622V	4,622V	3V
0,7k $\Omega$	2,344V	5,344V	3V

Stauchung des DMS

Tabelle 3.2.: Messergebnisse der Simulation der Wheatstone Brücke bei *LT Spice*

### 3.1.3. Simulation des Verstärkers

Im realen Schaltungsaufbau wird der Verstärker *INA129* verwendet. Da seitens des Herstellers keine *LT-Spice* Datei dieses Verstärkers zur Verfügung gestellt wird, wird die Simulation in diesem Fall mit einem Verstärker mit sehr ähnlichen Eigenschaften simuliert. Es handelt sich hierbei um den Instrumentenverstärker *LT1168*. Für beide gilt, dass die Verstärkung durch einen vorgeschalteten Widerstand bestimmt wird. Wie in den folgenden Abbildungen 3.5a und 3.5b zu sehen ist, ist die Verstärkung  $G$  bei gleichen vorgeschalteten Widerständen für beide Verstärker identisch. Das Verhalten ist also das gleiche und es kann von den Ergebnissen der Simulation des Verstärkers *LT1168* auf das Verhalten vom Instrumentenverstärker *INA129* geschlossen werden.

$R_G = 49.4k\Omega / (G - 1)$

Table 1 shows appropriate 1% resistor values for a variety of gains.

**Table 1**

DESIRED GAIN	$R_G$	CLOSEST 1% VALUE	RESULTANT GAIN
1	Open	Open	1
2	49400 $\Omega$	49900 $\Omega$	1.99
5	12350 $\Omega$	12400 $\Omega$	4.984
10	5488.89 $\Omega$	5490 $\Omega$	9.998
20	2600 $\Omega$	2610 $\Omega$	19.93
50	1008.16 $\Omega$	1000 $\Omega$	50.4
100	498.99 $\Omega$	499 $\Omega$	99.998
200	248.24 $\Omega$	249 $\Omega$	199.4
500	99 $\Omega$	100 $\Omega$	495
1000	49.95 $\Omega$	49.4 $\Omega$	1001

(a) Verstärkung LT1168 [9]

INA128:  $G = 1 + \frac{50k}{R_G}$       INA129:  $G = 1 + \frac{49.4k}{R_G}$

DESIRED GAIN (V/V)	INA128		INA129	
	$R_G$ ( $\Omega$ )	NEAREST 1% $R_G$ ( $\Omega$ )	$R_G$ ( $\Omega$ )	NEAREST 1% $R_G$ ( $\Omega$ )
1	NC	NC	NC	NC
2	50.00k	49.9k	49.4k	49.9k
5	12.50k	12.4k	12.35k	12.4k
10	5.556k	5.62k	5489	5.49k
20	2.632k	2.61k	2600	2.61k
50	1.02k	1.02k	1008	1k
100	505.1	511	499	499
200	251.3	249	248	249
500	100.2	100	99	100
1000	50.05	49.9	49.5	49.9
2000	25.01	24.9	24.7	24.9
5000	10.00	10	9.88	9.76
10000	5.001	4.99	4.94	4.87

NC: No Connection

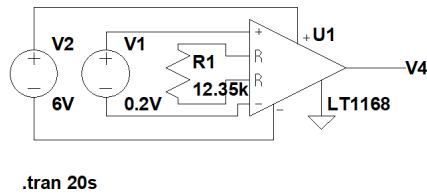
(b) Verstärkung INA129 [16]

Abbildung 3.5.: Verstärkungsfaktoren im Vergleich

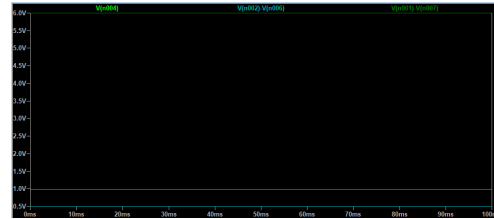
Wie bereits in den vorangegangenen Simulationen definiert, startet auch hier der Durchlauf bei 0s und stoppt bei 100ms. Die Genauigkeit der Schritte beträgt 1ms. In diesem Fall sind in der Schaltung mehrere Spannungsquellen gewählt, um die Schaltung vereinfacht darstellen zu können. Die Spannungsquelle  $V_2$  repräsentiert die Spannungsversorgung von 6V. Dies berücksichtigt also bereits den ausführlichen Aufbau der Spannungsversorgung, wie im vorangestellten Abschnitt "3.1.1" hergeleitet, da die 9V Versorgungsspannung auf 6V transformiert wurde. Die Spannungsquelle  $V_1$  repräsentiert das Ausgangssignal der Wheatstonebrücke. Wie im Abschnitt "3.1.2" dargelegt ist, handelt es sich bei dem Beispielwert von 0,2V um eine durchaus übliche Ausgangsspannung der Wheatstonebrücke.

Die Werte des Eingangssignals für den Verstärker können in *LT-Spice* manuell geändert werden. Diese Spannungsänderung entspricht der Spannungsabgabe der Messbrücke. Sie hängt davon ab, wie sich der Widerstandswert der DMS bei Dehnung oder Stauchung ändert. Auf diese Weise wird die Schaltung durch das Einsparen der Wheatstonebrücke deutlich übersichtlicher.

In der Simulation entspricht  $R_1$  dem einstellbaren Vorwiderstand, der über den Verstärkungsfaktor entscheidet,  $V_1$  stellt das zu verstärkende Eingangssignal dar, bei  $V_4$  handelt es



(a) Verstärkerschaltung



(b) Spannungsmessung LT1168

Abbildung 3.6.: LT-Spice Simulation LT1168

sich um das (verstärkte) Ausgangssignal des Verstärkers und  $G$  ist der Verstärkungsfaktor, der der oben aufgeführten Abbildung 3.5a entnommen ist.

$R_1$	$V_1$	$V_4$	$G$
49,4k $\Omega$	0	0	[2]
49,4k $\Omega$	50mV	100mV	2
49,4k $\Omega$	100mV	200mV	2
49,4k $\Omega$	200mV	400mV	2
49,4k $\Omega$	500mV	1V	2
12,35k $\Omega$	50mV	250,02mV	5
12,35k $\Omega$	100mV	500,05mV	5
12,35k $\Omega$	200mV	1V	5
12,35k $\Omega$	500mV	2,06V	[5]
5,49k $\Omega$	50mV	500mV	10
5,49k $\Omega$	100mV	999,91mV	10
5,49k $\Omega$	200mV	1,893V	10
5,49k $\Omega$	500mV	808,88mV	[10]

Tabelle 3.3.: Messergebnisse des Verstärkers LT1168 bei LT Spice

Wie in Tabelle 3.3 zu sehen ist, zeigen die Ergebnisse der Simulation, wie der veränderbare Vorwiderstand  $R_1$  und der Verstärkungsfaktor  $G$  zusammenhängen. Die jeweilige Eingangsspannung  $V_4$  entspricht der Eingangsspannung  $V_1$  multipliziert mit dem Verstärkungsfaktor  $G$ . Ausnahmen sind zu erkennen, sobald die Ausgangsspannung auf über 2V verstärkt werden soll. Hier hat der Verstärker LT1168 eine Obergrenze, über die die Spannung nicht verstärkt wird. Das trifft auf den tatsächlich verwendeten Verstärker INA129 nicht zu und kann somit vernachlässigt werden.

