

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

22. Juli 2019

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.2. Ziel der Arbeit	1
1.3. Aufbau der Arbeit	2
2. Theoretischer Hintergrund	3
2.1. Dehnmessstreifen	3
2.1.1. Widerstandsänderung	4
2.2. Wheatstone Brücke	5
2.3. Biegebalken	7
2.3.1. Aufbau des Biegebalkens	8
2.3.2. Charakterisierung der Biegebalken	9
2.4. Drucksensoren	10
2.4.1. Aufbau des Drucksensors	12
2.4.2. Charakterisierung der Drucksensoren	13
2.5. Störgrößen	14
2.6. Spannungsversorgung	16
2.6.1. Spannungsteiler	16
2.6.2. Impedanzwandler	17
2.6.3. Inverter	18
2.7. Instrumentenverstärker	19
2.8. Anzeige	20
3. Schaltungsaufbau und Simulation	23
3.1. Simulation der Schaltung	23
3.1.1. Simulation der Spannungsversorgung	23
3.1.2. Simulation der Wheatstone Brücke	24
3.1.3. Simulation des Verstärkers	27
3.1.4. Simulation der gesamten Schaltung	29
3.2. Aufbau der Schaltung auf dem Steckbrett	29
3.2.1. Spannungsversorgung	30
3.2.2. Wheatstonebrücke	31
3.2.3. Verstärker	32
3.2.4. Gesamte Schaltung	33
4. Herstellung und Fertigung	37
4.1. Herstellung der Platine	37
4.1.1. Schaltung	37
4.1.2. Platinenlayout	38
4.1.3. Fertigung der Platine	39
4.2. Fertigung des Gehäuses	40
5. Auswertung	43
5.1. Überprüfung der Platine	43

6. Fazit	45
A. Anhang	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
Literaturverzeichnis	vii

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 wurden. Die Leiterbahnen sind mittels Siebdruck eingebracht. 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 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 fünf Kapiteln. Zunächst werden im Abschnitt [2 Theoretischer Hintergrund](#) Grundkenntnisse erläutert, die wichtig für das Verständnis des Projektes sind. Das darauf folgende Kapitel [3 Schaltungsaufbau und Simulation](#) veranschaulicht die genaue Entwicklung und Dimensionierung der Schaltung. In Kapitel [4 Herstellung und Fertigung](#) ist dokumentiert, wie die Schaltung angefertigt wird. Die Messergebnisse des Aufbaus werden im Abschnitt [5 Auswertung](#) diskutiert. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse ist im Kapitel [6 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 2.3 und 2.4 näher charakterisiert und das Auslesen der Sensoren mittels einer Wheatstoneschen Brückenschaltung wird in Abschnitt 2.2 erläutert. Die Störgrößen, die bei diesem Aufbau auftreten, werden in Kapitel 2.5 beleuchtet. Schließlich werden in Abschnitt 2.6 Bauteile vorgestellt, die zur Konzeption der Spannungsversorgung notwendig sind. Kapitel 2.7 stellt die Funktionsweise vom Instrumentenverstärker dar und Kapitel 2.8 erläutert das Auslesen der Brückenspannung und Verstärkerausgangsspannung mit einem Arduino Uno.

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. Dabei können Größen wie Kräfte, Drücke oder Drehmomente erfasst werden [24].

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 2.2 näher ausgeführt [9].

2.1.1. Widerstandsänderung

Der ohmsche Widerstand eines Leiters ergibt sich aus dem spezifischen Widerstand ρ , der Länge des Leiters l und der Querschnittsfläche A [19]:

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

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 ρ . 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 [23].

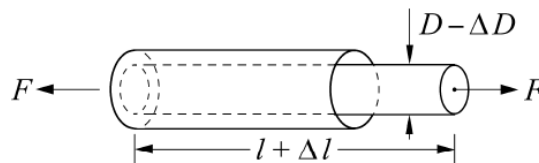


Abbildung 2.1.: Formänderung einer Leiterbahn der Länge l und dem Durchmesser D unter der Krafteinwirkung F [19]

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 [9].

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 [6].

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

Dabei ist der k-Faktor eine Materialkonstante, die die Dehnungsempfindlichkeit eines Materials beschreibt und die Verformung des Querschnitts enthält [25].

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

2.2. 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 [9].

Die Wheatstonesche Brückenschaltung, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, besteht aus zwei parallel geschalteten Spannungsteilern, siehe Abschnitt 2.6.1, 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.

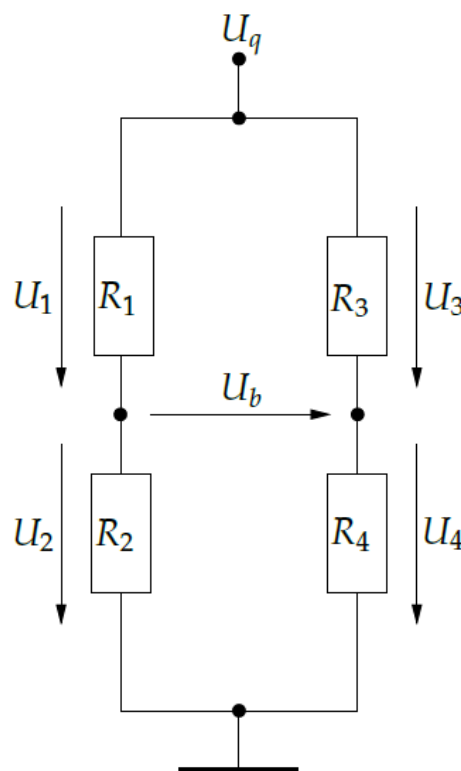


Abbildung 2.2.: Aufbau einer Wheatstonesche Brückenschaltung [25]

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 :

$$U_2 = U_q \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{und} \quad U_4 = U_q \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (2.3)$$

Aufgrund der Kirchhoff'schen Maschengleichung gilt:

$$U_b = U_2 - U_4 \quad (2.4)$$

Es ergibt sich somit die Brückenspannung U_b :

$$U_b = U_q \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = U_q \cdot \left(\frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \right) \quad (2.5)$$

Damit die Brücke abgeglichen ist, muss $U_b = 0$ sein. Aus Gleichung 2.5 folgt:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (2.6)$$

In Abbildung 2.2 sind vier Widerstände zu sehen. In der Regel ist mindestens einer der Widerstände ein Dehnungsmessstreifen. So entstehen drei verschiedenen Klassifizierungen von Wheatstone Brücken: die Vollbrücke, die Halbbrücke (mit oder ohne Temperaturkompensation) und die Viertelbrücke.

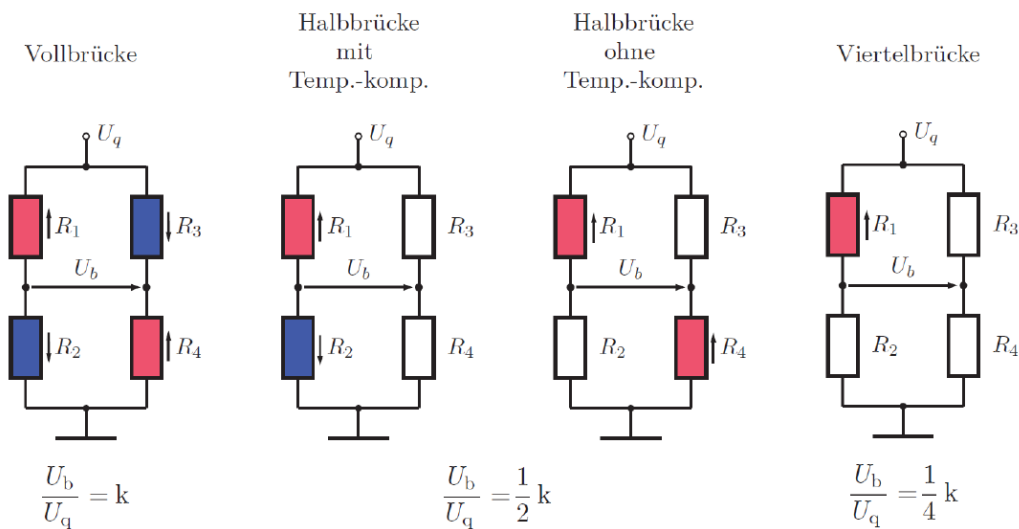


Abbildung 2.3.: Klassifizierung von Wheatstone Brücken und die entsprechenden Sensitivitäten [25]

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 Brückenspannung der Vollbrücke hat eine lineare Kennlinie 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 wird die Brückenspannung nicht von der Temperatur beeinflusst [10].

Halbbrücke

Bei der Halbbrücke werden nur zwei Dehnungsmessstreifen verwendet. Je nach Platzierung der Dehnungsmessstreifen ist es möglich, Temperatureinflüsse auf dem Bauteil auszugleichen. Die Halbbrücke weist die halbe Sensitivität k der Vollbrücke auf [10].

Viertelbrücke

Die Viertelbrücke besteht aus einem aktiven DMS und drei passiven Widerstände. Diese Aufteilung verweist die geringste Sensitivität k . Eine Temperaturkompensation ist in diesen Aufbau nicht möglich. Außerdem besitzt die Viertelbrücke eine nichtlineare Kennlinie der Brückenspannung. Dies kann bei kleinen Widerstandsänderungen allerdings vernachlässigt werden.

2.3. 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 2.4 zu sehen [25].

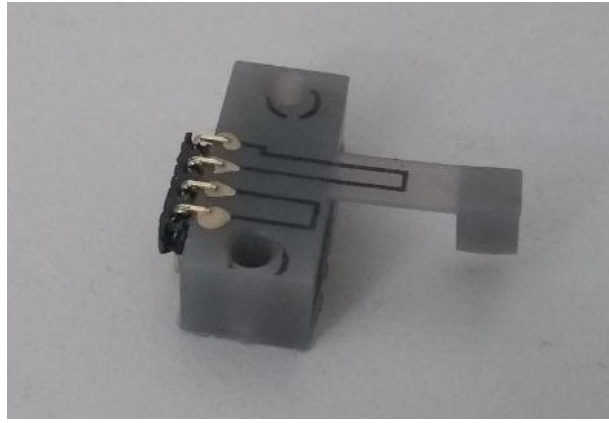


Abbildung 2.4.: Biegebalken mit aufgedruckten Widerständen und Kontaktierung

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 [25].

2.3.1. 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 2.5 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 l_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[6].

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[23].

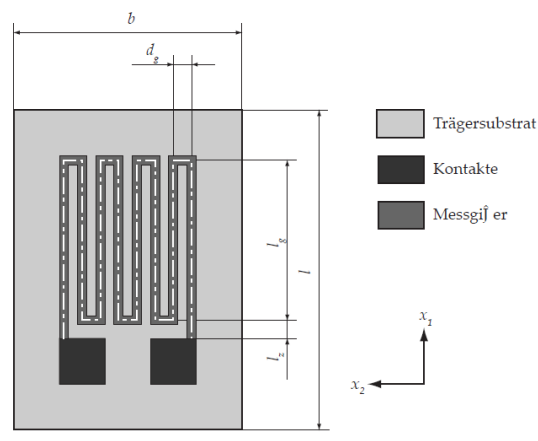


Abbildung 2.5.: mäanderförmige Anordnung der Leiterbahnen [23]

Der Kunststoffkörper inklusive Biegebalken ist 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[25].

2.3.2. Charakterisierung der Biegebalken

Die verwendeten Dehnungsmessstreifen weisen unter Krafteinwirkung ein bestimmtes Verhalten auf. Dieses ist in Abbildung 2.6 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.

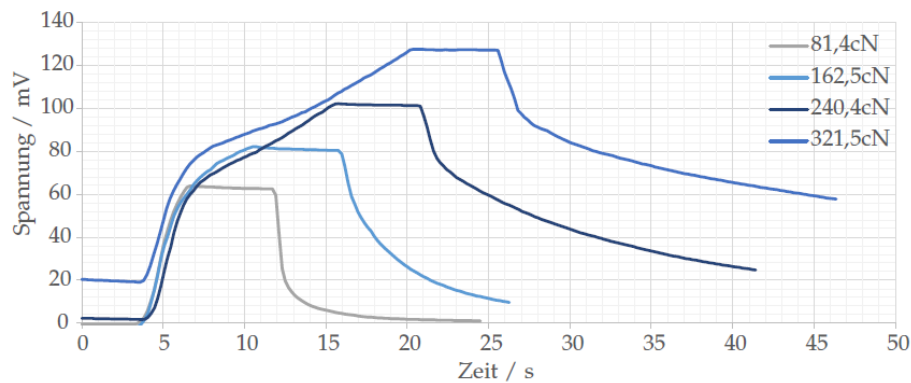


Abbildung 2.6.: Brückenspannung eines Biegebalkens in Abhängigkeit zur Zeit bei verschiedenen Kräften [25]

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 [25].

