



Hochschule Landshut
Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
Master Elektrotechnik

Entwicklung und Erprobung einer piezoresistiven Sensor-Schaltung mit drahtloser Energieversorgung im Projekt MedLast

Masterarbeit
von
Stephan Jobstmann

Betreuer: Prof. Dipl.-Phys. Anton Harasim
Arbeit vorgelegt am: 29. Januar 2013

Erklärung zur Masterarbeit (gemäß § 35, Abs. 7 RaPO)

Name, Vorname
des Studierenden: **Jobstmann Stephan**

Hochschule Landshut
Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Landshut, den 29. Januar 2013

(Stephan Jobstmann)

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist Teil des Projekts MedLast an der Hochschule Landshut, Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen. Ziel des Projekts ist ein System zu entwickeln, das eine Überwachung des Genesungsprozesses für Fuß-, Hüft- und Knieverletzungen sowohl für den Patienten als auch für den behandelnden Arzt ermöglicht. Dabei wird im Bereich der Fußsohle ein Elektronikmodul eingesetzt, dass Schrittzahl und Belastung auswertet. Diese Daten werden in einem Speicher aufgezeichnet und in Echtzeit für den Patienten verständlich aufbereitet und an eine Anzeige am Handgelenk des Patienten weitergeleitet. So hat der Genesende stets einen Überblick über Belastung seines Beines.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein funktionierendes Schaltungskonzept für die Elektronik des Fußmoduls zu entwickeln. Dies schließt folgende Schaltungsteile ein:

- eine Messschaltung der Belastung über einen piezoresistiven Sensor,
- eine verschleißfreie Aktivierung des Interrupts über einen Piezodruckaufnehmer,
- einen akustischen Signalgeber (Piezo-Buzzer) bei Überbelastung,
- diverse Schaltungen zur Sicherheit und Leistungsoptimierung:
 - Verpolschutz
 - Kurzschlussstromsperrre
 - Abwärtswandler zu Impedanzanpassung
- ein Empfängermodul für drahtlose Energieübertragung und
- ein Akkusystem zur Energiebereitstellung

Es wurden bei der Bearbeitung der Thematik folgende Ergebnisse erzielt:

- Durch die parallele Bearbeitung mehrerer Teilgebiete des Projekts hat sich ein geringfügiger Mehraufwand im Schaltungs-Entwurf ergeben. So wurde zunächst eine Schaltung für ein System-on-a-Chip entwickelt welches auf dem 2,4 GHz Band sendet. Dieses ist allerdings ungünstig für den körpernahen Einsatz. Darum wurde ein zweites Layout für einen Mikrocontroller mit integrierter Sendeeinheit entwickelt. Dieser sendet auf einer besser geeigneten Frequenz von 868MHz. Gleichzeitig dazu wurde ein bereits fertiges Evaluations-Modul soweit modifiziert, um die Sensorik darauf anzubinden.
- Die Sensorik wurde samt Auswertungsbaustein erfolgreich an mehreren eingebetteten Systemen getestet. Darunter war auch das oben genannte modifizierte Evaluations-Modul das auf der Frequenz von 868MHz sendet.
- Um eine ausreichende Versorgung des eingebetteten Systems sicher zu stellen, wurde ein Lithium-Ionen Akku samt Ladesystem aufgebaut und erfolgreich getestet. Dabei können konventionelle Akkus, wie etwa die für Mobiltelefone, benutzt werden.
- Bei einem Testaufbau wurde ein Piezo-Signalgeber (Buzzer) als Schalter zweckentfremdet und mit geringer Zusatzbeschaltung in Betrieb genommen. Mit diesem kann der jeweils angeschlossene Mikroprozessor über externe Interrupts angesteuert werden.
- Es wurde mithilfe einfacher diskreter Bauteile, wie einem P-Kanal MOSFET und einer selbst-zurückstellenden Sicherung, eine ausreichende Schutzbeschaltung aufgebaut und getestet. Da bei den Mikroprozessoren der Stromverbrauch unabhängig von der angelegten Spannung gleich bleibt, wurde mit einem Abwärtswandler eine Leistungsoptimierung vorgenommen.
- Während der Voruntersuchung wurde empirisch nachgewiesen, dass bei kleiner Auslenkung unter 200 Newton eine kapazitive Messmethode mit den bisher bereitgestellten Piezoelementen des Typs Sonox 502 der Firma Ceramtec unzureichende Ergebnisse liefern.

-
- Energy-Harvesting wurde im Bereich der thermoelektrischen Wandlung getestet. Allerdings hat sich beim praktischen Aufbau und bei der kommerziellen Betrachtung die drahtlose Energieübertragung als Energiezuführung für das System durchgesetzt. Ein eigener Aufbau eines Empfängers in Dickschichttechnik wurde bereits erfolgreich in Betrieb genommen.

Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Harasim und den Mitarbeitern des Hybridlabors der Hochschule Landshut. Die Unterstützung und die Hilfsbereitschaft haben mir sehr bei der Anfertigung meiner Arbeit geholfen.

Weiter möchte ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung während meiner Studienzeit und bei meinen Freunden für die stete Bestätigung meiner Berufung bedanken.

*Diese Arbeit ist all den starken Frauen gewidmet,
die immer hinter mir standen.*

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Anforderungen	2
2.1 Stand der Technik	2
2.2 Aufgabenstellung	3
2.3 Vorgehensweise	4
3 Grundlagen	5
3.1 Piezoresistives Meßprinzip	5
3.2 Drahtlose Energieversorgung	7
3.2.1 Prinzip	7
3.2.2 Effizienz	8
3.2.3 Resonanzkopplung	8
3.2.4 Auswirkungen auf den Körper	8
3.2.5 Abschirmung	10
3.3 Lithium-Ionen Akkumulator	10
3.3.1 Aufladen	11
3.3.2 Allgemeine Hinweise	13
3.4 Energy-Harvesting	14
3.4.1 Piezoelektrisch	14
3.4.2 Thermoelektrisch	16
4 Voruntersuchung	17
4.1 Motivation	17
4.2 Versuchsaufbau	17
4.3 Ergebnis	18
4.4 Messungen	19

4.4.1	Sonox P502	19
4.4.2	Piezo-Stack von Elliptec	29
5	Hardware	40
5.1	Sensorik	40
5.2	Energiebereitstellung	44
5.2.1	Superkondensator	44
5.2.2	Lithium-Ionen-Akkumulator	45
5.3	Arbeitsschaltung	50
5.3.1	CC2541	50
5.3.2	CC430F6137	57
5.4	Energiezuführung	62
5.4.1	Drahtlose Energieübertragung	62
5.4.2	Energy-Harvesting	66
6	Software	69
6.1	Frequenzgenerierung	69
6.2	Sensorauswertung & ISR	73
7	Ergebnis	87
8	Ausblick	88
A	Layout: AD1232 Sensorik (verifiziert)	89
B	Layout: Lilon-Akku-Lader (verifiziert)	90
C	Layout: CC2541, 2,4GHz SoC (verifiziert)	91
D	Layout: CC430F6137 868MHz SoC	92
	Literaturverzeichnis	96

1. Einleitung

Die moderne Schulmedizin ist mittlerweile an einem Punkt angelangt, an dem die biochemischen Prozesse innerhalb des Körpers als nahezu komplett erfasst gelten. Die Mechanismen der Informationsweitergabe über die Nervenbahnen, die Belastbarkeit der Anatomie oder die Zerlegungsprozesse des Stoffwechsels sind als solche weitestgehend erforscht. Wie jedoch in jedem Forschungsbereich bedeutet dies auch, dass die Lernkurve beziehungsweise die Anzahl der Ergebnisse an innovativen Erkenntnissen drastisch über die letzten Jahrzehnte abnehmen. Weiter lässt sich feststellen, dass Fortschritte der modernen Medizin hauptsächlich auf den Innovationen aus den Bereichen der Pharmazie und der Medizintechnik beruhen. So ermöglichen intelligente Kamerasysteme eine bessere Überwachung von Operationen am schlagenden Herzen¹ oder die Abnahme von elektrischen Nervensignalen eine Steuerung von kybernetischen Prothesen².

Die fortschreitende Entwicklung in der Medizintechnik bietet auch Hilfestellung im Genesungsprozess im Fachbereich der Orthopädie. So wird im Projekt „MedLast“ sowohl eine Unterstützung für den Patienten als auch eine Kontrollmöglichkeit während der Heilung einer Beinfraktur erstrebtt. Dabei wird das Gewicht auf dem geschienten Fuß und die Häufigkeit der Auftritte aufgezeichnet. Gleichzeitig sollen diese Daten zur zeitnahen Kontrolle an eine visuelle Ausgabeeinheit, ähnlich einer Armbanduhr, weitergegeben werden. Für die Konstruktion der Elektronik, welche die Werte für Belastung und Schrittzahl aufnimmt, werden die Gebiete Energieversorgung und Sensorik zusammengefasst. Hierbei kann nur sehr schlecht auf proprietäre Komplettsysteme zurückgegriffen werden. Darum sollen in dieser Arbeit die nötigen Schritte unternommen werden, um ein solches System zu erstellen und in Betrieb zu nehmen.

¹Motion Compensation in Minimally Invasive Heart Surgery [DLR13a]

²Paralyzed individuals control robotic arms to reach and grasp using brain computer interface [DLR13b]

2. Anforderungen

2.1. Stand der Technik

Zur Messung der Gewichtskraft wurde auf einen weitverbreiteten Standard mit Dehnungsmessstreifen zurückgegriffen. Diese finden bei Körperwaagen, Achslastsensoren und Drehmoment-Aufnehmern Einsatz. Somit gilt diese Gattung der Kraftaufnehmern als etabliert.

Bisher gibt es kein System, das aktiv die laufende Belastung bei Beinfrakturen, Knöchel-, Knie- und Hüftverletzungen überwacht. Es werden lediglich nur Direktiven durch den behandelnden Arzt vorgegeben. Diese können allerdings weder vom Arzt überprüft noch vom Patienten einwandfrei nachverfolgt werden. Ein gekapseltes eingebettetes Messsystem zur Erfassung der Schrittzahl und der Belastungsdaten ist noch nicht bekannt.

In der Sparte der drahtlosen Energieübertragung konnten bei dem Qi-Standard größere Absatzzahlen erreicht werden. Insbesondere die Vertretung bei namhaften Herstellern wie Nokia [NOK13] oder Energizer[ENE13], welcher eine breite Palette an Lösungen für Ladestationen hat. Es sind zwar andere Standards im Kommen, aber diese befinden sich noch im Entwicklungsstadium.

Bei der Akkutechnik kam es in letzten Jahren zu einer übergreifenden Verbreitung der Lithium-Ionen Technologie. Es gab bei diesem Typ noch eine weitere sich verbreitende Entwicklung, den Lithium-Polymer Akku. Dabei ist die Anode nicht mehr auf einer Flüssigkeit basierend aufgebaut, sondern auf vielen kleinen Schichten. Durch diese Umgestaltung sind verschiedenste neue Bauformen möglich. Bei dieser Arbeit wird aber weiterhin an der Lithium-Ionen Technologie festgehalten.

2.2. Aufgabenstellung

Als wesentliche Bestandteile der Aufgabenstellung sind zuerst die zu bearbeitenden Teilgebiete zu nennen. Hierzu gehören:

- Sensorik-Auswertung
- Energiezuführung
- Energiebereitstellung

In der Sensorik-Auswertung ist in erster Linie der zu verwendende Sensor bestimmend. Da dieser sich durch den steten Optimierungsverlauf auch im Verhalten sowie in den zu erwartenden Messgrößen ändern kann, sollte diesbezüglich ein Freiheitsgrad in der Implementierung vorhanden sein. Durch vorausgehende Messungen des Authors werden piezoresistive Druckaufnehmer verwendet. Dieser muss einer Belastung von 150kg Körpergewicht im Lastwechsel standhalten. Weiter soll im zentralen Mikrocontroller des Moduls eine passende Auslesesoftware erstellt werden. Diese muss die gemessenen Daten aufbereiten und in eine passende SI-Einheit wie Newton [N] oder Kilogramm [kg] zurück rechnen.

Bei der Energiezuführung sollen dahingehend Überlegungen angestrebt werden, auf welche Art und Weise das komplette Modul mit Spannung versorgt werden kann. Dabei sollen autarke wie auch fremd-gespeiste Quellen betrachtet werden. Dabei werden Energie-Harvesting Systeme und auch Konzepte für die drahtlose Energieübertragung analysiert.

Die Energiebereitstellung bezieht sich auf die Speicherung im oder am Modul selbst. Hierbei ist die Abstimmung zwischen Bedarf und Bereitstellung ausschlaggebend für die Wahl der zu verwendenden Technologie. Hier werden Superkondensatoren und Lithium-Ionen-Akkus gegenübergestellt und bewertet. Als kleinere Additive sind folgende elektronische Komponenten noch vorgesehen:

- Piezo-Summer samt Treiberschaltung
- Schutzbeschaltung
- Temperaturaufnehmer

Somit ergibt sich ein kompletter Aufbau bei dem zuerst ein System zur Energiezuführung, wie thermisches Energy-Harvesting oder drahtlose Energieversorgung, angeführt wird. Eine Zwischenspeicherung der elektrischen Energie, in Form von entweder Superkondensatoren oder Lithium-Akkumulatoren, wird schaltungstechnisch gleich danach eingegliedert. Nach einer Schutzbeschaltung wird eine Anpassung des Spannungspegels durch einen Abwärtswandler vorgenommen bevor es im Stromlaufplan weiter zu der Arbeitsschaltung geht. Diese besteht aus einem Mikrocontroller, in dem ein Funkmodul implementiert ist. An diesem wird ein A/D-Wandler angefügt, der die Sensor-Auswertung übernimmt. Diese Reihe an Baugruppen gilt es zu entwerfen, aufzubauen und deren Funktion zu verifizieren.

2.3. Vorgehensweise

Grundsätzlich lässt sich die Herangehensweise beim Bearbeiten der einzelnen Teilbereiche in vier Schritte einteilen:

1. Zuerst werden die Anforderungen analysiert und die in Frage kommenden Elemente aufgelistet. Je nach den zu gewichtenden Eigenschaften, wie beispielsweise Funktionsumfang, Implementierungsaufwand, Leistungsaufnahme oder langfristige Kosten pro Stück in der Fertigung werden die Bausteine daraufhin ausgewählt.
2. Als nächsten Schritt folgt die Anpassung an vorhandene Schaltungselemente. Hierbei müssen Berechnungen zur Schaltungsauslegung vorgenommen werden.
3. Anschließend wird ein Schaltplan erstellt. Dies erfolgt meist anhand der Informationen aus den entsprechenden Datenblättern oder der gängigen Schaltungstechnik. Dieser wird dann in ein passendes Layout umgewandelt.
4. Zuletzt wird eine Platine des Prototyps bestellt, bestückt und auf Funktion geprüft.

3. Grundlagen

3.1. Piezoresistives Meßprinzip

Bei dieser Arbeit werden Dehnungsmessstreifen¹ zum Detektieren der auftretenden Gewichtskraft verwendet. Deren grundlegendes Messprinzip beruht auf der Deformation des Materials. Durch diese werden die Parameter, l Länge und q Querschnitt, der Grundgleichung 3.1 für den elektrischen Widerstand R verändert.

$$R = \frac{l}{q} \cdot \rho \quad (3.1)$$

Die folgenden Rechnungen und Erkenntnisse beziehen sich aus einer Passage des Lehrbuchs [ES12, S.234 ff.] . Die relative Widerstandsänderung kann mit der Fehlerabschätzung bestimmt werden:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3.2)$$

wenn der Querschnitt q durch Durchmesser D ersetzt wird

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3.3)$$

Dividiert man durch $\Delta l/l$

$$\frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} = 1 - 2 \frac{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} + \frac{\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} \quad (3.4)$$

Das Verhältnis von relativer Widerstandsänderung und Dehnung wird folgend mit

¹kurz: DMS

K bezeichnet

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (3.5)$$

Das Verhältnis von relativer Querkontraktion und relativer Längenänderung wird durch μ ersetzt.

$$\mu = -\frac{\Delta D/D}{\Delta l/l} \quad (3.6)$$

Somit erhält man statt Gleichung 3.4 auf der vorherigen Seite die folgende:

$$K = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l} \quad (3.7)$$

Die relative Änderung des spezifischen Widerstands $\Delta\rho/\rho$ bezogen auf die relative Längenänderung $\Delta l/l$ bleibt bei den weit verbreiteten Metall-DMS nahezu unverändert. Zur Messung von Deformationen, wie Druck, Zug oder Torsion müssen diese isoliert auf das zu vermessende Material aufgebracht werden. Dabei werden diese in Mäanderform gebrachten Metallbahnen in Folie eingegossen und mit Klebstoff ammontiert. Allerdings kann es dabei zu Komplikationen im Verbund mit der schützenden Folie kommen. Darum werden oft DMS in Dickschichttechnik mit anderen Materialien gleich auf den Folienträger aufgedruckt und eingebrannt. So wird schon durch den Fertigungsprozess eine Fehlerquelle ausgeschlossen. Dennoch muss bei dieser Technologie nun auch die relative Änderung des spezifischen Widerstands berücksichtigt werden. Diese ist durch den piezoresistiven Effekt bei dieser Stoffgattung ausschlaggebend. Bei Metall-DMS treten K -Werte von höchstens 2 auf. Im großen Gegensatz dazu bewegen sich die auf Silizium basierenden DMS mit K -Faktoren von -100 bis 120 je nach Dotierung.

3.2. Drahtlose Energieversorgung

Das hier vorgestellte Konzept bezieht sich auf Technologie, die mit dem WPC²-Standard konform ist. Es gibt auch andere Konzepte, die sich mit drahtloser Energieübertragung beschäftigen. Das ist auch nachvollziehbar wenn man bedenkt, dass die ersten drahtlosen Anlagen von Nikola Tesla bereits 1895 in Betrieb genommen wurden[TES13]. Allerdings weisen die meisten einfacheren Aufbauten einen entscheidenden Nachteil auf: Sie sind nicht geregelt. Der WPC-Standard hat aber nicht nur das Regelungssystem als Vorteil gegenüber anderen Konzepten vorzuweisen. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Punkte der Spezifikation aufgeführt und erklärt. Dabei ist der Inhalt sinngemäß aus Quelle [WPC13] übertragen worden.

3.2.1. Prinzip

Das zugrundeliegende Prinzip ist die induktive Kopplung, ähnlich derer eines Transformators. Sie besteht aus einer Empfänger- und einer Sendespule, welche wiederum eine magnetisch-gekoppelte Einheit bilden. Wechselströme in der Sendespule erzeugen ein Magnetfeld, das über die Lenz'sche Regel Strom in die Empfängerspule induziert. Die durch das Ohm'sche Gesetz entstehende Spannung kann zur Versorgung eines Handheld-Geräts verwendet werden. Über den Kopplungsfaktor und die Güte der Induktivitäten lassen sich Rückschlüsse auf das System ziehen. Bestimmend wirken folgende Faktoren auf die Kopplung:

- Abstand zwischen den beiden Spulen
- Größe der Spulen zueinander
- Form der Spulen
- Winkel zwischen den Spulen

²Wireless Power Consortium

3.2.2. Effizienz

Zur Erhaltung einer optimalen Anpassung zwischen der Ein- und Ausgangsleistung müssen weitere Dinge beachtet werden. So darf kein allzu großer Unterschied im Größenverhältnis der beiden beteiligten Induktivitäten entstehen. Weiter sinkt der Leistungsfaktor mehr als indirekt proportional mit dem steigenden Abstand zwischen den Spulen.

3.2.3. Resonanzkopplung

Um die induktive Kopplung zu erweitern, können Resonanz-Schwingkreise verwendet werden. Dieses Prinzip wurde bereits von Nikola Tesla im vorletzten Jahrhundert aufgegriffen. Für Systeme mit schlechter Kopplung ist dies eine gute Möglichkeit, den Energiefluss zu verbessern. Denselben Rahmenbedingungen, wie der rein induktiven Kopplung folgend, hat diese Methode bereits weite Verbreitung gefunden. Ähnlich wie die Saiten einer akustischen Gitarre in einem entsprechenden Umfeld lässt sich selbst mit geringstem Aufwand ein Schwingkreis anregen. Bei der Gitarre genügt beispielsweise eine Unterhaltung zwischen zwei Personen in der selben Tonlage, um eine merkliche Schwingung wahrnehmen zu können. Bei dieser Form der Energieübertragung lässt sich ein vergleichbarer Aufbau mit zusätzlichen Kondensatoren zu den Induktivitäten erstellen. Diese eliminieren auftretende Streuinduktivitäten im Empfänger und magnetisierende Induktivitäten im Sender. Die einzige übrigbleibende Größe ist der reelle Widerstand der Spulen. Aber bei gegebener guter Güte wie im vorhergehenden Unterkapitel 3.2.1 auf der vorherigen Seite lässt sich dieser Effekt als minimal betrachten.

3.2.4. Auswirkungen auf den Körper

Ausgehend von der Allgegenwart von Elektromagnetischer Strahlung und dessen weit gefächertes Frequenzspektrum von 0 bis 300GHz sind gesundheitliche Aspekte zu untersuchen. So genügen bei sogenannter ionisierender Strahlung zu der auch Röntgen- und Gammastrahlung zu zählen ist, wenige Milliwatt, um den menschlichen Körper zu beschädigen. Die Frequenzen der WPC-konformen Module bewegen sich im Gegensatz dazu im nicht ionisierenden Bereich. Die „International

Commission on Non-Ionizing Radiation Protection”, kurz ICNIRP, hat dazu Richtlinien aufgestellt[ICN98]. Darin wird festgehalten, mit welcher Leistung in einem bestimmten Frequenzbereich auf den menschlichen Körper eingewirkt werden darf, ohne diesen zu schädigen.