#### 3.1.4. Simulation der gesamten Schaltung

Um die gesamte Schaltung zu simulieren, werden die verschiedenen Teile der vorangegangenen Simulationen in den Unterkapiteln [Simulation der Spannungsversorgung](#) bis [Simulation des Verstärkers](#) nun zusammengefügt. Somit ist gewährleistet, dass alle einzelnen Schaltungsabschnitte tatsächlich funktionieren und nun wird das Gesamtergebnis geprüft.

## 3.2. Aufbau des Steckbrettes

messreihen einfüegen siehe notizen!

Der Simulation folgt der praktische Aufbau der Schaltung. Dafür werden zunächst alle Komponenten auf einem Steckbrett angeordnet, da die einzelnen Bauteile hier schnell und einfach montiert werden können. Wenn hier alle Vorgänge stimmen, kann eine Platine mit entsprechender Schaltung angefertigt werden.

Ähnlich dem beschriebenen Vorgehen im Kapitel 3.1 zur Simulation, werden alle Teilbereiche der Schaltung zunächst einzeln aufgebaut und getestet, um sie schließlich zusammenfügen zu können. Die gesamte Schaltung ist in Abbildung 3.7 zu finden.

Alle hierfür benötigten Bauteile sind in der folgenden Tabelle 3.4 zusammenfassend aufgelistet:

Bauteil	Anzahl	Bezeichnung/Wert
Impedanzwandler	1	<i>LM6132</i>
Inverter	1	<i>ICL7660A</i>
Instrumentenverstärker	1	<i>INA129</i>
Potentiometer	3	$0 - 10k\Omega$
Potentiometer	1	$0 - 5k\Omega$
Kondensator	1	$10\mu F$
Widerstand	1	$3.28k\Omega$
Widerstand	1	$6.78k\Omega$
Widerstand	2	$9.95k\Omega$

Tabelle 3.4.: Bauteilliste

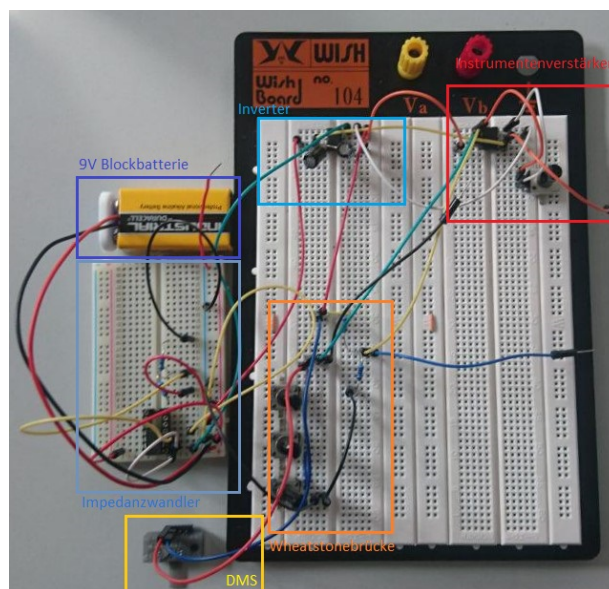


Abbildung 3.7.: gesamte Schaltung auf dem Steckbrett aufgebaut

### 3.2.1. Spannungsversorgung

Wie bereits in Abschnitt [Spannungsversorgung](#) beschrieben, wird die Spannungsversorgung mittels 9V Blockbatterie, Impedanzwandler und Inverter realisiert. Diese sind in der Übersicht der Gesamtschaltung blau markiert. Zur Überprüfung der Quellspannung werden die Bauteile einzeln durchgemessen: Die gemessene Spannung der 9V Blockbatterie beträgt  $U_{\text{Batterie}} = 9,14V$ . Die Teilspannungen (entsprechend Abbildung [2.12](#)) betragen  $U_1 = 2,947V$  und  $U_2 = 6,088V$ . Dies entspricht der gewünschten Spannung  $U_2$  in Gleichung [2.14](#), der Spannungsteiler kann also so aufgebaut bleiben.

Die Ausgangsspannung  $U_2$  des Spannungsteilers wird in den Impedanzwandler eingespeist. Dies entspricht nun der Eingangsspannung  $+INA$  des Impedanzwandlers *LM6132*, wie im Datenblatt [??](#) abzulesen ist. Die Versorgungsspannung wird mit  $V+ = 9,038V$  direkt aus der Batterie gespeist und die gemessene Ausgangsspannung beträgt  $OUTA = 6,091V$ . Die benötigte Spannung von etwa  $6,098V$  bleibt also erhalten und kann im folgenden auch belastet werden.

wo kommt das bild des impedanzwandlers aus dem datenblatt hin?

Um die Spannung zu invertieren, wird die Ausgangsspannung  $OUTA = 6,089V$  in den Inverter eingespeist. Somit gilt am Inverter  $V+ = 6,089V$  und die gemessene Ausgangsspannung ergibt sich zu  $V_{OUT} = -6,086V$ .

Mit den Spannungen  $OUTA = 6,06V$  und  $V_{OUT} = -6,086V$  erhalten wir also die für den Rest der Schaltung benötigte Versorgungsspannung.

### 3.2.2. Wheatstonebrücke

Die Wheatstonebrücke und die eingefügten Sensoren, in diesem Fall ein DMS, sind in der Abbildung [3.7](#) orange bzw. gelb markiert. Im Aufbau auf dem Steckbrett wird die Spannungsversorgung von  $6V$  zunächst mit einem Netzteil gewährleistet, um die Anzahl von Fehlerquellen gering halten zu können.

Zur Überprüfung des Aufbaus werden die DMS1 und DMS2 in der Wheatstonebrücke eingesetzt. Zunächst wird die Brückenschaltung abgeglichen. Wenn die Brückenspannung möglichst gering ist, werden die DMS gestaucht bzw. gedehnt und die resultierende Brückenspannung wird ausgelesen. Ziel ist es, zu überprüfen, ob sich die Verformung des DMS in der Brückenspannung ablesen lässt. Für die Dehnungsmessstreifen werden die maximalen und minimalen Brückenspannungen erfasst und in Tabelle [??](#) dokumentiert, um abschätzen zu können, in welcher Größenordnung sie auftreten wird. Auf dieser Grundlage kann die notwendige Verstärkung ermittelt werden.

	Brückenspannung [mV] bei Dehnung	Brückenspannung [mV] bei Stauchung
DMS 1	275	-135
DMS 2		



### 3.2.3. Verstärker

Der Verstärker *INA 129* wird ebenfalls auf dem Steckbrett aufgebaut und überprüft. Um die Funktion des Instrumentenverstärkers zu prüfen, wird ein konstantes Eingangssignal  $U = 200\text{mV}$  eingespeist und durch verschiedene Vorwiderstände wird der Verstärkungsfaktor  $G$  erfasst. Um die Fehlerquellen möglichst gering zu halten, wird das Eingangssignal zur Überprüfung mit dem Netzteil generiert.