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

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. Der Biegebalken kann ebenfalls 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.

2.4. Drucksensoren

Drucksensoren werden in sehr vielen verschiedenen Arbeitsbereichen angewendet. Darunter befinden sich beispielsweise die Automobilbranche, die Medizintechnik oder die Automatisierungstechnik. Der Drucksensor reagiert auf Krafteinwirkung durch Auslenkung der eingespannten Membran. Ähnlich den Biegebalken sind die Drucksensoren mittels 3D-Druck hergestellt. Nähere Ausführungen dazu sind in Abschnitt 2.4.1 zu finden.

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

definiert:[2]

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{für} \quad \vec{F} \perp \vec{A} \quad (2.7)$$

Der Drucksensor nimmt den gemessenen Druck über eine Membran auf. Diese Verformung wird durch aufgebrachte elektrische Widerstände schließlich in ein elektrisches Signal umgewandelt. Wie in Abbildung 2.7 zu erkennen ist, bedeutet eine Krafteinwirkung auf die Membran, dass auf der Oberfläche sowohl Dehnung, als auch Stauchung auftreten.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 erläutert, beruht die Widerstandsänderung grundsätzlich sowohl auf der Änderung der geometrischen Maße, als auch auf dem piezoresistiven Effekt, also der Änderung des spezifischen Widerstands. Aufgrund des verwendeten Materials überwiegt für die hier verwendeten Drucksensoren der piezoresistive Effekt verglichen mit dem der Formänderung. Es handelt sich also um einen Drucksensor mit piezoresistiver Sensoranordnung.

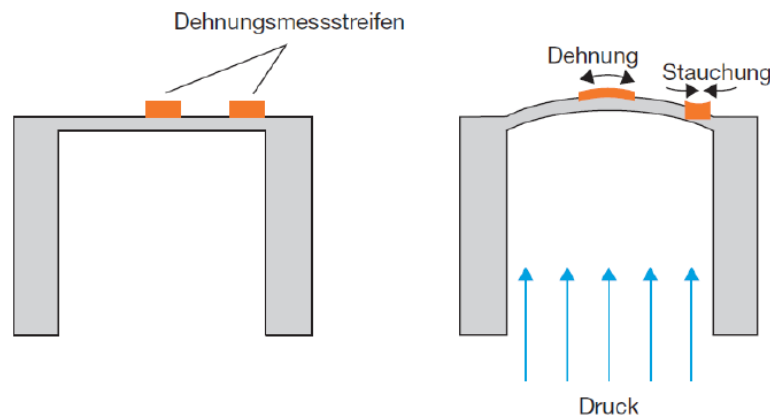


Abbildung 2.7.: Verformung der Sensormembran unter Druckeinwirkung [8]

Da die Verformung auf einer kreisförmigen Membran also nicht einheitlich ist, muss auch die Struktur der DMS so angepasst werden, dass die Verformung dennoch eindeutig erfasst werden kann. Aus diesem Grund werden die Widerstände sowohl an Positionen aufgebracht, die Stauchung erfahren, als auch an Positionen, an denen eine Dehnung wirkt. Um eine möglichst präzise Messung zu erhalten, werden sie zu einer Wheatstoneschen Messbrücke verschaltet. Eine solche Struktur ist für eine runde Membran mit entsprechendem Dehnungsverhalten eine rosettenförmige Anordnung der Leiterbahnen des DMS. Diese Form ist in Abbildung 2.8 dargestellt [8].

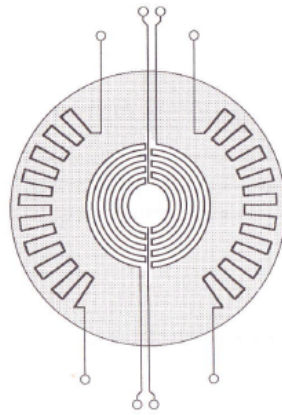


Abbildung 2.8.: Beispiel für die Anordnung eines DMS in Membranrosetten [8]

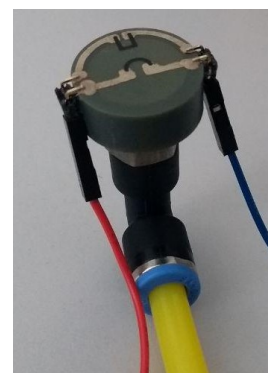
2.4.1. Aufbau des Drucksensors

Wie in den Abbildungen 2.9a bzw. 2.9b zu sehen ist, besteht ein Drucksensor aus einer Membran, deren Dicke deutlich kleiner sein muss, als die Fläche. Auf dieser befinden sich auch die Dehnungsmessstreifen. Die Membran 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. Die Druckzufuhr wird mit einem Druckcontroller umgesetzt, um eine möglichst genaue Messung vornehmen zu können.

Das Verfahren zur Herstellung mittels 3D-Druck ähnelt dem der Biegebalken. Die Dehnungsmessstreifen werden im Siebdruckverfahren in einer Halbbrückenschaltung auf die Oberfläche gedruckt. Die Kontaktierung erfolgt mit Stiftleisten.[8]



(a)



(b)

Abbildung 2.9.: Verschaltung des Drucksensors (a) ohne und (b) mit Druckanschluss und elektrischer Verbindung

2.4.2. 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 wird versucht, den Hystereseeffekt in der Messung 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 verschiedenen Sensoren, die hier aufgeführt sind, weisen eine Membrandicke von $250\ \mu\text{m}$ bis $1000\ \mu\text{m}$ auf. Die Brückenspannung nimmt also bei zunehmender Membrandicke ab. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.10 zu erkennen.

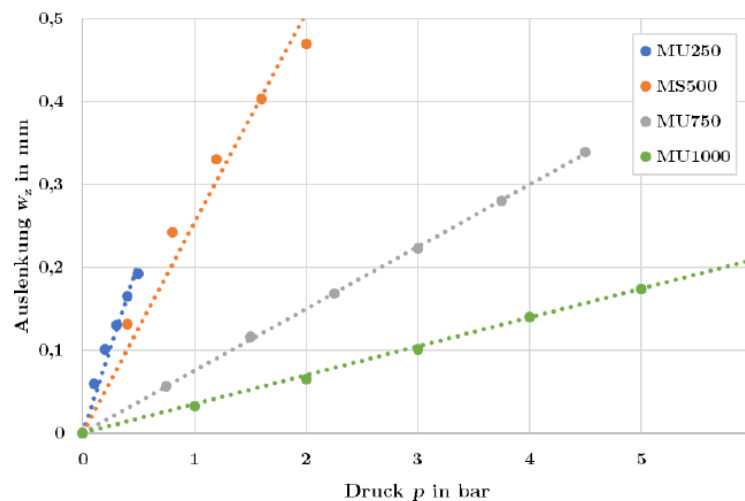


Abbildung 2.10.: Gemessene Brückenspannung in Abhängigkeit des Drucks p [8]

Die Drucksensoren weisen eine sogenannte elastische Hysterese auf. Diese ist in Abbildung 2.11 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 [8].

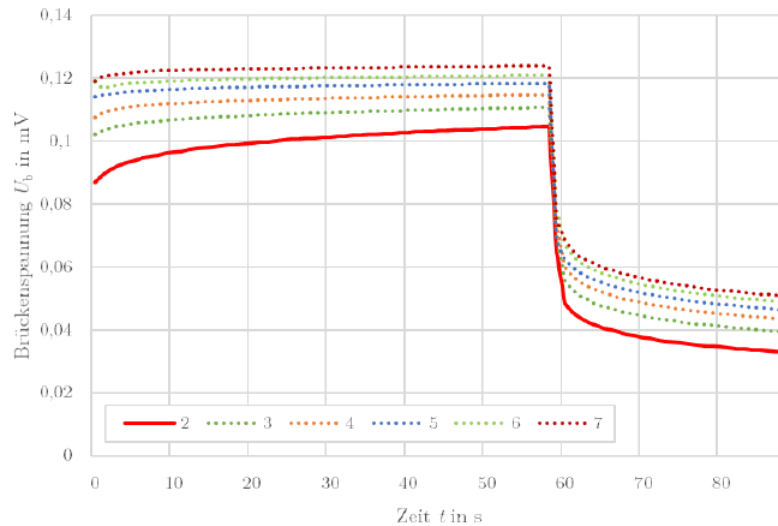


Abbildung 2.11.: Brückenspannung eines Drucksensors bei mehrfacher Belastung [8]

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 differenzierter bewerten zu können.[19]

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. Der thermische Fehler wird gering gehalten, 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 [9].

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. Dabei handelt es sich um entgegengesetzte Kräfte des Messgitters und des Trägerwerkstoffes, welche bei hinreichend langer Dehnung durch Relaxationsvorgänge kleiner werden. Dadurch verringert sich die Federwirkung des Messgitters und der Effekt des Kriechens entsteht. [9]

Zusätzlich entstehen Fehler, wenn ein belasteter Streifen infolge einer nachgebenden Verbindung zwischen Werkstück und DMS wieder in seine Ausgangslage zurückkriecht. Eine sorgfältige Klebung gewährleistet also, dass das Kriechen gering bleibt.

Der Effekt tritt ebenso im verwendeten Kunststoff 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 [14].

Querempfindlichkeit

Die Querempfindlichkeit beschreibt den Effekt, dass sich Widerstandsänderungen eines DMS auch messen lassen, wenn dieser nicht in Längs- sondern in Querrichtung beansprucht wird. Diese Querdehnungen beeinflussen den Widerstand des Dehnungsmessstreifens und können das Messergebnis der Längsdehnung verfälschen. Die Querempfindlichkeit beschreibt also die Empfindlichkeit einer Messeinrichtung, mit der diese auf andere Größen reagiert, als die zu messende. Die Messergebnisse variieren in diesem Fall auch, wenn sich anstelle der Messgröße die Störgrößen ändern.

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. Dieser Unterschied lässt sich mit den verschiedenen Querschnitten der verwendeten Leiterbahnen erklären [23].

Foliendehnungsmessstreifen, wie auch in Abbildung 2.5 (S.9), haben in der Regel deutlich breiter gestaltete Kurven, als Leiterbahnen. Auf diese Weise wird der Einfluss der Kurven, deren Leiterbahn quer zur Dehnung verlaufen, auf die gemessene Widerstandsänderung möglichst klein gehalten.

Da es sich bei den hier verwendeten DMS um Folien-DMS handelt, kann der Effekt der Querempfindlichkeit also vernachlässigt werden [18].

Hysteresese

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 Hysteresese 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 [7].

Bei Dehnungsmessstreifen tritt die mechanische Hysteresese zwischen der Dehnung des Messobjekts und der Dehnung des Messgitters, welche in Form von Widerstandsänderung erfasst wird, auf. Sie ergibt sich als Differenz zwischen den Widerstandsänderungen und steigender oder fallender Dehnung des Objekts. Durch das Wechseln von steigender und fallender Dehnung entsteht ein Dehnungszyklus, welcher dadurch charakterisiert ist, dass die Differenz der Widerstandsänderungen am Dehnungsnullpunkt für aufsteigende und abfallende Dehnung verschieden ist. Des weiteren wird Hysteresese von möglichen im Dehnungsmessstreifen vorhandenen Eigenspannungen beeinflusst, die sich meist nach den ersten Dehnungszyklen abbauen [9].

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 Versorgungsspannung, die aufgeteilt werden soll, ist die der 9V Blockbatterie. Diese entspricht der Spannung U_q in Abbildung 2.12. Die Widerstände R_1 und R_2 werden so dimensioniert, dass die resultierende Spannung U_2 bei etwa 5V liegt.

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

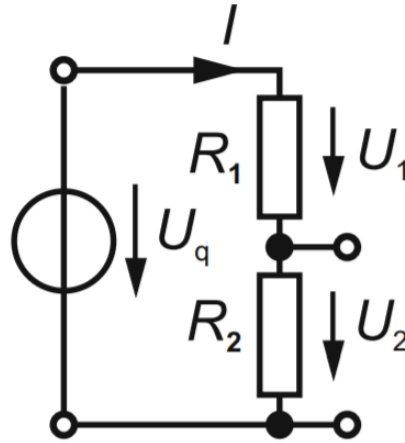


Abbildung 2.12.: einfacher Spannungsteiler [16]

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

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_q und der Ausgangsspannung U_2 in Abhängigkeit von den Teilwiderständen.

