



Laborprotokoll

Fachlabor Mikromechatronik

angefertigt von

Viviane Bremer, Justus Drögemüller, Manisch Kumar
Matr.-Nr.: 4254652, 4427984, 1234567

am

Institut für Mikrotechnik
Technische Universität Braunschweig

Juli 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Introduction	1
1.1	Zielsetzung und Gliederung	1
1.2	Geschichte/Literatur	1
2	Preliminary Design	2
2.1	Wert und Einheit	2
2.2	Überschrift	2
2.3	Anforderungen an einen Drucksensor (Viviane Bremer)	2
3	FEM-Simulation	3
3.1	Einfluss der Membrandicke auf die maximale Spannung (Viviane Bremer)	3
3.2	Einfluss der Membranabmessungen auf den Spannungsverlauf	3
3.2.1	Einfluss der Bossgröße (Viviane Bremer)	3
4	Etching Process	5
5	Characterising	7
5.1	Allgemeines (Justus)	7
5.2	Versuchsaufbau und -durchführung (Justus)	8
5.3	Auswertung (Viviane Bremer)	8
5.3.1	Sensitivitätsabschätzung für longitudinales und transversales Sensordesign (Viviane Bremer)	9
5.3.2	Comparing calculated sensitivity with measured sensitivity	12
6	Circuit Layout	13
6.1	Dimensionierung der Widerstände	13
6.2	Erstellen der Schaltung in PSpice (Viviane Bremer)	13
6.3	Simulation der Auswerteelektronik mit theoretisch berechneten Werten	13
6.3.1	Einfluss des Offset-Potentiometers (Viviane Bremer)	13
6.3.2	Einfluss des Verstärkungs-Potentiometers (Viviane Bremer)	13
6.3.3	Abgleichung der Schaltung (Viviane Bremer)	14
6.4	Simulation der Auswerteelektronik mit Bauteilwerten/Simulation with real values	14
7	Evaluation Circuit	18
7.1	Leiterplattenlayout mit Eagle (Viviane Bremer)	18
8	Zusammenfassung und Ausblick	21

appendix	22
A.1 Erster Anhang	22
A.2 Zweiter Anhang	22

1 Introduction

Hier stehen einige einführende Worte in das Thema der Arbeit.

1.1 Zielsetzung und Gliederung

Was ist Sinn und Zweck der Arbeit, wie ist sie aufgebaut und welche Themen werden behandelt [?].

1.2 Geschichte/Literatur

Optionale Betrachtung der Thematik wie sie in der Geschichte und/oder Literatur Erwähnung findet. Hier sollten auch schon der eine [?] oder andere [?] Literaturverweise auftauchen.

2 Preliminary Design

2.1 Wert und Einheit

Viele Einheiten lassen sich schöner darstellen mit dem „Tag“ `\unit[]{}` beziehungsweise `\unitfrac[]{}{}`. Siehe den Vergleich: ohne 1 m oder mit 1 m bzw. ohne 1 m/sec oder mit 1 m/sec.

2.2 Überschrift

Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text
Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text
Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text
Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text
Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text Text

2.3 Anforderungen an einen Drucksensor (Viviane Bremer)

Für die Auswertung des morphologischen Kastens muss zunächst eine Anforderungsliste erstellt werden. Es soll ein Drucksensor zur Überwachung des Gasdrucks in einer Niederdruck-Pneumatikleitung entwickelt werden. Dieser Druck liegt gewöhnlich zwischen 0 und 1 bar, kann jedoch auf maximal 1,2 bar ansteigen. Die Messgenauigkeit sollte hierbei mindestens bei ± 50 bar liegen. Eine Änderung des Druckes verläuft sehr langsam und kann somit als quasi-statisch angesehen werden. Da der Sensor in eine bestehendes Gehäuse integriert wird, dürfen seine Abmaße 10x10 mm nicht überschreiten. Das Ausgangssignal soll einer Ausgangsspannung von 0 bis 1 V entsprechen und somit den anliegenden Druck in bar repräsentieren. Zur Spannungsversorgung steht eine symmetrische Spannung von 12 V und eine Referenzspannung von 1 V zur Verfügung. Des Weiteren wird mit einem Bedarf von 2.000.000 Stück gerechnet. Die Fertigungskosten sollten bezogen auf die Stückzahl so gering wie möglich ausfallen.

Diese Anforderungen sind nach Fest-, Mindest- und Wunschanforderung in Tabelle **blubb** aufgelistet.

—>morphologischen Kasten bewerten

3 FEM-Simulation

3.1 Einfluss der Membrandicke auf die maximale Spannung (Viviane Bremer)

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Membrandicke auf die auftretende mechanische Spannung in der Membran betrachtet. Hierfür werden folgende Dicken genutzt: $15\text{ }\mu\text{m}$, $25\text{ }\mu\text{m}$, $35\text{ }\mu\text{m}$.

Zur Analyse wird der anliegende Druck für alle drei Membrandicken in 0.2 bar Schritten von 0.2 bar bis 1 bar erhöht und die resultierende mechanische Spannung ermittelt. Die Verläufe sind in Abbildung **blubb** dargestellt. Die Bruchspannung σ_{Br} von Silizium beträgt 830 MPa und sollte während des Sensorbetriebs nicht überschritten werden. Zur besseren Visualisierung ist sie als Konstante im Graphen dargestellt.

Membran a erreicht die Bruchspannung schon bei einem Druck von 0.439 bar, welcher im benötigten Messbereich liegt. Im Falle von Membran b wird sie knapp oberhalb des Messbereichs bei 1.05 bar erreicht. Die Bruchspannung bei Membran c entspricht einem anliegenden Druck von 2 bar, welcher deutlich oberhalb des Messbereiches ist. Hieraus lassen sich Erkenntnisse für das Sensorverhalten gewinnen. Membran a ist zu dünn für diese Messaufgabe, da sie innerhalb des Messbereichs reißt. Jedoch ist Membran c auch nicht akzeptabel, da niedrige Spannungen auftreten im Vergleich zu Membran b. Diese bildet einen guten Kompromiss für die gewünschte Aufgabe.