Es wird die Ausgangsspannung des Verstärkers erfasst. Diese ist in Abbildung 3.8a und auf dieser Grundlage wird die Verstärkung berechnet. Diese ist im Vergleich mit den im Datenblatt festgeschriebenen Verstärkungsfaktoren je nach Vorwiderstand in Abbildung 3.8b aufgetragen. Die Ergebnisse sind in den folgenden Graphen dargestellt.

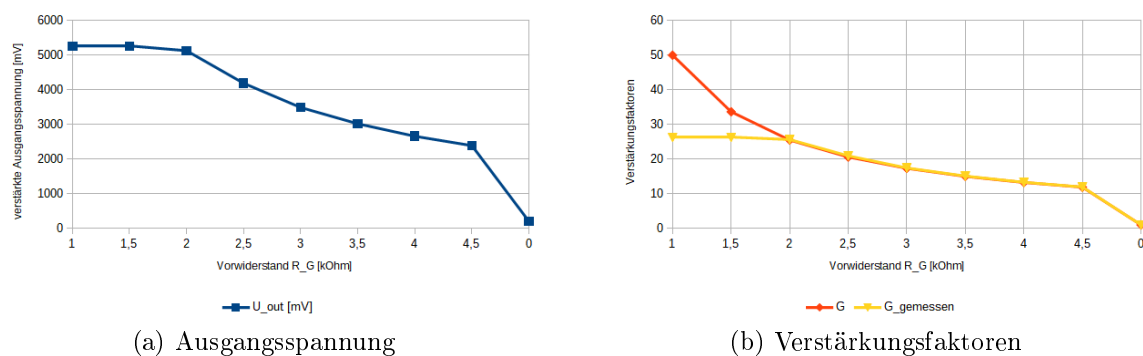


Abbildung 3.8.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei einem konstanten Eingangssignal von  $U_{\text{Eingang}} = 200\text{mV}$

Die Abbildung der Ausgangsspannung zeigt, dass diese steigt, je kleiner der Vorwiderstand gewählt ist. Eine Ausnahme zeigt sich, wenn dieser 0 beträgt. Für diesen Fall ist die Verstärkung  $G = 1$ . Weitere Abweichungen treten auf, sobald die Verstärkung über 25 anwächst. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ausgangsspannung ab dieser Verstärkung auf über  $5,26\text{V}$  ansteigt. Der Instrumentenverstärker *INA 129* kann die Ausgangssignale maximal bis auf den Betrag der Versorgungsspannung verstärken. Die Versorgungsspannung, die durch Impedanzwandler und Inverter zur Verfügung gestellt wird, liegt bei  $\pm 6,086\text{V}$ . Berücksichtigt man die Verluste der Schaltung, erhält man mit  $U_{\text{Ausgang}} = 5,26\text{V}$  die maximal mögliche Ausgangsspannung des Instrumentenverstärkers. Hier liegt also eine Begrenzung des Ausgangssignals vor.

Dieses Verhalten ist auch für die ermittelten Verstärkungsfaktoren in Abbildung 3.8b zu erkennen. Hier entspricht die aus der Messung berechnete Verstärkung  $G_{\text{gemessen}}$  der aus dem Datenblatt entnommene Verstärkung  $G$  je Vorwiderstand ebenfalls solange der Vorwiderstandswert größer ist, als  $R_G = 2\text{k}\Omega$ . Während der Verstärker in diesem Aufbau eine Begrenzung hat, schlüsselt das Datenblatt deutlich höhere Verstärkungsfaktoren auf.

Beide Graphen zeigen, dass der Verlauf der Ausgangsspannung dem der Verstärkung durch *INA 129* entspricht, solange sich die Werte im Definitionsbereich befinden.

Zur Überprüfung des Verhaltens des Instrumentenverstärkers wird eine zweite Messreihe vorgenommen, in der das Eingangssignal kleiner gewählt ist. Auf diese Weise soll die Überschreitung des Grenzwertes umgangen werden.

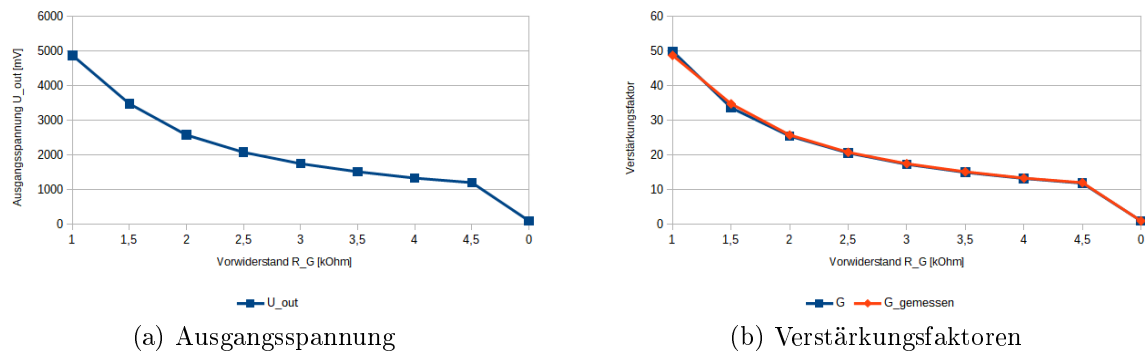


Abbildung 3.9.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei einem konstanten Eingangssignal von  $U_{Eingang} = 100\text{mV}$

Wie in Abbildung 3.9a und 3.9b zu erkennen ist, entspricht der Verlauf der Ausgangsspannung nun ohne Ausnahmen den Verstärkungsfaktoren. Auch diese sind sowohl gemessen, als auch dem Datenblatt entnommen identisch.

#### 3.2.4. Gesamte Schaltung auf dem Steckbrett

Sobald alle Teilabschnitte funktionieren, können sie zusammengesetzt werden und ein erneuter Messdurchlauf überprüft nun die gesamte Schaltung. In der Gesamtschaltung wird die Spannungsversorgung durch die Batterie, den Impedanzwandler und den Inverter gewährleistet und das Ausgangssignal der Wheatstonebrücke *Brückenspannung* wird durch den Instrumentenverstärker verstärkt. Das verstärkte Ausgangssignal *Ausgangsspannung* wird ebenfalls in Abbildung 3.10a erfasst.

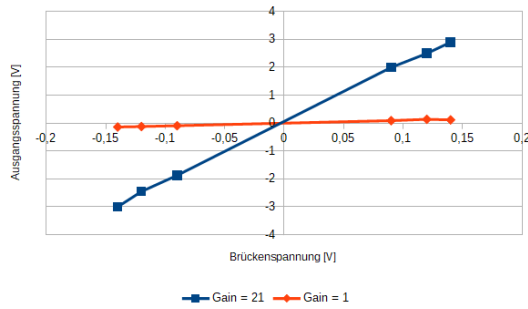
Es erfolgen mehrere Durchläufe mit zwei verschiedenen Verstärkungsfaktoren, welche in Abbildung 3.10b dargestellt sind. Diese hängen vom Vorwiderstand des Instrumentenverstärkers ab. Dabei sind die konstanten Werte dem Datenblatt in Abbildung 3.5b entnommen. Bei  $G = 1$ , also ohne Vorwiderstand ( $R_G = 0$ ) bzw.  $G = 21$  ( $R_G = 2,47\text{k}\Omega$ ) handelt es sich um die tatsächlich gemessene bzw. berechnete Verstärkung.