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

Durch weiteres Umformen gelangt man zu folgendem Verhältnis [5]:

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

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

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

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

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. Ein Impedanzwandler besteht aus einem Operationsverstärker, bei dem der invertierende Eingang direkt mit dem Ausgang verbunden ist, wie es 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 am Ausgang des Spannungsteilers kaum beeinflusst [4, 19].

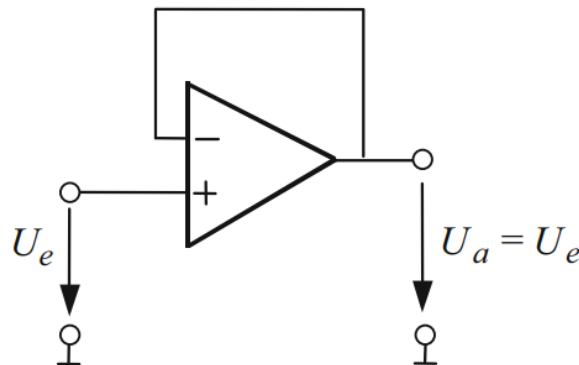


Abbildung 2.13.: Impedanzwandler [15]

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.

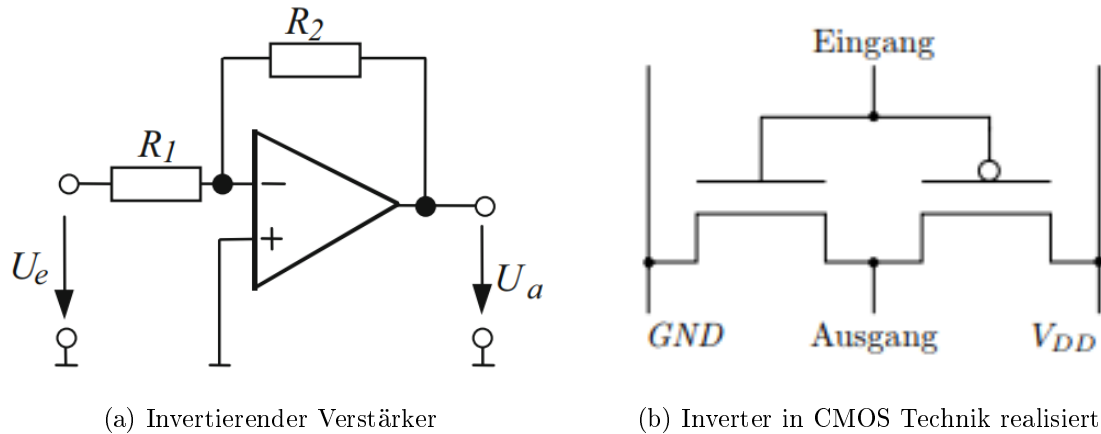
Ein invertierender Verstärker, wie in Abbildung 2.14a zu sehen, verstärkt die Eingangsspannung U_e mit dem Spannungsverstärkungsfaktor $v = -\frac{R_2}{R_1}$. Damit ergibt sich für die Ausgangsspannung U_a folgender Zusammenhang [4]:

$$U_a = v \cdot U_e = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e \quad (2.14)$$

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: $R_1 = R_2$ [19].

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 [3].

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 [17].



(a) Invertierender Verstärker

(b) Inverter in CMOS Technik realisiert

Abbildung 2.14.: Arten der Realisierung von Invertiern [3, 15]

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 2.15 dargestellt ist. Bei einem Instrumentenverstärker handelt es sich um eine besonders präzise Operationsverstärkerschaltung, die meist als integrierter Schaltkreis hergestellt ist. Entsprechend Abbildung 2.15 besteht die Schaltung aus drei Operationsverstärkern [19].

Das vorgeschaltete Potentiometer R_{gain} bzw. R_G regelt den Verstärkungsfaktor. Je kleiner der vorgeschaltete Widerstandswert, desto größer ist die Verstärkung G und andersherum. Dem Datenblatt des Instrumentenverstärkers INA 129 ist zu entnehmen, dass eine Verstärkung von 1 bis 10000 möglich ist [21].

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 Eingängen V_{IN}^- und V_{IN}^+ der ersten beiden OPVs liegen die Ausgangssignale der Wheatstonebrücke an, deren Differenz verstärkt wird.

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.

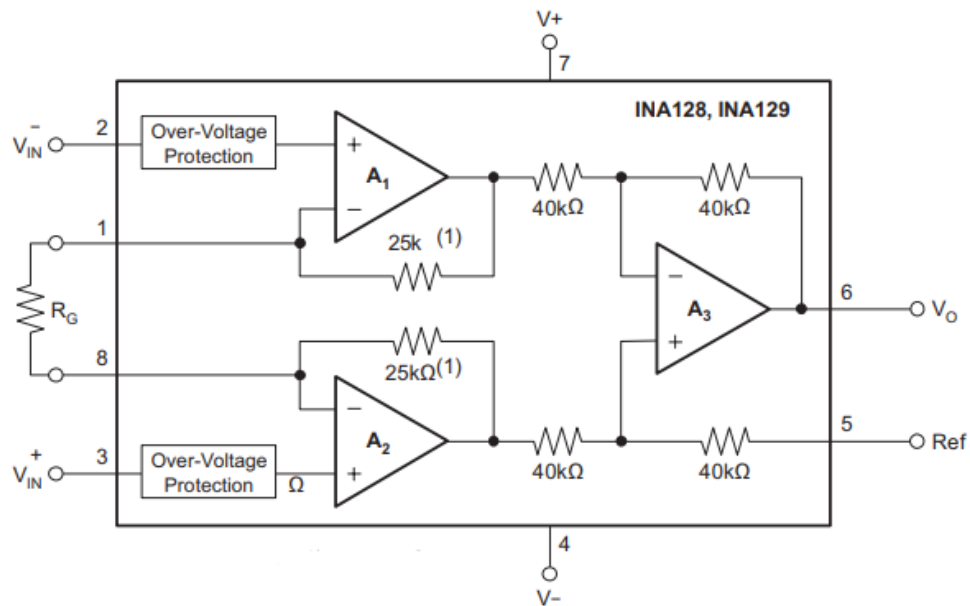


Abbildung 2.15.: Funktion der INA129 Verstärker [21]

2.8. Anzeige

Für die Anzeige der Brückenspannung und die Ausgangsspannung des Verstärkers wird ein Arduino Uno verwendet. Die Hauptkomponente des Bauteils ist der Mikrocontroller ATMEGA 328P. Wie in Abbildung 2.16 zu sehen ist, verfügt der Arduino über 14 digitale Input/Output - Pins und 6 analoge Input Pins. Die Betriebsspannung beträgt 5V und es ist eine direkte Verbindung mit einem Rechner über den USB-Anschluss möglich [1].

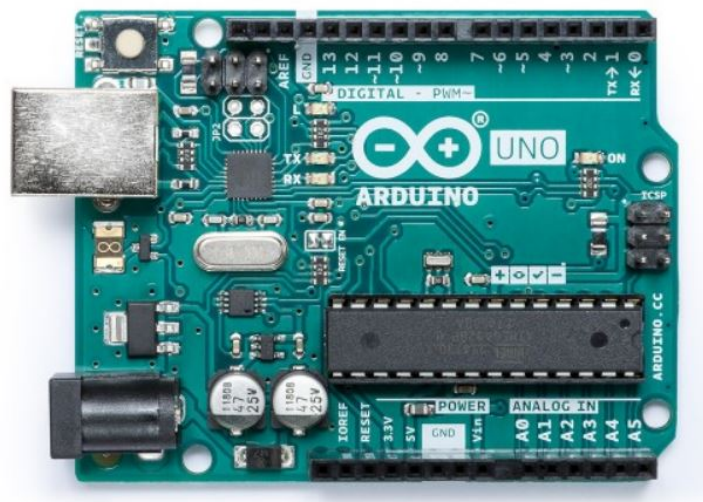


Abbildung 2.16.: Arduino Uno [1]

Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich vier Pins belegt. An die analogen Eingänge A_0 bzw. A_1 werden beide Knotenspannungen der Wheatstone Brücke angeschlossen. Die

Ausgangsspannung des Verstärkers, also die verstärkte Brückenspannung, wird mit dem analogen Pin A_2 verbunden. Damit das Bezugspotential des Arduinos gleich dem Bezugspotential der gesamten Schaltung ist, wird der GND-Anschluss an die Batterie angeschlossen. Der verwendete Arduino-Code befindet sich im Anhang auf Seite i.

3. Schaltungsaufbau und Simulation

3.1. Simulation der Schaltung

Der erste Schritt in der Entwicklung der Schaltung zum Auslesen der Sensoren beinhaltet eine Simulation der Schaltung mit dem Programm *LT Spice*. Die Simulation dient der Überprüfung der Funktionalität der Schaltung. Sie ist die Grundlage für einen direkten Vergleich zwischen theoretischen Messergebnissen unter idealisierten Bedingungen und den tatsächlich gemessenen Ergebnissen. Diese berücksichtigen, dass Störeffekte auf die Bauteile wirken, welche im Abschnitt 2.5 [Störgrößen](#) erläutert sind.

Die Schaltung besteht aus einer Wheatstonebrücke, in der die jeweiligen Sensoren (Biegebalken/Drucksensoren) eingesetzt sind, sowie einer Verstärkerschaltung, die dafür sorgt, dass die Brückenspannung der Wheatstonebrücke 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 erfolgen Schritt für Schritt. Die Simulation der Spannungsversorgung ist in Abschnitt 3.1.1 erläutert, die der Wheatstonebrücke in Abschnitt 3.1.2 und die des Verstärkers ist im Unterkapitel 3.1.3 zu finden. Anschließend wird die Gesamtschaltung in Abschnitt 3.1.4 ebenfalls simuliert.

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 9V Gleichspannungsquelle (Blockbatterie) angeschlossen und die daraus resultierende 6V Spannung wird in den Impedanzwandler eingespeist.

Entsprechend der Bestimmung der Widerstände für den Spannungsteiler in Abschnitt 2.6.1 siehe Gleichung 2.13 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:

$$U_2 = 9V \cdot \frac{6,78k\Omega}{3,28k\Omega + 6,78k\Omega} = 6,066V \quad (3.1)$$

Für die Simulation in *LT Spice* wird der Simulationsbefehl "Transient" verwendet, um eine simulierte Spannungs- und Stromkurve darstellen zu können. Die Simulation startet bei 0s und stoppt bei 10s. Die Abtastrate ist 1/ms. Wie in der Simulation in Abbildung 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.

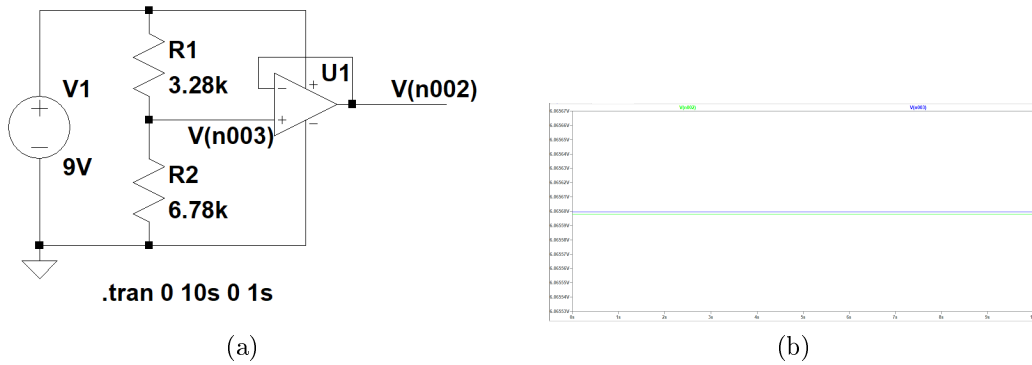


Abbildung 3.1.: Simulation des Impedanzwandlers

Die so erzeugte Spannung 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* [12] der Firma *Analog Devices* verwendet, der vergleichbar ist mit dem Inverter *ICL7660* der Firma *Renesas* [17], welcher im tatsächlichen Aufbau verwendet wird. Der Aufbau dieser Schaltung und die Wahl des Kondensators erfolgen nach Angaben des Herstellers [11].

Wie erwartet [22], lässt sich aus Abbildung 3.2b ablesen, dass die Ausgangsspannung $V(n006)$ mit $-6,066V$ das negative Äquivalent zur Ausgangsspannung des Spannungsteilers bzw. Eingangsspannung des Inverters mit $V(n002) = 6,066V$. Damit ist eine symmetrische Spannungsversorgung für den Instrumentenverstärker gegeben.