Art der Aussetzung	Frequenz-Bereich	Belastung des gesamten Körpers in $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$	Belastung von Kopf und Torso in $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$	Belastung der Extremitäten in $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$
Berufsbedingte Belastung	1-100kHz	-	-	-
Berufsbedingte Belastung	100kHz-10MHz	0,4	10	20
Belastung in der Öffentlichkeit	1-100kHz	-	-	-
Belastung in der Öffentlichkeit	100kHz-10MHz	0,08	2	4

Tabelle 3.1.: Richtwerte nach der ICNIRP[ICN98]

Weiter liegt die Überlegung nahe, Energie über größere Distanzen bereitzustellen oder Räume mit einem elektromagnetischen Feld zu fluten, um so auf jedem Punkt darin mit einer Empfängerspule einkoppeln zu können. Für den relevanten Frequenzbereich von 100kHz-10MHz nach ICNIRP bleibt die maximale abzugebende, nicht schädliche Strahlung konstant. Allerdings ist auch zu erwähnen, dass die zulässige Leistungsübertragung für Empfängerspulen von Handheld-Geräten (Durchmesser von 4cm bis 10cm) sich zwischen 2mW und 30mW bewegt. Damit lassen sich höchsten Sensornetzwerke, wie beispielsweise das ZigBee-Konzept versorgen. Zum Laden von mobilen Geräten ist diese geringe zugelassene Leistung unzureichend.

3.2.5. Abschirmung

Maßnahmen zur Abschirmung müssen aus folgenden Gründen bei diesem System ergriffen werden:

- Das magnetische Feld könnte in andere Geräte einstreuhen
- Es könnte zur Erwärmung der an der sekundären Seite angebrachten Akkuzelle kommen
- Wirbelströme in ungeschützten Metallteilen sind zu erwarten

Für diesen Frequenzbereich gibt es zwei grundlegende Methoden, um magnetische Quellen abzuschirmen. Zum einen wäre die Option, dass ein magnetisches Gegenfeld aufgebaut wird, welches das eigentliche Arbeitsfeld auf die zu koppelnde Spule lenkt. Zum anderen besteht die Möglichkeit dass ein ferromagnetisches Material, beispielsweise eine Eisen- oder Ferritplatte, das magnetische Streufeld einfängt und bündelt. Diese Lösung wäre allerdings nur mit einer entsprechend dicken Schicht von ferromagnetischem Material sinnvoll. Denn dabei würde dennoch über der Platte ein magnetisches Feld (Restfeld) entstehen. Wenn man beide Optionen zusammenlegt, ergibt sich eine optimale Abschirmung. Dabei wird über die Eisenplatte eine Schicht eines elektrischen Leiters aufgebracht. In diesem wird vom Restfeld ein Strom erzeugt, der wiederum ein seiner Ursache entgegen wirken- des Magnetfeld aufbaut. Dieses löscht das oberhalb der Abschirmung vorhandene magnetische Feld aus.

3.3. Lithium-Ionen Akkumulator

Der LiIon-Akku³ stellt den aktuellen Stand der Technik in der elektrischen Speichertechnologie dar. Da dieser auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, sollen im Folgenden die wichtigsten Eckdaten und Informationen bezüglich dessen Verwendung näher erläutert werden. Der Inhalt wurde sinngemäß aus der Webseite Battery University [BAT13] übernommen.

³Lithium-Ionen Akkumulator

3.3.1. Aufladen

Der Ladeprozess ähnelt dem von Blei-Akkumulatoren. Im Gegensatz zu diesen ist allerdings auf die Speisespannung genauestens zu achten. Einzelne Zellen werden mit einer Spannung von 4,20V geladen. Dabei darf die anliegende Spannung höchstens $\pm 50\text{mV}$ vom Normalwert abweichen. Andernfalls ist mit einer Verkürzung der Lebensdauer der Akku-Zelle zu rechnen. Anders als bei anderen Akkumulatoren wie dem NiMH⁴-Akku ist auch keine sogenannte Erhaltungsladung⁵ zulässig. In Abbildung 3.1 sind die einzelnen Schritte des Ladevorgangs zu sehen. Diese werden im Folgenden näher erklärt.

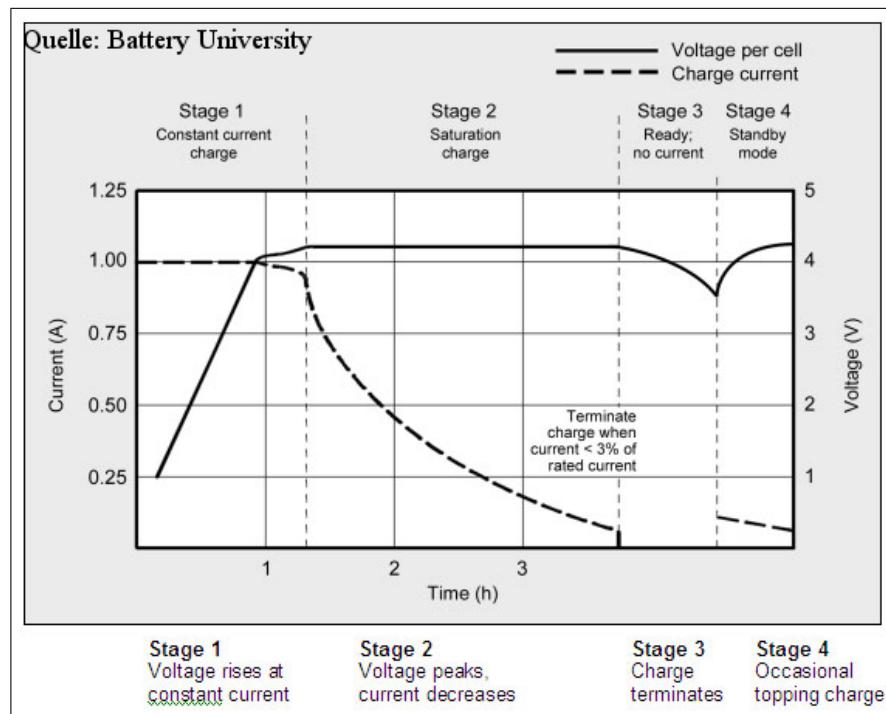


Abbildung 3.1.: Ladungskurve eines typischen Lithium-Ionen-Akkumulators

Quelle: Cadex Electronics Incorporated [BAT13]

⁴Nickel-Metallhydrid

⁵besser bekannt unter dem englischen Begriff: trickle charging

Phase 1

In der ersten Phase des Ladevorgangs wird der Akku mit einem konstanten Ladestrom gespeist. Dabei wird die Höhe in der Einheit C festgelegt. Diese ist nicht zu verwechseln mit der Bezeichnung der Ladung, *Coulomb*. Stattdessen handelt es sich um einen Umrechnungsfaktor, ausgehend vom Quotienten $\frac{\text{Ladestrom}}{\text{Kapazität}}$ beziehungsweise $1 \frac{A}{Ah}$. Dabei wird das resultierende $\frac{1}{h}$ in der Literatur ignoriert und generell nur von C gesprochen. Übliche Werte hierfür bewegen sich zwischen 0,5 und $1C$. Ein Ladestrom von $0,7C$ hat als resultierenden Strom 1,4A bei einer 2Ah Zelle. Allerdings ist es für die Zelle auch nicht schädlich, wenn sie weit unter diesen Werten bestromt wird. So können LiIon-Zellen beispielsweise auch mit Solarzellen oder anderen Niederstrom-erzeugenden Quellen gespeist werden.

Phase 2

Wenn beim Laden mit konstanten Strom der Spannungswert von 4,05V erreicht wird, ändert sich die Ladestrategie. Nun wird eine konstante Spannung von 4,2V an die Zelle angelegt. Dabei wird der Ladestrom weiter gemessen, denn an ihm wird das Abbruchkriterium festgelegt. Erreicht der Strom 3% des in der ersten Phase festgelegten Werts, so ist der Akku fertig geladen und die Zelle gesättigt. Auch hier sei angemerkt, dass die maximale Spannung von 4,2V nicht zwingend erreicht werden muss. Wird die Zelle bei einer Spannung von 4,1V geladen, erreicht sie nicht die maximale Kapazität. Dafür kann Sie öfter geladen werden, die Ladezyklenzahl erhöht sich.

Phase 3

Diese Phase beschreibt lediglich den Arbeitszustand des Akkus. Dabei sinkt vorerst die Spannung der Zelle rapide von dem zuvor angelegten Ladungshöchstwert von 4,2V auf eine Nennspannung von 3,6 bis 3,7V. Auf diesem Wert hält sich die Spannung relativ lange, bis dieser kurz vor der vollständigen Entladung steht. Erst dann beginnt die Spannung wieder weiter zu sinken. Je nach Herstellerempfehlung befindet sich die Entladeschlussspannung zwischen 2,5 und 3V. Wird der Akku

dennoch weiter entladen, können entweder Schäden auftreten oder er muss mit einem anderen Ladeprofil wieder regeneriert und vorgeladen werden.

Phase 4

Soll der Akku auf Bereitschaft geladen werden, so darf dieser nicht mit einer Erhaltungsladung bestromt werden. Stattdessen wird die Spannung der Zelle gemessen und bewertet. Fällt diese unter einen Schwellwert von meistens 4,05V wird mit Phase zwei wieder nachgeladen, bis das Abbruchkriterium des Ladestroms erreicht worden ist.

3.3.2. Allgemeine Hinweise

- LiIon Akkus sollten nie unter 2,7V per Zelle entladen werden. Daher sollte bei der Einlagerung darauf geachtet werden, dass eine Mindestladung von 40% der Maximalkapazität vorhanden ist.
- Bei einem gewöhnlichen Ladevorgang ist eine Temperaturerhöhung der Zelle von 5-10°C üblich. Höhere Temperatursprünge sind ein Zeichen für eine vorangegangene, unsachgemäße Handhabung oder Schäden am Akku.
- LiIonen Akkus sollten generell bei moderaten Temperaturen betrieben werden. Insbesondere beim Laden sollte darauf geachtet werden, dass die Temperatur 0°C nicht unterschritten wird.
- Tiefentladene Akkus können mit einem speziellen Ladeprofil eventuell wieder aktiviert werden.
- Eine vollständige Ladung beziehungsweise Entladung wie bei NiMH-Akkus ist nicht förderlich für dessen Lebensdauer. Teilaufladungen sind bei diesem Akkutyp besser.

3.4. Energy-Harvesting

3.4.1. Piezoelektrisch

Eines der größten abgedeckten Felder im Energy-Harvesting Bereich ist die Gewinnung von nutzbarer elektrischer Energie aus vorhandener mechanischer Energie. Hierbei werden die piezoelektrischen Effekte genutzt, welche bei Druck oder Schwingungsbelastungen auf einem Piezokristall entstehen [Dem11, vgl. S.36 ff]. Dabei entsteht bei bestimmten nichtleitenden Keramiken aufgrund von mechanischem Druck elektrische Ladung an den Oberflächen. Die inneren Ladungskerne driften dabei auseinander, es bildet sich ein Dipol aus. Es werden die grundlegenden Gleichungen des Piezo-Effekts wie folgt beschrieben:

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \quad (3.8)$$

$$S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad (3.9)$$

Mit den Parametern: D : Dielektrische Verschiebung (statt Polarisierung)

S : Relative mechanische Dehnung

T : Mechanische Spannung

E : Elektrische Feldstärke

d : piezoelektrische Ladungskonstante

s^E : Elastizitätskonstante, $E = \text{konstant}$

ε^T : Permittivität, $T = \text{konstant}$

Zum Energy-Harvesting werden bevorzugt Biegebalken⁶ verwendet. Diese können technologisch an die angeforderte Kraftaufnahme, die Schwingungsfrequenz und die Amplitude der resultierenden Spannung angepasst werden. Der Aufbau als Biegebalken liefert sein Optimum der Energieumwandlung bei seiner Resonanzfrequenz. Dabei wird weiter zwischen Transversalschwingern⁷ (Formel 3.10 und 3.11) und Longitudinalschwingern⁸ (Formel 3.12 und 3.13) unterschieden.

$$D_3 = d_{31} \cdot T_1 + \varepsilon_{33}^T \cdot E_3 \quad (3.10)$$

$$S_1 = s_{11}^E \cdot T_3 + d_{31} \cdot E_3 \quad (3.11)$$

⁶im Englischen auch bekannt als Cantilever

⁷31-Schwingungsmodus

⁸33-Schwingungsmodus

Bei den Transversalschwingern wird quer zur mechanischen Auslenkung eine elektrische Spannung erzeugt. Wenn mechanische Schwingung bzw. Druckbelastung mit dem elektrischen Feld bzw. der dielektrischen Verschiebung gleichgerichtet ist, wird von Longitudinalschwingern gesprochen. Transversalschwinger erzeugen eine rund zehnmal höhere Spannung als Longitudinalschwinger [Dem11, S.39]. Ein Beispiel für die Wirkungsweise im kristallinen Aufbau eines longitudinal aktiven Piezoelements ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Dabei ist recht deutlich die Ladungsverschiebung aufgrund der Verzerrung der Kristallstruktur zu erkennen.

$$D_3 = d_{33} \cdot T_3 + \varepsilon_{33}^T \cdot E_3 \quad (3.12)$$

$$S_3 = s_{33}^E \cdot T_3 + d_{33} \cdot E_3 \quad (3.13)$$

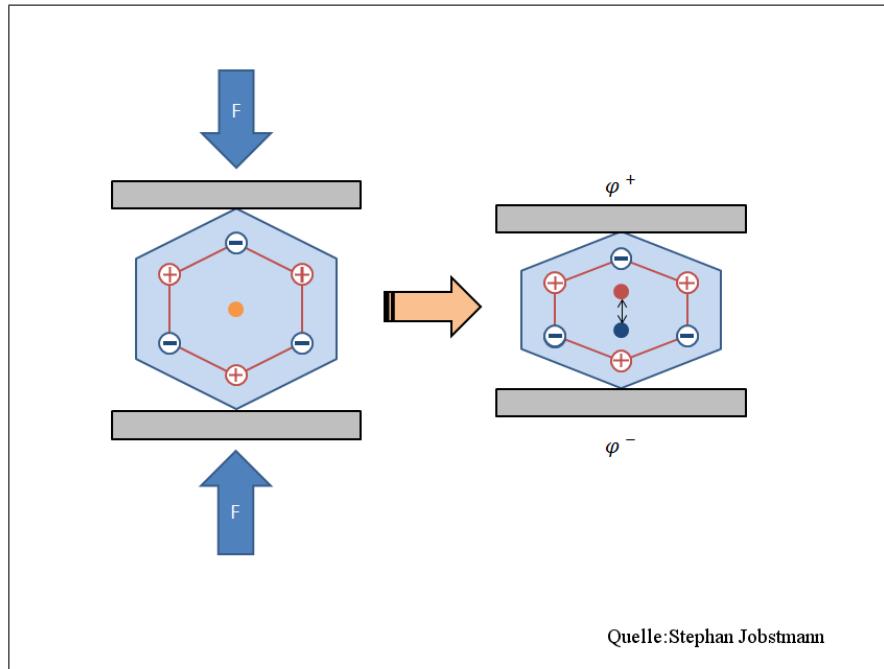


Abbildung 3.2.: Longitudinaler Piezoeffekt; Es ist der Aufbau der Kristallstruktur und die Ladungsverschiebung eines Piezoelements zu sehen. Bei Krafteinwirkung verschieben sich die Ladungen im Kristall und erzeugen eine Spannung an den Außenflächen.

3.4.2. Thermoelektrisch

Eine im Vergleich zu piezoelektrischem Energy-Harvesting hohe Energieumwandlung wird mit der thermoelektrischen Transformation erzielt. Dabei wird als physikalische Grundlage der Seebeck-Effekt benutzt. Dieser beschreibt, dass bei zwei unterschiedlichen Metalllegierungen bei vorliegender Differenz der Temperaturen am Übergang der Elemente eine Spannung entsteht. Die entstandene Potentialdifferenz wird auch Thermospannung [ES12, vgl. S.158] genannt. Die Inverse dieses Vorgangs wird mit dem Peltier-Effekt beschrieben. Da das Verhalten der spezifischen Elemente reziprok ist, können Peltierelemente auch zur Gewinnung von elektrischer Energie genutzt werden.

Der Seebeck-Effekt beruht auf den folgenden molekularen Gegebenheiten: Naturgemäß wandern bei einem Metall, welches einem Temperaturunterschied ausgesetzt ist, die Elektronen von der heißen zur kalten Seite. Dies geschieht aufgrund der natürlichen Diffusionsbewegung innerhalb des Metalls. Bei zwei aneinanderliegenden, verlötzten oder verschweißten Legierungen gibt das Metall mit der niedrigeren Austrittsarbeit Elektronen an das andere Metall ab und wird dadurch positiv geladen. Dadurch bildet sich an der Kontaktfläche ein elektrisches Feld. Dieses kann resultierend als direkte Proportionale zur anliegenden Temperaturdifferenz der zwei Kontaktstellen mit einem Voltmeter gemessen werden. Übliche Werte hierfür sind ca. $10 \frac{\text{mV}}{100^\circ\text{K}}$. Durch intelligente Beschaltung, zum Beispiel mehrere Elemente in Reihe, lässt sich eine höhere Empfindlichkeit erzielen. Mit dem in Kapitel 5.4.2 auf Seite 66 vorgestellten LTC3108 Baustein lässt sich ab einer Ausgangsspannung von 20mV eine stabile Energieumwandlung in Gang bringen.

Wird der technischen Aufbau nun so gestaltet, dass er zur Energieumwandlung und nicht zur Temperaturmessung verwendet werden soll, erweist es sich als nützlich ein oder mehrere Peltierelemente im umgekehrten Betrieb zu verwenden. [Dem11, vgl. S.30]

4. Voruntersuchung

4.1. Motivation

Ausschlaggebend für diese Messungen ist die Bestimmung von mechanischen Lastwechseln im niederfrequenten Bereich unter 4Hz. Genauer handelt es sich dabei um die Erfassung der Druckbelastung einer medizinischen Schienung eines verletzten Beines, mithilfe von piezoelektrischen Elementen. Diese Messung sollte bereits im Vorfeld der Arbeit eine Aussage zulassen, welche Methode, piezokapazitiv oder piezoresistiv, zur Bestimmung der anliegenden mechanischen Last den größeren Vorteil bietet. Bei diesen Bauelementen können anhand von drei Parametern Rückschlüsse auf die mechanische Belastung gezogen werden:

- Spannung,
- Ladung,
- Kapazität.

Dieses Kapitel bezieht sich auf die Untersuchung von Abhängigkeiten zwischen mechanischer Druckbelastung und elektrischer Kapazitätsänderung am Piezoelement. Hier wurde vom Autor ein Vorbericht erstellt, der weitgehend wörtlich übernommen wurde [Job12].

4.2. Versuchsaufbau

Ziel dieser Versuchsreihe ist die Bestimmung der Kapazitätsänderung von piezoelektrischen Elementen bei mechanischer Druckbelastung. Dabei wird das Piezoelement elektrisch isoliert in einem Schraubstock belastet. Über Zuleitungen wird mit einem sogenannten LCR-Meter eine Vierdraht-Impedanz-Messung durchgeführt,

die einzelnen Parameter hierfür werden bei den Versuchsreihen angegeben. Mit Hilfe einer Kraftmessdose, welche eine Vollmessbrücke mit Dehnmessstreifen beinhaltet, wird der angelegte mechanische Druck am Piezoelement abgeleitet. Da zu Messbeginn nur geringe Zusatzinformationen zu diesem Hilfsmittel vorhanden waren, geschahen alle Auswertungen in einem geringen Bereich unterhalb der Maximalbelastbarkeit von 250N. Weiter ist die angelegte Versorgungsspannung an der Messdose stets 10V DC. Bei allen Messungen wurde ein LCR-Meter ISO-TECH LCR-821 zur Impedanzmessung und ein Fluke-Hand-Multimeter 179 zur Spannungsmessung verwendet. Als Spannungsquelle stand ein Hameg HM8142 bereit.

4.3. Ergebnis

Im Allgemeinen lassen sich aufgrund der getätigten Messungen folgende Aussagen treffen:

- Die Kapazitätsänderung der Piezoelemente unter Last stellt für kleine wirkende Kräfte keine hinreichend reproduzierbare Methode zur Messung von mechanischer Druckbelastung dar. Aufgrund der massiv einwirkenden parasitären Effekte, seien es Veränderungen der Luftfeuchte, Temperaturschwankungen oder pyroelektrische Einflüsse, konnten keine eindeutig wiederholbaren Werte erzielt werden.
- Die Werkstoffstabilität ist auch in Frage zu stellen. Während der Messung ist ein Element unter Belastung zu Bruch gegangen. Dies ist auf eine fehlende Einfassung zurückzuführen.
- Weiter lassen sich die Ergebnisse der einzelnen Prüflinge unterscheiden:
 - CeramTec, P502, einschichtiger Piezo: Bei steigender Belastung verläuft die dazu korrespondierende Kapazitätskurve wie eine Exponentialfunktion mit negativem Exponenten. Weiter ist dieser während der Messung bei einer nicht mehr nachvollziehbaren Belastung zerbrochen. Die Reproduzierbarkeit einzelner Messergebnisse ist nahezu ausgeschlossen.
 - CeramTec, P505, Mehrschichtiger Piezo: Auch bei diesem Piezoelement verläuft unter steigender Belastung die dazugehörige Kapazitätskurve

monoton fallend. Weiter wurde auch hier eine hohe Abhängigkeit von äußeren Einflüssen festgestellt.

- Elliptec, Mehrschichtiger Piezo: Bei diesem Stack ergab sich eine mit dem Druck steigende Kapazitätskurve. Allerdings erschweren auch hier parasitäre Effekte eine eventuelle Reproduzierbarkeit.