3.2 Einfluss der Membranabmessungen auf den Spannungsverlauf

3.2.1 Einfluss der Bossgröße (Viviane Bremer)

Zur Analyse des Einflusses der Bossgröße wird die Membrangröße auf $3600\text{ }\mu\text{m}$ und die Membrandicke auf $25\text{ }\mu\text{m}$ gesetzt. Die Bossgröße wird folgendermaßen variiert: $800\text{ }\mu\text{m}$, $1000\text{ }\mu\text{m}$, $1200\text{ }\mu\text{m}$.

Die Spannungsverläufe und Verschiebungen sind in Abbildung **blubb** dargestellt. Bei einer Bossgröße von $800\text{ }\mu\text{m}$ treten Spannungen von bis zu 274 MPa auf. Eine Vergrößerung des Bosses auf $1000\text{ }\mu\text{m}$ führt zu einer maximalen Spannung von 178 MPa. Der größte Boss senkt die auftretende Spannung auf 128 MPa. Des Weiteren ist zu sehen,

dass eine Vergrößerung des Bosses zu einer Angleichung der Spannungsspitzen führt und die Dehnung der Membran von $374\,\mu\text{m}$ auf $77\,\mu\text{m}$ senkt.

4 Etching Process

(Viviane Bremer)

Für die Erstellung der Sensormembran muss zunächst der Ätzprozess charakterisiert werden. Zur Berechnung des zu ätzenden Volumens wird folgende Volumenformel eines Pyramidenstumpfes,

$$V = \frac{h}{3}(A_1 + \sqrt{A_1 A_2} + A_2), \quad (4.1)$$

benötigt. Für die Fertigung wird ein 4Wafer mit einer Dicke von $450 \mu m$ genutzt. Die zu erzeugende Membran ohne Boss hat eine Breite von $4000 \mu m$ und eine Dicke von $25 \mu m$. Dies führt zu einer Ätzhöhe von

$$h = 450 \mu m - 25 \mu m = 425 \mu m. \quad (4.2)$$

Die Fläche A_1 bestimmt sich mit der Membranbreite zu

$$A_1 = a_1^2 = 4000 \mu m \cdot 4000 \mu m = 16 mm^2. \quad (4.3)$$

Fläche A_2 ergibt sich mit

$$\tan(54,7^\circ) = \frac{425 \mu m}{\Delta a} \quad (4.4)$$

$$\Delta a = \frac{425 \mu m}{\tan(54,7^\circ)} = 300 \mu m \quad (4.5)$$

$$a_2 = a_1 - 2\Delta a = 3400 \mu m \quad (4.6)$$

zu

$$A_2 = a_2^2 = 11,56 mm^2. \quad (4.7)$$

Dies eingesetzt in Gleichung 4.1 ergibt für das zu ätzende Volumen

$$V_{Si} = \frac{0.425 mm}{3}(16 + \sqrt{16 \cdot 11.56} + 11.56) mm^2 = 5.831 mm^3. \quad (4.8)$$

Die Dichte ρ_{Si} von Silizium beträgt 0.002336 g/mm^3 . Dies führt mit dem errechneten Volumen zu einer Masse von

$$m_{Si} = \rho V_{Si} = 0.0137 \text{ g} \quad (4.9)$$

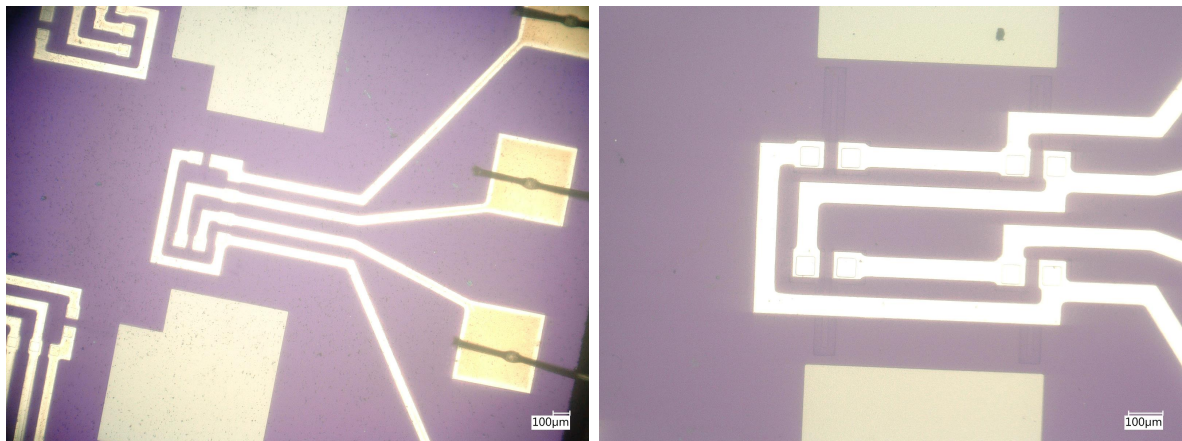
Mit der Molmasse von Silizium, $M_{Si} = 28.09 \text{ g/mol}$, ergibt sich die Stoffmenge zu

$$n_{Si} = \frac{m_{Si}}{M_{Si}} = 4.877 \cdot 10^{-4}. \quad (4.10)$$

5 Characterising

5.1 Allgemeines (Justus)

Nachdem am ersten Labortag der Sensor mit Hilfe von SolidWorks designt und auf theoretischer Grundlage mit verschiedenen Simulationen berechnet wurde, musste am darauffolgenden Labortag eine Charakterisierung erfolgen. Aufgrund von Fertigungsabweichungen, die nie vermieden werden können, verhalten sich Sensoren immer unterschiedlich. Dies spiegelt sich unter Anderem in der Sensitivität, dem Offset oder auch in der Messgenauigkeit wider. Um den Abweichungen entgegenzuwirken, müssen bestimmte Eigenschaften des entsprechenden Sensors also zunächst ermittelt werden. Das IMT stellte jedem Laborteilnehmer einen vorgefertigten Sensor zur Verfügung, der dem erstellten Design vom vorherigen Labortag entsprach. Lediglich bei der Betrachtung unter dem Mikroskop ließen sich Differenzen feststellen. Der Unterschied zwischen den Drucksensoren ergab sich aus der Anordnung der jeweiligen Resistoren, die stellenweise in die Sensormembran eingearbeitet sind und der piezoresistiven Spannungsmessung dienen. Abbildung 5.1 a) zeigt eine t-förmige Anordnung der Resistoren, Abbildung 5.1 b) eine transversale. Eine Festlegung, welche Anordnung für die gegebenen Anforderungen am besten geeignet sei, erfolgte durch Überlegung.