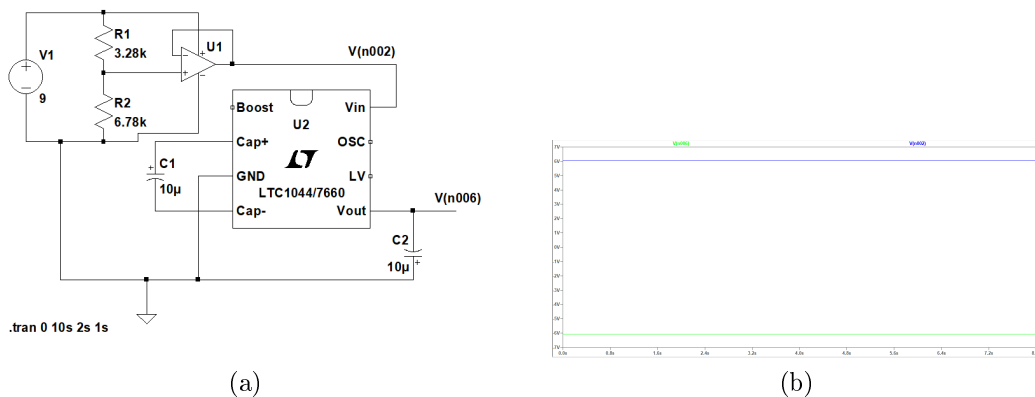


Abbildung 3.2.: Simulation des Spannungsteilers und des Inverters bei *LT Spice*

3.1.2. Simulation der Wheatstone Brücke

Der zweite Teil der Schaltung ist die Wheatstonebrücke. Aufgrund der geringen Anzahl der zur Verfügung gestellten Dehnungsmessstreifen wird in diesem Projekt eine Viertelbrücke

aufgebaut.

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.

Die Widerstände 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.

Tabelle 3.1.: Eigenwiderstände der jeweils angeschlossenen Sensoren

Sensor	Eigenwiderstand
DMS 1	$6,0k\Omega$
DMS 2	$26,5k\Omega$
Drucksensor 1	$0,898k\Omega$

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 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 $1ms$.

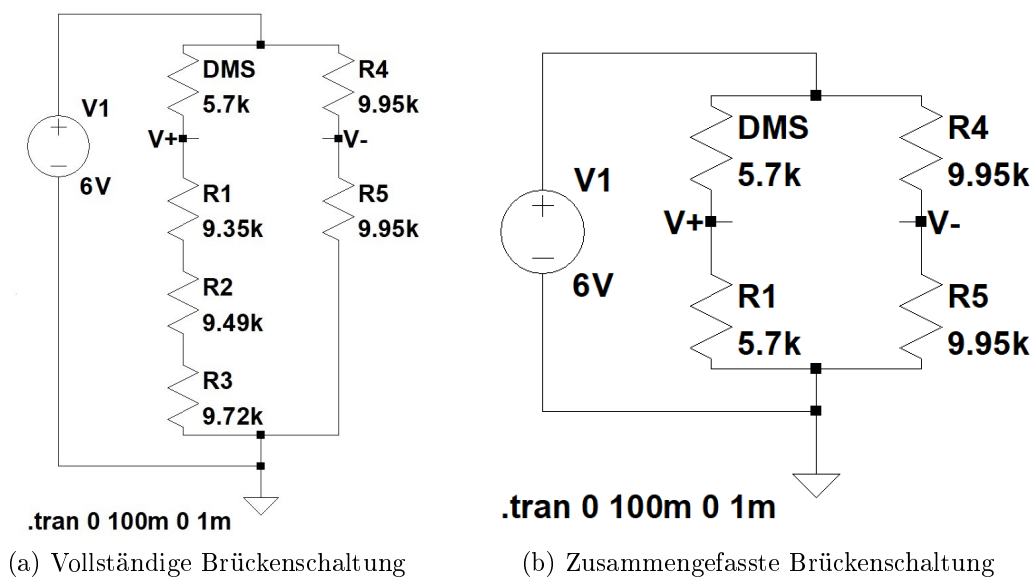


Abbildung 3.3.: Simulation der Wheatstone Brücke bei *LT Spice*

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 2.6 gezeigt wurde, gilt:

$$DMS * R_5 = R_1 * R_4 \quad (3.2)$$

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 Abbildung 3.5 zeigen die entsprechenden Ergebnisse. Wichtig zu beachten sind die unterschiedlichen Brückenspannungen, die entstehen. Entsprechend Abbildung 2.2, den Gleichungen in 2.3 und Gleichung 2.4(S.5,6) folgt für die Brückenspannung ($V_+ - V_-$) in LT Spice:

$$U_b = (V_+) - (V_-) \quad \text{mit} \quad V_+ = V_1 \cdot \frac{R_1}{DMS + R_1} \quad (3.3)$$

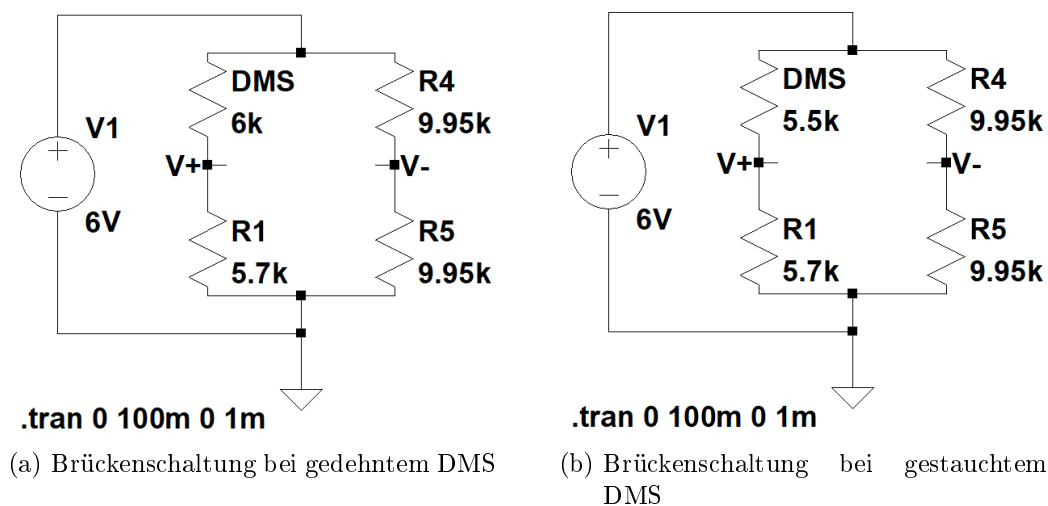


Abbildung 3.4.: Simulation der Brückenschaltung

Mit den folgenden Simulationsergebnissen in Abbildung 3.5 kann das Verhalten der DMS veranschaulicht werden.

Während die Knotenspannung V_- konstant bleibt, spiegelt sich die Änderung des Widerstandswertes in der Knotenspannung V_+ wider. Die Brückenspannung U_b der Wheatstoneschen Brückenschaltung ergibt sich aus der Differenz beider Knotenspannungen, wie auch in Gleichung 3.3 gezeigt ist. Dies ist im Verlauf der Graphen zu erkennen. Sind beide Knotenspannungen V_+ und V_- gleich groß, so befindet sich die Brücke im abgeglichenen Zustand und die Brückenspannung wird zu Null $U_b = 0V$. Wird die linke Knotenspannung V_+ kleiner, so ergibt sich 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.

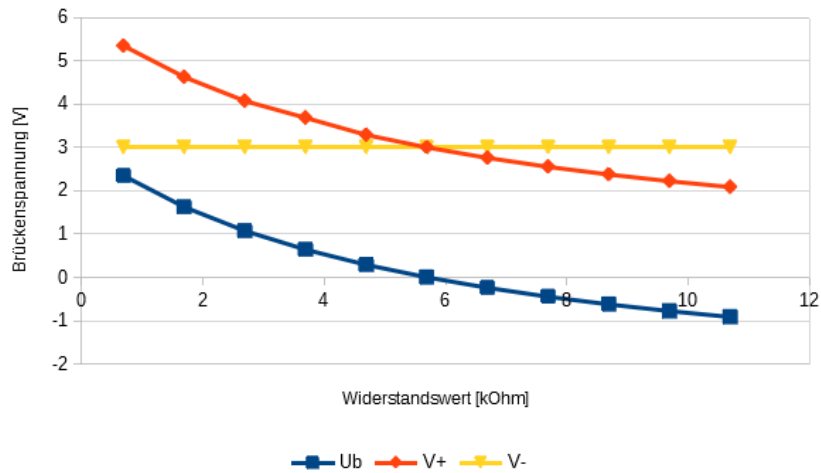


Abbildung 3.5.: Brückenspannung als Differenz der Spannungen V_+ und V_-

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 durchgeführt. Es handelt sich hierbei um den Instrumentenverstärker *LT1168*. Für beide gilt, dass die Verstärkung durch einen vorgeschalteten Widerstand bestimmt wird. Den Datenblättern [21] und [11] ist zu entnehmen, dass die Verstärkung G bei gleichen vorgeschalteten Widerständen für beide Verstärker identisch ist. 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.

Wie bereits in den vorangegangenen Simulationen definiert, startet auch hier der Durchlauf bei $0s$ und stoppt bei $100ms$. Die Abtastrate beträgt $1ms$. In diesem Fall sind in der Schaltung mehrere Spannungsquellen gewählt, um die Schaltung, wie in Abbildung 3.6a, 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 simuliert, 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.

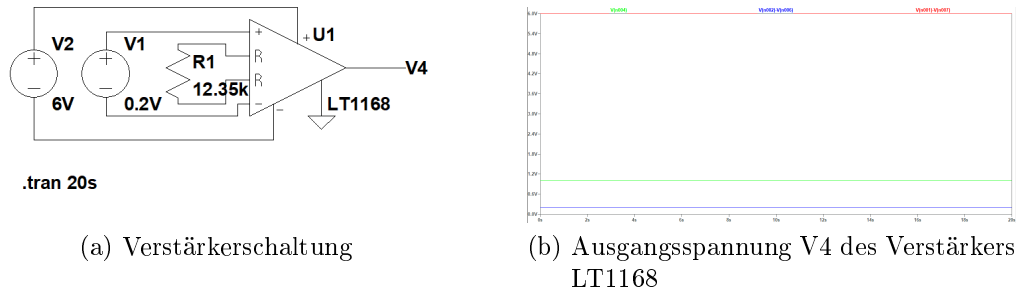


Abbildung 3.6.: LT-Spice Simulation LT1168

Die Werte des Eingangssignals für den Verstärker können in *LT-Spice* manuell geändert werden. Diese Spannungsänderung entspricht der Spannungsausgabe 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 sich um das Ausgangssignal des Verstärkers und G ist der Verstärkungsfaktor, der dem Datenblatt [11] entnommen ist.

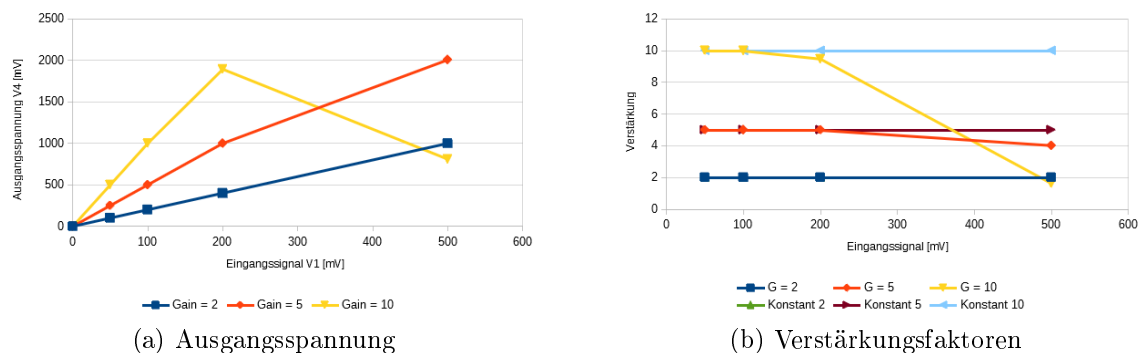
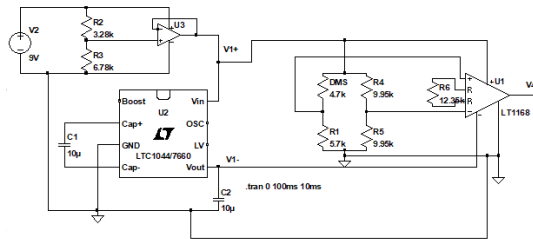


Abbildung 3.7.: Spannungsverstärkung mit *LT1168* bei LT Spice

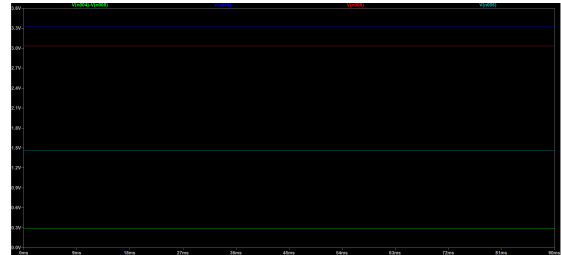
Wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist, zeigen die Ergebnisse der Simulation, wie die Ausgangsspannung V_4 und der Verstärkungsfaktor G zusammenhängen. Die jeweilige Ausgangsspannung V_4 entspricht der Eingangsspannung V_1 multipliziert mit dem Verstärkungsfaktor G . Ausnahmen sind in Abbildung 3.7a zu erkennen, sobald die Ausgangsspannung auf über 2V verstärkt werden soll. Verdeutlicht ist die Abweichung des Verstärkungsfaktors in Abbildung 3.7b. 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 Spannungsversorgung, Wheatstonebrücke und Verstärkung aus den Unterkapiteln 3.1.1 bis 3.1.3 nun zusammengefügt. Somit ist gewährleistet, dass alle einzelnen Schaltungsabschnitte tatsächlich funktionieren und nun wird das Gesamtergebnis geprüft.