4.4. Messungen

4.4.1. SonoX P502

Bei diesem Piezobaustein handelt es sich um ein einfaches, nicht mehrschichtiges Element. Die nachfolgenden Messungen untersuchten das Verhalten der Kapazität unter mechanischer Druckbelastung entlang der elektrischen Feldorientierung. Entgegen der Erwartung, dass die Kapazität mit steigender Druckbelastung ebenfalls steigt, verhält sich diese mehr wie eine Exponentialfunktion mit negativen Exponenten. Dies ist in nahezu allen folgenden Graphen der kommenden Unterkapitel nachzuvollziehen. Falls nicht anders in der Beschreibung zu den einzelnen Messungen erwähnt, wurden alle Messwerte sofort nach dem Kraft anlegen abgelesen.

Kapazität über steigender Druckbelastung

Diese Messung zeigt das kapazitive Verhalten des Piezoelements SonoX P502. Bei den Messwerten wird die Kapazität über die angelegte Kraft, bzw. die Spannung an der Kraftmessdose, aufgetragen, wie in Tabelle 4.1 und Abbildung 4.1 auf Seite 21 nachzuvollziehen ist. Speisefrequenz der Impedanzmessung war 500Hz bei 1V Amplitude.

U_{diff} in mV	C_{diff} in nF	C_{Piezo} in nF
0.02	-0.01795	
0.50	-0.0235	
0.94	-0.02212	
1.48	-0.0235	0.9766
1.93	-0.0244	0.9754
Fortsetzung auf der nächsten Seite		

U_{diff} in mV	C_{diff} in nF	C_{Piezo} in nF
2.49	-0.02529	0.9748
3.00	-0.02801	0.9716
3.60	-0.0294	0.9705
4.10	-0.02995	0.96981
4.56	-0.03057	0.96935
5.00	-0.03137	0.96858
5.51	-0.03184	0.96811
6.11	-0.03231	0.96766

Tabelle 4.1.: Messung 1; SonoX 502 Kapazitives Verhalten über steigende mechanische Belastung

Kapazität über statischer Druckbelastung

Durch die bei der ersten Messung stets ändernden Kapazitäten während einer Druckvorgabe wird dieser Versuch zur Untersuchung bei statischer Belastung ange setzt. Durch die Beobachtung der sinkenden Spannungsdifferenz (der Kraftmessdo se) über die Zeit lässt sich die auftretende Kapazitätsänderung (des Piezoelements) auf die Kunststoffbacken des Schraubstocks zurückführen. Die Werte bzw. die gra fische Auswertung ist hierbei aus der Tabelle 4.2 und dem Graphen aus Abbil dung 4.2 auf Seite 23 zu entnehmen.

Aufgrund eines Gegenvergleichs (siehe Tabelle 4.2 Graph 4.3 auf Seite 24) lässt sich an dieser Stelle bereits sagen, dass die sich verringernden Werte auf die fortwährende Entspannung der Kunststoffbacken des Schraubstocks zurückführen lässt.

Uhrzeit	U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF
09:50:00	10.12	0.9734
10:20:00	9.59	0.9662
11:40:00	9.37	0.96311

Tabelle 4.2.: Messung 2; SonoX 502 Statisches Verhalten über steigende mechanische Belastung

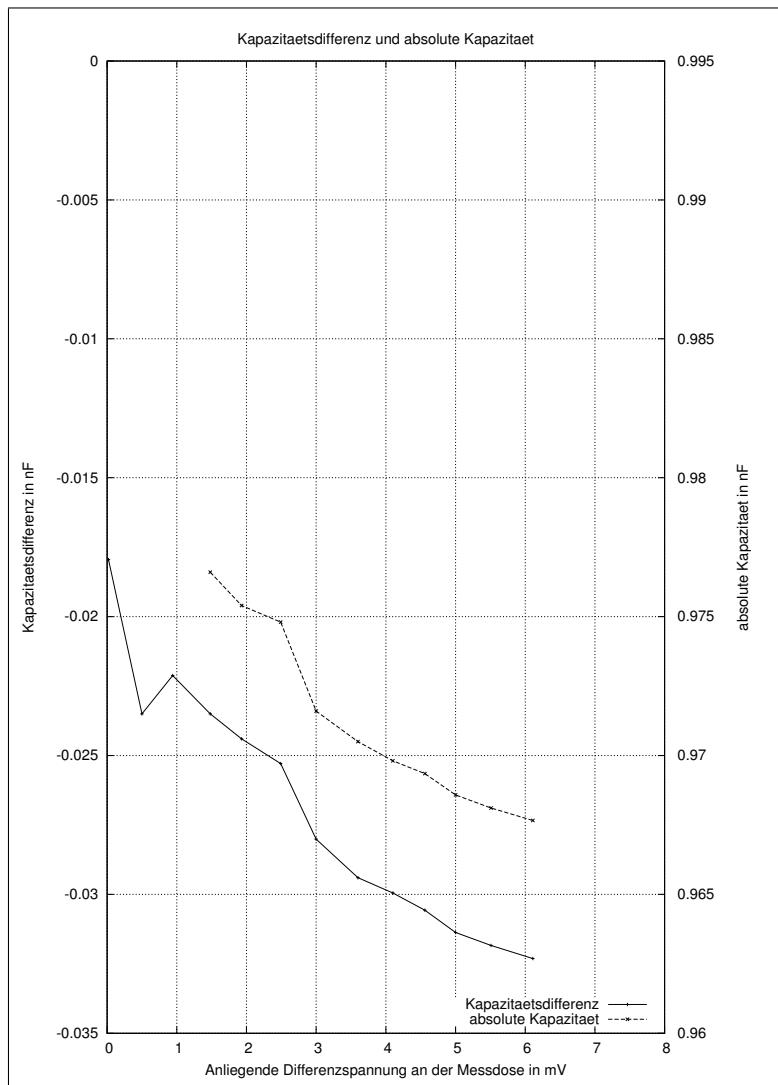


Abbildung 4.1.: Messung 1; Veränderung des kapazitiven Verhaltens des Piezo-elements SonoX 502 der Firma Ceramtec über eine steigende mechanische Belastung. Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 0,5V Erregung bei 500Hz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

Uhrzeit	U_{diff} in mV
11:20:00	9.510
11:27:00	9.362
11:35:00	9.278
11:54:00	9.196
12:19:00	9.167
13:33:00	9.144
14:33:00	9.137
15:41:00	9.114
16:10:00	9.112

Tabelle 4.3.: Messung 2; Statisches Verhalten Zeit, stabilerer Schraubstock

Weitere Messung mithilfe des Maschinenschraubstocks

Bei vorhergehenden Messungen ergab sich der Verdacht, dass die Werte aufgrund der nicht konstanten Druckbelastung durch die Spannvorrichtung verfälscht worden sind. Darum ist diese Messreihe mit einem schweren Maschinenschraubstock mit Stahlbacken erstellt worden. Hierbei wurde zusätzlich noch der Einfluss eines Parallelwiderstands untersucht. Allerdings wurden die Messungen jeweils nach einer Abschätzung der auftretenden Messwertdifferenz abgebrochen, da dies nicht als zielführend erschien. Zum Sicherstellen dieser Annahme wurde jeweils noch ein Messwert bei einer Druckbelastung von einer äquivalenten Spannung von 10mV aufgenommen. Diese ergaben keine feststellbaren Unterschiede zu den letzten dokumentierten Werten. Bei den Messungen wurde jeweils eine Entspannungsphase der Belastungsvorrichtung von 2 Minuten bei jedem Messschritt eingehalten. Die erzielten Messergebnisse sind in den Tabellen 4.4 auf Seite 25 und 4.5 auf Seite 25 ersichtlich. Anhand der Abbildung 4.4 auf Seite 26 lässt sich die unveränderte Charakteristik des Verhaltens unter Last nachvollziehen. Die Skalierung wurde hier zur Veranschaulichung angepasst.

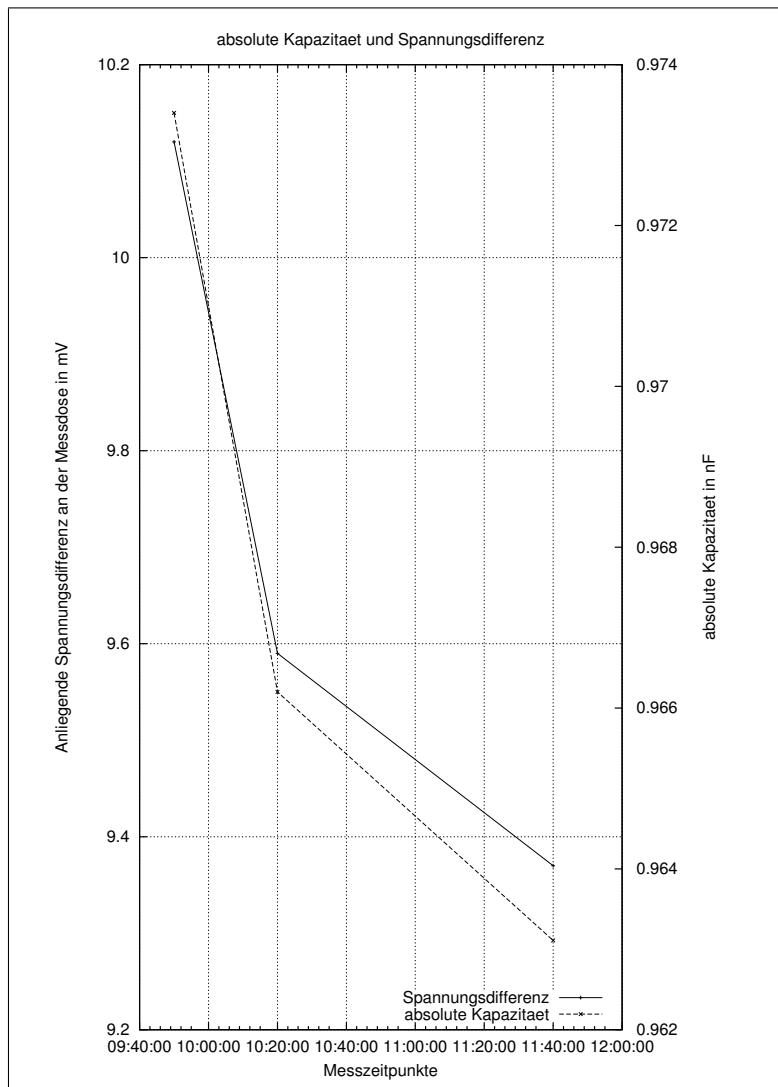


Abbildung 4.2.: Messung 2a, Vergleichsmessung zu Messung 2; Veränderung des kapazitiven Verhaltens des Piezoelements Sonox 502 der Firma Ceramtec und der anliegenden Kraft bei gleichbleibender Einstellung der Spannvorrichtung, gemessen über die Zeit. Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 0,5V Erregung bei 500Hz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

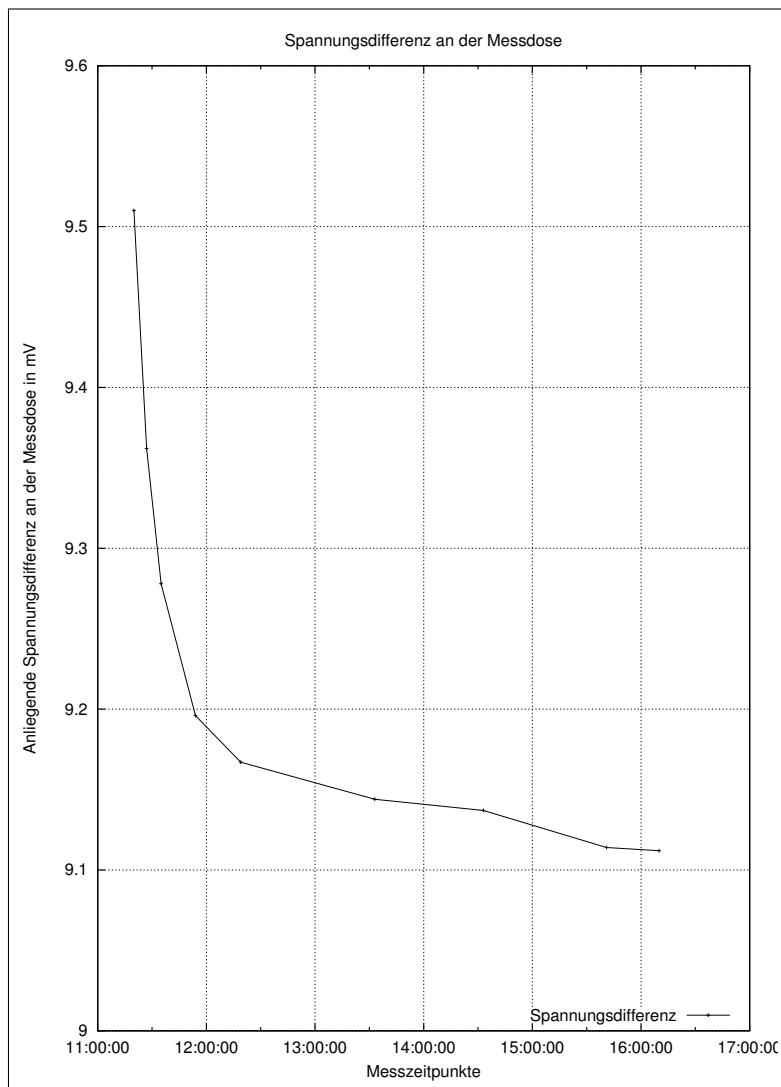


Abbildung 4.3.: Messung 2a; Erfassung der anliegenden Kraft mit einem stabileren Schraubstock bei gleichbleibender Einstellung der Spannvorrichtung, gemessen über die Zeit. Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 0,5V Erregung bei 500Hz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF
0.44	0.9719
0.97	0.9685
1.75	0.9675
2.36	0.9665
3.00	0.9654
3.53	0.9645
4.03	0.9643
4.53	0.963
5.05	0.9625
5.78	0.9626
6.38	0.9625

Tabelle 4.4.: Messung 3; mit $100\text{k}\Omega$ Parallelwiderstand

U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF
0.64	0.9683
1.26	0.9640
1.75	0.9620
2.40	0.9603
2.87	0.9587
3.88	0.9570
4.38	0.9540
5.22	0.9538

Tabelle 4.5.: Messung 4; ohne Parallelwiderstand

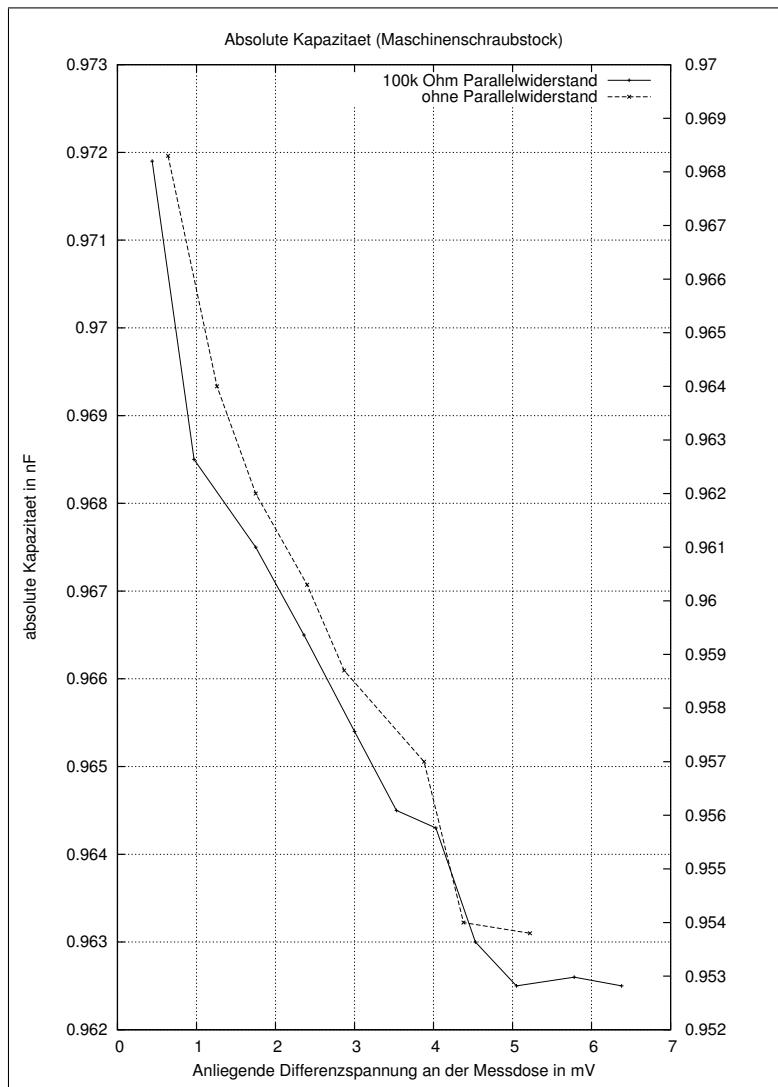


Abbildung 4.4.: Messung 3 und 4; Kapazitives Verhalten des Piezoelements SonoX 502 der Firma Ceramtec über eine steigende mechanische Belastung unter Einsatz einer stabileren Spannvorrichtung.
Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 0,5V Erregung bei 500Hz
Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

Messung mit anderer Impedanzmessfrequenz

Da generell eine Veränderung des Impedanzverhaltens über die Frequenz bei Piezoelementen zu erwarten ist, wurde diese Messung mit halber Frequenz angestrebt. Allerdings sind die sich ergebenden Unterschiede so gering, dass sie von parasitären Effekten überlagert werden und die äußeren Umwelteinflüsse (Temperatur, relative Luftfeuchte) maßgebend für die Ergebnisse sind. Die erzielten Werte sind der Tabelle 4.6 zu entnehmen. Die weiterhin fallende Kapazitätskurve über die Druckbelastung ist in Abbildung 4.5 auf der nächsten Seite ersichtlich.

Um eine weitere qualitative Aussage über das Frequenzverhalten treffen zu können, wurde empirisch die erste Resonanzfrequenz des Piezoelements ermittelt. Hierzu wurde ein Frequenzgenerator mit manuellem Sweep betrieben und mithilfe eines Shuntwiderstands der Strom in Serie auf Extrema beobachtet. Nach dieser Messung lässt sich ein Resonanzverhalten bei ca. 2.84 MHz feststellen. Aufgrund des weiten Abstands zur Messfrequenz können weitere Schlüsse gezogen werden. Daraus lässt sich auch die unveränderte Charakteristik der vorhergehenden Messung bestätigen.

U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF
0.4	0.9705
1.4	0.9709
2.0	0.9690
3.0	0.9681
3.8	0.9675
5.0	0.9670

Tabelle 4.6.: Messung 5; 1kHz Messfrequenz

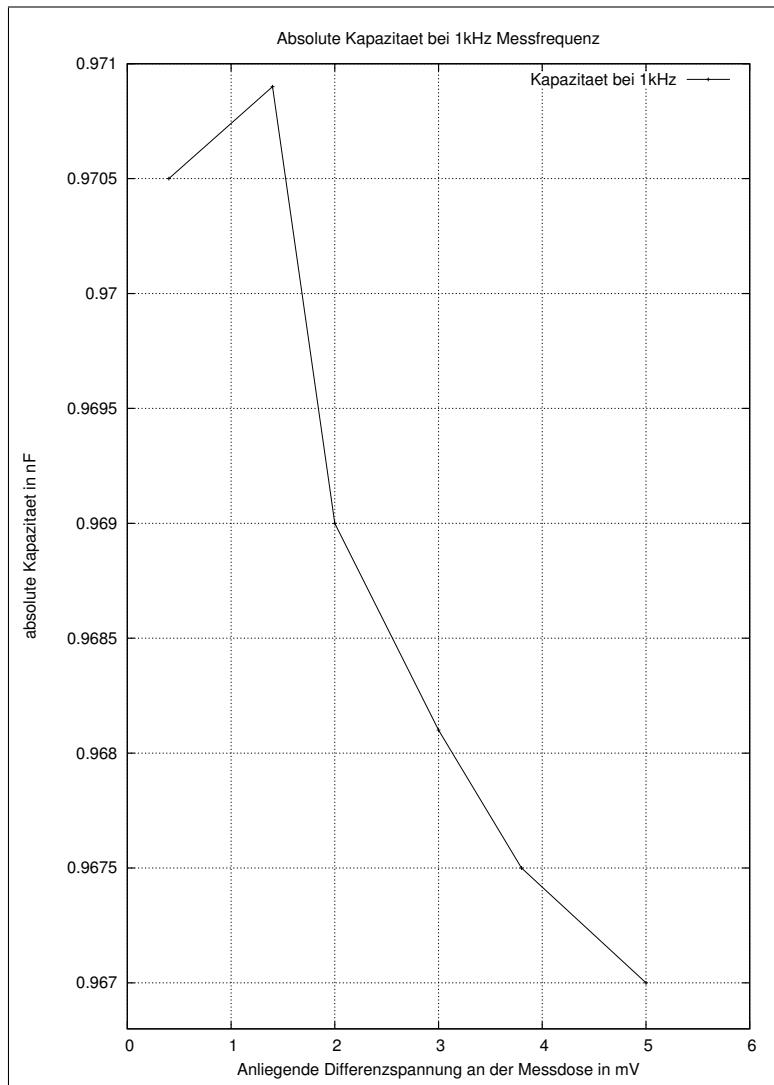


Abbildung 4.5.: Messung 5; Kapazitives Verhalten des Piezoelements Sonox 502 der Firma Ceramtec über eine steigende mechanische Belastung unter Einsatz einer anderen Messfrequenz (1kHz). Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 0,5V Erregung bei 1kHz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

4.4.2. Piezo-Stack von Elliptec

Da die vorhergehenden Messungen mit dem einfach aufgebauten Piezoelement nicht die erforderlichen Resultate bezüglich Charakteristik und Reproduzierbarkeit brachten, wurde nun eine Versuchsreihe mit gestapelten Piezoelementen angestrebt. Der Messaufbau blieb weiterhin derselbe wie in den ersten Versuchen, d.h. mithilfe eines Schraubstocks mit Kunststoffbacken wurde eine mechanische Druckbelastung an den Piezostack (im Folgenden auch Stack genannt) und einer Kraftmessdose in Serie angelegt. Beim verwendeten LCR-Meter wurden folgende Parameter eingestellt: 1kHz, 1V, R.H. off, C.V. off, int B. off.