(a) Messbrücke mit t-förmiger Anordnung

(b) Messbrücke mit transversaler Anordnung

Abbildung 5.1: Sensordesigns im Überblick

Anschließend begann die eigentliche Charakterisierung in Form eines Versuchs.

5.2 Versuchsaufbau und -durchführung (Justus)

Der Sensor wurde auf eine Steckplatine mit entsprechenden Ein- und Ausgängen gesetzt. Die Versorgungsspannung von 1V wurde durch eine externe Spannungsquelle bewerkstelligt. Zur Messung der Ausgangsspannung stand ein Potentiometer zur Verfügung, das ebenfalls mit der Steckplatine verbunden wurde. Bevor die Verbindungen angebracht wurden, mussten zunächst die Leiterbahnen der Platine betrachtet werden, um Ein- und Ausgänge nicht zu verwechseln. Der Druck wurde mit Hilfe eines Druckreglers aufgegeben, welcher den Gasdruck von Stickstoff exakt aufbringen konnte. Abbildung 5.2 zeigt den gesamten Versuchsaufbau.

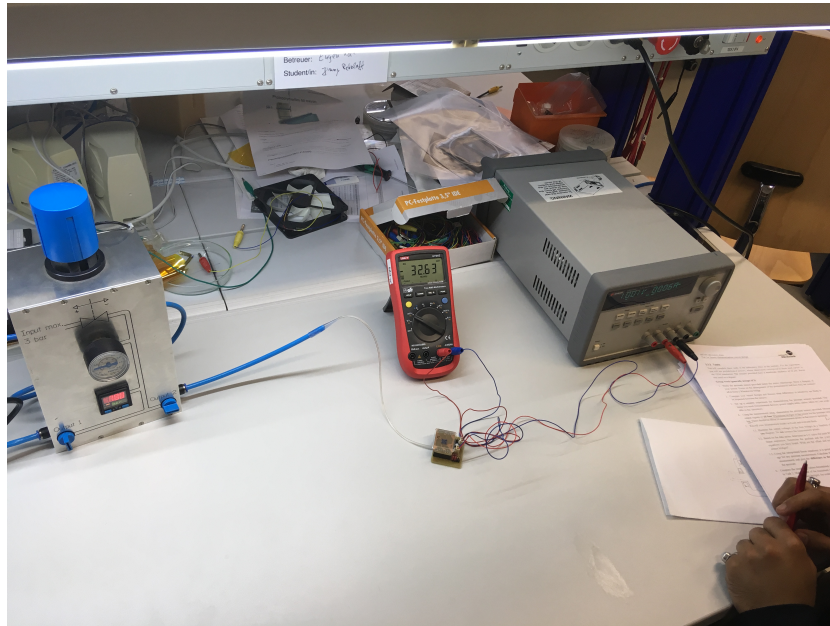


Abbildung 5.2: Versuchsaufbau zur Charakterisierung

Da jede der vier zum Sensor gehörenden Wheatstone'schen Messbrücken charakterisiert werden mussten, wurden entsprechende Jumper verwendet, mit denen die einzelnen Messbrücken angesteuert werden konnten. Zu jeder Brücke wurde die Ausgangsspannung für die Drücke 0bar, 0,2bar, 0,4bar, 0,6bar, 0,8bar und 1bar gemessen und festgehalten. Außerdem wurde je eine Messung ohne Anschluss an die Druckversorgung durchgeführt, um einen Messwert unter atmosphärischem Druck zu erhalten. Da eine folgende Aufgabe darin bestand, die gemessenen Werte mit denen einer anderen Laborgruppe zu vergleichen, wurde der Versuch noch mit einem weiteren Sensor durchgeführt.

5.3 Auswertung (Viviane Bremer)

Die Messergebnisse der zwei verschiedenen Sensoren sind in Abbildung 5.3 und 5.4 dargestellt. Anhand der Graphen ist deutlich zu erkennen, dass eine t-förmige Anordnung für diese Anwendung nicht zielführend ist. Die Kennlinien für die einzelnen Brücken dieses

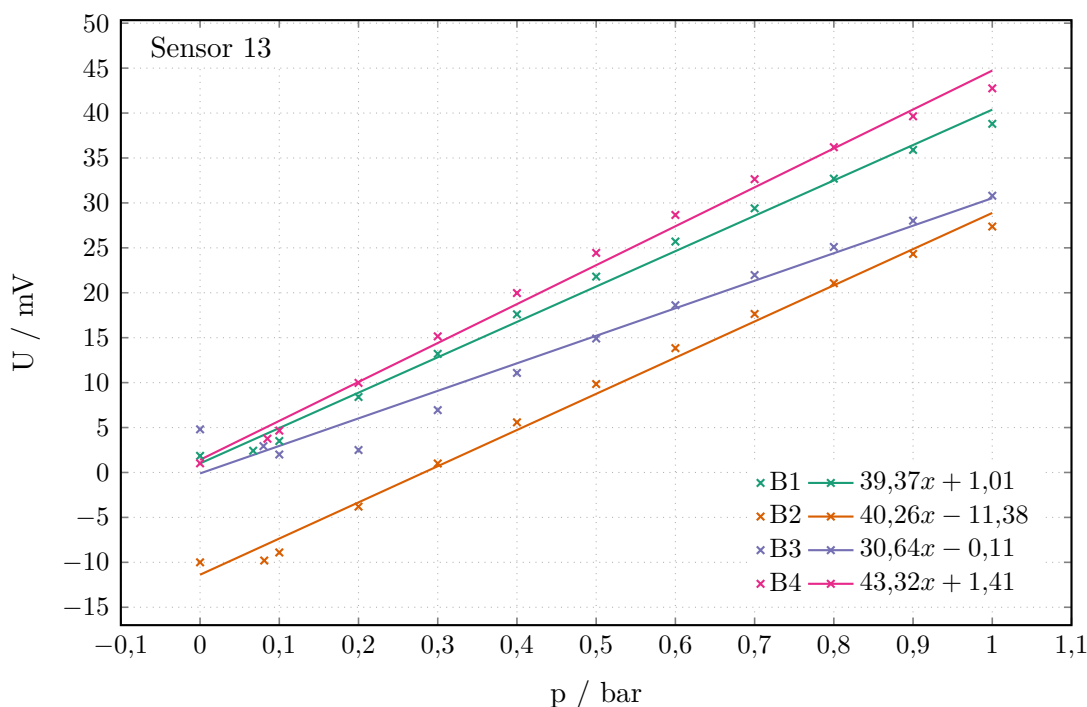


Abbildung 5.3: Messwerte und Regressionsgeraden der Brücken von Sensor 13.