(a) Gesamtschaltung



(b) Ausgangsspannungen der Gesamtschaltung

Abbildung 3.8.: LT-Spice Simulation der komplette Schaltung

In Abbildung 3.8b stellt die Spannung $V(n004) - V(n008)$ die Brückenspannung (in dem Beispiel ist diese $291.616mV$) dar. Die Spannung $V(n006)$ zeigt die Ausgangsspannung der gesamten Schaltung, also die bereits verstärkte Ausgangsspannung. Da der Widerstand $R = 12.35k\Omega$ einem Verstärkungsfaktor von $G = 5$ entspricht, sollte am Ausgang eine Spannung von $V = 1,458V$. Diese stimmt mit $V(n006)$ überein. Somit ist die Simulation der Schaltung abgeschlossen.

3.2. Aufbau der Schaltung auf dem Steckbrett

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 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 3.9 zu finden.

Alle hierfür benötigten Bauteile sind in der folgenden Tabelle 3.2 zusammenfassend aufgelistet:

Bauteil	Anzahl	Bezeichnung/Wert	Schaltungsbereich
Batterie	1	9V	
Impedanzwandler	1	<i>LM6132</i>	
Inverter	1	<i>ICL7660A</i>	
Instrumentenverstärker	1	<i>INA129</i>	
Potentiometer	3	0 – 10k Ω	Wheatstonebrücke
Potentiometer	1	0 – 5k Ω	Instrumentenverstärker
Kondensator	1	10 μF	Inverter
Widerstand	1	3.28k Ω	Spannungsteiler
Widerstand	1	6.78k Ω	Spannungsteiler
Widerstand	2	9.95k Ω	Wheatstonebrücke

Tabelle 3.2.: Bauteilliste

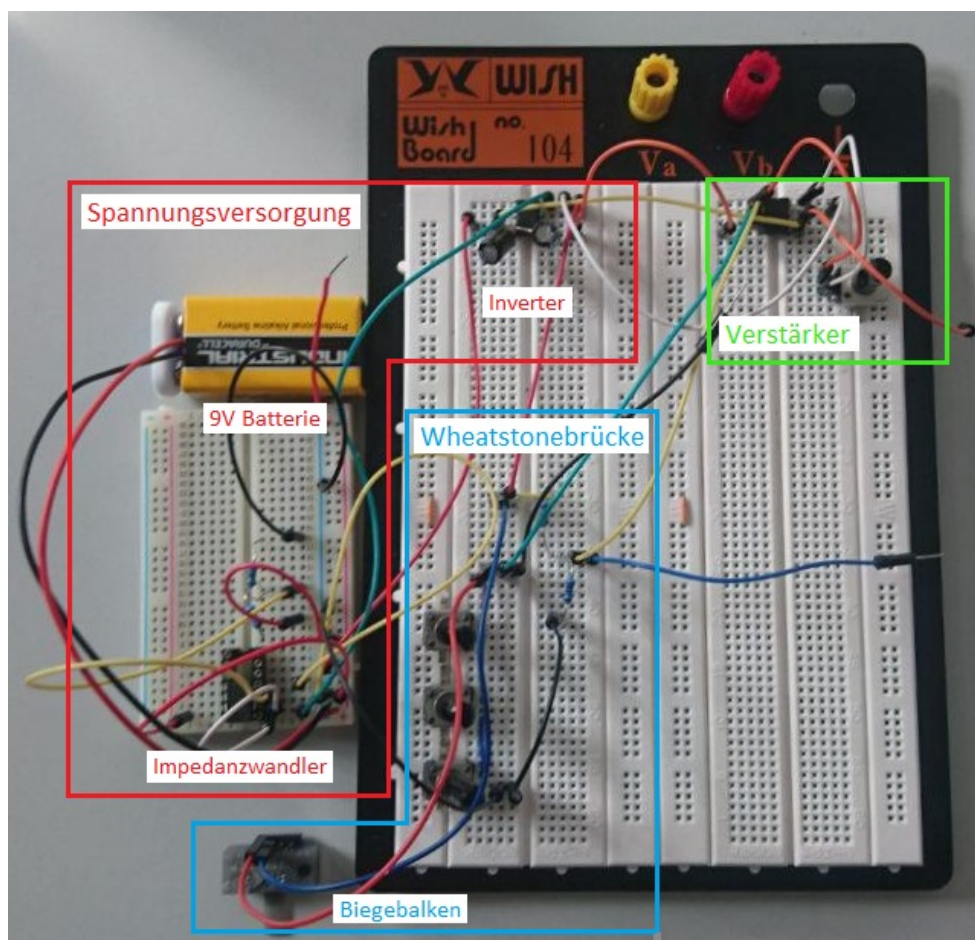


Abbildung 3.9.: gesamte Schaltung auf dem Steckbrett aufgebaut

3.2.1. Spannungsversorgung

Wie bereits in Abschnitt [2.6 Spannungsversorgung](#) beschrieben, wird die Spannungsversorgung mittels 9V Blockbatterie, Impedanzwandler und Inverter realisiert. Diese sind in der

Übersicht der Gesamtschaltung rot 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 S.17) betragen $U_1 = 2,95V$ und $U_2 = 6,09V$. Die gewünschten 6V für U_2 werden realisiert, der Spannungsteiler kann also so aufgebaut bleiben.

Die Ausgangsspannung U_2 des Spannungsteilers wird mit dem nicht-invertierenden Eingang $+INA$ des Impedanzwandlers *LM6132* verbunden. Die Versorgungsspannung für den Impedanzwandler wird direkt aus der Batterie bezogen und die gemessene Ausgangsspannung beträgt $OUTA = 6,09V$. Die benötigte Spannung bleibt also erhalten und kann im folgenden auch belastet werden.

Um die Spannung zu invertieren, wird die Ausgangsspannung $OUTA$ des Impedanzwandlers mit dem positiven Eingang des Inverters verbunden. Die gemessene Ausgangsspannung ergibt sich zu $V_{OUT} = -6,09V$.

Mit den Spannungen $OUTA = 6,06V$ und $V_{OUT} = -6,09V$ erhalten wir also die für den Rest der Schaltung benötigte Versorgungsspannung.

3.2.2. Wheatstonebrücke

Die Wheatstonebrücke und der eingefügte Sensor, in diesem Fall ein Biegebalken, sind in der Abbildung 3.9 blau 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 jeweils Biegebalken1 und Biegebalken2 in der Wheatstonebrücke eingesetzt. Zunächst wird die Brückenschaltung abgeglichen, solange der Sensor unbelastet ist. Dabei wird der Wert der Potentiometer in der Brückenschaltung so weit verändert, bis die Brückenspannung so gut wie möglich an 0V angenähert ist. Sobald die Brückenspannung möglichst gering ist, werden die Biegebalken 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 Biegebalken werden die maximalen und minimalen Brückenspannungen erfasst und in Tabelle 3.3 dokumentiert, um abschätzen zu können, in welcher Größenordnung sie auftreten wird. Auf dieser Grundlage kann die notwendige Verstärkung ermittelt werden.

Tabelle 3.3.: maximale und minimale Brückenspannung der Sensoren

	Brückenspannung [mV] bei Dehnung	Brückenspannung [mV] bei Stauchung
Biegebalken 1	-250	200
Biegebalken 2	-520	250
Drucksensor	-120	0

3.2.3. Verstärker

Der Verstärker *INA 129* wird ebenfalls auf dem Steckbrett aufgebaut und überprüft. In Abbildung 3.9 (S.30) entspricht dies dem grün markierten Teil der Schaltung. Um die Funktion des Instrumentenverstärkers zu testen, wird ein konstantes Eingangssignal $U = 200\text{mV}$ eingespeist. Durch das Einstellen verschiedener Vorwiderstände mit Hilfe des Potentiometers wird der Verstärkungsfaktor G erfasst. Um die Fehlerquellen möglichst gering zu halten, wird das Eingangssignal auch hier zunächst mit dem Netzteil generiert. Es wird die Ausgangsspannung des Verstärkers erfasst. Diese ist in Abbildung 3.10a abgebildet. Auf Grundlage der gemessenen Ausgangsspannung wird die Verstärkung berechnet. Diese ist im Vergleich mit den im Datenblatt festgeschriebenen Verstärkungsfaktoren je nach Vorwiderstand in Abbildung 3.10b aufgetragen. Je kleiner der Vorwiderstand des Verstärkers gewählt ist, desto größer ist die Verstärkung. Ist kein Vorwiderstand angeschlossen, so wirkt keine Verstärkung ($G = 1$).

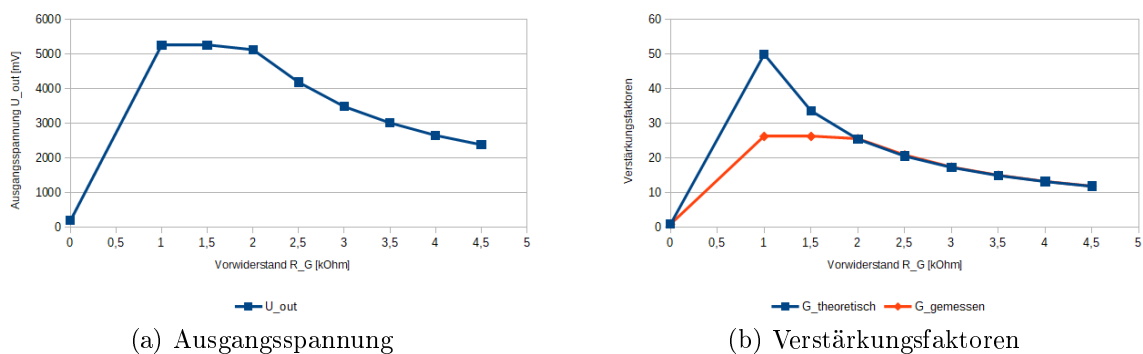


Abbildung 3.10.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei einem konstanten Eingangssignal von $U_{\text{Eingang}} = 200\text{mV}$

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 $G = 1$. Dies erklärt den Sprung des Graphen für die Werte $R_G = 0\text{ k}\Omega$ und $R_G = 1\text{ k}\Omega$. Weitere Abweichungen treten auf, sobald die Verstärkung auf 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 3.10b zu erkennen. Hier entspricht die aus der Messung berechnete Verstärkung G_{gemessen} der aus dem Datenblatt [21] entnommenen 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.

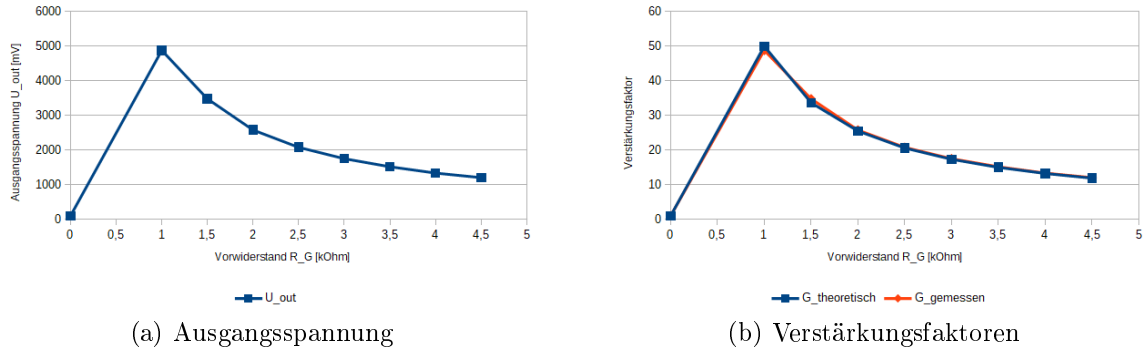


Abbildung 3.11.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei einem konstanten Eingangssignal von $U_{Eingang} = 100\text{mV}$

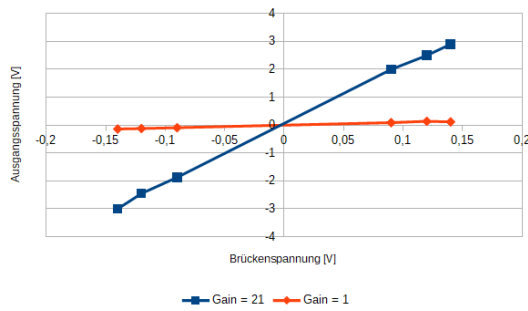
Wie in Abbildung 3.11a und 3.11b zu erkennen ist, entspricht der Verlauf der Ausgangsspannung nun ohne Ausnahmen den Verstärkungsfaktoren. Auch diese sind sowohl gemessen, als auch dem Datenblatt entnommen identisch.