In den Abbildungen 3.11a und 3.11b für die Gesamtschaltung mit DMS2 zu finden.

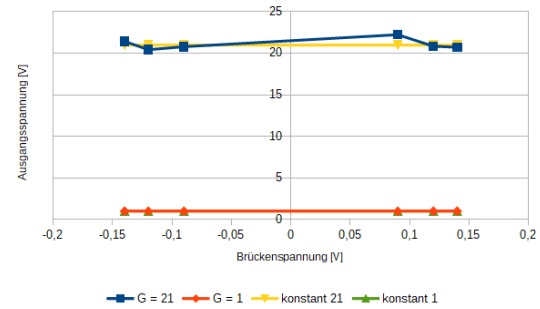
Vergleicht man nun die Ausgangssignale der Wheatstonebrücke mit den jeweils verstärkten Ausgangssignalen, ist zu erkennen, dass beide für die beispielhaft ausgewählten Verstärkungen  $G = 1$  und  $G = 21$  ein sehr ähnliches Verhalten aufweisen. Das verstärkte Ausgangssignal ist direkt proportional zur Brückenspannung und die Abbildungen 3.10b und 3.11b zeigen, mit welchen Faktoren die einzelnen Brückenspannungen verstärkt sind. Dieser Vergleich ist sinnvoll, um zu überprüfen, wie genau der Instrumentenverstärker verstärkt.

Bei den negativen Spannungen handelt es sich um die Messergebnisse bei Dehnung und bei den positiven Spannungen handelt es sich um die Ergebnisse bei Stauchung der DMS. Auch dies entspricht dem erwarteten Verhalten.

Des weiteren ist festzustellen, dass der gemessene Verstärkungsfaktor in etwa dem zu erwartenden entspricht. Dabei ist zu sehen, dass die Abweichungen beim Mess-

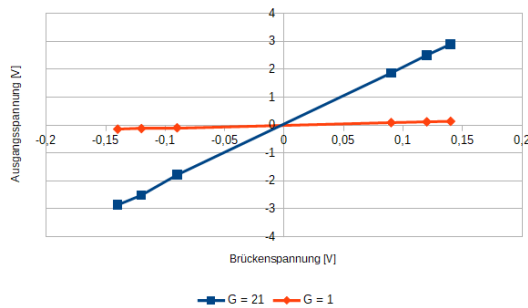


(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen  $G$

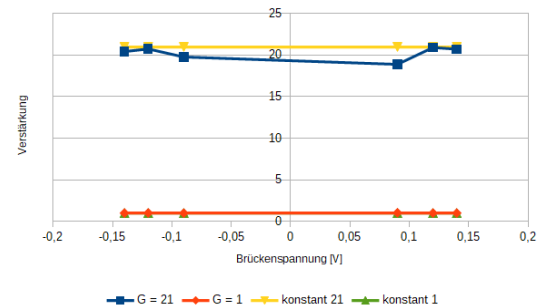


(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 3.10.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS1



(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen  $G$



(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 3.11.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS2

durchlauf mit DMS2 etwas größer sind. Das ist darauf zurückzuführen, dass eine ähnliche Krafteinwirkung bei DMS2 eine stärkere Änderung der Brückenspannung hervorruft und diese schwer konstant zu halten ist. Hier kann es sich um Ablesefehler handeln.