Designs sind nahezu konstant. Im Gegensatz dazu zeigen die Kennlinien des transversalen Designs einen deutlich linearen Verlauf. Jedoch weicht der errechnete Wert bei der t-förmigen Anordnung nicht so stark vom gemessenen Wert ab, wie bei dem transversalen Design (Abbildung blubb).

5.3.1 Sensitivitätsabschätzung für longitudinales und transversales Sensordesign (Viviane Bremer)

Mit Hilfe der Ergebnisse aus der FEM-Simulation kann eine erste Abschätzung der Sensitivität für ein longitudinales und ein transversales Sensordesign gemacht. Hierfür wird die maximal auftretende Spannung genutzt. In diesem Fall beträgt $\sigma_{max} = 1,78 \cdot 10^8$ Pa. Mit folgender linearen Annäherung für den Spannungsverlauf in der Membran

$$\sigma(x) = \sigma_{max} \left(1 - \frac{1}{349,5\mu m}x\right) \quad (5.1)$$

kann die Spannung an den Widerständen der Wheatstone'schen Brücke bestimmt werden. Die Abstände zur Membrankante sind für die zwei verschiedenen Sensordesigns in Tabelle 5.1 aufgeführt.

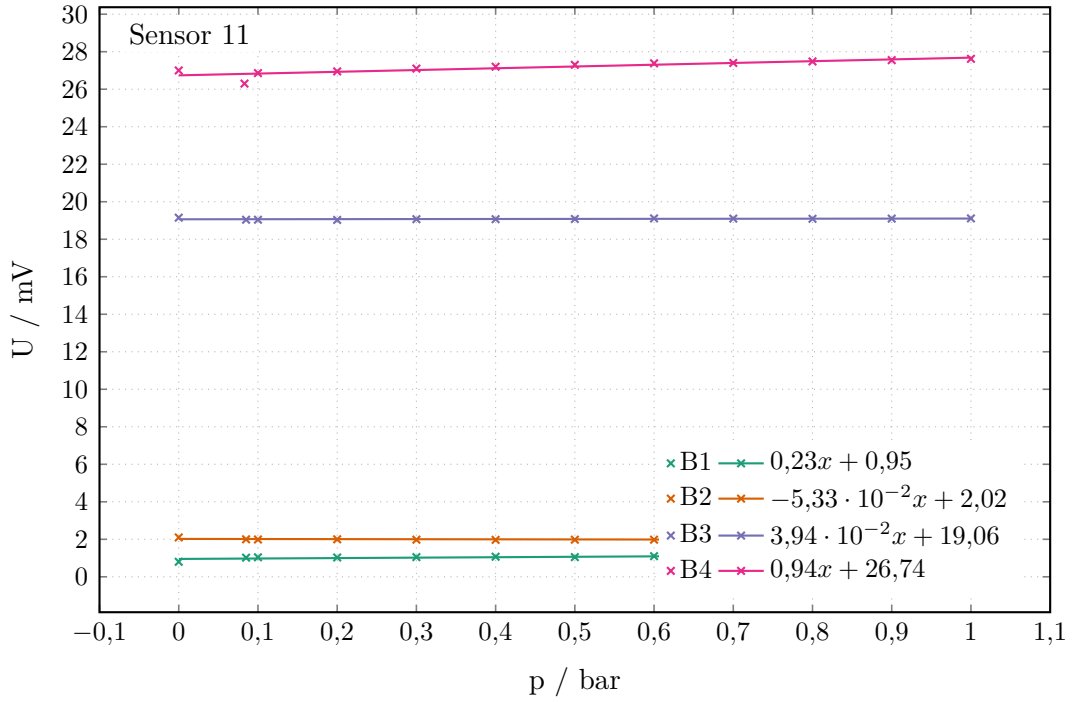


Abbildung 5.4: Messwerte und Regressionsgeraden der Brücken von Sensor 11.

Tabelle 5.1: Abstände der Widerstände zur Membrankante

	R_1	R_2	R_3	R_4
longitudinal	$100 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$	$599 \mu\text{m}$	$599 \mu\text{m}$
transversal	$50 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m}$	$649 \mu\text{m}$	$649 \mu\text{m}$

Für die relative Widerstandsänderung gilt

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t. \quad (5.2)$$

σ_l und σ_t können für den jeweiligen Dotierungstyp in Tabelle abgelesen werden.

Mit Gleichung 5.2 lässt sich die Ausgangsspannung

$$U = U_0 \frac{\Delta R}{R} \quad (5.3)$$

bestimmen. Je größer dieser Wert bei konstanter mechanischer Spannung ist, desto höher ist die Empfindlichkeit des Sensors.

Für das longitudinale Design ergeben sich mit den Gleichungen 5.1 bis 5.2 folgende Werte von R_1 und R_2 für eine n- und p-Diffusion:

Tabelle 5.2: Piezoresistive Koeffizienten der Hauptrichtungen für <100>-Silizium in $10^{-11} Pa^{-1}$

	π_l	π_t
n-Diffusion	-9.39	-5.25
p-Diffusion	21.54	-19.89

$$\sigma_{l,1/2} = 1.78 \cdot 10^8 Pa \left(1 - \frac{1}{349.5 \mu m} 100 \mu m\right) = 127 \cdot 10^6 Pa \quad (5.4)$$

$$\sigma_{l,3/4} = 1.78 \cdot 10^8 Pa \left(1 - \frac{1}{349.5 \mu m} 599 \mu m\right) = -127 \cdot 10^6 Pa \quad (5.5)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_n = -9.39 \cdot 10^{-11} Pa^{-1} \cdot 127 \cdot 10^6 Pa = -11.93 \cdot 10^{-3} \quad (5.6)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_p = 21.54 \cdot 10^{-11} Pa^{-1} \cdot 127 \cdot 10^6 Pa = 27.35 \cdot 10^{-3} \quad (5.7)$$

Somit ergeben sich die Empfindlichkeiten für ein longitudinales Design zu

$$U_n = 1V \cdot (-11.93 \cdot 10^{-3}) = -11.93 mV \quad (5.8)$$

$$U_p = 1V \cdot 27.35 \cdot 10^{-3} = 27.35 mV. \quad (5.9)$$

Die Widerstände R_3 und R_4 erzeugen betragsmäßig die gleichen Werte und werden aus diesem Grund nicht weiter ausgeführt.