3.2.4. Gesamte Schaltung

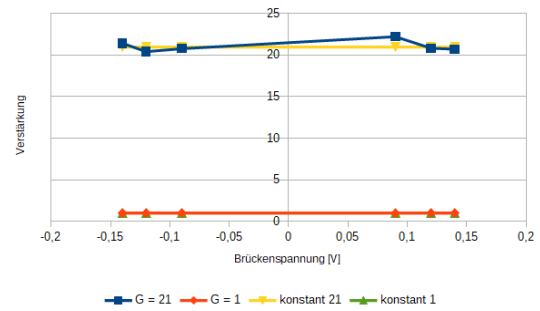
Sobald alle Teilabschnitte funktionieren, können sie zusammengesetzt werden und ein erneuter Messdurchlauf überprüft nun die gesamte Schaltung. In der Gesamtschaltung wird die Spannungsversorgung durch die Batterie, den Impedanzwandler und den Inverter gewährleistet und das Ausgangssignal der Wheatstonebrücke *Brückenspannung* wird durch den Instrumentenverstärker verstärkt. Das verstärkte Ausgangssignal für Biegebalken 1 *Ausgangsspannung* wird in Abbildung 3.12a erfasst.

Es erfolgen mehrere Durchläufe mit zwei verschiedenen Verstärkungsfaktoren, welche in Abbildung 3.12b dargestellt sind. Diese hängen vom Vorwiderstand des Instrumentenverstärkers ab. Dabei sind die konstanten Werte dem Datenblatt [21] 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 Abbildung 3.13 sind die Ergebnisse für Biegebalken 2 zu finden und in Abbildung 3.14 die für den Drucksensor.

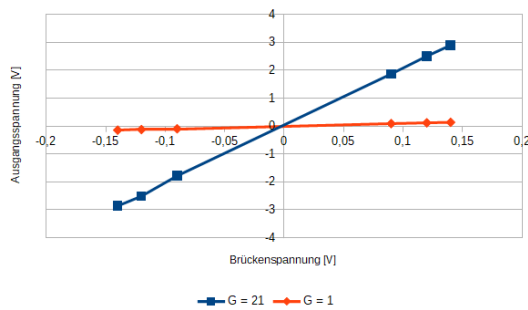


(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen G

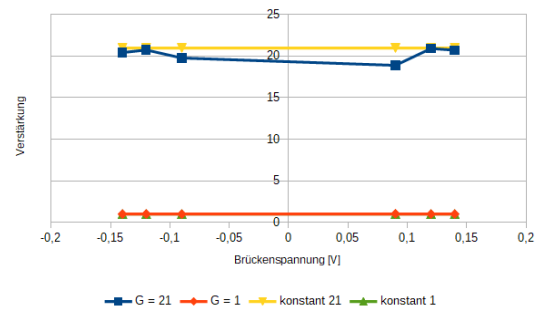


(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 3.12.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von Biegebalken 1

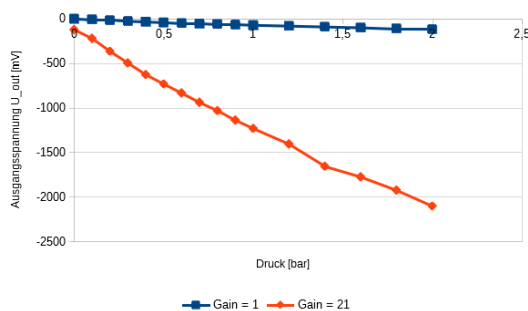


(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen G

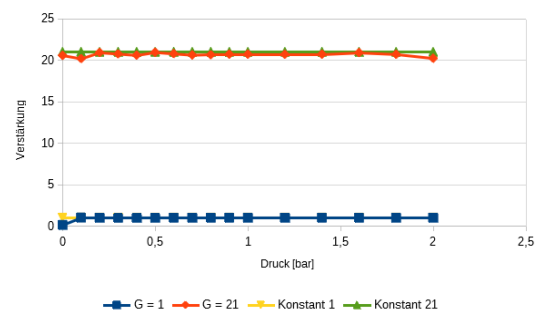


(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 3.13.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von Biegebalken 2



(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen G



(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 3.14.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von Biegebalken2

Vergleicht man nun die Ausgangssignale der Wheatstonebrücke jeweils mit den Ausgangssignalen des Verstärkers, 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. Die Abbildungen [3.12b](#), [3.13b](#) und [3.14b](#) zeigen, mit welchen Faktoren die einzelnen Brückenspannungen verstärkt sind. Dieser Vergleich ist sinnvoll, um zu überprüfen, wie genau der Instrumentenverstärker verstärkt.

Dabei ist festzustellen, dass der gemessene Verstärkungsfaktor in etwa dem zu erwartenden entspricht. Es ist zu sehen, dass die Abweichungen beim Messdurchlauf mit Biegebalken 2 etwas größer sind. Das ist darauf zurückzuführen, dass eine ähnliche Krafteinwirkung bei Biegebalken 2 eine stärkere Änderung der Brückenspannung hervorruft und diese schwer konstant zu halten ist. Hier kann es sich um Ablesefehler handeln. Für den Drucksensor hingegen weist der Vergleich der Verstärkungsfaktoren nur sehr geringe Abweichungen auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der ausgeübte Druck mittels eines Druckcontrollers erzeugt wird. Auf diese Weise ist es möglich, genauer zu arbeiten als bei der mechanischen Auslenkung eines Biegebalken.

Bei den negativen Spannungen in Abbildung [3.12a](#) und [3.13a](#) handelt es sich um die Messergebnisse bei Dehnung und bei den positiven Spannungen handelt es sich um die Ergebnisse bei Stauchung der Biegebalken. Auch dies entspricht dem erwarteten Verhalten der Biegebalken. Die Drucksensoren weisen eine negative Spannung auf, da die Membran nur von einer Seite zu belastet wird. Dies entspricht einer Dehnung und ist somit negativ.

4. Herstellung und Fertigung

4.1. Herstellung der Platine

4.1.1. Schaltung

Um die Platine anzufertigen, muss als erstes die gesamte Schaltung gezeichnet werden. Für diesen Zweck wird das 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 Schaltung wird anschließend 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.

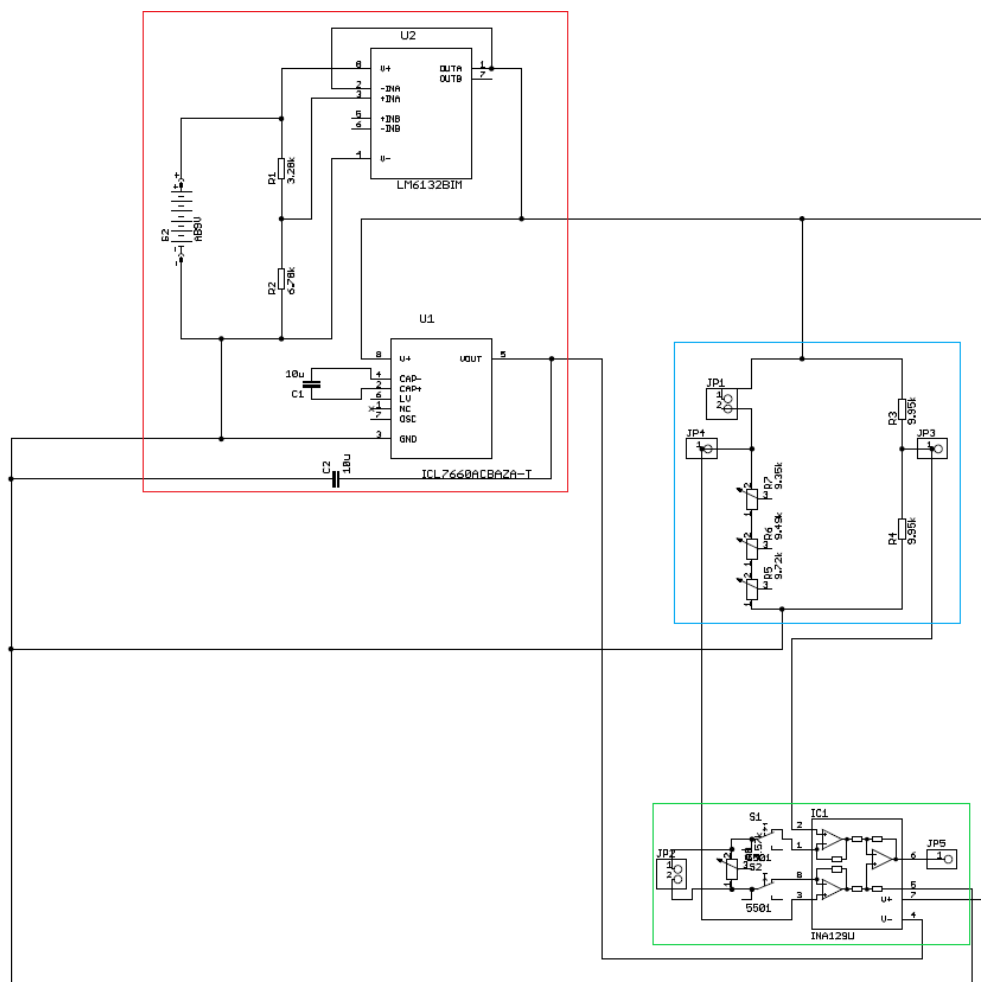


Abbildung 4.1.: Schaltplan bei *EAGLE*

Aus Abbildung 4.1 folgt die Abbildung 4.2. Bauteile wie die Schalter und Potentiometer werden ins Gehäuse integriert, um das Abgleichen der Wheatstone Brücke bzw. das Umliegen vom Schalter zu vereinfachen. Die Spannungsversorgung ist in der Abbildung rot umrandet, die Wheatstone Brücke blau, und der Verstärker grün.

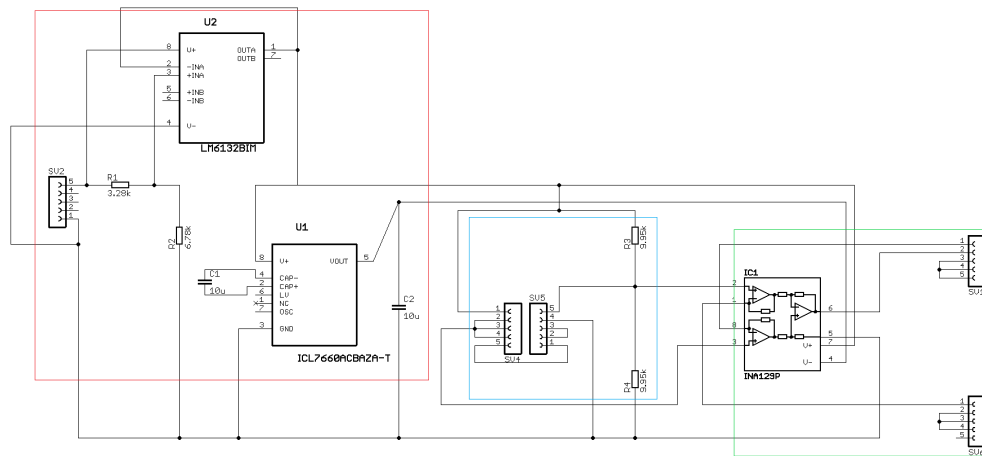


Abbildung 4.2.: Vereinfachter Schaltplan bei *EAGLE*

4.1.2. Platinenlayout

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 anzuordnen. Abbildung 4.3 zeigt die 1mm breiten Leiterbahnen und die Löt pads.