Weiter wurden bei diesen Messungen die Zuleitungen nicht auf dem Stack direkt aufgelötet, da dies den Messvorgang an sich unmöglich gemacht hätte. Stattdessen wurden Keramikträger als lose Verbindung der Messleitungen zum Piezoelement verwendet. Dadurch kann es bei geringer mechanischer Belastung zu Verfälschungen gekommen sein, da der Kontakt zwischen Stack und Keramik unzureichend war.

Messung Piezo-Stack, ohne Entladungsmaßnahme

Bei dieser ersten Vermessung des kapazitiven Verhaltens des Piezostacks unter Druckbelastung in elektrischer Feldrichtung wurde eine Entspannungs-Zeit der Kunststoffbacken des Schraubstocks von 2 Minuten berücksichtigt. Es wurde lediglich der Piezo ohne zusätzlichen Parallel- oder Serienwiderstand vermessen. Die auffällig abweichenden Anfangswerte in Abbildung 4.6 auf Seite 31 sind auf den schlechten Kontakt zwischen Keramikplättchen und Stack bei geringer Druckbelastung zurückzuführen. Die aufgenommenen Werte sind in Tabelle 4.7 zu finden.

U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF	$R_{Parallel}$ in k Ω
0.7	253.25	2.39
1.2	270.00	8.01
1.9	271.39	15.48
2.9	271.83	16.98
3.6	271.98	17.40
Fortsetzung auf der nächsten Seite		

U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF	$R_{Parallel}$ in k Ω
4.5	272.22	17.42
6.1	272.47	15.80
7.0	272.70	17.72
8.0	272.83	18.28
9.4	273.16	18.30
10.9	273.62	17.21

Tabelle 4.7.: Messung 6; Piezostack; Einführende Messung

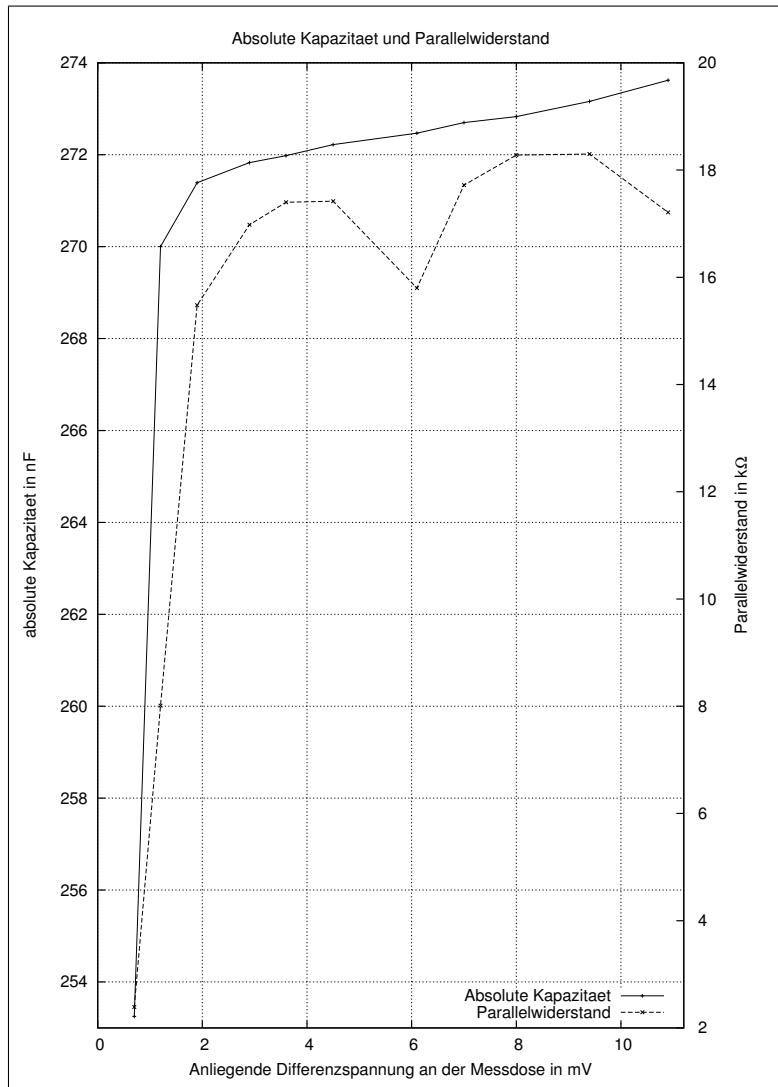


Abbildung 4.6.: Messung 6; Kapazitives Verhalten des Piezostacks der Firma Elliptec über eine steigende mechanische Belastung. Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 1V Erregung bei 1kHz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

Messung Piezo-Stack, mit Entladung, ohne Setz-Zeit

Um störende, vom Stack selbst erzeugte Ladungsquellen ausschließen zu können, wurde diese Messung in jeweils zwei Schritten ausgeführt. Beim ersten Schritt wird die Kraft angelegt und der Piezo-Stack kurzgeschlossen, um so möglicherweise erzeugte Ladungen zu eliminieren. Als zweiten Schritt wird mithilfe des LCR-821 eine Impedanzmessung durchgeführt. Diese beiden Schritte wurden je unter 30 Sekunden durchgeführt, um ein möglichst isochrones Ergebnis zu erhalten. Weiter wurde die Messung ein zweites Mal durchgeführt, um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit treffen zu können. Beim Vergleich der Graphen in Abbildung 4.7 auf der nächsten Seite wird deutlich, dass selbst bei unmittelbar aufeinanderfolgenden Messungen keine zureichende Wiederholbarkeit der Messvorgänge erreicht werden kann. Die korrespondierenden Werte beider Messungen sind in Tabelle 4.8 zu finden. Um Rückschlüsse auf das ε des Piezomaterials zu ermöglichen, wurde der Parallelwiderstand bei diesem Messvorgang mit aufgezeichnet. Die Resultate sind in der Tabelle 4.9 auf Seite 34 und Abbildung 4.8 auf Seite 35 ersichtlich.

Messung 1		Messung 2	
U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF	U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF
0.15	266.66	0.49	269.02
1.15	267.14	1.55	268.98
2.55	267.72	2.82	269.26
3.24	267.93	3.63	269.36
4.39	268.6	4.60	269.55
5.10	268.88	5.57	269.78
6.14	269.32	6.39	269.90
7.55	268.95	7.74	270.25
8.24	270.16	8.40	270.40
9.82	270.71	9.52	270.70
10.45	270.76	10.49	270.84

Tabelle 4.8.: Messung 7; Piezostack; mit Entladung, ohne Setz-Zeit; Kapazität

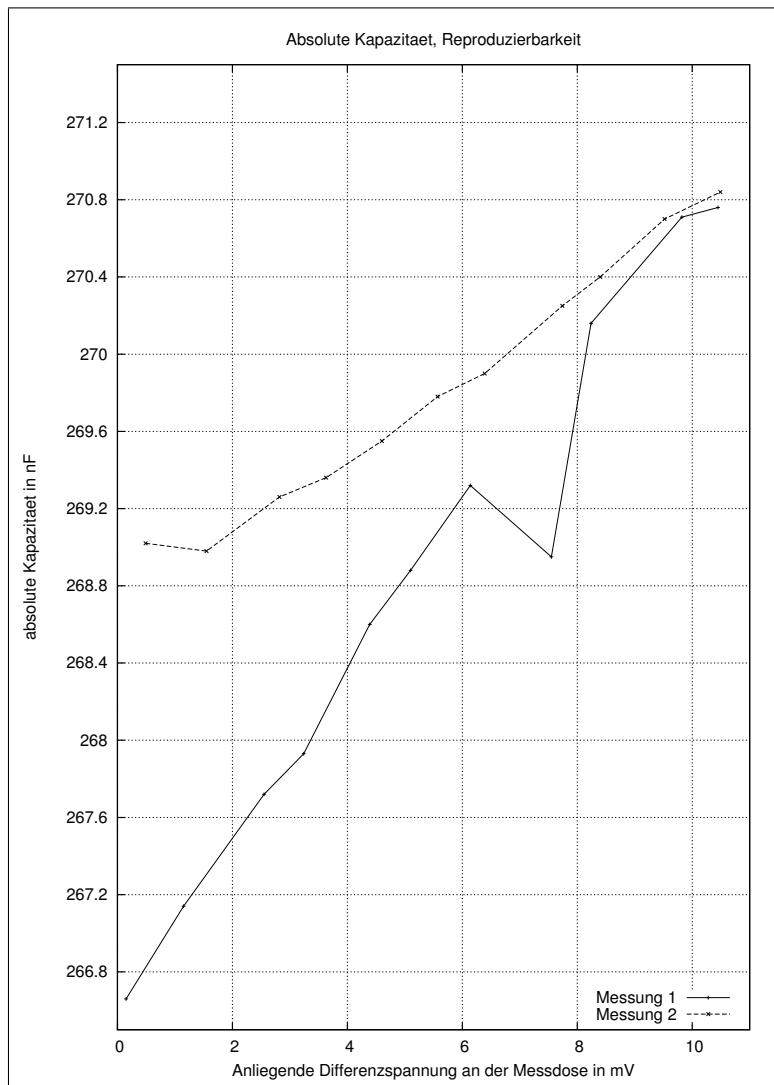


Abbildung 4.7.: Messung 7; Kapazitives Verhalten des Piezostacks der Firma Elliptec über eine steigende mechanische Belastung, mit andauernden Kurzschluss zwischen den sofort abgelesenen Messzeitpunkten. Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 1V Erregung bei 1kHz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

Messung 1		Messung 2	
U_{diff} in mV	$R_{Parallel}$ in kΩ	U_{diff} in mV	$R_{Parallel}$ in kΩ
0.15	16.53	0.49	17.42
1.15	19.24	1.55	18.38
2.55	19.25	2.82	18.68
3.24	19.58	3.63	18.63
4.39	19.19	4.60	18.72
5.10	19.15	5.57	17.72
6.14	18.93	6.39	18.70
7.55	18.62	7.74	18.65
8.24	18.58	8.40	17.63
9.82	18.38	9.52	18.55
10.45	18.51	10.49	18.60

Tabelle 4.9.: Messung 8; Piezostack; mit Entladung, ohne Setz-Zeit; Parallelwiderstand

Quelle: eigene Darstellung

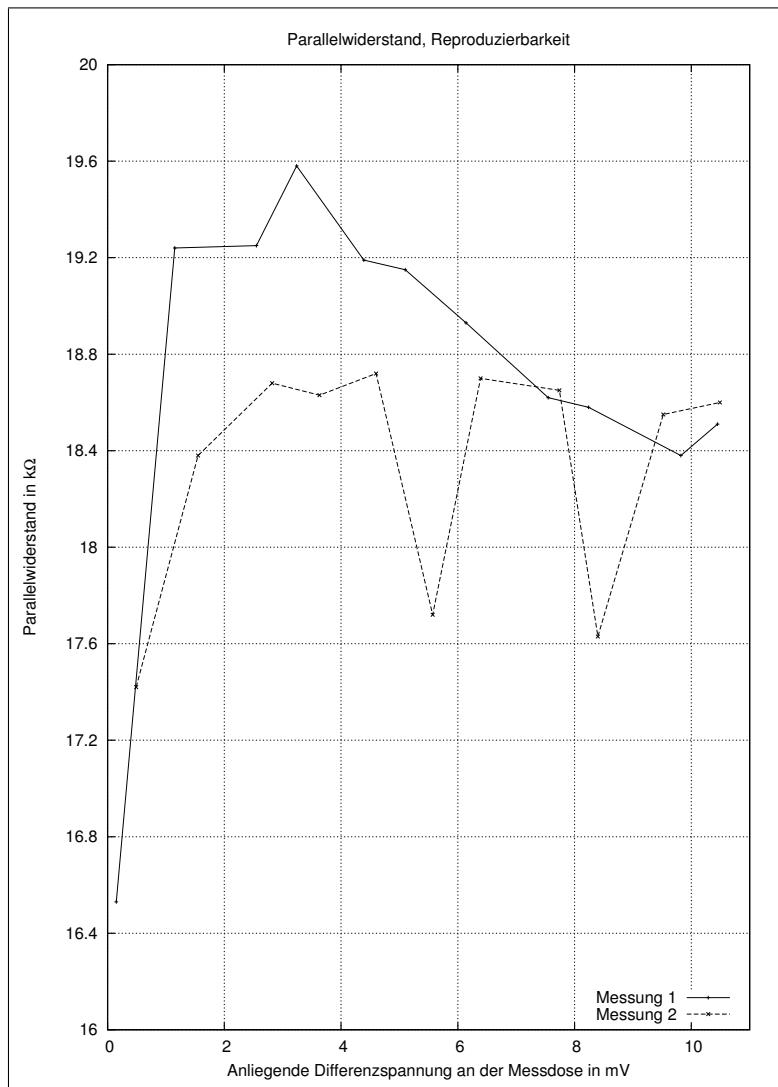


Abbildung 4.8.: Messung 8; Resistives Verhalten des Piezostacks der Firma Elliptec über eine steigende mechanische Belastung, mit andauernden Kurzschluss zwischen den sofort abgelesenen Messzeitpunkten. Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 1V Erregung bei 1kHz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

Messung Piezo-Stack, mit Entladung, mit 2 Minuten Setz-Zeit

Um eine treffende Aussage fassen zu können, wurde die vorhergehende Messung komplett wiederholt. Jedoch wurde dieses mal bei den einzelnen Werten eine Setz-Zeit von 2 Minuten eingehalten, um etwaige Fehler aufgrund des elastischen Materials der Schraubstockbacken zu minimieren. Allerdings sind auch hier anhand von Abbildung 4.9 auf Seite 38 die deutliche Abweichung zwischen den Kapazitätslinien zu sehen. Die dazugehörigen Werte sind in Tabelle 4.10 zu finden.

Auch hier wurde eine Messung des auftretenden Parallelwiderstands angestoßen. Die Resultate sind in Tabelle 4.11 und Abbildung 4.10 auf Seite 39 nachzulesen.

Messung 1		Messung 2	
U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF	U_{diff} in mV	C_{Piezo} in nF
0.55	268.80	1.16	268.90
1.17	268.55	2.33	269.23
2.26	268.73	3.34	269.35
3.27	268.94	4.33	269.43
4.27	269.13	4.99	269.51
4.93	269.14	6.20	269.85
6.10	269.37	7.03	269.90
6.95	269.50	8.32	270.30
8.21	269.70	9.31	269.99
9.24	269.60	10.41	270.33
10.30	269.83		

Tabelle 4.10.: Messung 9; Piezostack; mit Entladung, 2 Minuten Setz-Zeit; Kapazität

Messung 1		Messung 2	
U_{diff} in mV	$R_{Parallel}$ in kΩ	U_{diff} in mV	$R_{Parallel}$ in kΩ
0.55	17.38	1.16	17.80
1.17	18.08	2.33	18.65
2.26	19.07	3.34	18.80
Fortsetzung auf der nächsten Seite			

Messung 1		Messung 2	
U_{diff} in mV	$R_{Parallel}$ in kΩ	U_{diff} in mV	$R_{Parallel}$ in kΩ
3.27	19.15	4.33	18.88
4.27	19.18	4.99	18.89
4.93	19.30	6.20	18.87
6.10	19.29	7.03	18.69
6.95	19.30	8.32	18.82
8.21	19.29	9.31	19.10
9.24	19.44	10.41	19.00
10.30	19.49		

Tabelle 4.11.: Messung 10; Piezostack; mit Entladung, 2 Minuten Setz-Zeit; Parallelwiderstand

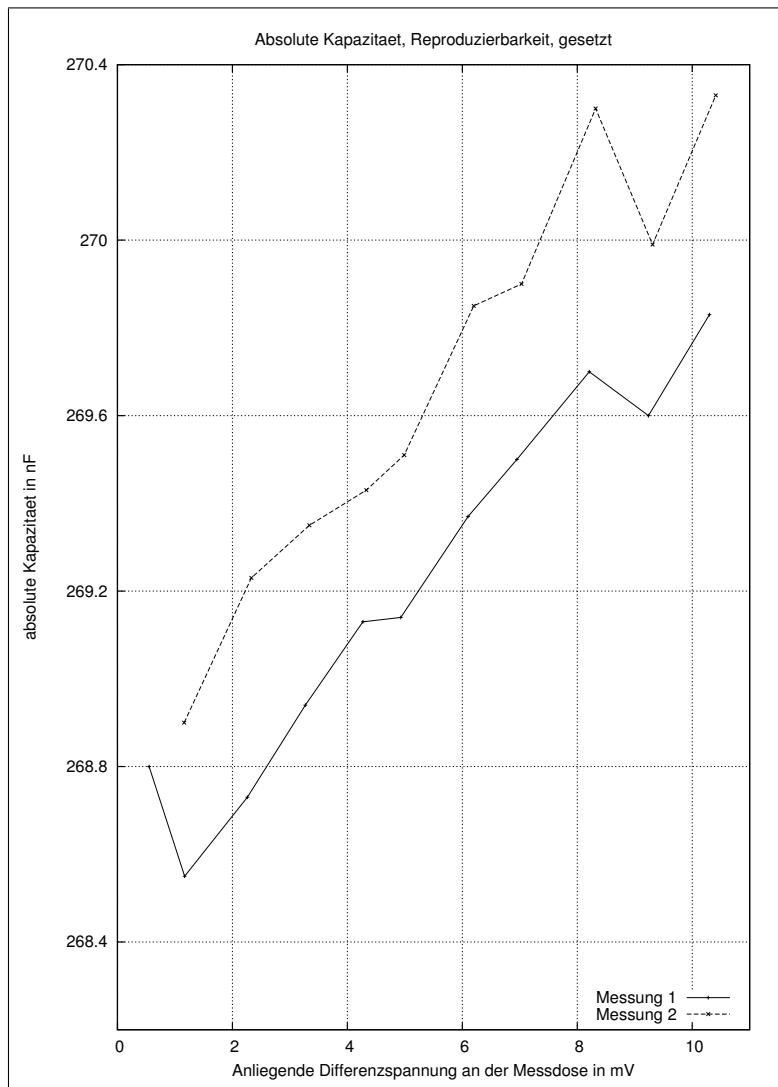


Abbildung 4.9.: Messung 9; Kapazitives Verhalten des Piezostacks der Firma Elliptec über eine steigende mechanische Belastung, mit andauernden Kurzschluss zwischen den Messzeitpunkten. Diese wurden nach 2 Minuten Setz-Zeit abgelesen. Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 1V Erregung bei 1kHz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

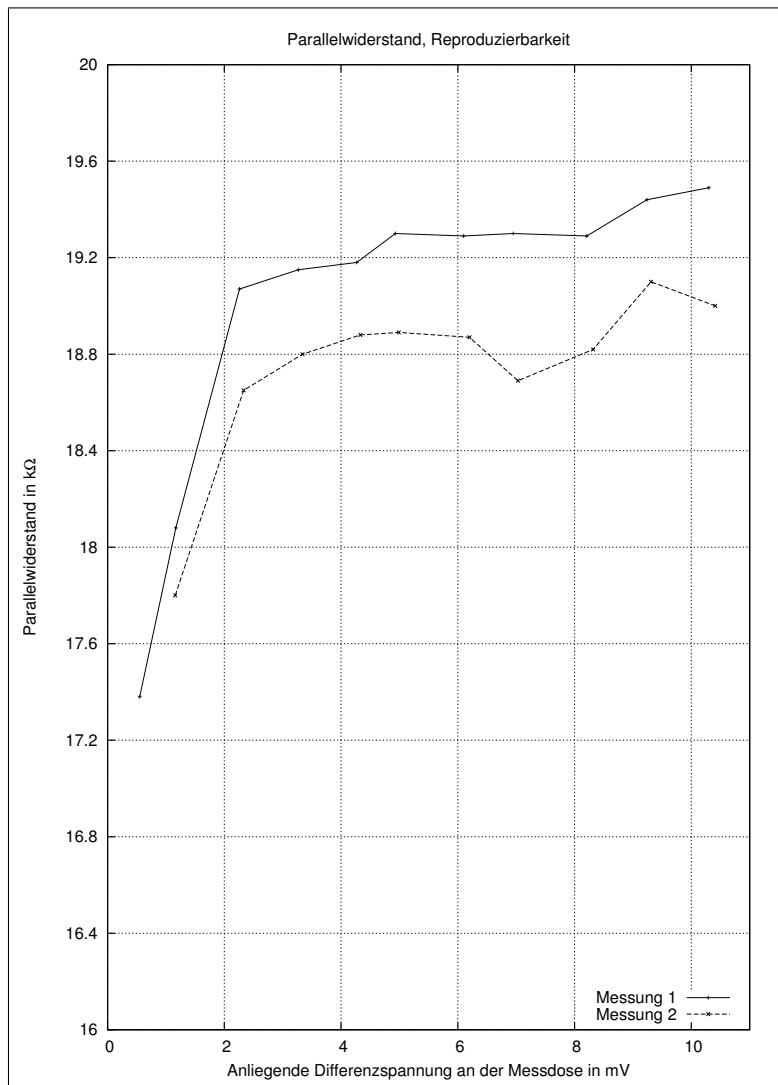


Abbildung 4.10.: Messung 10; Resistives Verhalten des Piezostacks der Firma Elliptec über eine steigende mechanische Belastung, mit andauernden Kurzschluss zwischen den Messzeitpunkten. Diese wurden nach 2 Minuten Setz-Zeit abgelesen. Messmittel: ISO-TECH LCR-821, 1V Erregung bei 1kHz Messfrequenz

Quelle: eigene Darstellung

5. Hardware

Im Folgenden werden die Schritte in der Hardware-Entwicklung für die Sensorik und das Energiemanagement geordnet und in Teilbereiche separiert aufgeführt.