Analog dazu werden die Werte für das transversale Design bestimmt:

$$\sigma_{t,1/2} = 1.78 \cdot 10^8 Pa \left(1 - \frac{1}{349.5 \mu m} 50 \mu m\right) = 152.53 \cdot 10^6 Pa \quad (5.10)$$

$$\sigma_{t,3/4} = 1.78 \cdot 10^8 Pa \left(1 - \frac{1}{349.5 \mu m} 649 \mu m\right) = -152.53 \cdot 10^6 Pa \quad (5.11)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_n = -5.25 \cdot 10^{-11} Pa^{-1} \cdot 152.53 \cdot 10^6 Pa = -8 \cdot 10^{-3} \quad (5.12)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_p = -19.89 \cdot 10^{-11} Pa^{-1} \cdot 152.53 \cdot 10^6 Pa = -30.3 \cdot 10^{-3} \quad (5.13)$$

$$(5.14)$$

Hier ergeben sich die Empfindlichkeiten zu:

$$U_n = 1V \cdot (-8 \cdot 10^{-3}) = -8mV \quad (5.15)$$

$$U_p = 1V \cdot -30.3 \cdot 10^{-3} = -30.3mV. \quad (5.16)$$

5.3.2 Comparing calculated sensitivity with measured sensitivity

longitudinal:

Bridge 1: 40.47

Bridge 2: 36.891

Bridge 3: 39.776

Bridge 4: 37.878

transversal:

Bridge 1: 35.257

Bridge 2: 40.263

Bridge 3: 39.369

Bridge 4: 43.315

6 Circuit Layout

6.1 Dimensionierung der Widerstände

6.2 Erstellen der Schaltung in PSpice (Viviane Bremer)

Zur weiteren Dimensionierung der Auswerteelektronik ist die Schaltung in PSpice erstellt worden. Diese ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Der linke Teil bis vor die zwei rechten Operationsverstärker ist zur Offsetkompensation des Sensors gedacht. Der restliche Teil dient zur Signalverstärkung. Für die Widerstände werden zunächst die in Kapitel 6.1 bestimmten Werte genutzt. In Kapitel 6.4 werden die gleichen Schritte mit zur Verfügung stehenden Bauteilen durchgeführt.

6.3 Simulation der Auswerteelektronik mit theoretisch berechneten Werten

6.3.1 Einfluss des Offset-Potentiometers (Viviane Bremer)

Zunächst wird nur das Offset-Potentiometer betrachtet. Dafür wird der Wert des Potentiometers R_{ref} von Null auf seinen Endwert erhöht und die Potentialdifferenz von Eingangsspannung am Operationsverstärker Ov2 und Eingangsspannung am Operationsverstärker Ov4 über den Widerstand geplottet. Wie aus der Abbildung 6.2 abzulesen ist, hat die Offsetkompensation einen Stellbereich von $\pm 12\text{ mV}$.

6.3.2 Einfluss des Verstärkungs-Potentiometers (Viviane Bremer)

Als nächstes wird der Einfluss des Verstärkungs-Potentiometers $R_{1_{var}}$ untersucht. Hierbei wird ähnlich vorgegangen, wie beim Offset-Potentiometer. Diesmal wird jedoch der Quotient aus Ausgangsspannung und Eingangsspannungsdifferenz genutzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.3 zu sehen. Der Wertebereich der Verstärkung liegt ca zwischen 21.8 und 25.6.

6.3.3 Abgleichung der Schaltung (Viviane Bremer)

Zum Schluss werden R_{ref} und $R1_{var}$ zusammen variiert und die Eingangsspannung auf 0 V gesetzt. Bei 0 V sollte die Verstärkung das Signal nicht beeinflussen, wenn der Offset ausgeglichen wurde. In Abbildung 6.4 ist zur Visualisierung die Ausgangsspannung über dem Widerstand aufgetragen.