### 3.3. Herstellung der Platine

#### 3.3.1. Schaltung

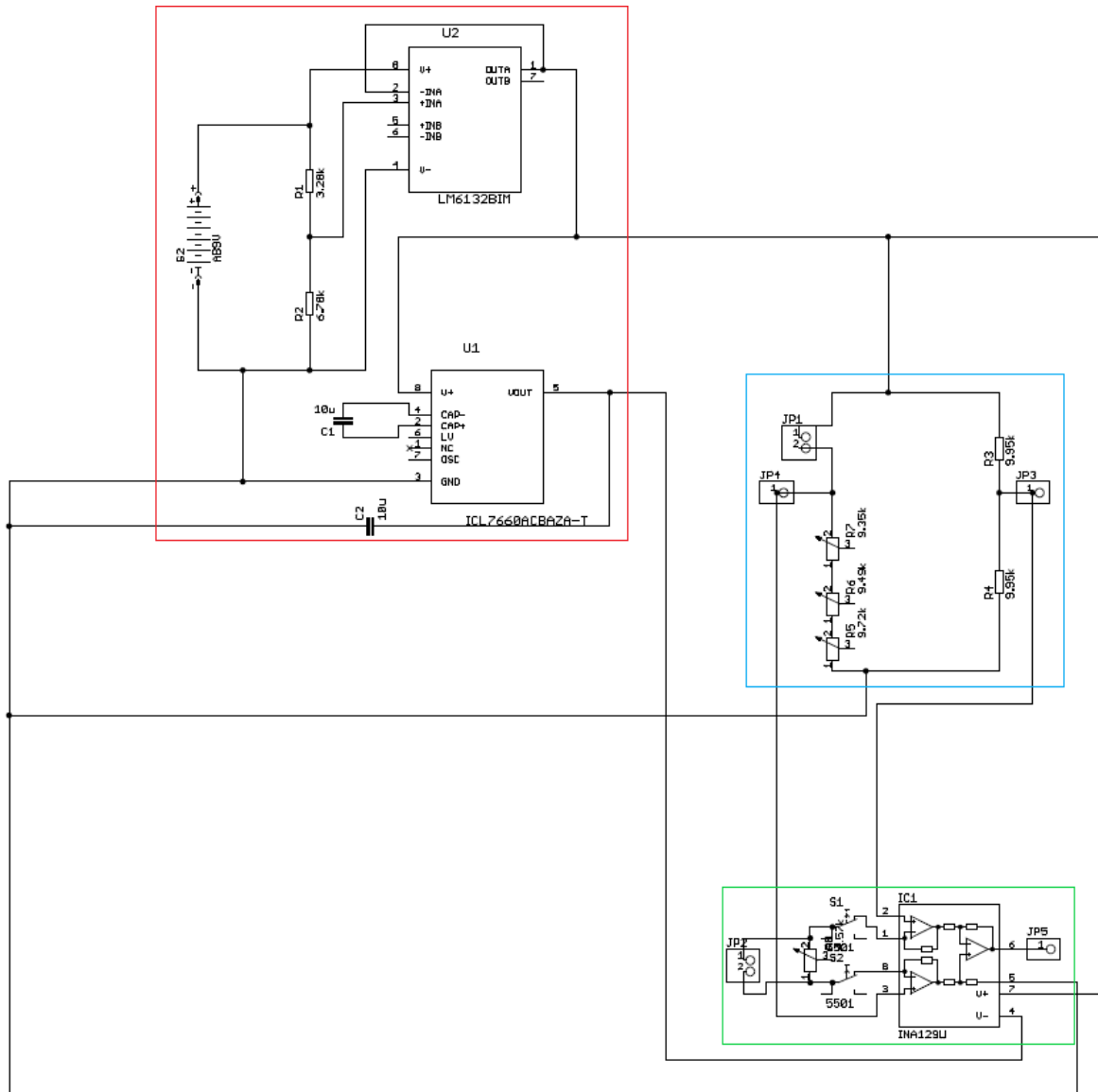


Abbildung 3.12.: Schaltplan bei *EAGLE*

Um die Platine anzufertigen, muss als erstes die gesamte Schaltung nochmal gezeichnet werden. Für diesen Zweck wird das EAD-Programm *EAGLE* verwendet. Die passenden Modelle für den Inverter und den Verstärker sind in der verfügbaren Bibliothek nicht vorhanden und müssen manuell hinzugefügt werden. Die gesamte Schaltung wird danach mit Pins erweitert, um die Messungen mit der Platine einfacher und übersichtlicher zu machen. Damit das Potentiometer des Verstärkers und somit die Verstärkung gemessen werden können, werden Schalter hinzugefügt, um das Bauteil von der gesamten Schaltung trennen zu können.

Aus Abbildung 3.12 folgt die Abbildung 3.13. Die Spannungsversorgung ist in die Abbildung Rot umwickelt, die Wheatstone Brücke ist blau, und den Verstärker grün.

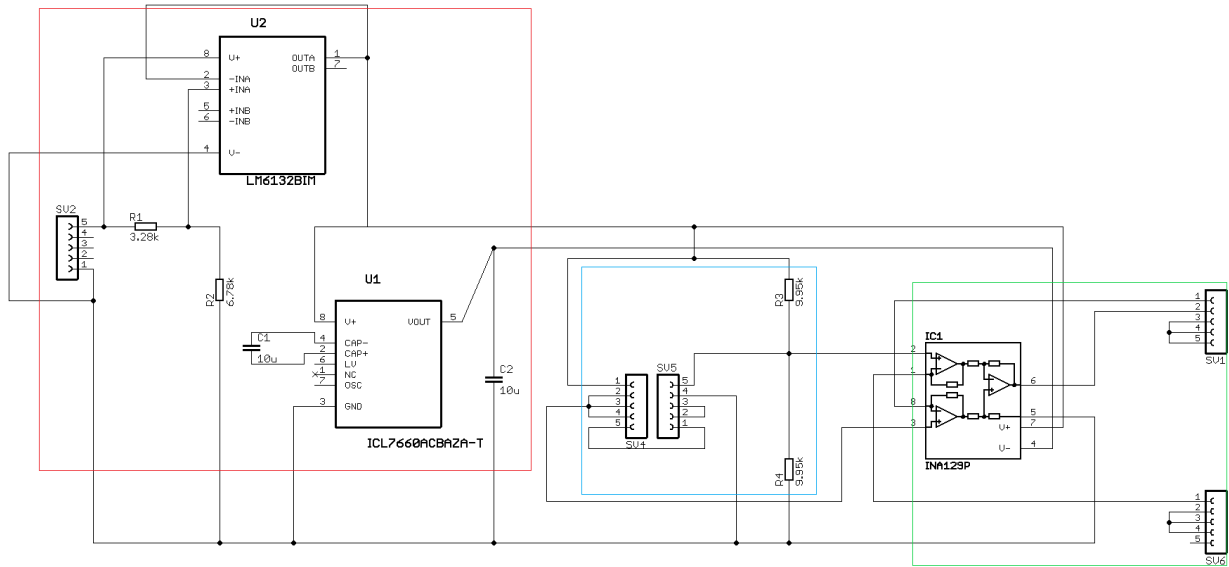


Abbildung 3.13.: Vereinfachtes Schaltplan bei *EAGLE*

### 3.3.2. Board

Als nächstes wird das Platinendesign gestaltet. Dafür wird bei *EAGLE* die Funktion "Board erzeugen" verwendet. Nachdem alle Bauteile in das vorgegebene 90mm x 60mm große Board verteilt wurden, wird die Funktion "Autorouter" angewendet, um die Leiterbahnen und Löt pads möglichst sinnvoll aufzuteilen. Abbildung 3.14 zeigt die 1mm dicken Leiterbahnen und die Löt pads.

Damit die Bauteile am Ende des Herstellungsprozesses auf der nicht beschichteten Seite der Platine angebracht werden können, wird das Platinendesign gespiegelt.

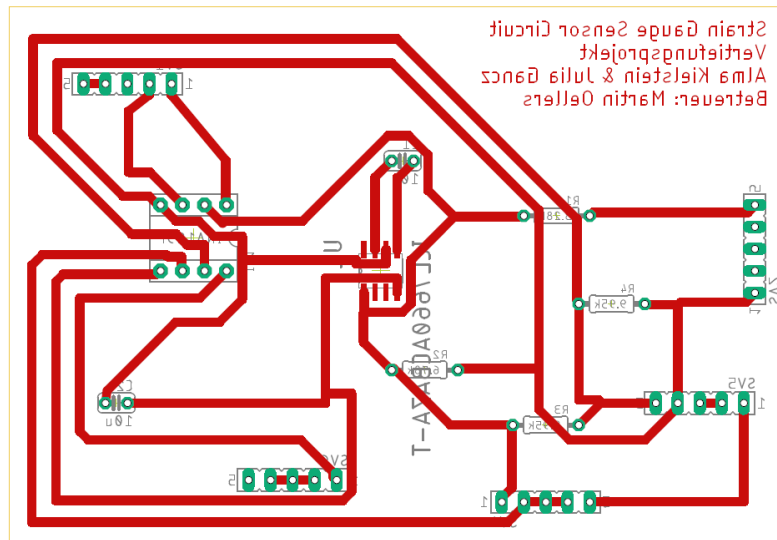


Abbildung 3.14.: Platinenlayout bei *EAGLE*

### 3.3.3. Herstellung

Die Platine besteht aus Kunststoff, der einseitig mit einer dünnen Kupferschicht beschichtet ist. Auf dieser Schicht ist eine lichtempfindliche Fotolackschicht, die durch Ultraviolettbestrahlung löslich wird. Das Platinenlayout wird auf eine Folie gedruckt und als Maske für die Fotolithografie verwendet. Damit gewünschte Abschnitte der Kupferschicht am Ende des Herstellungsprozesses nicht geätzt werden, wird die Maske auf den positiven Fotolack aufgebracht.

Das Substrat wird mit Ultraviolett-Strahlung belichtet und danach mit Kalilauge entwickelt. Somit wird der Fotolack von der bestrahlten Oberflächen entfernt und bleibt dort erhalten, wo auf Grund der Maske nicht belichtet wurde.