5.1. Sensorik

Zentrales Element der Schaltung des Fußmoduls des Projekts „MedLast“ ist der Druckaufnehmer. Erste Versuche die Druckbelastung über die Kapazitätsänderung von Piezoelementen zu messen erwiesen sich als äußerst schwierig. Die Problematik bei dieser Messmethode besteht darin, dass sie aufgrund der Flüchtigkeit der geringen Ladung und der Empfindlichkeit gegenüber parasitären Effekten äußerst aufwendig betrieben werden muss, um repräsentative und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Als parasitäre Effekte spielen hier unter anderem Luftfeuchte, Beleuchtung und die Umgebungstemperatur eine entscheidende Rolle. Bei ausführlichen Belastungstests im Bereich bis 200N konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden [Job12]. Darum wurde die Messmethode auf piezoresistive Dehnungsmessstreifen geändert. Diese Technologie bietet auch den Vorteil, dass aufgrund der eigenen Verarbeitung im Hybridlabor der Hochschule Landshut das Layout beliebig angepasst werden kann. Da generell davon ausgegangen wurde, dass der Widerstand des DMS sich sowohl vergrößern als auch verkleinern kann, musste das Messverfahren dementsprechend ausgelegt sein. Gemessen wird nicht über eine Kelvin-Messschaltung¹ sondern über eine als Wheatstonesche Brücke bekannte Messschaltung. Dabei wird der betreffende DMS in eine Brückenschaltung, genauer in eine Viertelmessbrücke, eingesetzt. Dies hat zum Vorteil, dass bei richtiger Anpassung der restlichen drei Teilwiderstände der Schaltung, sich an den Abnahmepunkten eine Spannungsdifferenz von 0V bei Ruhe einstellt. Aus diesem Grund

¹auch bekannt als Vierleitermessung

sollte der zu verwendende A/D²-Wandler die differentielle Spannungsmessung beherrschen oder von vornherein speziell für Messbrückenauswertung ausgelegt sein. Da eine weitere Maßgabe die Auflösung der Wandlung darstellt, wurde explizit nach einem Konverter mit mindestens 12-Bit Auflösung gesucht.

All diese Kriterien wurden von dem Baustein ADS1232 von Texas Instruments erfüllt. Dieser verfügt über 24-Bit Auflösung und ist speziell für rein resistive Brückenschaltungen ausgelegt [Ins08]. Als weiteren Vorteil beinhaltet dieses IC bereits einen internen Temperatursensor der einen der Unterpunkte der Anforderungen an die Arbeit erfüllt.

Ein erster Schaltungsentwurf (siehe Abbildung 5.1 auf der nächsten Seite) wurde mithilfe des an Hochschule Landshut vorhandenen Leiterplatten-Prototypers³ auf Platine gebracht, wie auf Abbildung 5.2 auf Seite 43 zu sehen ist. Dabei wurden alle Konfigurationsmöglichkeiten sowie Ein- und Ausgänge über Jumper und Stiftleisten nach außen geführt:

- Temperatursensor an/aus
- Eingangsbeschaltung: A1/A2
- Wandlungsgeschwindigkeit: 10/80 SPS⁴
- Vorverstärkung (Gain 0/1)
- Positive sowie Negative Versorgungsspannung
- Datenleitungen für SPI
- Eingänge für beide analogen Spannungsaufnehmer AIN1/AIN2

Da bei der Prototypenschaltung keine allzu gravierenden Spannungs- oder Stromimpulse an der Versorgungsspannung auftreten, können die digitale und die analoge Speisung ebenfalls über einen Jumper zusammengeschlossen werden. Zu Testzwecken wurde eine Viertelbrücke mit einem Potentiometer als variablen Widerstand diskret auf die Platine gebracht. Diese kann über Jumper an den Controller

²Analog-Digital

³LPKF C60

⁴samples per second

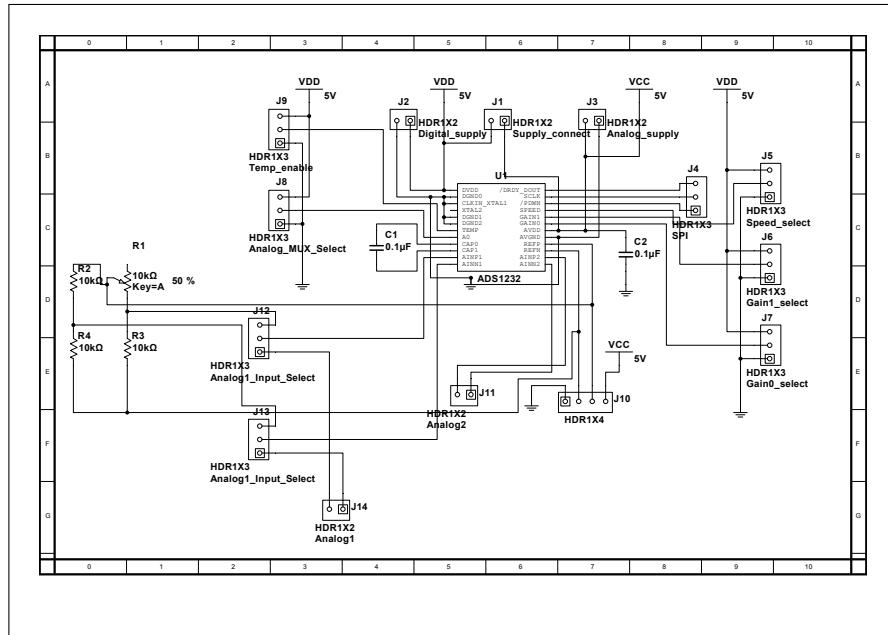


Abbildung 5.1.: Zentrales Element der Modul-Schaltung ist der AD1232 A/D-Wandler. Das Schaltbild wurde mit der Software Multisim v12 angefertigt. Das passende Platinenlayout ist im Anhang A auf Seite 89 zu finden.

Quelle: eigene Darstellung

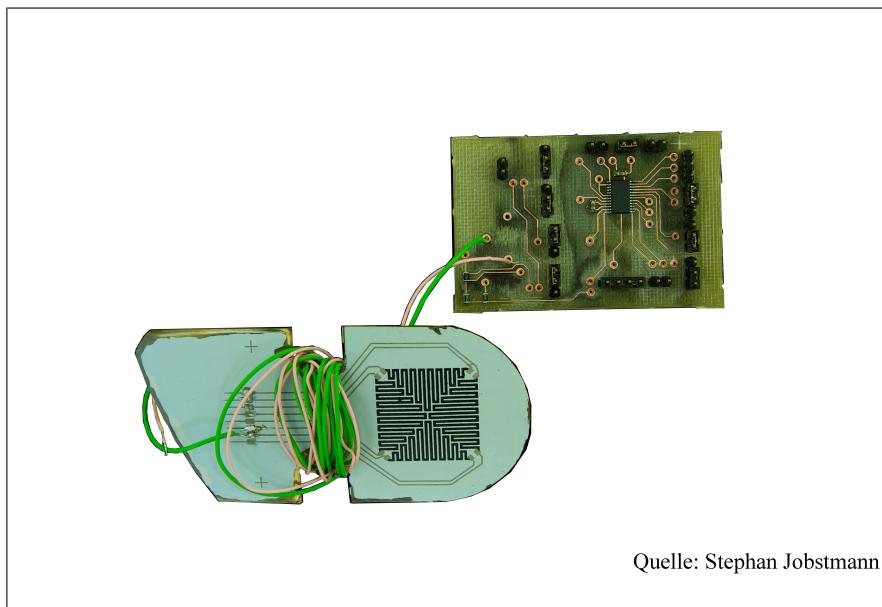


Abbildung 5.2.: Umsetzung in ein fertiges Design des AD1232 A/D-Wandler Moduls mit Drucksensor auf Keramik-Stahl Verbundmaterial, das im Hybridlabor der Hochschule Landshut entwickelt wurde.

angebunden werden. Für die digitale Anbindung, beispielsweise an einen Mikrocontroller, wird das SPI-Protokoll verwendet. Dabei ist hinzuzufügen, dass lediglich die MISO⁵- und SCK⁶-Leitungen benötigt werden. Zusätzlich verfügt das IC einen PDWN⁷ Eingang, über den der Baustein in einen Ruhemodus versetzt werden kann.

Der Testaufbau wurde weiter dahingehend modifiziert, dass es mit einem experimentellen Sensormodul von Frau Engelsberger, basierend auf einem LTCC-Stahl Verbundwerkstoff, optimale Ergebnisse liefert. Dementsprechend wurde die auf dem Modul befindliche Viertelbrücke aufgetrennt und das Potentiometer entfernt. Dieses wurde durch das Sensormodul ersetzt. Weiter wurden die Widerstände der restlichen Brücke an den Sensor angepasst.

⁵Master Input Slave Output

⁶Serial Clock

⁷Power Down

5.2. Energiebereitstellung

Da die Markttauglichkeit bei diesem Projekt eine wesentliche Rolle spielt, wird eine weitverbreitete, einfach zu realisierende und auch günstige Methode gesucht, um die Energie für die Elektronik des eingebetteten Moduls bereitzustellen.

5.2.1. Superkondensator

Als Superkondensator werden im Allgemeinen hochkapazitive Energieträger bezeichnet, die ihre elektrische Ladung anders als Keramik-, Tantal-, Elektrolyt- oder Folienkondensatoren speichern. Sie funktionieren nicht wie diese durch Ladungsseparation mittels Dielektrikum sondern bedienen sich anderer Effekte, wie Energiespeicherung in Helmholtz-Doppelschichten⁸, faradayscher Ladungstausch⁹ oder einer Kombination aus beiden Technologien¹⁰. Aufgrund dieser anderen Bauweisen lassen sich Kapazitäten erreichen, die das von Elektrolytkondensatoren um das 10000-fache überschreiten. Somit ziehen sie bezüglich der Ladungsdichte mit Akkumulatoren gleich. Anders als bei den üblichen Kondensatoren wird durch den technologischen Unterschied der Funktionsprinzipien eine lineare Lade- beziehungsweise Entladekurve erreicht. Mit in Miniaturbauweise gefertigte Bauelemente für Platinenmontage sind bereits ganzzahlige Farad an Ladungskapazität mit dieser Technologie üblich. Für den praktischen Einsatz für die Arbeit fielen diese Energiespeicher aufgrund ihrer schaltungstechnischen Zusatzbeschaltung zur Spannungsstabilisierung und des, im Gegensatz zu den weit verbreiteten Lithium-Ionen Akkus, hohen Kostenfaktors aus. Weiter ist die Selbstentladung zudem höher als bei konventionellen Akkumulatoren. Aus diesen Gründen wurde eine Lösung der Energiezwischenspeicherung, welche auf Superkondensatoren basiert, nicht weiter verfolgt.

⁸Doppelschichtkondensator

⁹Pseudokondensator

¹⁰Hybridkondensator

5.2.2. Lithium-Ionen-Akkumulator

Der Lithium-Ionen-Akku hat sich in den letzten Jahren zur Standardtechnologie für wiederaufladbare Energiespeicher entwickelt. Sie sind in nahezu jedem portablen, elektrisch betriebenen Gerät zu finden. Dies liegt auch an Sicherheitsmaßnahmen, wie den in nahezu allen Li-Ion-Akkus verbauten NTC¹¹-Widerstand, der mithilfe externer Sicherheits- und Messbeschaltung Rückschlüsse über die interne Temperaturrentwicklung des Energiespeichers schließen lässt. Dadurch wird bei einer Fehlfunktion oder einem Schaden des Akkus ein Brand oder gar eine Explosion des Geräts verhindert¹².

Für das Projekt wurde nach einem IC-Baustein gesucht, der selbstständig bei ausreichender Eingangsspannung den Ladungsvorgang bei einem 1-Zellen Li-Ionen Akku vornimmt. Die Wahl eines fertigen ICs bietet einige Vorteile:

- Der Aufbau der Schaltung reduziert sich auf ein Minimum an Bauteilen, so werden zum Beispiel Schmitt-Trigger für die Temperaturüberwachung, Spannungsstabilisatoren und Stromquellen bereits in einem Baustein vereint.
- Die Komplexität des Schaltungslayouts wird auf geringen Ausmaßen festgehalten.
- Berechnungen zur Auslegung der einzelnen Baugruppen werden obsolet oder auf wenige reduziert. Dabei wird meistens der Anwender durch die im Datenblatt aufgezeigten Anwendungsbeispiele mit Vorlagen zur Berechnung unterstützt.
- Die Schaltung ist bereits im Datenblatt festgehalten und muss lediglich bei den Bauteilwerten adaptiert werden.

Nach hinreichendem Vergleich fiel die Wahl des zu verwendenden Bausteins auf den BQ24100 von der Firma Texas Instruments¹³. Dieser umfasst eine durch die am Akku anliegende Temperatur gesteuerte Schutzbeschaltung und eine äußerst niedrige Mindestspannung für die Eingangsbeschaltung. Weiter sind diverse Steuereingänge

¹¹Negative Temperature Coefficient

¹²Uelzen: Explodiertes Notebook löst Feuerwehreinsatz aus [TON13]

¹³Battery Management Products - Battery Charger Solutions BQ24100 [TIB13]

als auch Ausgänge die durch ihre logischen Pegel den aktuellen Status des Ladezyklus wiedergeben im Baustein realisiert. Die Ladelogik erkennt ebenfalls eine Tiefentladung und passt dementsprechend den Ladezyklus an.

Berechnungsschritte nach Datenblatt [Ins12a]

$$\Delta I_L = I_{Charge} \cdot I_{Charge^{Ripple}} \quad (5.1)$$

$$\Delta I_L = 1,33A \cdot 30\% = 0,4A \quad (5.2)$$

$$L_{OUT} = \frac{V_{BAT} \cdot (V_{INMAX} - V_{BAT})}{V_{INMAX} \cdot f \cdot \Delta I_L} \quad (5.3)$$

$$L_{OUT} = \frac{4,2V \cdot (5V - 4,2V)}{5V \cdot 1,1 \cdot 10^6 \frac{1}{s} \cdot 0,4A} \quad (5.4)$$

$$L_{OUT} = \frac{3,36V^2}{2,2 \cdot 10^6 \frac{VA}{s}} = 1,527 \mu \frac{Vs}{A} = 1,527 \mu H \quad (5.5)$$

Da das Hybridlabor der Hochschule Landshut während des Aufbaus Induktivitäten mit $6,2\mu H$ im Lager hatte, wurde folgende Rechnung zur Anpassung vorgenommen:

$$\Delta I_L = \frac{V_{BAT} \cdot (V_{INMAX} - V_{BAT})}{V_{INMAX} \cdot f \cdot L_{OUT}} \quad (5.6)$$

$$\Delta I_L = \frac{4,2V \cdot (5V - 4,2V)}{5V \cdot 1,1 \cdot 10^6 \frac{1}{s} \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{A}} \quad (5.7)$$

$$\Delta I_L = \frac{3,36V^2}{34,1 \frac{V^2s}{sA}} = 0,0985A = 98,5mA \quad (5.8)$$

(5.9)

Resultierender Spitzstrom I_{IPK} an der Induktivität:

$$I_{IPK} = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (5.10)$$

$$I_{IPK} = 1,33A + \frac{0,0985A}{2} = 1,379A \quad (5.11)$$

Die ideale Ausgangskapazität berechnet sich über eine optimale Resonanzfrequenz von 16kHz. Grundsätzlich bewegt sich die zulässige Frequenz zwischen 8kHz und 32kHz laut Datenblatt [Ins12a].

$$f_O = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{OUT} \cdot C_{OUT}}} \quad (5.12)$$

$$C_{OUT} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_O^2 \cdot L_{OUT}} \quad (5.13)$$

$$C_{OUT} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (16 \cdot 10^{3\frac{1}{2}})^2 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}} \quad (5.14)$$

$$C_{OUT} = 1,595 \cdot 10^{-5} \frac{\text{As}}{\text{V}} \Rightarrow 16\mu\text{F} \quad (5.15)$$

Wieder wurde Aufgrund von Lagerbeständen eine andere Kapazität gewählt: $10\mu\text{F}$

$$f_O = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{OUT} \cdot C_{OUT}}} \quad (5.16)$$

$$f_O = \frac{1}{2\pi\sqrt{6,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot 10 \cdot 10^{-5} \frac{\text{As}}{\text{V}}}} \quad (5.17)$$

$$f_O = 20,212\text{kHz} \quad (5.18)$$

Die Resonanzfrequenz der passiven Leistungsbauteile am Schaltungsausgang liegen mit rund 20kHz noch innerhalb des gültigen Bereichs.

Der angelegte Speisestrom für den Ladevorgang wird vom IC über einen Shunt-Widerstand (R_{SNS}) bestimmt. Dieser wird über geforderten Ladestrom (I_{CHARGE}) und einer Shuntspannung (V_{RSNS}) dimensioniert. Die Shuntspannung sollte laut Vorgabe zwischen 100mV und 200mV betragen. Für die Berechnung wurde daher ein arithmetisches Mittel von 150mV gewählt.

$$R_{SNS} = \frac{V_{RSNS}}{I_{CHARGE}} \quad (5.19)$$

$$R_{SNS} = \frac{150\text{mV}}{1,33\text{A}} = 0,1128\Omega \Rightarrow 0,1\Omega \quad (5.20)$$

resultierende Shuntspannung

bei einem Widerstand von $0,1\Omega$:

$$V_{RSNS} = R_{SNS} \cdot I_{CHARGE} = 0,1\Omega \cdot 1,33\text{A} \Rightarrow 133\text{mV} \quad (5.21)$$

Berechnung der Verlustleistung am Shuntwiderstand:

$$P_{RSNS} = I_{CHARGE}^2 \cdot R_{SNS} \quad (5.22)$$

$$P_{RSNS} = (1,33A)^2 \cdot 0,1\Omega = 176,9\text{mW} \quad (5.23)$$

Die Steuerwiderstände für die Stromgrenzen berechnen sich wie folgt:

$$R_{ISET1} = \frac{K_{ISET1} \cdot V_{ISET1}}{R_{SNS} \cdot I_{CHARGE}} \quad (5.24)$$

$$R_{ISET1} = \frac{1000\frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot 1,0\text{V}}{0,1\Omega \cdot 1,33\text{A}} \quad (5.25)$$

$$R_{ISET1} = 7,5\text{k}\Omega \quad (5.26)$$

$$R_{ISET2} = \frac{K_{ISET2} \cdot V_{ISET2}}{R_{SNS} \cdot I_{PRECHARGE}} \quad (5.27)$$

$$R_{ISET2} = \frac{1000\frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot 0,1\text{V}}{0,1\Omega \cdot 0,133\text{A}} \quad (5.28)$$

$$R_{ISET2} = 7,5\text{k}\Omega \quad (5.29)$$

Das IC verfügt ebenfalls über eine zeitgesteuerte Sicherheitsabschaltung. Dessen Zeitintervall wird über einen externen Kondensator eingestellt. Im Allgemeinen ist von einer sicheren Ladezeit von 5 Stunden auszugehen.

$$C_{TTC} = \frac{t_{CHARGE}}{K_{TTC}} \quad (5.30)$$

$$C_{TTC} = \frac{300 \text{ Minuten}}{2,6 \frac{\text{Minuten}}{\text{nF}}} \quad (5.31)$$

$$C_{TTC} = 115,4 \text{ nF} \quad (5.32)$$

Ähnlich wie im Beispiel des Datenblatts wurde beim Versuchsaufbau der Berechnungsgrundlage ein NTC-Widerstand des Li-Ionen Akkus von $10\text{k}\Omega$ verwendet.