6.4 Simulation der Auswerteelektronik mit Bauteilwerten/Simulation with real values

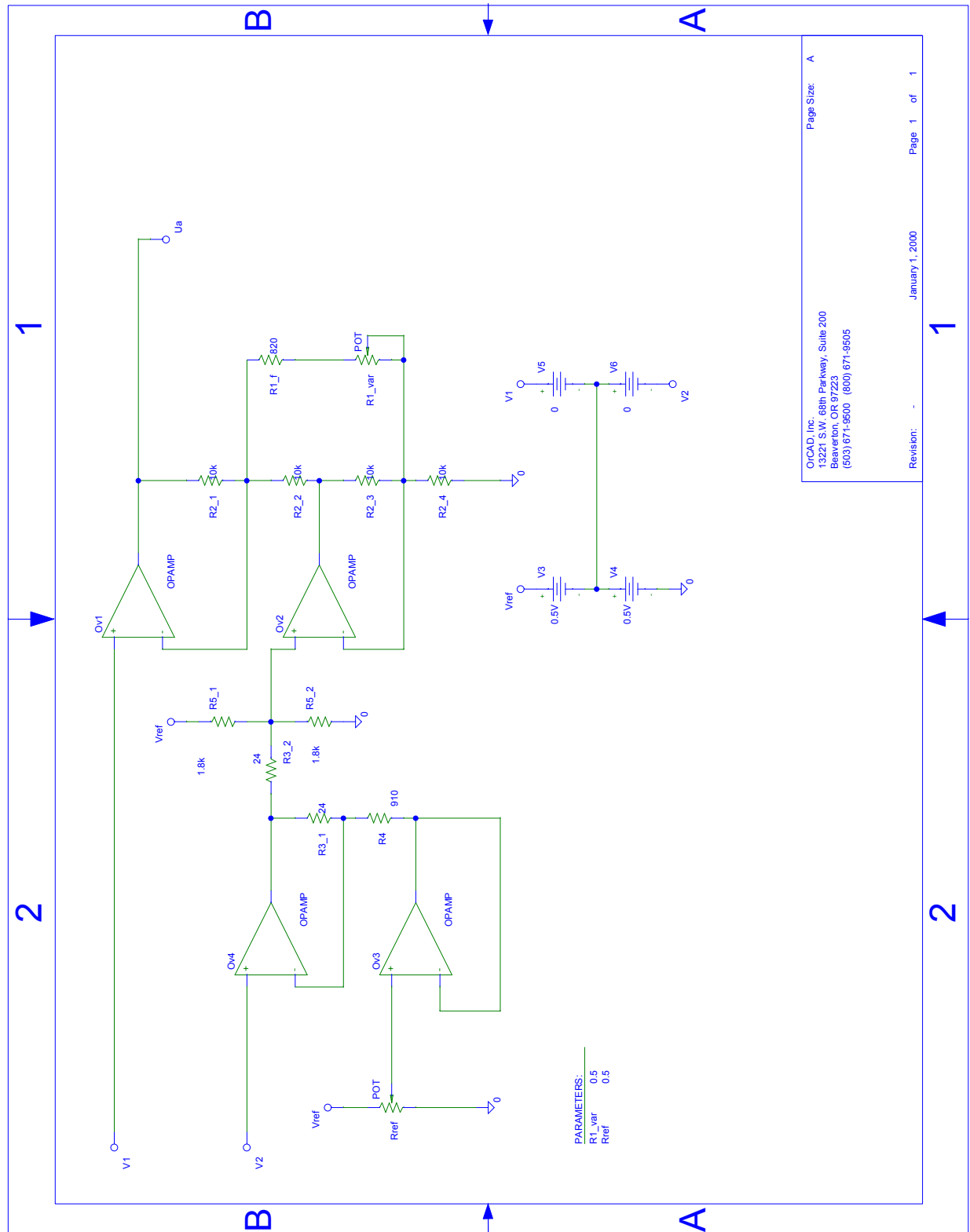


Abbildung 6.1: Schaltplan der Auswerteelektronik in PSpice

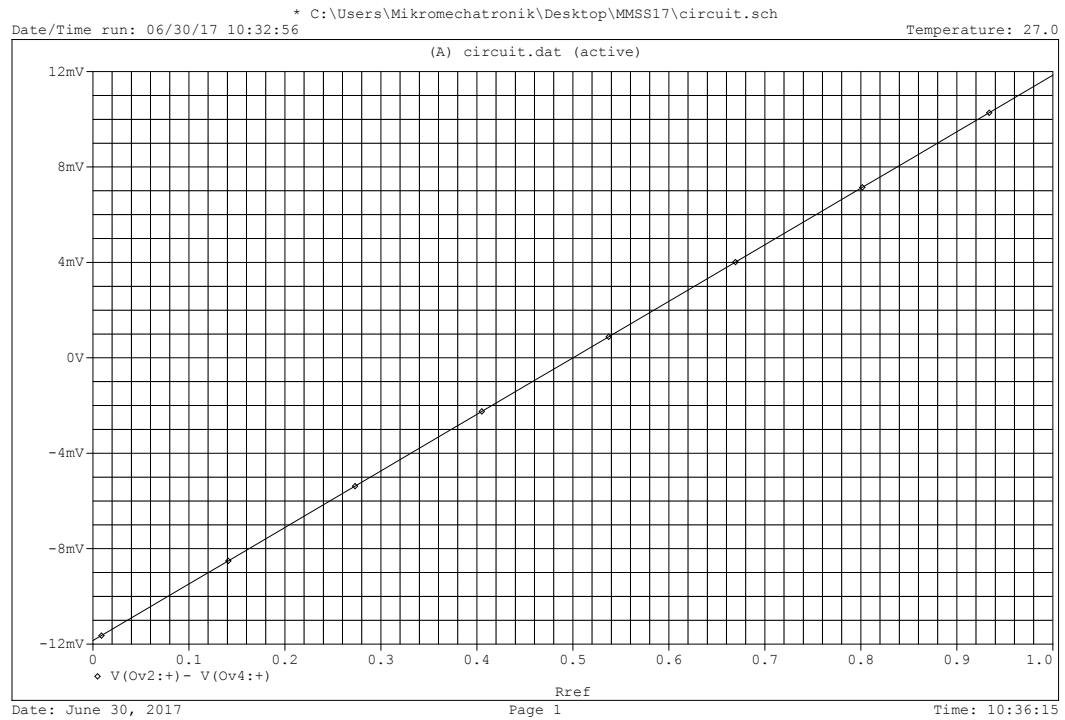


Abbildung 6.2: Verlauf der Spannungsdifferenz zwischen Operationsverstärker Ov 2 und Ov 4 über dem Widerstand Rref