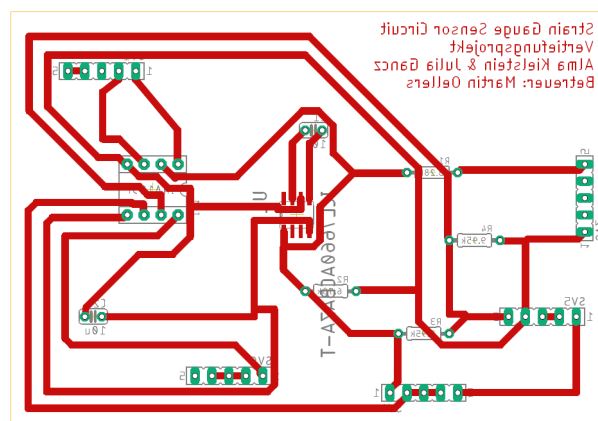


Abbildung 4.3.: Platinenlayout bei *EAGLE*

Damit die Bauteile am Ende des Herstellungsprozesses auf der nicht beschichteten Seite der Platine angebracht werden können, wird das Platinendesign gespiegelt. Aus Platzgründen wird der Inverter auf die Rückseite und den Impedanzwandler auf die Vorderseite der Platine per Hand gelötet.

4.1.3. Fertigung der Platine

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, welche als Maske für die Fotolithografie verwendet wird. Abbildung 4.4 zeigt die generellen Herstellungsschritte der Fotolithografie mit positivem Lack.

Damit gewünschte Abschnitte der Leiterbahnen 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 aufgrund 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.

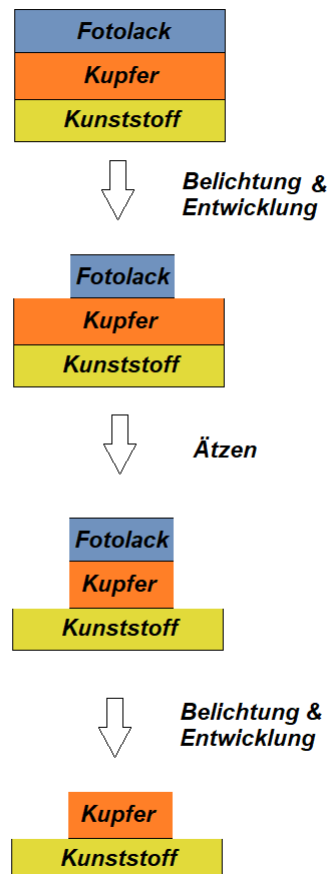


Abbildung 4.4.: Prozess der Fotolithografie für positiven Lack [13]

Nach der Entwicklung der Platine werden Löcher mit $0,7\text{mm}$ Durchmesser durch die Löt-pads gebohrt. Dadurch können die Bauteile in die Platine gesteckt und festgelötet werden.

An die Pins werden Kabel gelötet, damit Bauteile wie Schalter und Potentiometer in das Gehäuse integriert werden können und somit während einer Messung direkt verstellbar sind.

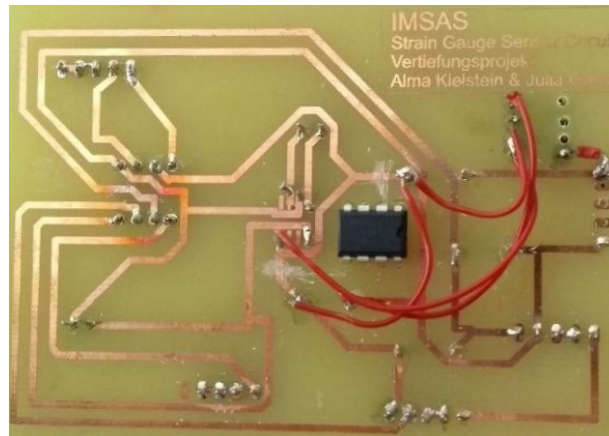


Abbildung 4.5.: fertige Platine

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

4.2. 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 erleichtert, da es einfacher ist, die Biegebalken zu wechseln, 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 (siehe Abbildung 4.6). Außerdem werden im Deckel Bohrungen für die Schrauben eingebracht, um beide Gehäuseteile miteinander verbinden zu können. Die Länge und Breite des Behälters sind gleich den Abmessungen des Deckels. Die Höhe des Behälters beträgt 60mm . Der Behälter wurde gitterartig gezeichnet um zu ermöglichen, die Platine auf Wunsch zu sehen (siehe Abbildung 4.7).

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

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

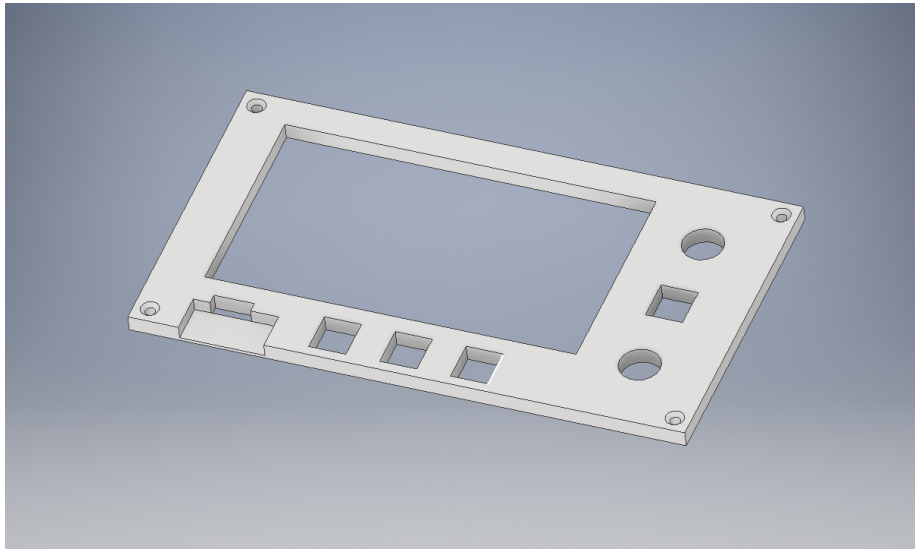


Abbildung 4.6.: 3D Design des Deckels

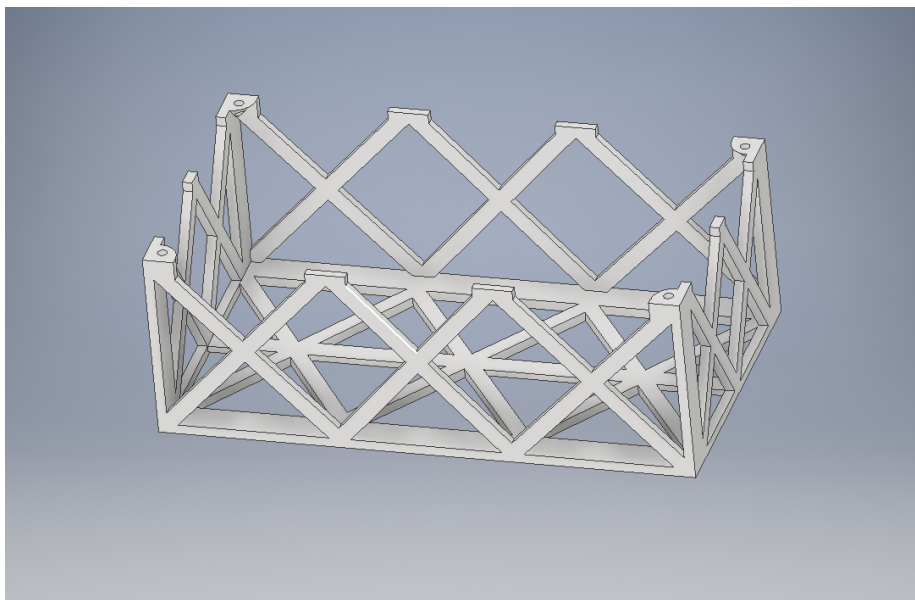


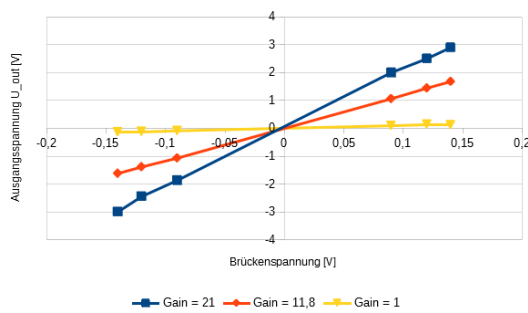
Abbildung 4.7.: 3D Design des Behälters

5. Auswertung

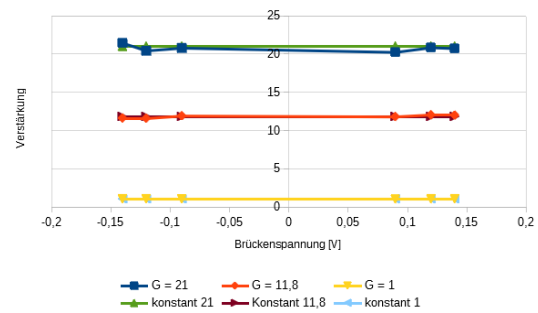
5.1. Überprüfung der Platine

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 5.1, 5.2 und 5.3 zusammengefasst. Wie auch in Abschnitt 3.2.4 (S.33) sind in den Abbildungen 5.1a, 5.2a und 5.3a die Ausgangsspannungen für die Verstärkungen $G = 21$, $G = 11,8$ und $G = 1$ für die beiden Biegebalken und den Drucksensor erfasst, während die Graphen 5.1b, 5.2b und 5.3b daneben jeweils die tatsächlich gemessene bzw. berechnete Verstärkung angeben.

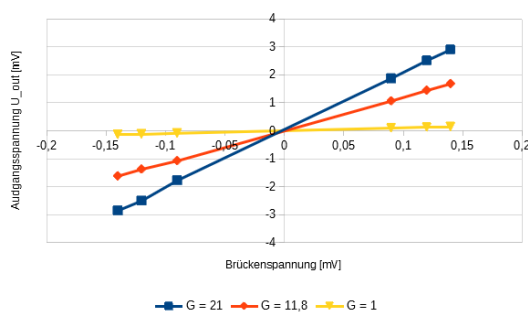


(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen G

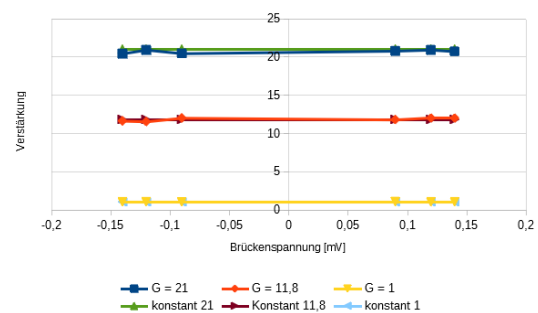


(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 5.1.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS1

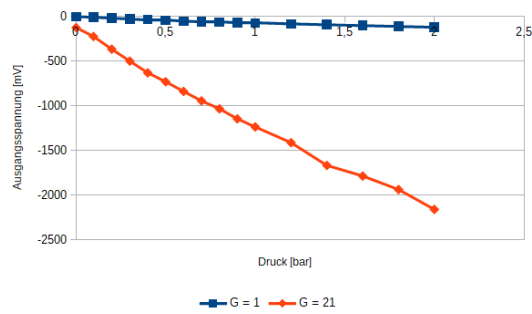


(a) Ausgangsspannung bei verschiedenen Verstärkungen G

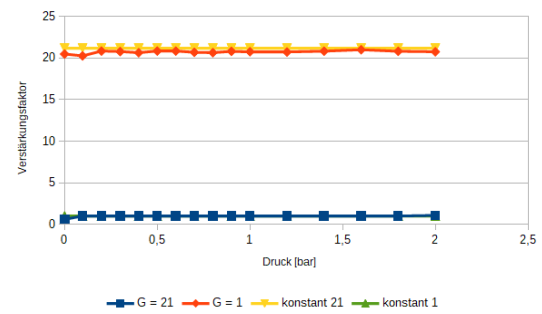


(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 5.2.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS2



(a) Ausgangsspannung bei Druck bis 2 bar



(b) berechnete Verstärkungsfaktoren

Abbildung 5.3.: Spannungsverstärkung mit *INA 129* bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS2

Die Ausgangsspannungen verhalten sich, wie auch im vorangegangenen Aufbau mit dem Steckbrett, linear. Auch hier entsprechen die negativen Spannungen der Dehnung und die positiven Spannungen der Stauchung.

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.

6. Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Auslesesystem für die Auswertung unterschiedlicher Dehnungsmessstreifen und Drucksensoren entwickelt. Als erstes wurden mehrere Simulationen durchgeführt um sicherzustellen, dass die geplante Schaltung kein Fehler enthält und alle Bauteile sicher bedient werden können. Jedes Bauteil wurde zuvor separat bei *LT Spice* getestet und anschließend wurde die gesamte Schaltung simuliert.

Nachfolgend wurde die Schaltung auf dem Steckbrett aufgebaut und für verschiedene Sensoren gemessen. Die Platine wurde hergestellt und die darauffolgende Messungen konnten direkt mit der Steckbrettmessung verglichen werden. Daraus folgt, dass die Messungen auf dem Steckbrett stärker von den erwarteten Messergebnissen aus der Simulationen und den Datenblättern abweichen, als die Messungen mit der Platine. Die Platine ist also weniger störanfällig und die Messung wird dadurch genauer als auf dem Steckbrett.

Das Gehäuse bietet zusätzlichen Schutz gegen Störungen, aber ohnehin soll die Validität der Messungen beachtet werden. Im Rahmen dieser Arbeit lassen sich die Ergebnisse reproduzieren, allerdings ist die Anzahl der Biegebalken und Drucksensoren relativ niedrig. Diese sind leider sehr empfindlich und störanfällig. Für eine Verbesserung des Auslesesystems sind stabile Sensoren mit robuster Kontaktierung erwünscht.

A. Anhang

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //9600bits pro sekunde
}
void loop()
{
  int bruecke0 = analogRead(A0); //bruecke0 = links DMS variation
  int brueckel = analogRead(A1); //brueckel = rechts konstant
  int verstaerkung = analogRead(A2); //ausgangssignal: verstärkte brückenspannung

  float bruecke0_formatiert = bruecke0 * (5.0 / 1023.0);
  float brueckel_formatiert = brueckel * (5.0 / 1023.0);
  float verstaerkung_formatiert = (verstaerkung * (5.0 / 1023.0));
  float verstaerkung_formatiert_abs = abs(verstaerkung);
  float resultbruecke = ((bruecke0_formatiert - brueckel_formatiert));
  Serial.print(verstaerkung_formatiert);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(resultbruecke);

  delay(100);
}
```

Abbildung A.1.: Verwendeter Arduino Code

Strain Gauge Sensor Circuit

Theory:

In this project we measure the strain of an object using a strain gauge sensor and a row of LEDs, which is lit along according to the positive and negative strain. At first the strain sensor is inserted as a part of a Wheatstone bridge. Then the output of the bridge is amplified using an instrumentation amplifier. A row of LEDs is lit up with the help of a LED driver in two different directions from the midpoint according to positive or negative strain.

Circuit Diagram:

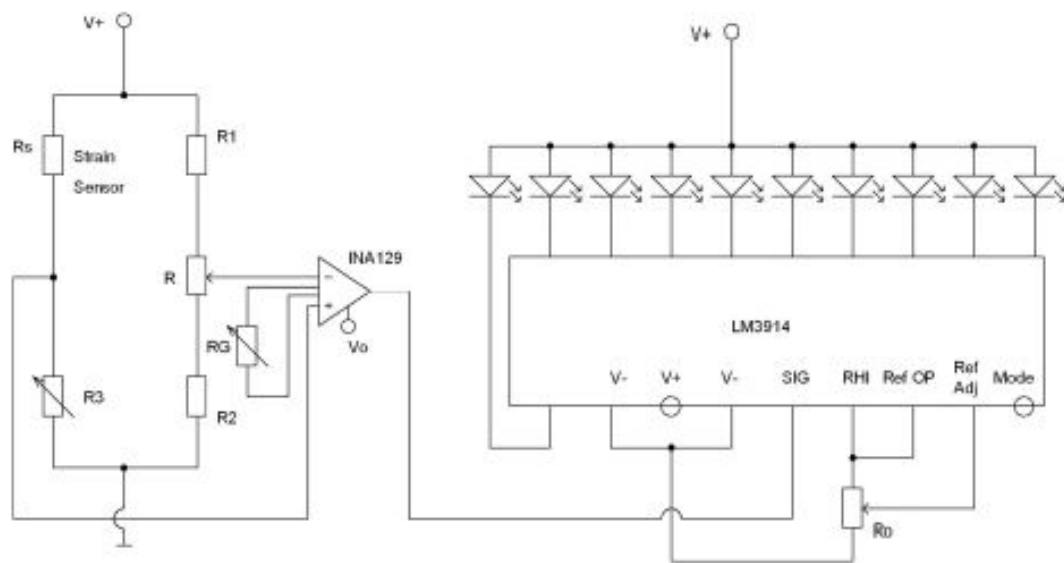


Figure18: Strain Measurement Circuit

Operation of the board:

Board is needed to be powered from a 5V supply. After that we have to bend the object where the sensor is attached. Then we will be able to see LED rows are lighting up depending on the direction and strength of the strain.

Operating parameters:

- ± 5 V power supply
- Wheatstone bridge values based on resistance of strain gauge

Tasks:

1. What is a strain gauge sensor? Explain its working principle. What are the factors that affect its performance? How can we improve its performance?
2. What is the working principle of a Wheatstone bridge? Explain in your own words.
3. What is the purpose of R_G in the circuit? What are the purposes of the other potentiometers in the circuit?
4. What is an instrumentation amplifier? What are the differences between a normal amplifier and an instrumentation amplifier?
5. Simulate the circuit for the sensor and the amplifier to choose suitable resistance values.
6. Design a suitable PCB layout for the circuit. Etch and drill the PCB accordingly. Gather all necessary components.
7. Build the circuit on the etched PCB.
8. Test the board functionality, attach the sensor to an elastic object and measure strain.
9. Finish your project documentation and present your results.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Formänderung einer Leiterbahn der Länge l und dem Durchmesser D unter der Krafteinwirkung F [19]	4
2.2.	Aufbau einer Wheatstonesche Brückenschaltung [25]	5
2.3.	Klassifizierung von Wheatstone Brücken und die entsprechenden Sensitivitäten [25]	6
2.4.	Biegebalken mit aufgedruckten Widerständen und Kontaktierung	8
2.5.	mäanderförmige Anordnung der Leiterbahnen [23]	9
2.6.	Brückenspannung eines Biegebalkens in Abhängigkeit zur Zeit bei verschiedenen Kräften [25]	10
2.7.	Verformung der Sensormembran unter Druckeinwirkung [8]	11
2.8.	Beispiel für die Anordnung eines DMS in Membranrosetten [8]	12
2.9.	Verschaltung des Drucksensors (a) ohne und (b) mit Druckanschluss und elektrischer Verbindung	12
2.10.	Gemessene Brückenspannung in Abhängigkeit des Drucks p [8]	13
2.11.	Brückenspannung eines Drucksensors bei mehrfacher Belastung [8]	14
2.12.	einfacher Spannungsteiler [16]	17
2.13.	Impedanzwandler [15]	18
2.14.	Arten der Realisierung von Invertern [3, 15]	19
2.15.	Funktion der INA129 Verstärker [21]	20
2.16.	Arduino Uno [1]	20
3.1.	Simulation des Impedanzwandlers	24
3.2.	Simulation des Spannungsteilers und des Inverters bei <i>LT Spice</i>	24
3.3.	Simulation der Wheatstone Brücke bei <i>LT Spice</i>	25
3.4.	Simulation der Brückenschaltung	26
3.5.	Brückenspannung als Differenz der Spannungen V_+ und V_-	27
3.6.	LT-Spice Simulation LT1168	28
3.7.	Spannungsverstärkung mit <i>LT1168</i> bei LT Spice	28
3.8.	LT-Spice Simulation der komplette Schaltung	29
3.9.	gesamte Schaltung auf dem Steckbrett aufgebaut	30
3.10.	Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei einem konstanten Eingangssignal von $U_{Eingang} = 200mV$	32
3.11.	Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei einem konstanten Eingangssignal von $U_{Eingang} = 100mV$	33
3.12.	Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von Biegebalken 1	34
3.13.	Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von Biegebalken 2	34
3.14.	Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von Biegebalken2	34
4.1.	Schaltplan bei <i>EAGLE</i>	37
4.2.	Vereinfachter Schaltplan bei <i>EAGLE</i>	38
4.3.	Platinenlayout bei <i>EAGLE</i>	38

4.4. Prozess der Fotolitografie für positiven Lack [13]	39
4.5. fertige Platine	40
4.6. 3D Design des Deckels	41
4.7. 3D Design des Behälters	41
5.1. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS1	43
5.2. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS2	43
5.3. Spannungsverstärkung mit <i>INA 129</i> bei verschiedenen Brückenspannungen von DMS2	44
A.1. Verwendeter Arduino Code	i
A.2. Aufgabenstellung	ii
A.3. Aufgabenstellung	iii

Tabellenverzeichnis

3.1. Eigenwiderstände der jeweils angeschlossenen Sensoren	25
3.2. Bauteiliste	30
3.3. maximale und minimale Brückenspannung der Sensoren	31

Literaturverzeichnis

- [1] Arduino.
- [2] Herbert Balke. *Einführung in die Technische Mechanik: Festigkeitslehre*. 3., aktual. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer, 2014. ISBN: 978-3-642-40980-6. DOI: [10.1007/978-3-642-40981-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40981-3).
- [3] Armin Biere u. a. *Digitaltechnik - eine praxisnahe Einführung*. 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).
- [4] Joachim Federau. *Operationsverstärker: Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen*. 7., erweiterte und überarbeitete Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 3658163739. DOI: [10.1007/978-3-658-16373-0](https://doi.org/10.1007/978-3-658-16373-0).
- [5] Gert Hagmann. *Grundlagen der Elektrotechnik: Das bewährte Lehrbuch für Studierende der Elektrotechnik und anderer technischer Studiengänge ab 1. Semester ; mit Aufgaben und Lösungen*. 16., durchgesehene und korrigierte Auflage. Elektrotechnik. Wiebelsheim: AULA-Verlag, 2013. ISBN: 9783891047798.
- [6] IMSAS. “Introduction to Micro Technology: Dehnungsmessstreifen (DMS)”. Lehrmaterial. Bremen: Universität Bremen.
- [7] Ellen Ivers-Tiffée und Waldemar von Münch. *Werkstoffe der Elektrotechnik: Mit 40 Tabellen*. 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).
- [8] Jennifer Hinz. “Entwicklung und Charakterisierung eines additiv gefertigten Drucksensors”. Bachelorarbeit. Bremen: Universität Bremen, 2017.
- [9] 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).
- [10] Walter Lang. *Sensors and Measurement Systems*. River Publishers Series in Electronic Materials and Devices. Aalborg: River Publishers, 2019. ISBN: 978-87-7022-027-9.
- [11] Linear Technology. *Low Power, Single Resistor Gain Programmable, Precision Instrumentation Amplifier: LT1168*.
- [12] Linear Technology. *Switched Capacitor Voltage Converter: LTC1044/7660*.
- [13] 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).
- [14] Walter Michaeli. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. 5. Aufl. München: Hanser, 2006. ISBN: 9783446405806.
- [15] Rainer Parthier. *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3-658-13597-3. DOI: [10.1007/978-3-658-13598-0](https://doi.org/10.1007/978-3-658-13598-0).
- [16] Steffen Paul und Reinhold Paul. *Gleichstromnetzwerke und ihre Anwendungen*. 5., aktualisierte Aufl. Bd. / Steffen Paul; Reinhold Paul ; 1. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-642-53947-3.
- [17] Renesas. *ICL7660A: Super Voltage Converters*.

- [18] Dieter Sautter und Hans Weinerth, Hrsg. *Lexikon Elektronik und Mikroelektronik*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1993. ISBN: 318401178X.
- [19] Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl und Bernhard Zagar. *Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen ; mit 38 Tabellen und 34 Beispielen*. 11., aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2014. ISBN: 3446441883.
- [20] 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).
- [21] Texas Instruments. *INA12x Precision, Low-Power Instrumentation Amplifiers*.
- [22] Texas Instruments. *LM6132/LM6134 Dual and Quad Low Power 10MHz Rail-to-Rail I/O Operational Amplifiers*.
- [23] Ulrich Nolten. “Entwicklung und Charakterisierung dehnungsbasierter Kraft- und Momentensensoren für medizinische Anwendungen”. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 19.04.2013.
- [24] Walter Lang. “Elektrische Messtechnik”. Lehrmaterial. Bremen: Universität Bremen, 2017.
- [25] Wiebke Gehlken. “Additive Fertigung eines dreidimensionalen Biegebalkens mit piezoresistiver Sensoranordnung”. Bachelorarbeit. Bremen: Universität Bremen, 6.09.2017. URL: <http://publications.rwth-aachen.de/record/229156>.