Mit

$$V_{LTF} = \frac{V_{O(VTSB)} \cdot \%_{LTF+100}}{100} \quad (5.33)$$

$$V_{LTF} = \frac{3,15\text{V} \cdot 73,5\%}{100} = 2,31525\text{V} \quad (5.34)$$

und

$$V_{HTF} = \frac{V_{O(VTSB)} \cdot \%_{HTF+100}}{100} \quad (5.35)$$

$$V_{HTF} = \frac{3,15\text{V} \cdot 34,4\%}{100} = 1,0836\text{V} \quad (5.36)$$

Lassen sich die begrenzenden Widerstände für die interne Sicherheitsschaltung berechnen. Als Grundlage wurden die Werte für die Widerstände vom Datenblatt übernommen: $RTH_{COLD} = 27,28\text{k}\Omega$ und $RTH_{HOT} = 4,912\text{k}\Omega$.

$$RT2 = \frac{V_{O(VTSB)} \cdot RTH_{COLD} \cdot RTH_{HOT} \cdot \left(\frac{1}{V_{LTF}} - \frac{1}{V_{HTF}} \right)}{RTH_{HOT} \cdot \left(\frac{V_{O(VTSB)}}{V_{HTF}} - 1 \right) - RTH_{COLD} \cdot \left(\frac{V_{O(VTSB)}}{V_{LTF}} - 1 \right)} \quad (5.37)$$

$$RT2 = \frac{3,15\text{V} \cdot 27,28\text{k}\Omega \cdot 4,912\text{k}\Omega \cdot \left(\frac{1}{2,31525\text{V}} - \frac{1}{1,0836\text{V}} \right)}{4,912\text{k}\Omega \cdot \left(\frac{3,15\text{V}}{1,0836\text{V}} - 1 \right) - 27,28\text{k}\Omega \cdot \left(\frac{3,15\text{V}}{2,31525\text{V}} - 1 \right)} \quad (5.38)$$

$$RT2 = 442,235\text{k}\Omega \Rightarrow 442\text{k}\Omega \quad (5.39)$$

$$RT1 = \frac{\frac{V_{O(VTSB)}}{V_{LTF}} - 1}{\frac{1}{RT2} + \frac{1}{RTH_{COLD}}} \quad (5.40)$$

$$RT1 = \frac{\frac{3,15\text{V}}{2,31525\text{V}} - 1}{\frac{1}{442\text{k}\Omega} + \frac{1}{27,28\text{k}\Omega}} \quad (5.41)$$

$$RT1 = 9,263\text{k}\Omega \Rightarrow 9,31\text{k}\Omega \quad (5.42)$$

Ein passendes Schaltungslayout (siehe Abbildung 5.3 auf der nächsten Seite) wurde mithilfe des Datenblatts [Ins12a] und der Software Multisim¹⁴ erstellt. Nach der Adaption der Schaltung auf ein passendes Layout wurde über einen Leiterplattenhersteller ein Prototyp auf FR4¹⁵ bestellt. An der Hochschule Landshut wurde dieser per Hand bestückt und mithilfe der Dampfphasenlötanlage fertig gelötet. Für erste Tests wurde ein handelsüblicher Mobiltelefon-Akku der Firma Huawei verwendet. Dieser war bereits geringfügig vorgeladen und besitzt einen internen NTC-Widerstand von $10\text{k}\Omega$. Somit entsprach diese Testumgebung ziemlich dem realen Einsatzgebiet der Ladeschaltung. Über einen fliegenden Aufbau mithilfe einer Experimentierplatine wurde der Akku an die Schaltung angeschlossen. Diese wurde selbst an eine 5V Konstantspannungsquelle angeschlossen, welche während des Versuchs auch im Spannungsspegel verändert wurde. Solange sich die anliegende Gleichspannung innerhalb des im Datenblatt vermerkten Intervalls bewegt, zeigen die Indikationsausgänge des ICs einwandfreien Betrieb auf. Die Funktion des Moduls konnte einwandfrei nachgewiesen werden und war stets reproduzierbar. Auch die kombinierbare Funktion mit dem Modul aus Kapitel 5.4.1 auf Seite 62 wurde erfolgreich getestet.

5.3. Arbeitsschaltung

5.3.1. CC2541

Um die Sensordaten verarbeiten zu können, wird eine Recheneinheit benötigt. Dabei sollte diese neben der Auswertung und Konvertierung auch eine Möglichkeit bereitstellen, Daten drahtlos zu verschicken. Bei der drahtlosen Datenübertragung war eine weitere Maßgabe, dass diese auf einem lizenzenfreien ISM¹⁶ seine Nachrichten verschickt. In Europa liegen diese auf den Frequenzen 433MHz, 868MHz und 2,4GHz (es gibt noch weitere ISM-Frequenzbereiche, diese sind allerdings die

¹⁴Software für den Schaltungsentwurf: NI Multisim [MUL13]

¹⁵Flame Retarding Number 4; Flammhemmendes Substratmaterial auf Epoxydbasis

¹⁶Industrial Scientific Medical

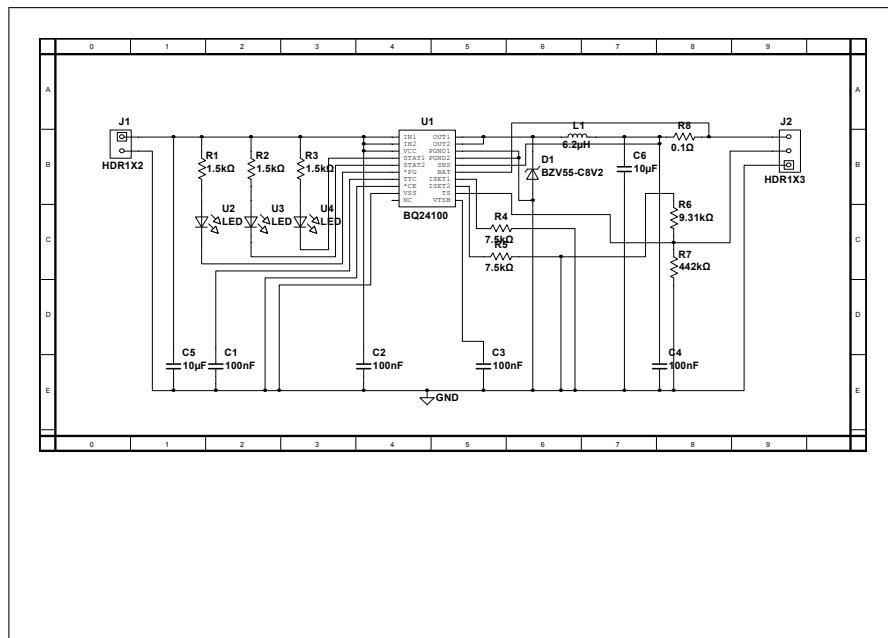


Abbildung 5.3.: Schaltbild des Lademoduls mit BQ24100 Baustein. Das zugehörige Layout ist im Anhang B auf Seite 90 zu finden.

Quelle: eigene Darstellung

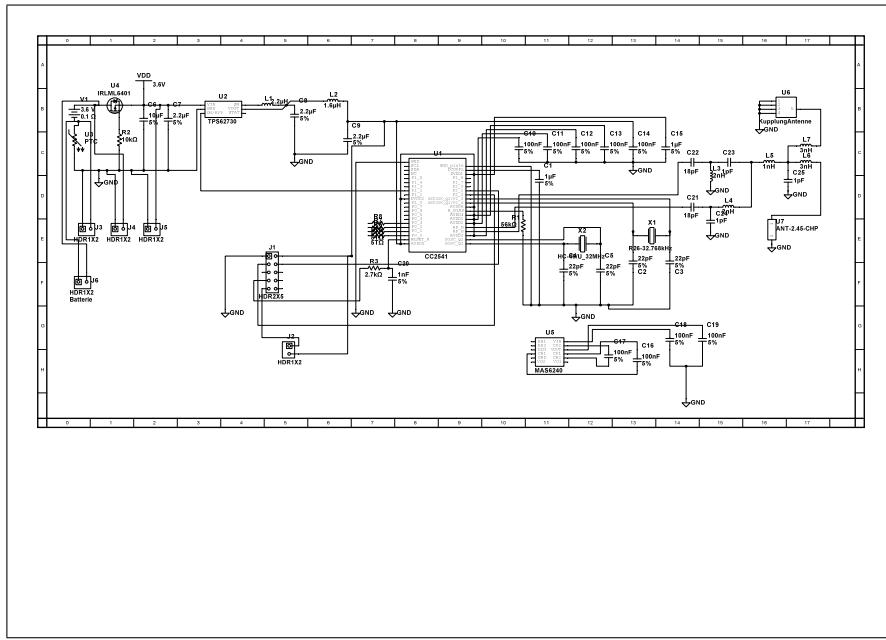


Abbildung 5.4.: Schaltbild des Moduls für den CC2541 Baustein. Das passende Platinenlayout ist im Anhang C auf Seite 91 zu finden.

Quelle: eigene Darstellung

Gängigsten). Durch eine Vorauswahl von einem Mitarbeiter der Firma SRI¹⁷ wurde der Mikrocontroller CC2541¹⁸ für erste Layouttests bestimmt. Mithilfe des Controllerdatenblatts [Ins12d] wurde eine grundlegende Schaltung aufgebaut (siehe Abbildung 5.4). Diese ist in Teilbereiche zu untergliedern:

- Eingangsschutzbeschaltung: „resetable Fuse“¹⁹, Verpolschutz
- DC/DC-Wandler: TPS62730 plus Peripherie
- System on a Chip, kurz SoC²⁰, CC2541 mit integrierter Transmitter-Einheit
- Balun²¹ plus Antennenkopplung und diskreter Antenne

¹⁷Sri Radio Systems GmbH [SRI13]

¹⁸Personal Area Networks - Bluetooth Low Energy Technology - CC2541 [TIC13]

¹⁹ein temperaturabhängiger Widerstand, zu deutsch: selbstrückstellende Sicherung

²⁰IC, welches Mikrocontroller und komplexe Peripherie auf einem Siliziumträger vereint

²¹Balanced to unbalanced

- Piezosignalgeber: MAS6240²²

Diese Teilgebiete sollen nun im Folgenden noch einzeln näher erklärt werden.

Eingangsschutzbeschaltung

Die Eingangsschutzbeschaltung besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten. Zuerst ist die „resetable Fuse“ zu nennen, welche einen zureichenden Schutz gegenüber Überströme bietet. Diese könnten im ungünstigsten Fall den speisenden Akku irreparabel beschädigen oder diesen zerstören. Die selbstrückstellende Sicherung ist im Grunde ein PTC-Widerstand²³. Allerdings hat dieser einen Ansprung in der Kennlinie, d.h. ab einem Schwellenwert wird der Widerstand hochohmig, sodass die gesamte Spannung der Schaltung an der Sicherung abfällt.

Der zweite Teil wird zum Schutz der elektronischen Schaltung vor Verpolung benötigt. Die Schutzelektronik besteht aus einem P-Kanal-MOSFET²⁴ und einem $10k\Omega$ Widerstand, der dessen Gate-Eingang vor Leistungsspitzen schützt. Die Funktion ist folgende: Damit der Transistor durchschaltet, muss dessen Source ein positiveres elektrisches Potential haben, als das Gate. Letzteres wird grundsätzlich über den Widerstand auf Massepotential gezogen. Bei richtig gepoltem Anschluss des Akkus leitet die Body-oder Bulk-Diode und das positive Potential der Akkusspannung liegt somit auch an Source an. Der Transistor steuert in Folge dessen auf. Bei Verpolung liegt am Gate grundsätzlich das höhere Potential an und auch die Body-Diode sperrt den Stromfluss. Die Schaltung hinter diesem Schutz bleibt im Fehlerfall unbehelligt.

DC/DC Wandler

Da der CC2541 Baustein unabhängig von der Speisespannung nahezu die gleiche Stromaufnahme hat [Ins12d, vgl. S. 21] wird von der Firma Texas Instruments der Einsatz eines TPS62730 Abwärtswandlers vorgeschlagen. Dieser wandelt eingehende Spannungen von 1,9V bis 3,9V auf eine feste Spannung von 2,10V um. Durch die geringen Verluste und durch den hohen Wirkungsgrad des Spannungswandlers

²²Low Noise/EMI Piezo Buzzer Driver - Micro Analog Systems [MAS13]

²³Positive Temperature Coefficient; Wert steigt mit steigender Temperatur

²⁴Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor

(ca. 86% am aktuellen Arbeitspunkt) bleibt die anfallende Leistung Eingangs- sowie Ausgangsseitig relativ gleich. Dadurch kann resultierend die Stromaufnahme vor dem TPS62730 reduziert werden. Zur Veranschaulichung folgende Beispielrechnung mit Zahlen aus dem Datenblatt:

Active-Mode RX,
ohne TPS62730
: 17,9mA

Active-Mode RX,
mit TPS62730
: 14,7mA

$$P_{\text{Controllereingang}} = U \cdot I \quad (5.43)$$

$$P_{\text{Controllereingang}} = 2,1V \cdot 17,9\text{mA} \quad (5.44)$$

$$P_{\text{Controllereingang}} = 37,59\text{mW} \quad (5.45)$$

$$P_{\text{Wandlereingang}} = U \cdot I \quad (5.46)$$

$$P_{\text{Wandlereingang}} = 3V \cdot 14,7\text{mA} \quad (5.47)$$

$$P_{\text{Wandlereingang}} = 44,1\text{mW} \quad (5.48)$$

$$\eta = \frac{37,59\text{mW}}{44,1\text{mW}} \quad (5.49)$$

$$\eta = 0,85 \quad (5.50)$$

Wie die Rechnung zeigt, bestätigt sich die Vorüberlegung und der 85%ige Wirkungsgrad fällt mit einen Mehraufwand an Leistung von 6,51mW kaum ins Gewicht. Gravierender ist dabei die Ersparnis in der Stromstärke um 3,2mA. Diese hat eine rechnerische Verlängerung der Akkulaufzeit um 17,8% zur Folge.

System on a Chip

Der CC2541 SoC vereint einen Mikrocontroller mit 8051-Architektur und eine Radiotransmitter-Einheit, welche eine Funkverbindung auf dem 2,4GHz ISM-Band

erzeugt. Er ist die zentrale Verarbeitungseinheit des Systems und beherbergt die Arbitrierung der Messdatenverarbeitung und die Datenübermittlung. Theoretisch ist es auch möglich mit diesem Chip Bluetooth-Übertragungen aufzubauen. Da aber hierfür Lizenzgebühren anfallen würden, wurden im Projekt erst proprietäre Protokolle zum Erstellen einer Funkverbindung angestrebt. Dies ist allerdings Aufgabe einer anderen Abschlussarbeit. Programmiert wird der SoC über eine TI²⁵-Schnittstelle, welche mit deren CC-Debugger²⁶ kompatibel ist. Zur Programmierung sind nähere Informationen in Kapitel 6 auf Seite 69 zu finden. Zu der peripheren Beschaltung kann noch auf die zwei Quarze eingegangen werden. Diese geben zum einen den Arbeitstakt im aktiven Modus vor (der 32MHz Quarz), zum anderen gibt es für den Low-Power-Mode²⁷ einen 32,768kHz Quarz. Dieser birgt den Vorteil, dass bei niedrigeren Taktfrequenzen deutlich weniger Leistung benötigt wird. Weiter wurden vier Portpins (P0.0 - P0.4) zum etwaigen Erweitern der Funktionalität herausgeführt.

Balun

Der Balun samt Filter wurde von dem Referenzdesign übernommen. So konnte die Berechnung der Bauteilwerte umgangen werden. Die Leitungsdimensionierung wurde mit der Software TXLine²⁸ vorgenommen. Mit diesem Programm lässt sich ohne größere Kenntnis der Berechnungen die Dimension der Leiterbahnführung bestimmen. Abbildung 5.5 auf der nächsten Seite zeigt als Beispiel die Leiterbahnbreitenberechnung für diese Schaltung.

Piezosignalgeber

Als zusätzliches Element soll die Schaltung über einen akustischen Signalgeber Warnhinweise an den Patienten bei akuter Überbelastung ausgeben. Hierfür soll ein Piezobuzzer, wie er beispielsweise in Weckern oder digitalen Armbanduhren verwendet, wird angefügt werden. Der nötigen Spannungshub an dem hochoh-

²⁵Texas Instruments

²⁶Debugger and Programmer for RF-System-on-Chips - CC-Debugger [CCD13]

²⁷kurz: LPM

²⁸TX-Line: Transmission Line Calculator AWR Corporation [TXL13]

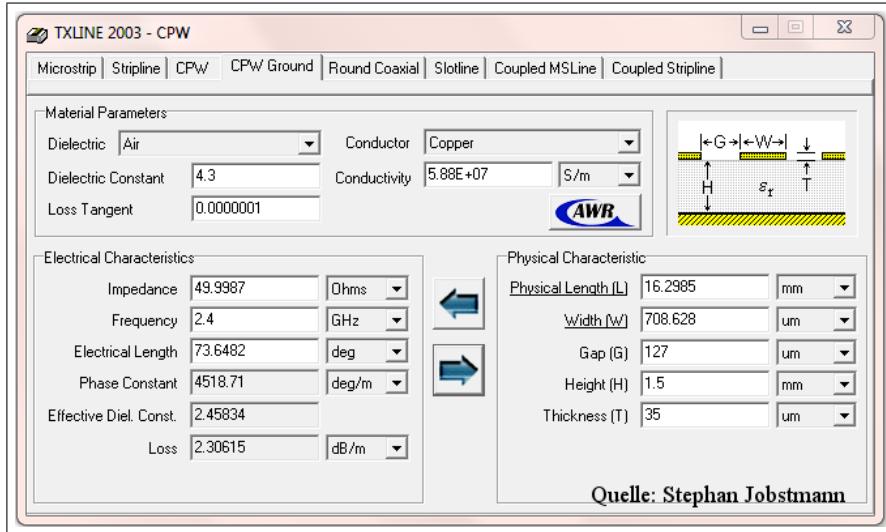


Abbildung 5.5.: Programm TXLine; Berechnung der Leiterbahnbreite

migen Eingangswiderstand des Piezokristalls wird über einen Treiberbaustein erzeugt. Der MAS6240 befindet sich seit Längerem im Hybridlabor der Hochschule Landshut im Einsatz. Lediglich die korrekte Ansteuerung über Software fehlte bisher für eine erfolgreiche Inbetriebnahme. Das IC hat eine integrierte dreistufige Ladungspumpe, welche die Eingangsspannung von 3V auf $18V_{pp}$ hochzieht. Das Signal wird einfach durch Anlegen der passenden Wechselspannung im für den Menschen hörbaren Bereich erzeugt. Für dieses Projekt wird über eine Zuleitung vom Mikrocontroller eine 4kHz Rechteckspannung angelegt. Diese Frequenz hat weiter den Vorteil, dass sie im psychoakustisch optimalen Bereich der menschlichen Wahrnehmung liegt [MTK98]. Hinzukommen noch zwei Steuerleitungen, welche für gewöhnlich ebenfalls vom SoC angesteuert werden sollen, allerdings spielt bei diesem Testaufbau vorerst die Stromaufnahme keine allzu große Rolle. Daraum wurden diese Steuereingänge für dauerhaften Betrieb schaltungstechnisch auf High-Pegel gelegt. Weiter enthalten Rechtecksignale Oberschwingungen, die für den Menschen ab einem gewissen Klirrfaktor als unangenehm empfunden werden. Dieser Effekt ist besonders für Warnsignale sehr hilfreich.

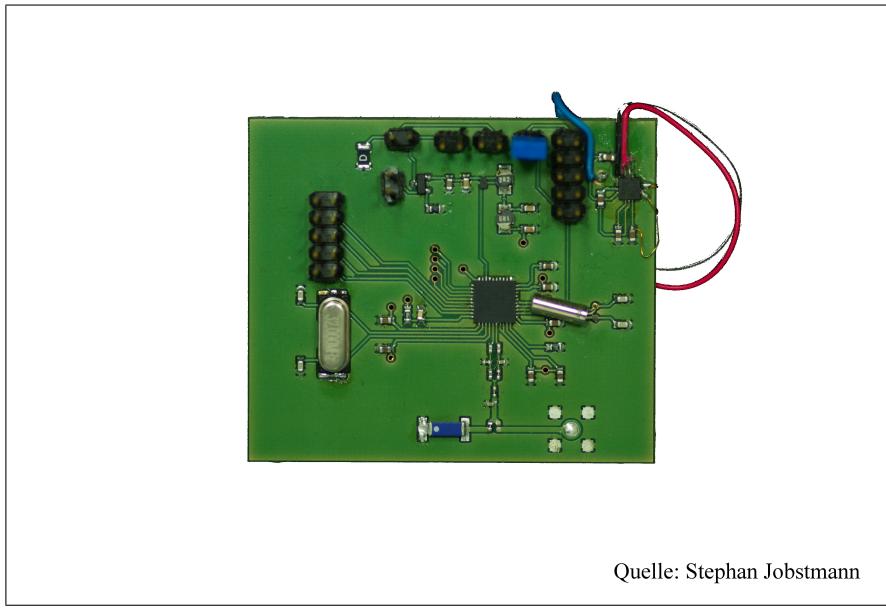


Abbildung 5.6.: Layout des Moduls mit zentralen CC2541-Baustein. Rechts oben ist auf der Platine der Piezotreiber mit zwei Zuleitungen zu erkennen. Hergestellt wurde es an der Hochschule Landshut

Fazit

Da sich im Laufe grundlegender Messungen einer anderen Abschlussarbeit herausgestellt hat, dass 2,4GHz äußerst ungünstig als Übertragungsfrequenz für Funkverbindungen in Körpernähe ist, wurde der Aufbau dieses Moduls wieder verworfen und ist somit obsolet. Die Funkverbindung wurde nicht getestet und eine Verbindung mit der Sensorik kam nicht zustande. Lediglich die Ansteuerung und das Layout des Piezotreiberbausteins wird für zukünftige weiterführende Arbeiten als Grundlage wiederverwendet werden. Ansonsten konnten alle erstrebten Funktionen des Moduls (Abbildung 5.6 erfolgreich im autarken Betrieb validiert werden.