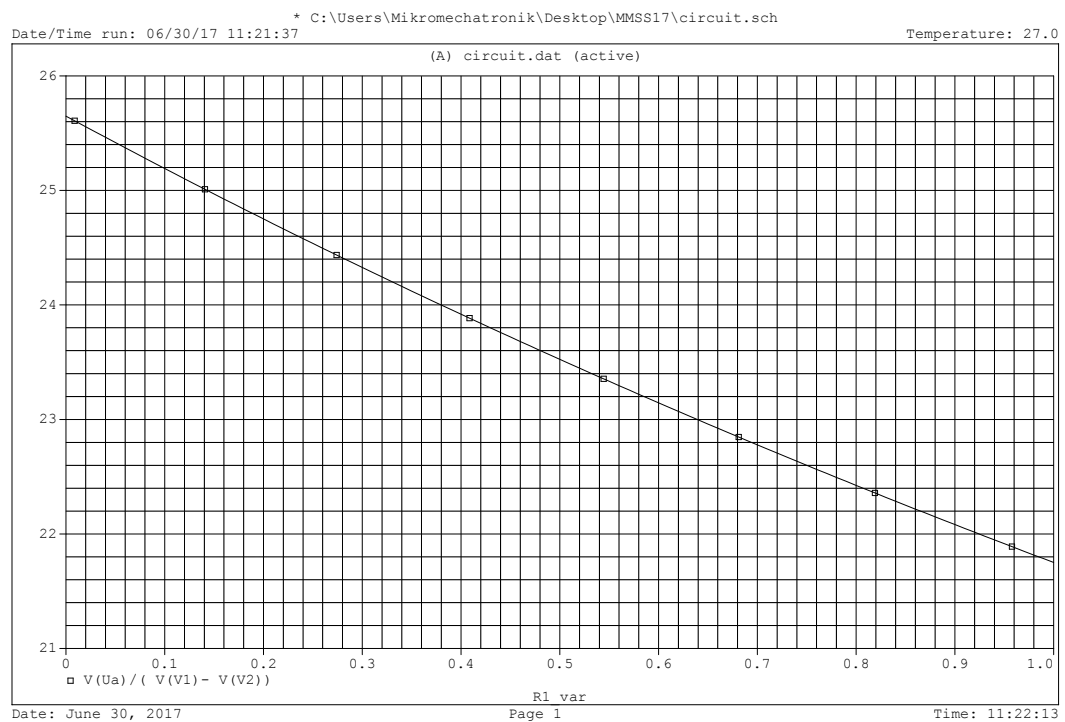


Abbildung 6.3: Verlauf der Spannungsdifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung über dem Widerstand $R1_{var}$

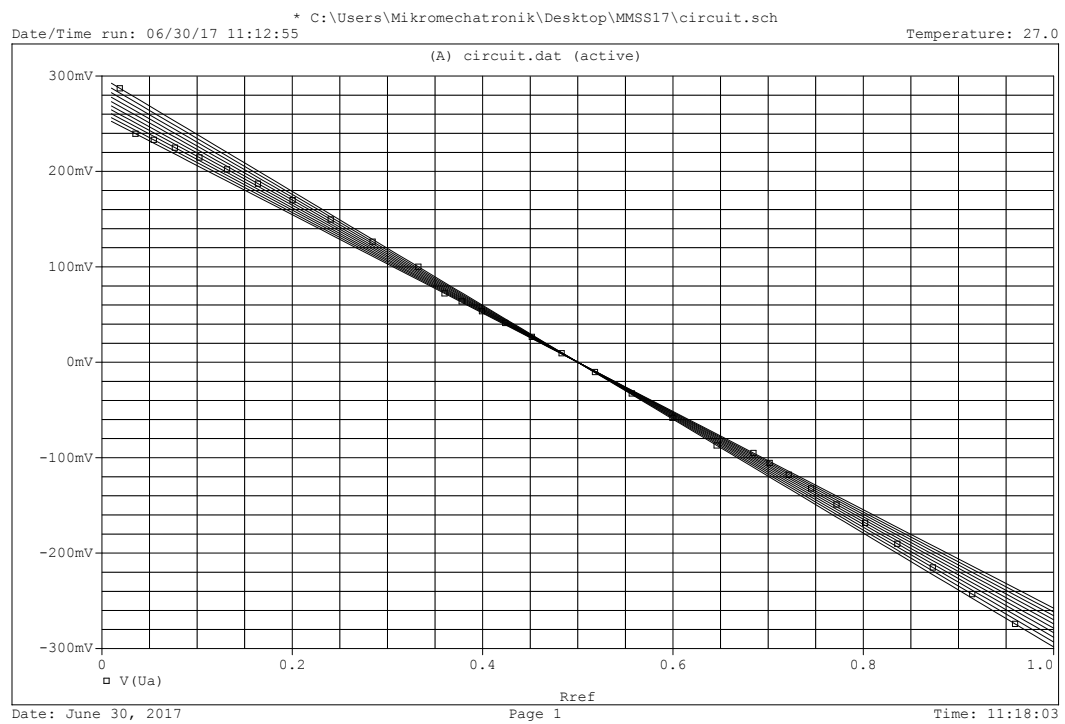


Abbildung 6.4: Verlauf der Ausgangsspannung über dem Widerstand

7 Evaluation Circuit

7.1 Leiterplattenlayout mit Eagle (Viviane Bremer)

Nachdem die Auswerteschaltung in den vorigen Kapiteln dimensioniert worden ist, wird nun die Platine designt. Mit der Software Eagle wird zunächst wieder der Schaltplan erstellt. Dieser ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Die Schaltung von zuvor wurde hier mit einem Sensoranschluss, einem Platinenstecker zur Spannungsversorgung, einer Spannungsstabilisierung für den IC, zwei Jumpers zum Wechseln der Brückenspannung und vier Platinensteckern zum Anschluss von Messgeräten erweitert.

Mit dem fertigen Schaltplan kann schließlich die Platine erzeugt werden. Hierfür wird zunächst die Größe 3150x1969 mil für die Platine eingestellt. Danach müssen alle Bauteile sinnvoll platziert und verbunden werden. Eine mögliche Lösung ist in Abbildung 7.2 zu sehen.