Als nächstes werden die freien Kupferflächen mit einer alkalischen Ätzlösung geätzt und die Kupferleiterbahnen entstehen dort, wo der Fotolack die Kupferschicht geschützt hat.

Als letztes wird der verbleibende Fotolack wieder belichtet und entwickelt, um die Kupferleiterbahnen zu befreien.

Abbildung 3.15 zeigt die generellen Herstellungsschritte der Fotolithografie mit positivem Lack.

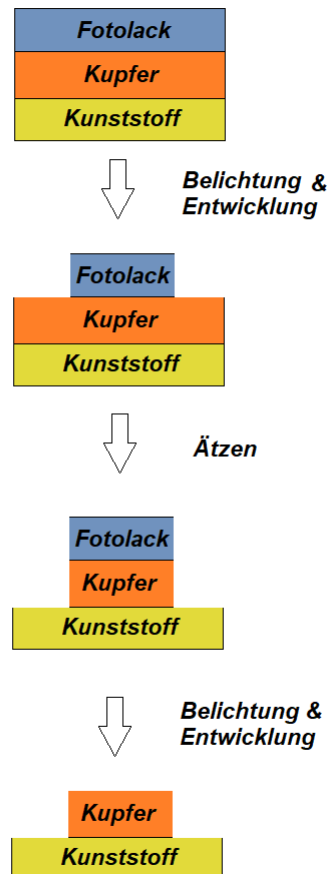


Abbildung 3.15.: Prozess der Fotolithografie für positiven Lack [10]

### 3.3.4. Fertigung der Platine

Nach der Entwicklung der Platine werden Löcher mit  $0,7\text{mm}$  Durchmesser an die Löt pads gebohrt. Dadurch können die Bauteile an die Platine gesteckt werden und festgelötet. An die Pins werden längliche Kabel befestigt, damit Bauteile wie Schalter und Potentiometer auf das Gehäuse festgeklebt werden können und somit während eine Messung direkt verstellbar sind.

Schließlich ist die Platinenherstellung abgeschlossen und nachfolgend wird das Gehäuse angefertigt.

## 3.4. Fertigung des Gehäuses

Die Fertigung des Gehäuses ist ein wichtiger Teil dieser Arbeit. Es schützt die Platine und Bauteile gegen mechanische Belastungen oder oberflächliche Beschädigung. Des weiteren wird die Handhabung vereinfacht, da es einfacher ist, die Dehnungsmessstreifen zu wech-

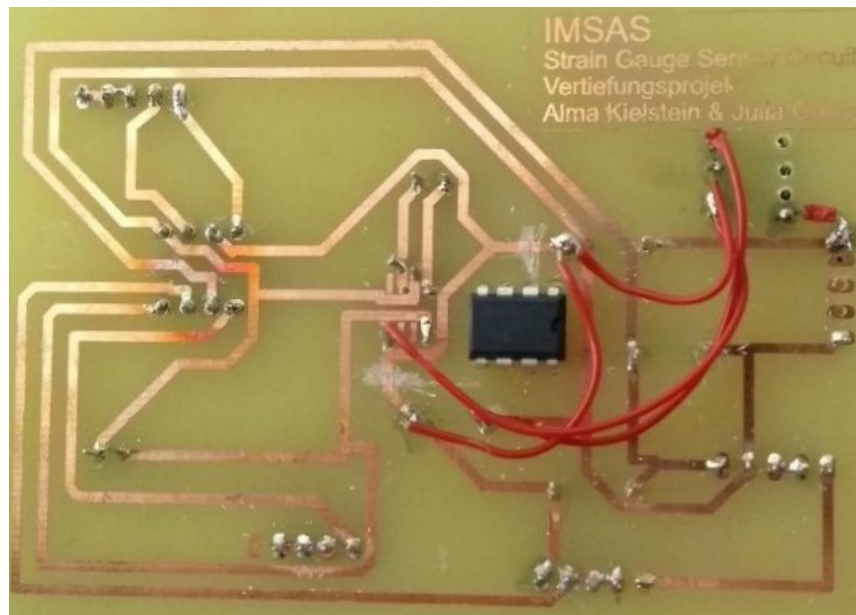


Abbildung 3.16.: fertige Platine

seln, ohne die Platine bedienen zu müssen. Das Gehäuse wird in 2 Hälften aufgeteilt: den Deckel und den Behälter. Beide Teile werden miteinander verschraubt.

Das Gehäuse wird mit dem CAD-Programm *Autodesk Inventor Professional 2019* gezeichnet. Das Außenmaß des Deckels beträgt  $165\text{mm} \times 92\text{mm} \times 5\text{mm}$ . Er beinhaltet Öffnungen für das Arduino LCD Display, die Dehnungsmessstreifen, die 3 Potentiometer aus der Wheatstone Brücke, zwei Schalter und das Potentiometer für den Verstärker. Außerdem werden im Deckel Bohrungen für die Schrauben eingebracht, um beide Gehäuseteile miteinander verbinden zu können. Die Länge und Breite des Behälters sind gleich die des Deckels. Die Höhe des Behälters beträgt  $60\text{mm}$ .

Der 3D-Drucker *Sigma R19* der Firma *BCN3D* wird für den Druck des Gehäuses verwendet. Als Druckmaterial wird der Kunststoff Polyactide (PLA) genutzt, eines der am häufigsten angewendeten Materialien für 3D-Drucker.

Schließlich werden alle Bauteile am Deckel verklebt und beide Gehäusenhälften werden fest miteinander verschraubt. Abschließend folgen Messungen mit verschiedenen Dehnungsmessstreifen.