5.3.2. CC430F6137

Genauso wie der CC2541 in Kapitel 5.3.1 auf Seite 50 ist der CC430F6137 ein SoC. Nachdem Ersterer aufgrund seiner schlechten Anpassung der Funkverbindung für

den Einsatzzweck für unzureichend eingestuft wurde, sind erste Versuche mit diesem Chip unternommen worden. Dabei wurde vorerst noch keine Modulplatine aufgebaut, sondern eine Entwicklungsplattform von TI verwendet: eine ez430-Chronos Uhr²⁹. Diese kann je nach Ausführung auf einem ISM-Band eine Funkverbindung mit einer zweiten Uhr oder einer Basisstation aufbauen. Da diese Uhren bereits an der Hochschule Landshut zur Verfügung standen, wurde die Variante mit dem CC430F6137 verwendet. Dieser ist ähnlich aufgebaut wie der bereits vorgestellte SoC, allerdings wurde hier ein CC1101³⁰ Chip implementiert, welcher auf 868MHz im ISM-Band sendet. Trotz der geringen Abmaße des 64-Pin QFN³¹-Gehäusetyps wurden mit Fädeldraht die Kontakte für die SPI³²-Schnittstelle und für einen Interrupteingang herausgeführt. Dieser wurde mit der im Unterkapitel (Nummer 5.1 auf Seite 40) beschriebenen Sensorik verbunden. Schaltungstechnisch ergab sich bei diesem Versuchsaufbau kein allzu großer Mehraufwand. Eine Besonderheit ist die Interruptsteuerung: Die Anforderung war eine verschleißfreie Möglichkeit den Controller in die Routine für die Datenaufnahme zu überführen. Dabei erwies sich folgender Testaufbau als zielführend:

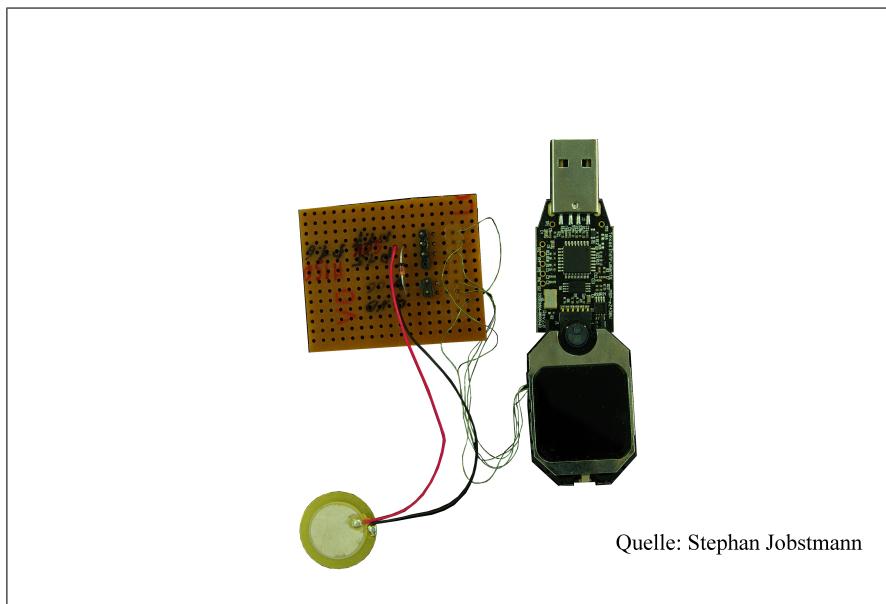
Für den Taster wurde eine Ersatzschaltung aus einem einfachen Piezobuzzer und einer dazu parallelgeschalteten Zenerdiode (Zenerspannung bei 3,3V) aufgebaut (Siehe Abbildung 5.7 auf der nächsten Seite). Der durch einen Druck auf den Piezo erzeugte Spannungshub von mehreren Volt (bis zu 20V) und dessen geringe Ladungsausschüttung genügen zur Signalverarbeitung. Allerdings muss der SoC vor dem großen Spannungspegel wirksam geschützt werden. Darum befindet sich unmittelbar an dem Piezobuzzer gekoppelt eine Diode, welche den anfallenden Pegel auf maximal 3,3V herunterzieht. Da die freigesetzte Ladung des Piezokristalls nicht genügt, um die Diode im Arbeitsbereich zu betreiben, ist beim praktischen Versuchsaufbau lediglich ein Spannungspegel von maximal ca. 2,1V zu erzielen. Dieser reicht aber immer noch aus, um eine Flanke bzw. einen Pegel zur Interrupt-Generierung zu erzeugen. Weiter wurde nach dieser Modifizierung

²⁹EZ430-Chronos Texas Instruments Embedde Processors Wiki [EZ413]

³⁰Transceiver Chip von TI [CC113]

³¹Quadrature Flat No Lead

³²serial peripheral interface



Quelle: Stephan Jobstmann

Abbildung 5.7.: Modifizierte ez430-Chronos Uhr mit Piezo-Interrupt Taster und Erweiterungsstiftleisten

der Entwicklungsplattform auch wieder ein Aufbau in Modulbauweise angestrebt (sie Abbildung 5.8 auf der nächsten Seite). Dieser hat grundsätzlich die selben Teilbereiche wie der Aufbau des CC2541 in Kapitel 5.3.1 auf Seite 50. Folgende Unterschiede sind dennoch zu erwähnen:

- Neben der üblichen Schnittstelle für den CC-Debugger wurde dieses mal auch eine Flachstecker-Verbindung mit aufgesetzt. Dies ermöglicht eine Programmierung über den Emulationsadapter der ez430-Chronos Entwicklungsplattform.
- Es wurden dieses Mal gezielt Portpins für die SPI-Verbindung und für den Interrupt-Eingang herausgeführt. Zusätzlich dazu wurde der komplette 8-Bit breite Port 2 auf einer Pfostenleiste zugänglich gemacht.
- Es ist kein Low-Power Quarz (32,768kHz) implementiert. Stattdessen ist ein RC-Schwingkreis im Controller bereits integriert.

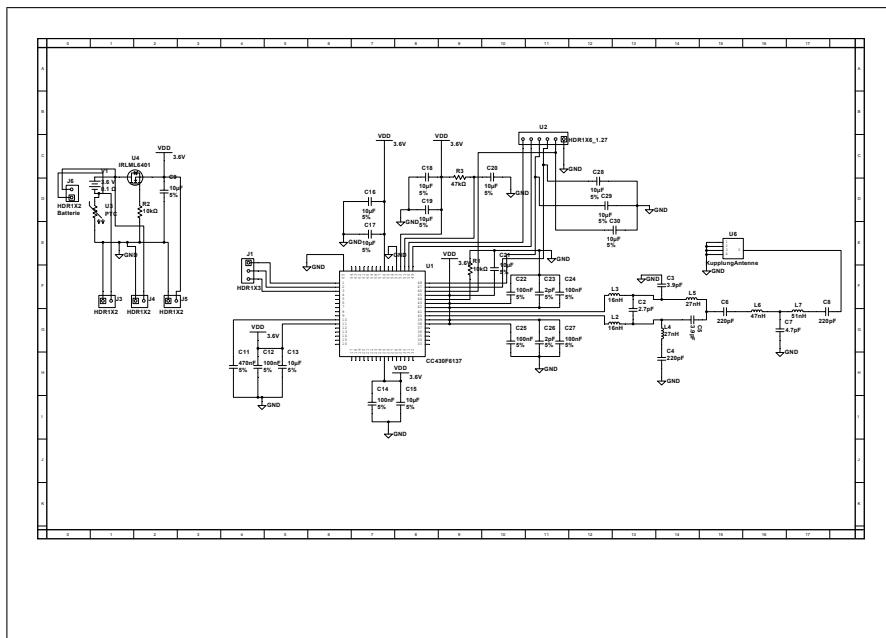
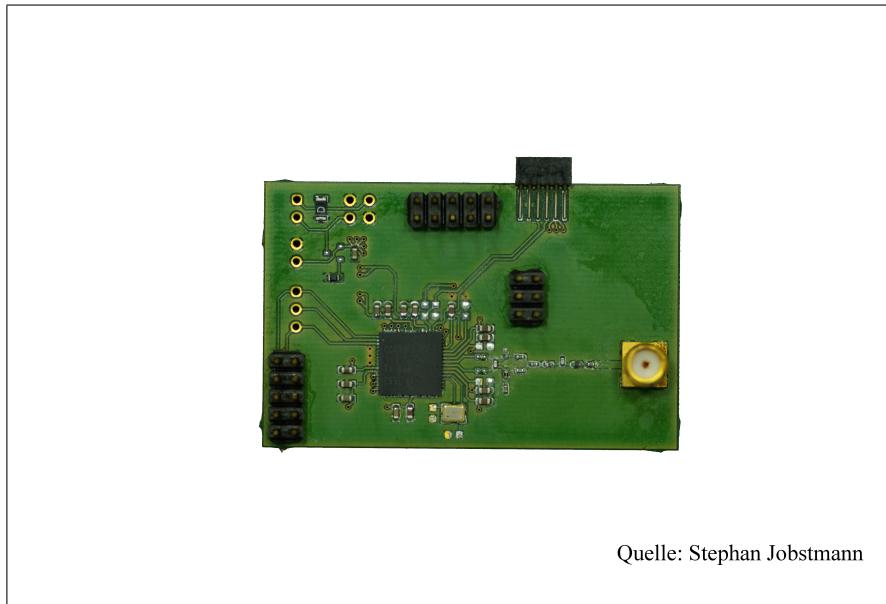


Abbildung 5.8.: Schaltbild des Modulentwurfs für den CC430F6137 Baustein. Das passende Layout ist im Anhang D auf Seite 92 zu finden.

Quelle: eigene Darstellung



Quelle: Stephan Jobstmann

Abbildung 5.9.: Eine Modulplatine mit zentralen CC430F6137-Baustein auf FR4-Substrat; Hergestellt an der Hochschule Landshut

- Es wurde auf die Option einer diskret angebrachten Antenne verzichtet. Stattdessen befindet sich zum Testen eine Kupplung für Antennen mit koaxialem Anschluss.
- Der Piezosignalgeber wurde für den ersten Prototypen weggelassen. Bei erfolgreichem Aufbau eines Moduls, welches die grundlegenden Funktionen beherrscht wird dieser wieder mit auf die Platine aufgenommen.
- der Abwärtswandler wurde aufgrund der mangelnden Empfehlung durch TI nicht integriert. Dieser soll aber beim nächsten Layout ebenfalls als Option bestückbar sein.

Die einzelnen Baugruppen sind nach demselben Schema wie dem des Modul des CC2541 aufgebaut. So wurde der Balun und dessen Dimensionierung wieder aus dem Referenz-Design von TI übernommen und die Leiterbahnbreite mit TXLine berechnet. Die Verifizierung des Aufbaus (Abbildung 5.9) konnte aufgrund eines Layoutfehlers am Quarz des CC430F6137 nicht durchgeführt werden. Es steht ein Redesign für das Schaltungslayout zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch aus.

5.4. Energiezuführung

Als zielführend erweist sich eine Vorüberlegung im Bezug auf die Möglichkeiten der elektrischen Speisung. Grundlegende Anforderungen waren hier die Verwendung in hermetisch isolierten Systemen und die Effizienz. Somit ist beispielsweise von vornherein eine direkte Kopplung an eine Netzversorgungsquelle oder eine Speisung durch wechselbare Batterien ausgeschlossen.

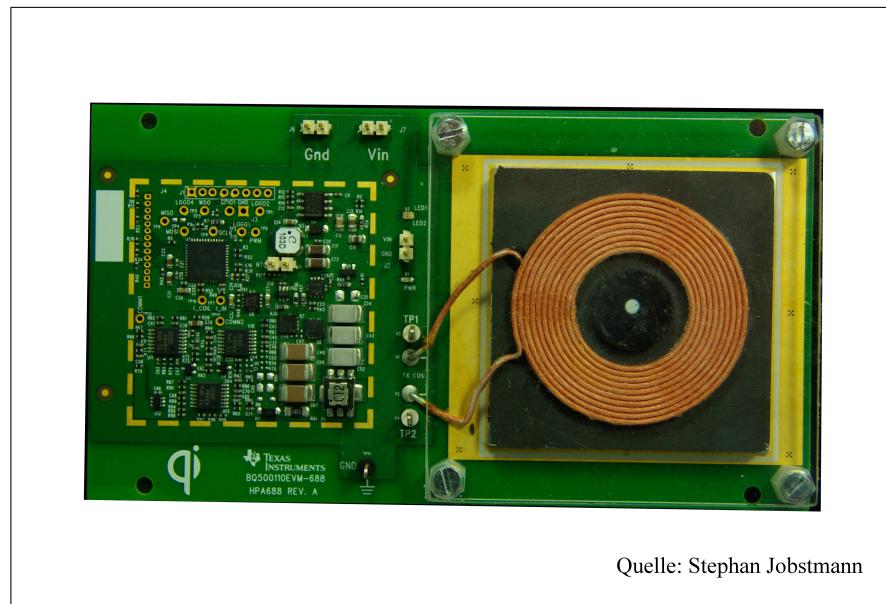
5.4.1. Drahtlose Energieübertragung

Zum Laden der internen Speicher, die in Kapitel 5.2 auf Seite 44 vorgestellt wurden, wird eine vielfach höhere Leistung benötigt als jene, die mit den Mitteln des Energy-Harvesting bereitgestellt werden kann. Allerdings sollen die durch die Grundvoraussetzung festgelegten Richtlinien nicht verletzt werden. Durch den betreuenden Professor Harasim kam die Vorgabe ein Evaluations-Kit der Firma Texas Instruments genauer zu untersuchen. Dabei handelte es sich um ein System, welches aus zwei Komponenten bestand:

- Transmitter, Sender: bq500110EVM-688 Evaluation Module (Grafik 5.10)
- Receiver, Empfänger: bq51013EVM-725 Evaluation Module (Grafik 5.11)

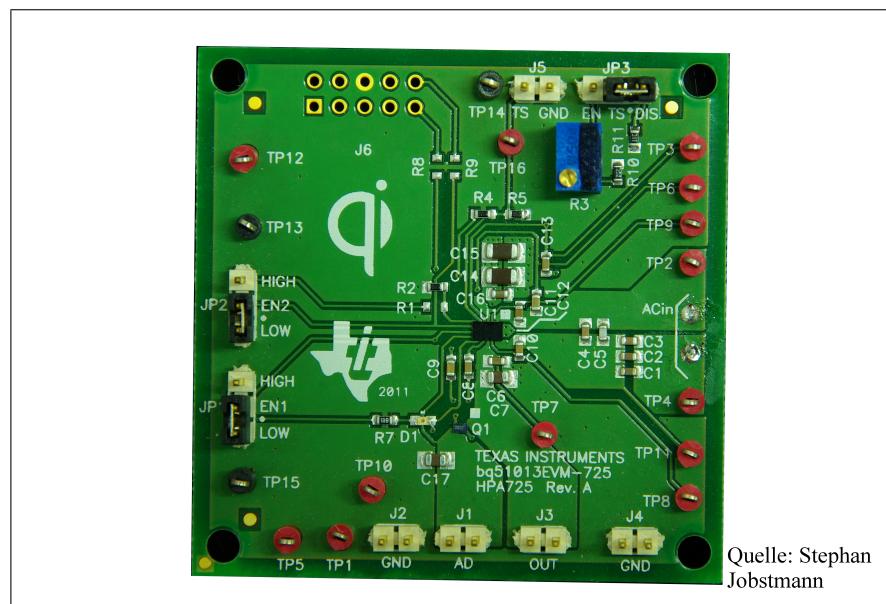
Dieses lässt sich mithilfe einer Gleichspannungsquelle, eingestellt auf eine Speisung von 19V und einer Stromgrenze über 0,5A sehr einfach in Betrieb nehmen. Am Empfängermodul stellt sich bei passgenauer Platzierung der beiden Übertragerspulen des magnetischen Kopplungssystems eine Tätigkeit der Indikationsanzeige ein. Ein Permanentmagnet hilft beim Zentrieren der beiden Luftspulen. Laut Datenblatt [Ins12c, vgl. S.2] liefert die Beispielschaltung 5V bei 1A. Zum Testen der Kompatibilität wurde die Schaltung mit der in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Ladeeinheit gekoppelt. Das erfolgreiche Zusammenarbeiten konnte reproduzierbar getestet werden.

Für das Gesamtkonzept des Fußmoduls vom Projekt „MedLast“ ist die Empfangseinheit vorrangig. Um eine passendes Zusammenspiel von proprietärer Sendeeinheit und selbstentworfener Empfangsschaltung sicherzustellen, wurde der gleiche



Quelle: Stephan Jobstmann

Abbildung 5.10.: Transmitter-Modul bq500110EVM-688 des Evaluation-Packs von Texas Instruments



Quelle: Stephan Jobstmann

Abbildung 5.11.: Receiver-Modul bq51013EVM-725 des Evaluation-Packs von Texas Instruments

Baustein (*BQ51013*) verwendet. Allerdings wurde beim Schaltungsaufbau darauf geachtet, dass der Bauteilumfang sich auf ein Minimum reduziert. So wurde die Zusatzbeschaltung für eine eventuelle alternative bedrahtete Versorgung weggelassen. Bei dem *BQ51013* handelt es sich um ein IC, welches nur in BGA³³ Gehäusegröße erhältlich ist. Da dies wiederum für das Layoutdesign bedeutete, dass mit Kontaktflächengrößen von $250\mu\text{m}$ gearbeitet werden muss, ergab sich eine weitere Problematik. Die typischen Leiterplattenhersteller für Prototypen und Kleinserien haben eine Vorgabe für den Mindestdurchmesser von Durchkontaktierungen mit $300\mu\text{m}$. D.h. über die üblichen Wege war es nicht ohne Mehraufwand möglich, einen Platine zu beschaffen. Da ein Durchmesser der Durchkontaktierungen von $150\mu\text{m}$ als maximale Maßgabe anzusehen war, wurde für den Prototypenbau LTCC³⁴ als Schaltungsträger ausgewählt. Diese können im Hybridlabor in Dickschichttechnik selbstständig aufgebaut werden. Weiter können durch das Laserstruktur-Gerät *ProtoLaser U* die Keramiksubstrate auf $15\mu\text{m}$ genau geritzt und gebohrt werden. Da LTCC im einlagigen Aufbau zu fragil wäre, wurden noch Überlegungen angestrebt, um die mechanische Widerstandsfähigkeit zu erhöhen. Ein mehrlagiger Aufbau barg eine zu große Gefahr im Bezug auf die erhöhte Wahrscheinlichkeit einer unterbrochenen Durchkontaktierung. Diese steigt exponentiell mit der Anzahl der verwendeten Lagen LTCC. Durch einen Hinweis von Herrn Leschik wurde bei einem zweiten Versuch die LTCC-Schicht, welche den beidseitigen Schaltungsdruck aufgetragen hatte, auf eine Al_2O_3 -Keramik auflaminiert. Diese dient als mechanisch-stabiler Träger. Nach einem ersten Fehlversuch konnten somit auf einem Substrat mit Mehrfach-Nutzen mehrere, passiv-elektrisch einwandfreie Schaltungen aufgebaut werden. Nach deren Bestückung per Hand und Löten mit der Dampfphasenanlage der Hochschule Landshut wurde diese mit der Einkopp lungsspule verbunden. Eine anfängliche Überlegung, diese ebenfalls auf LTCC-Dickschichttechnik zu realisieren, wurde aufgrund der nicht einzuhaltenden Kriterien an die Güte der Induktivität wieder verworfen. Darum fiel die Entscheidung auf eine Empfänger-Spule, welche von der Firma Würth Elektronik genau für diesen Zweck bereitgestellt wird [eGCK12]. Die für den Empfängerschwingkreis noch

³³Ball Grid Array

³⁴Low Temperature Cofire Ceramic

benötigten Kapazitäten wurden über folgende Formeln des Datenblatts [Ins12b] dimensioniert:

$$C1 = [(f_S \cdot 2\pi)^2 \cdot L'_S]^{-1} \quad (5.51)$$

$$C1 = [(100\text{kHz} \cdot 2\pi)^2 \cdot 0,01011\text{mH}]^{-1} \quad (5.52)$$

$$C1 = 250\text{nF} \quad (5.53)$$

$$C2 = \left[(f_D \cdot 2\pi)^2 \cdot L_S - \frac{1}{C1} \right]^{-1} \quad (5.54)$$

$$C2 = \left[(1\text{MHz} \cdot 2\pi)^2 \cdot 0,01011\text{mH} - \frac{1}{250\text{nF}} \right]^{-1} \quad (5.55)$$

$$C2 = 2,53\text{nF} \quad (5.56)$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot f_D \cdot L_S}{R} \quad (5.57)$$

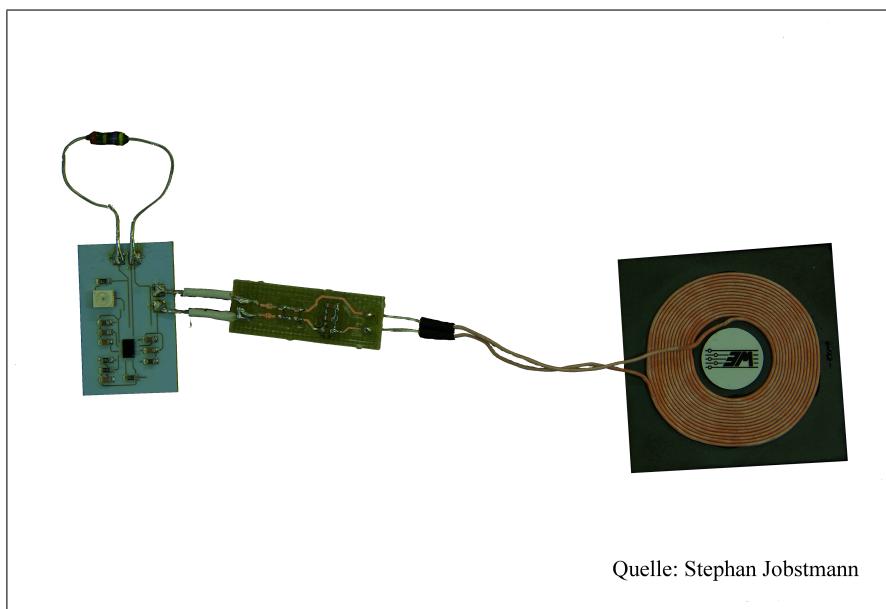
$$Q = \frac{2\pi \cdot 1\text{MHz} \cdot 0,01011\text{mH}}{0,1488\Omega} \quad (5.58)$$

$$Q = 426,90 \quad (5.59)$$

Als Mindestmaß wird im Datenblatt [Ins12b, siehe S.23] eine Güte von 77 festgelegt. Diese wird mit der Luftspule von Würth Elektronik weit überschritten.