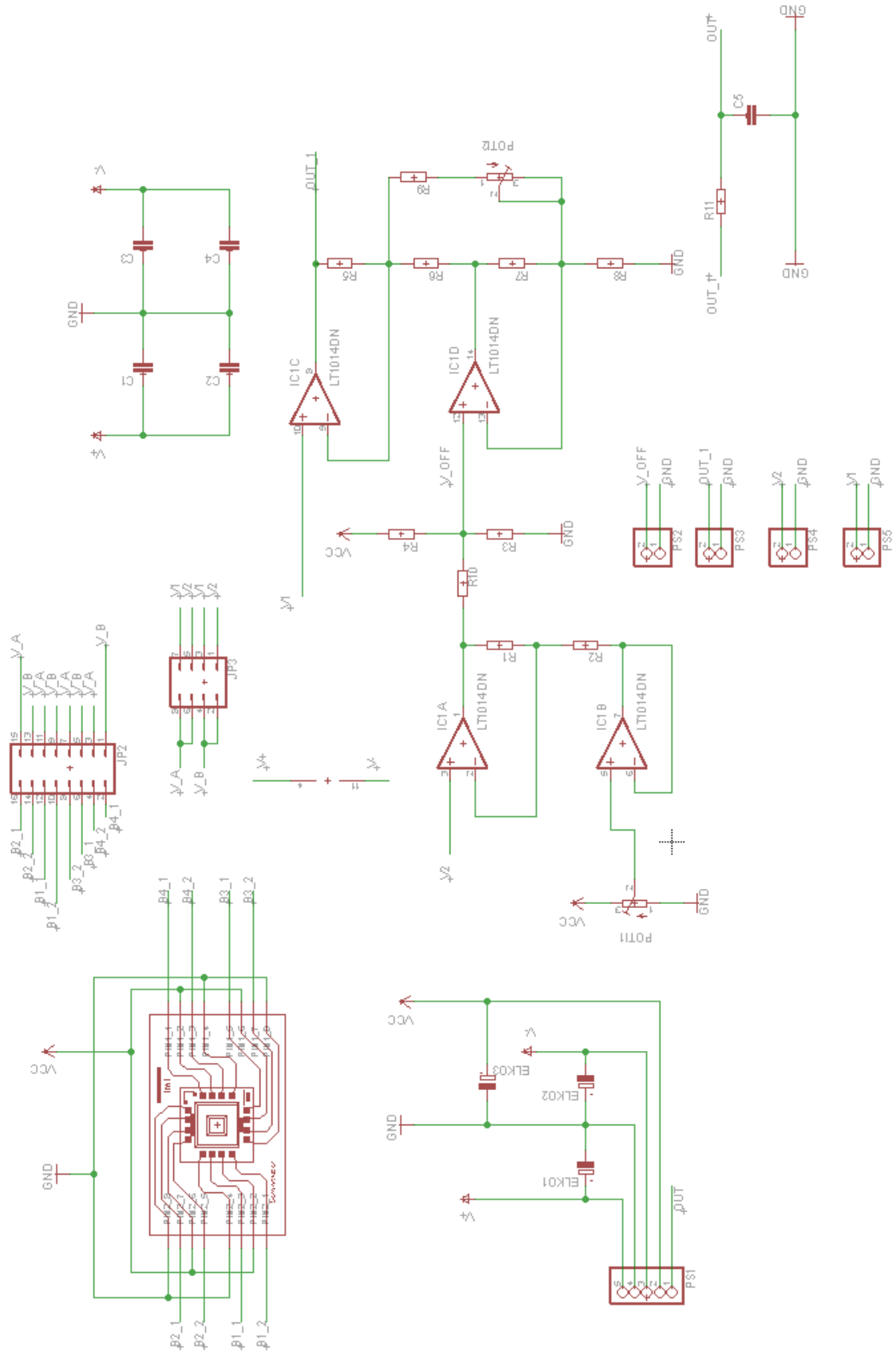


Abbildung 7.1: Eagle-Schaltplan der Auswerteelektronik

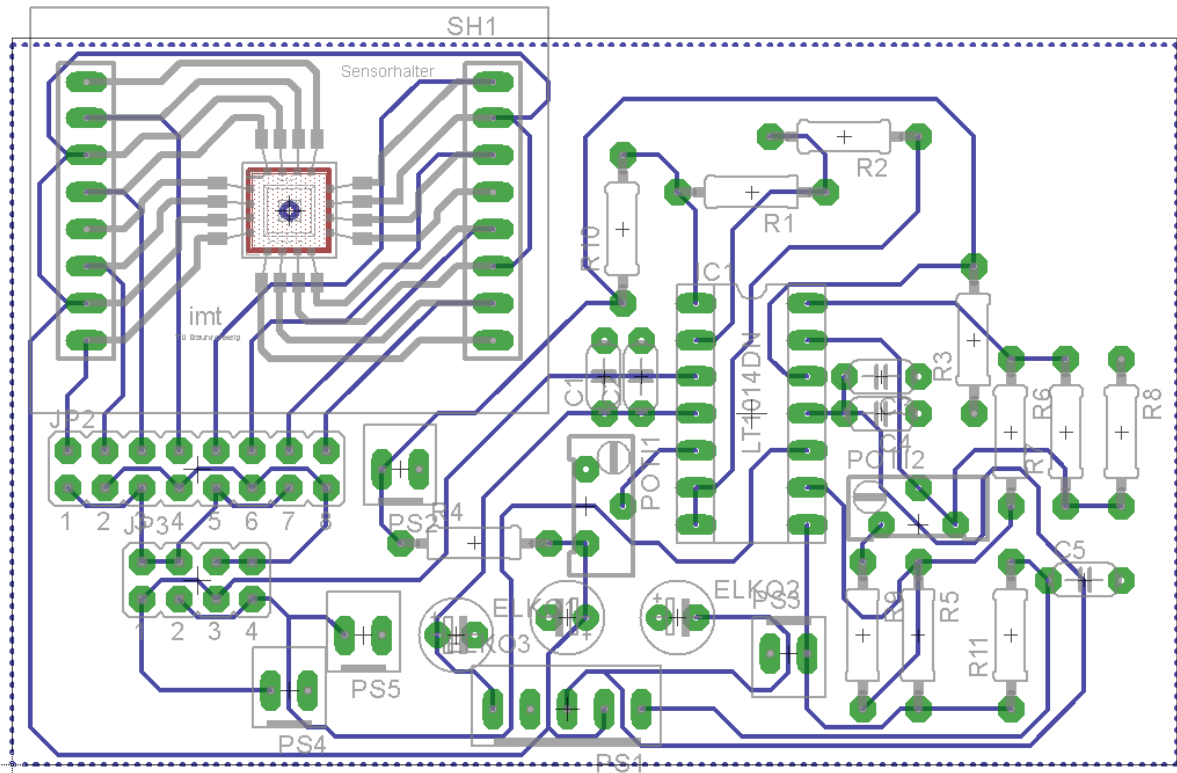


Abbildung 7.2: Platinenlayout der Auswerteelektronik in Eagle mit ausgeblendeter Massefläche

8 Zusammenfassung und Ausblick

Hier stehen die Ergebnisse der Arbeit und ein kurzer Ausblick wie es weiter gehen kann.

Appendix

A.1 Erster Anhang

Ein Anhang.

A.2 Zweiter Anhang

Ein weiterer Anhang.