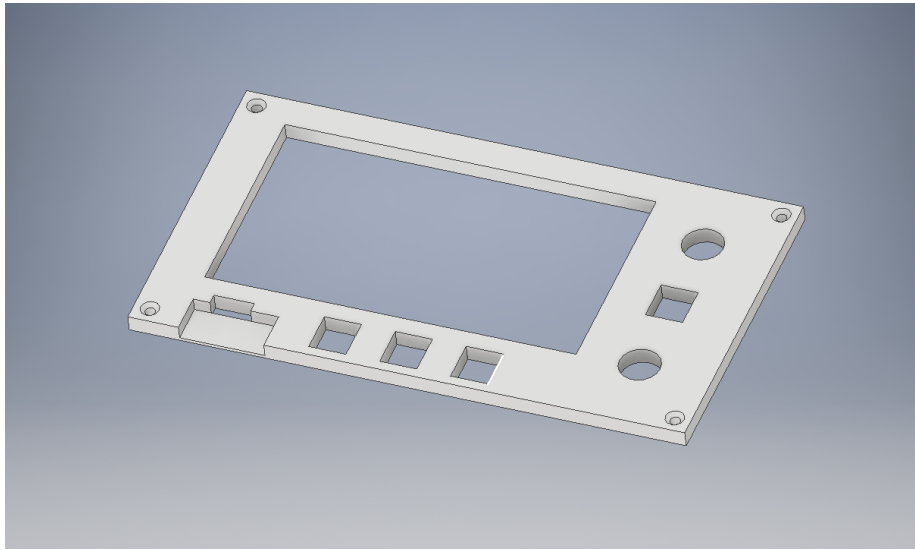


Abbildung 3.17.: 3D Druck des Deckels

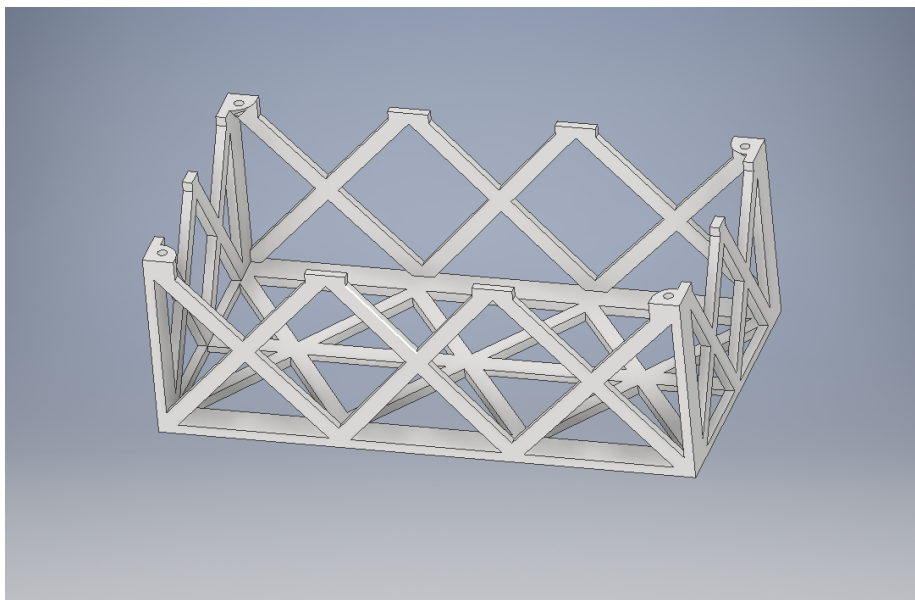


Abbildung 3.18.: 3D Druck des Behälters



## 4. Auswertung

### 4.1. Überprüfung der Platine

Da nun die Entwicklung der Schaltung fertig ist und eine entsprechende Platine angefertigt ist, kann diese ausgewertet werden. Das bedeutet, dass einige Messreihen vorgenommen werden, um die Funktionalität zu überprüfen.

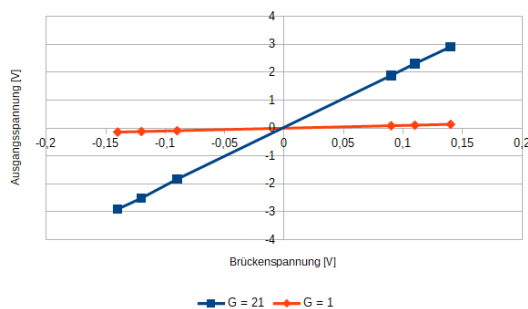
Die Messergebnisse sind in den Graphen 4.1 und 4.2 zusammengefasst.

Wie auch in Abschnitt 3.2.4 sind in den Abbildungen 4.1a und 4.2a die Ausgangsspannungen für die Verstärkungen  $G = 21$  und  $G = 1$  für verschiedene DMS erfasst, während die Graphen 4.1b und 4.2b daneben jeweils die tatsächlich gemessene bzw. berechnete Verstärkung angeben. Auch hier entsprechen die negativen Spannungen der Dehnung und die positiven Spannungen der Stauchung. Die Messreihen sind proportional zueinander und die Ausgangsspannungen verhalten sich, wie auch im vorangegangenen Aufbau mit dem Steckbrett.

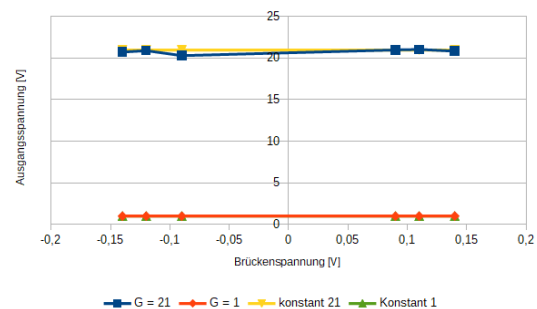
Der Vergleich der Verstärkungsfaktoren weist minimale Abweichungen auf, die allerdings geringer sind, als bei den Messungen mit dem Steckbrett. Dies weist daraufhin, dass die Platine weniger störanfällig ist. Die Abweichungen sind so gering, dass sie vernachlässigt werden können.

Die Schaltung auf der Platine kann also die Brückenspannungen bzw. Eingangssignale der DMS auf bis zu 5V verstärken.

messreihe spiegelt das nicht so toll wider -> noch eine mit anderen faktoren? wenigstens mit 5kOhm?

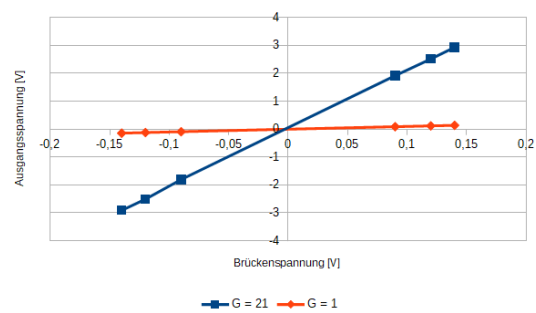


(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen  $G$

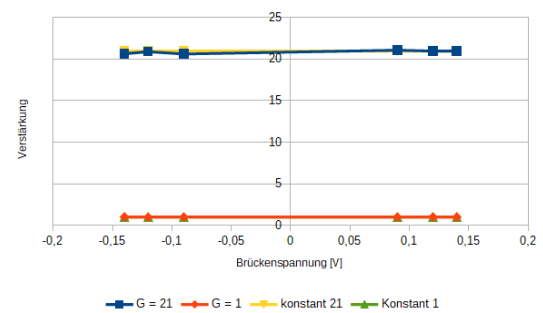


(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 4.1.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS1



(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen  $G$



(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 4.2.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS2

## 5. Fazit



## A. Anhang

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Formänderung einer Leiterbahn der Länge $l$ und dem Durchmesser $D$ unter der Krafteinwirkung $F$ [14] . . . . .	4
2.2. Biegebalken mit aufgedruckten Widerständen und Kontaktierung . . . . .	5
2.3. mäanderförmige Anordnung der Leiterbahnen [17] . . . . .	6
2.4. Brückenspannung eines Biegebalkens in Abhängigkeit zur Zeit bei verschiedenen Kräften [19] . . . . .	7
2.5. Verformung der Sensormembran unter Druckeinwirkung [6] . . . . .	8
2.6. Beispiel für die Anordnung eines DMS in Membranrosetten [6] . . . . .	9
2.7. Verschaltung des Drucksensors (a) ohne und (b) mit Druckanschluss und elektrischer Verbindung . . . . .	9
2.8. Gemessene Brückenspannung in Abhängigkeit des Drucks $p$ [6] . . . . .	10
2.9. Brückenspannung eines Drucksensors bei mehrfacher Belastung [6] . . . . .	11
2.10. Aufbau einer Wheatstonesche Brückenschaltung [19] . . . . .	12
2.11. Klassifizierung von Wheatstone Brücken und die entsprechenden Sensitivitäten [19] . . . . .	13
2.12. einfacher, unbelasteter Spannungsteiler . . . . .	16
2.13. Impedanzwandler . . . . .	17
2.14. Arten der Realisierung von Invertern . . . . .	18
2.15. Funktion von Instrumentenverstärkern . . . . .	19
3.1. Simulation des Impedanzwandlers . . . . .	22
3.2. Simulation des Spannungsteilers und des Inverters bei <i>LT Spice</i> . . . . .	22
3.3. Simulation der Wheatstone Brücke bei <i>LT Spice</i> . . . . .	23
3.4. Simulation der Brückenschaltung . . . . .	24
3.5. Verstärkungsfaktoren im Vergleich . . . . .	25
3.6. LT-Spice Simulation LT1168 . . . . .	26
3.7. gesamte Schaltung auf dem Steckbrett aufgebaut . . . . .	27
3.8. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei einem konstanten Eingangssignal von $U_{Eingang} = 200mV$ . . . . .	29
3.9. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei einem konstanten Eingangssignal von $U_{Eingang} = 100mV$ . . . . .	30
3.10. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS1 . . . . .	31
3.11. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS2 . . . . .	31
3.12. Schaltplan bei <i>EAGLE</i> . . . . .	32
3.13. Vereinfachtes Schaltplan bei <i>EAGLE</i> . . . . .	33
3.14. Platinenlayout bei <i>EAGLE</i> . . . . .	34
3.15. Prozess der Fotolitografie für positiven Lack [10] . . . . .	35
3.16. fertige Platine . . . . .	36
3.17. 3D Druck des Deckels . . . . .	37
3.18. 3D Druck des Behälters . . . . .	37



4.1. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS1 . . . . .	39
4.2. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS2 . . . . .	40

# Tabellenverzeichnis

3.1. Eigenwiderstände der jeweils angeschlossenen Sensoren . . . . .	23
3.2. Messergebnisse der Simulation der Wheatstone Brücke bei <i>LT Spice</i> . . . .	24
3.3. Messergebnisse des Verstärkers LT1168 bei LT Spice . . . . .	26
3.4. Bauteilliste . . . . .	27

# Literaturverzeichnis

- [1] Armin Biere u.a. *Digitaltechnik - eine praxisnahe Einführung*. ger. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer, 2008. ISBN: 3540777296. DOI: [10.1007/978-3-540-77729-8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77729-8). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-77729-8>.
- [2] Joachim Federau. *Operationsverstärker. Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen*. ger. 7., erweiterte und überarbeitete Auflage. Lehrbuch. Federau, Joachim (VerfasserIn). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. 577 S. ISBN: 3658163739. DOI: [10.1007/978-3-658-16373-0](https://doi.org/10.1007/978-3-658-16373-0). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-16373-0>.
- [3] Gert Hagmann. *Grundlagen der Elektrotechnik. Das bewährte Lehrbuch für Studierende der Elektrotechnik und anderer technischer Studiengänge ab 1. Semester ; mit Aufgaben und Lösungen*. ger. 16., durchgesehene und korrigierte Auflage. Elektrotechnik. Wiebelsheim: AULA-Verlag, 2013. 398 S. ISBN: 9783891047798.
- [4] IMSAS. "Introduction to Micro Technology: Dehnungsmessstreifen (DMS)". Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme. Lehrmaterial. Bremen: Universität Bremen.
- [5] Ellen Ivers-Tiffée und Waldemar von Münch. *Werkstoffe der Elektrotechnik. Mit 40 Tabellen*. ger. 10., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Teubner, 2007. ISBN: 9783835100527. DOI: [10.1007/978-3-8351-9088-7](https://doi.org/10.1007/978-3-8351-9088-7). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8351-9088-7>.
- [6] Jennifer Hinz. "Entwicklung und Charakterisierung eines additiv gefertigten Drucksensors". Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme. Bachelorarbeit. Bremen: Universität Bremen, 2017.
- [7] Stefan Keil. *Dehnungsmessstreifen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 978-3-658-13611-6. DOI: [10.1007/978-3-658-13612-3](https://doi.org/10.1007/978-3-658-13612-3).
- [8] Linear Technology. *Low Power, Single Resistor Gain Programmable, Precision Instrumentation Amplifier. LT1168*. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1168fa.pdf> (besucht am 15.04.2019).
- [9] Linear Technology. *Switched Capacitor Voltage Converter. LTC1044/7660*. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt1044.pdf> (besucht am 15.04.2019).
- [10] Chris Mack. *Fundamental Principles of Optical Lithography*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. ISBN: 9780470723876. DOI: [10.1002/9780470723876](https://doi.org/10.1002/9780470723876).
- [11] Walter Michaeli. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. ger. 5. Aufl. München: Hanser, 2006. 240 S. ISBN: 9783446405806. URL: [http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2801691&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2801691&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).
- [12] Renesas. *ICL7660A. Super Voltage Converters*. URL: <https://www.snapeda.com/parts/ICL7660ACBAZA-T/Renesas%20Electronics/datasheet/> (besucht am 15.04.2019).

- [13] Dieter Sautter und Hans Weinerth, Hrsg. *Lexikon Elektronik und Mikroelektronik*. ger. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1993. 1155 S. ISBN: 318401178X.
- [14] Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl und Bernhard Zagar. *Elektrische Messtechnik. Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen ; mit 38 Tabellen und 34 Beispielen*. ger. 11., aktualisierte Auflage. Schrüfer, Elmar (VerfasserIn) Reindl, Leonhard M. (VerfasserIn) Zagar, Bernhard (VerfasserIn). München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2014. 445 S. ISBN: 3446441883.
- [15] Leonhard Stiny, Hrsg. *Passive elektronische Bauelemente*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN: 978-3-658-08651-0. DOI: [10.1007/978-3-658-08652-7](https://doi.org/10.1007/978-3-658-08652-7).
- [16] Texas Instruments. *INA12x Precision, Low-Power Instrumentation Amplifiers*. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina129.pdf> (besucht am 15.04.2019).
- [17] Ulrich Nolt. “Entwicklung und Charakterisierung dehnungsbasierter Kraft- und Momentensensoren für medizinische Anwendungen”. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2013-04-19. URL: <http://publications.rwth-aachen.de/record/229156/files/4667.pdf> (besucht am 13.05.2019).
- [18] Walter Lang. “Elektrische Messtechnik”. IMSAS. Lehrmaterial. Bremen: Universität Bremen, 2017. (Besucht am 23.06.2019).
- [19] Wiebke Gehlken. “Additive Fertigung eines dreidimensionalen Biegebalkens mit piezoresistiver Sensoranordnung”. Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme. Bachelorarbeit. Bremen: Universität Bremen, 2017-09-06. URL: <http://publications.rwth-aachen.de/record/229156> (besucht am 06.05.2019).