Mit drei, beziehungsweise zwei diskreten Kondensatoren wurden die Kapazitäten $C1$ und $C2$ aufgebaut. Dies wurde auf einer separaten, zwischen Spule und Keramiksaltung gelöteten Platine aufgebaut. Der fertige selbstentworfene Aufbau wurde mit einer geringen Last von 47Ω auf die von Texas Instruments bereitgestellte Schaltung³⁵ gesetzt und getestet. Dieser ist auf Grafik 5.12 auf der nächsten Seite zu sehen. Die Reproduzierbarkeit wies noch Defizite auf, so konnte noch nicht sichergestellt werden, dass bei jedem Aufsetzen der Empfängerschaltung eine stabile Verbindung zustande kommt. Weiter können noch keine niederohmigen Lasten ($< 50\Omega$) an das Modul gekoppelt werden. Dies mag zum einen an der un-

³⁵bq500110EVM-688, Sendeeinheit



Quelle: Stephan Jobstmann

Abbildung 5.12.: Im Bild ist links das bläuliche selbst entworfene LTCC-Receiver Modul zu erkennen. Über diesem ist ein Lastwiderstand zu sehen, rechts daneben ist eine kleine Platine mit SMD-Kondensatoren zum Abstimmen des Schwingkreises. Ganz rechts außen ist die zugekauft Koppelpule zu sehen. Hergestellt wurde der Verbund im Hybridlabor der Hochschule Landshut

zureichenden Anpassung des Schwingkreises liegen oder auch zum anderen an der Hochohmigkeit der gedruckten Leiterbahnen auf dem Keramiksubstrat.

5.4.2. Energy-Harvesting

In diesem Teilbereich werden zwei physikalische Grundarten des Micro Energy Harvesting betrachtet. Diese sind die Umwandlung von mechanischer Schwingungsenergie und thermischer Differenz in elektrische Spannung. Bei der Vorbereitung und Einarbeitung in die entsprechende Thematik wird bei der Umformung von mechanischen Schwingungen in Elektrizität offensichtlich, dass dies eine ungünstige Form der Energiegewinnung für dieses System ist. Dies liegt unter anderem an der unmöglichen Abstimmung der durch den Auftritt erzeugten Erregung auf die Resonanzfrequenz des Schwingungsaufnehmers. Das Optimum des ersten Ausschlags

der durch den Tritt erzeugten Amplitude kann nicht in einer akzeptablen Baugröße implementiert werden. Andere Schwingungsaufnehmer sind zwar ebenfalls grundsätzlich geeignet und erregbar, allerdings bieten diese eine noch schlechtere Energiegewinnung. Weiter benötigt ein solches Bauelement einen Freiraum, um seine abklingende Bewegung harmonisch abbauen zu können. Es müssen auch die maximal auftretenden Beschleunigungen berücksichtigt werden, was wiederum zu einer Versteifung des kompletten Federsystems führen würde. Das hätte als Resultat, dass durch die Erhöhung der dynamischen Bandbreite die verhältnismäßig kleineren Anregungen einen schlechteren Wirkungsgrad liefern würden. Diese Umstände schließen die piezoelektrische Wandlung leider für die Option der Energiezuführung aus. [Dem11, vgl. S.39]

Die thermoelektrische Wandlung beruht auf der Inversen des Peltier-Effekts, dem Seebeck Effekt. Diesem liegt zu Grunde, dass am Übergang von zwei unterschiedlichen Metallen unterschiedlicher Temperierung ein elektrisches Feld aufgebaut wird. Die Verwendung dieses Effekts war zunächst nur bei Temperatur-Messfühlern weit verbreitet. Allerdings ist aufgrund der fortschreitenden Entwicklung der Micro Energy Harvesting Technologien dieser Effekt mittlerweile auch zur Energieversorgung nutzbar.

Als zentralen Baustein für die Erprobung von Micro-Energy-Harvesting Systemen im Bezug auf thermo-elektrische Energiewandlung bietet sich der *LTC3108* von der Firma Linear Technology an. Dieser vermag mit geringem Aufwand Eingangsspannungen von 20mV bis 500mV auf ausgangsseitig bis zu 5V aufwärts zu wandeln. Um möglichst schnell Erkenntnisse aus der Wirkungsweise des Bausteins ziehen zu können, wird eine im Internet veröffentlichte Schaltung³⁶ für Tests verwendet (siehe Abbildung 5.13 auf der nächsten Seite). Diese hält sich strikt an die Vorgaben des Datenblatts³⁷ [LTC10]. Beim LTC3108 handelt es sich um einen Spannungs-Aufwärtswandler³⁸ für sehr niedrige Eingangsspannungen. Im Gegensatz zum normalen Aufbau von Aufwärtswandlern wird keine einfache Induktivität sondern ein kleiner Transformator verwendet. Dies reduziert zwar aufgrund des ho-

³⁶Github Repository of wa7iut [GIT13]

³⁷LTC3108 - Ultralow voltage Step-Up Converter and Power Manager [LTC13]

³⁸Step-Up-Converter

hen Übersetzungsverhältnisses (1:20 bis 1:100) den Wirkungsgrad, allerdings lassen sich so auch höhere Spannungen erzeugen. Bei dem Versuchsaufbau wird ein 1:100 Transformator verwendet, da sich die Eingangsspannungen, welche experimentell ermittelt wurden, sich zwischen 20mV und 90mV bewegen. Als zu erstrebende Ausgangsspannung wurde schaltungstechnisch 3,3V eingestellt, da dies die zur Zeit am häufigsten bei Mikrocontrollern vorkommende Versorgungsspannung ist. Als externer Energiespeicher wurde ausgangsseitig an die Schaltung ein $2200\mu\text{F}$ Kondensator angefügt. Als energieerzeugendes Element wurde ein Peltierelement mit einem Aluminium-Kühlkörper versehen. So muss bei ausreichender zugeführter Wärme nicht einmal aktiv gekühlt werden, es genügt die Wärmeveräußerung durch den Kühlkörper.

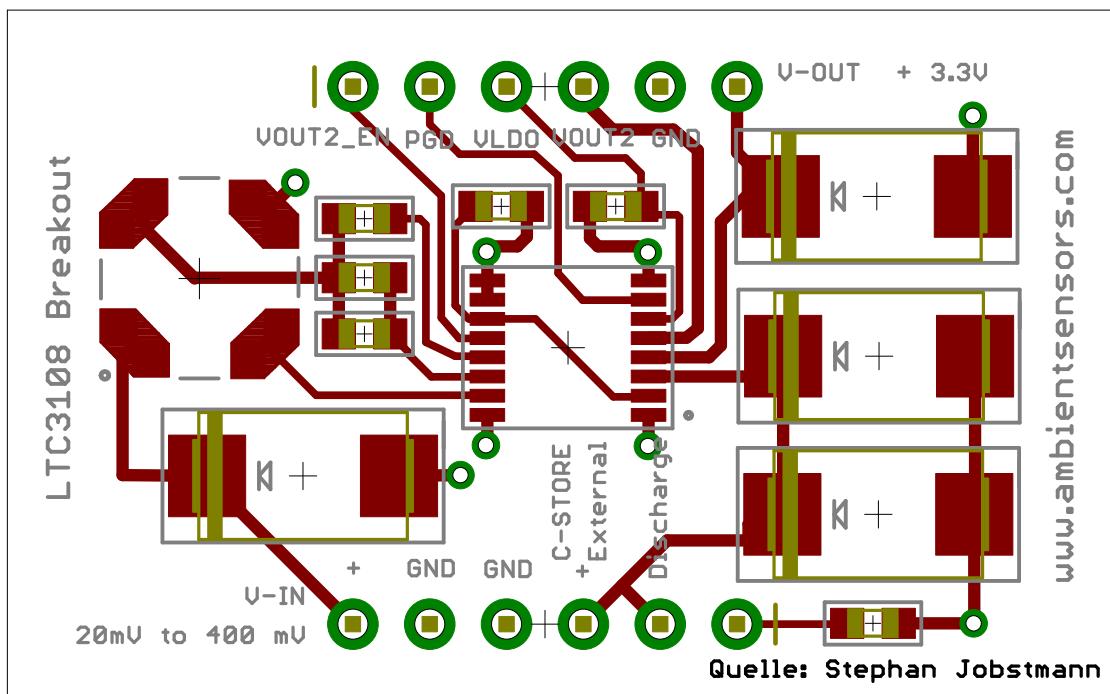


Abbildung 5.13.: Das Layout für den Energy-Harvesting Baustein LTC3108 wurde von der Open-Source-Quelle [GIT13] entnommen

6. Software

Für diverse Testläufe und die Auswertung der Sensordaten des AD1232-Bausteins sowie der Ansteuerung der erweiterten Peripherie werden verschiedene Programme benötigt. Unter Peripherie ist im Rahmen dieser Arbeit der Piezotreiber und die Interruptsteuerung von externen Signalen zu verstehen. Trotz der verschiedenen Entwicklungsumgebungen haben alle geschriebenen Programme die gemeinsame Sprache *C*. In den folgenden Unterkapiteln werden nur die eigens für diese Arbeit erstellten Routinen und Subroutinen vorgestellt. Falls ein proprietärer Softwarerahmen oder eine Bibliothek vom Hersteller verwendet wurde, ist dies an entsprechender Stelle ausdrücklich erwähnt.

6.1. Frequenzgenerierung

Zur Frequenzgenerierung wurde vorerst als Zielbaustein der CC2541 aufgrund des bestehenden Hardware-Aufbaus (vergleiche Kapitel 5.3.1 auf Seite 50) in den Vordergrund gerückt. Zum Erstellen wurde die Entwicklungsumgebung IAR Embedded Workbench IDE for 8051¹ verwendet. Zuerst wurden die grundlegenden Strukturen der Clock-Generierung, der Timer-Funktion und die der Port-Adressierung mithilfe des User's Guide [Ins12e] ausreichend eruiert. Um den Code auch für Dritte möglichst lesbar zu halten, wurden statt einfachen hexadezimalen Werten zur Registerkonfiguration lesbare Akronyme in einer separaten Header-Datei erstellt. Diese sind ab Seite 72 zu finden. Der ganze Code wurde wiederum mit Kommentaren versehen, um einen schnellen Überblick über dessen Funktion wiederzugeben. Auf Seite 71 ist die Hauptroutine ersichtlich. Von Zeile 6 bis 8 wird als Taktquelle für den Prozessor der externe Quarz eingestellt. Die Port-Konfiguration wurde in der Passage von 10 bis 13 modifiziert. Dabei wurde die zweite alternative Portbe-

¹C/C++ Compiler 8051 - IAR Embedded Workbench for 8051 [IAR13]

legung für den Timerausgang vorgenommen. Timer 1 wird in Zeile 15 mit MODULU zum einfachen Hochzählen bis zu einem festgelegten Wert (Zeile 22 bis 24) konfiguriert. Mit den Passagen 22, 26 bis 28 wird ein Puls-Breiten-moduliertes² Signal mit 50% Taktverhältnis erzeugt.

²PWM: Puls Width Modulation

```
1 #include <iocc2541.h>
2 #include "portingDefines.h"
3
4 int main( void )
5 {
6     //Setting Chipclock-Source
7     CLKCONCMD = 0x00; // HXOSC;
8     while((CLKCONSTA &= HRCOSC));
9
10    //Setting Port-configuration
11    PERCFG |= PALT2;
12    POSEL |= 0x80;
13    PODIR |= 0x80;
14
15    T1CTL |= MODULO;
16
17    // T1CNTL = 0x01;
18
19    // T1CCTL3 |= INITOUT;
20    T1CCTL3 = FECYCLE | CMPMODE;
21
22    // Set Countermax @ 32Mhz/4kHz = 8000dec = 0x1F40
23    T1CCOH = 0x1F;
24    T1CCOL = 0x40;
25
26    // Set Duty-Cycle half of Countermax 4000dec = 0x0FA0
27    T1CC3H = 0x0F;
28    T1CC3L = 0xA0;
29
30    while(1);
31
32    return 0;
33 }
```

Listing 6.1: main.c, Umgebung IAR Embedded Workbench for 8051

```
1 //-----  
2 //  
3 //  
4 //      Easy MS430 to SoC porting Header  
5 //  
6 //  
7 //  
8 //-----  
9  
10  
11 //accessing the TxCTL register  
12 #define DIV_1    0x0000  
13 #define DIV_8    0x0004  
14 #define DIV_32   0x0008  
15 #define DIV_128  0x000C  
16  
17 #define SUSPEND 0x0000  
18 #define FREERUN 0x0001  
19 #define MODULO  0x0002  
20 #define UPDOWN   0x0003  
21  
22  
23 //accessing the Timer 1  
24 //Channel 3 Capture/Compare Control  
25 #define RFIRQ   0x80  
26 #define T3IM    0x40  
27 #define FECYCLE 0x28      // falling cycling edge  
28 #define RECYCLE 0x30      // rising cycling edge  
29 #define INITOUT 0x38      // Initialize output pin  
30 #define CMPMODE 0x04      // Set for output Compare  
31  
32  
33 //accessing the Clock Registers  
34  
35 //Use with CLKCONCMD to change main-clock-source
```

```

36 #define HXOSC 0x40
37 //Use with CLKCONSTA to check
38 //if clock-source has changed
39 #define HRCOSC 0x40
40
41 //accessing the Portconfig
42
43 #define PALT2 0x40

```

Listing 6.2: portingDefines.h, Umgebung IAR Embedded Workbench for 8051

6.2. Sensorauswertung & ISR

Um die Funktion des Sensors festzustellen, wurde zunächst eine Plattform gewählt, deren Funktion sich bewährt hat. Somit wurde der AD1232 mit dem 8051 Mikrocontroller Board³ der Hochschule Landshut in Betrieb genommen. Dies hatte den Vorteil, dass Messwerte über eine bereits im Vorfeld angelegte Code-Bibliothek auf dem LCD⁴ der Zusatzplatine ohne großen Programmieraufwand ausgegeben werden kann. Darum werden im Folgenden auch nur die für den Sensor relevanten Teile erläutert. Auf Seite 75 werden die Routinen zur Sensordatenverarbeitung der Quelldatei SPI.c dargestellt. Der String am Anfang dient zur etwaigen Ausgabe auf dem LC-Display. Die `union` vereint die einzelnen empfangen 8-Bit Fragmente des ausgelesenen Wertes des 24-Bit A/D-Wandlers zu einem `unsigned long`-Wert (`longre`). Über Präprozessor-Anweisungen kann eine Vorselektion der unterschiedlichen Programmabschnitte erzielt werden (`MV_OUT`, `UV_OUT`, `TEMP`, `EVAL_BOARD`). So wird ein Großteil des Programmcodes eingespart. Darum kann auch eine Vielzahl an Variationen der Signalaufbereitung in eine Quelldatei untergebracht werden, ohne die maximale Codegröße von 4kByte zu überschreiten. Diese ist von der lizenzenfreien Version der Entwicklungsumgebung μ Vision4 von Keil vorgegeben. Im Unterprogramm `void wandleascii_signed(unsigned int e)` wird unabhängig von

³C8051F020 von SiLabs, 8-Bit Mikrocontroller

⁴Liquid Crystal Display

der Vorselektion der empfangene AD-Wert in ASCII-Zeichen umgewandelt. Lediglich die arithmetische Aufbereitung ist unterschiedlich. Ebenfalls ist eine Vorzeichenanalyse allen gemein, diese wird über Bitmanipulation durchgeführt: `ken5[x] = (e > 0x7FFF) ? 0x2D : 0x2B;`. Über den Aufruf der Subroutine wird über das Polling-Verfahren der 24-Bit Wert des A/D-Wandlers eingelesen. Dies geschieht über 4 in Reihe folgende Aufrufe einer 8-Bit Empfangsschleife.

In der Headerdatei `dependencies.h` auf Seite 81 werden die Anweisungen für den Präprozessor definiert. Dazu kommen noch Kalibrationswerte für den internen Temperatursensor des AD1232, welche durch empirische Analyse festgelegt wurden. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des A/D-Wandlers mit dem Hochschul-Board, wurde eine Adaption auf die ez-Chronos Uhr vollzogen. Dafür wurde ein Programmbeispiel⁵ von Texas Instruments als Grundlage verwendet und dementsprechend angepasst. Um eine eventuelle weitere Portierung zu vereinfachen, beginnt die Quelldatei auf Seite 82 mit `#define`-Anweisungen die ein schnelles Angleichen ermöglichen. Nach dem Abschalten des Watchdog-Timers in der `void main(void)`-Routine werden die Ports gesetzt und der SPI-Port konfiguriert. Eine Besonderheit des Controllers fällt dabei auf: es ist beim Betrieb der SPI-Schnittstelle nicht nötig, alle drei Standardleitungen (MOSI, MISO, SCK) zu setzen. So kann bei PIN/PORT-Mangel auch beispielsweise ein MOSI-PIN als GPIO⁶ verwendet werden, wenn über SPI ausschließlich Daten eingelesen werden. Weiter wird ein Interrupt-Eingang für den Piezo-Taster und der zugehörige Vector eingeschalten. In der `__interrupt void PORT1_ISR(void)` (Zeile 109) wird mit ankommenden Interrupt zuerst geprüft, ob am A/D-Wandler gültige Daten anliegen. Danach werden wie im vorhergehenden Programm für den 8051 Controller die 4 8-Bit Werte des 24-Bit ADC-Werts eingelesen.

⁵CC430F613x Demo - USCL_A0, SPI 3-Wire Master Increment Data [CC413]

⁶General Purpose Input Output

```
1 #include "C8051F020.h"
2 #include "dependencies.h"
3
4 unsigned char ken5[12]={"SPI:      mV"};
5
6 union
7 {
8     unsigned char c[4];
9     unsigned int i[2];
10    unsigned long longre;
11 }analog;
12
13 #ifndef TEMP
14 void wandleASCII_signed(unsigned int e)
15 {
16     unsigned int reference = REFERENCE;
17 /*Folgender Codeausschnitt bewirkt nur eine laufende
18 Animation auf dem LCD-EA T123-I2C*/
19 #ifdef EVAL_BOARD
20     static unsigned char inc = 0x8F;
21
22     switch(inc)
23     {
24         case 0x94:
25             inc = 0xBD;
26             break;
27         case 0xBD:
28             inc = 0x90;
29             break;
30         default:
31             inc++;
32             break;
33     }
34
35 #endif // #ifdef EVAL_BOARD
```

```
36
37 #ifdef MV_OUT
38
39     ken5[0] = inc;
40     ken5[1] = ':';
41     ken5[2] = ' ';
42     ken5[3] = ' ';
43     ken5[4] = ' ';
44
45     /*Erkennen des Vorzeichenbits und
46     Auswertung als Symbol*/
47     ken5[5] = (e > 0x7FFF) ? 0x2D : 0x2B;
48
49     e = e << 1;                      //Entfernung des
50     e = e >> 1;                      //Vorzeichenbits
51
52     e =((unsigned long)e * reference)/65536;
53     ken5[6]=e/1000+ 0x30;
54     e = e % 1000;
55     ken5[7]=e/100+ 0x30;
56     e = e % 100;
57     ken5[8]=e/10 + 0x30;
58     e = e % 10;
59     ken5[9]=e + 0x30;
60     ken5[10]='m';
61 #endif //ifdef MV_OUT
62
63 #ifdef UV_OUT
64
65     ken5[0] = inc;
66     ken5[1]=':';
67
68     /*Erkennen des Vorzeichenbits und
69     Auswertung als Symbol*/
70     ken5[2] = (e > 0x7FFF) ? 0x2D : 0x2B;
```

```
71
72     e = e << 1;                      //Entfernung des
73     e = e >> 1;                      //Vorzeichenbits
74
75     e =(((unsigned long)e * reference*100))>>16;
76
77     /* Ganzzahl-in-String Umwandlung */
78     ken5[3]=e/100000 + 0x30;
79     e = e % 100000;
80     ken5[4]=e/10000 + 0x30;
81     e = e % 10000;
82     ken5[5]=e/1000 + 0x30;
83     e = e % 1000;
84     ken5[6]=e/100 + 0x30;
85     e = e % 100;
86     ken5[7]=e/10 + 0x30;
87     e = e % 10;
88     ken5[8]=e + 0x30;
89     ken5[9]= '5';
90     ken5[10]= 'u';
91
92 #endif //ifdef UV_OUT
93 }
94 #endif //ifndef TEMP
95
96 #ifdef TEMP
97 void wandlascii_signed(unsigned long e)
98 {
99     unsigned long    subb = SUBB;
100    unsigned long    div = DIV;
101    unsigned int step = STEP;
102
103 /*Folgender Codeausschnitt bewirkt nur eine laufende
104 Animation auf dem LCD-EA T123-I2C*/
105 #ifdef EVAL_BOARD
```

```
106     static unsigned char inc = 0x8F;
107
108     switch(inc)
109     {
110         case 0x94:
111             inc = 0xBD;
112             break;
113         case 0xBD:
114             inc = 0x90;
115             break;
116         default:
117             inc++;
118             break;
119     }
120 #endif // EVAL_BOARD
121
122     ken5[0] = inc;
123     ken5[1] = ':';
124     ken5[2] = ' ';
125
126     /*Kuerzen des 32Bit ulong Wertes
127      auf den 24Bit-Inhalt.
128      Beispiel: 34 45 B4 00h --> 34 45 B4h */
129     e = e >> 8;
130
131     /*Erkennen des Vorzeichenbits und
132      Auswertung als Symbol*/
133     ken5[3] = (e > 0x7FFFFFF) ? 0x2D : 0x2B;
134
135     e = e << 1;           //Entfernung des
136     e = e >> 1;           //Vorzeichenbits
137
138     /*Berechnung nach Kalibrationswerten*/
139     e = (e - subb) * 10 / div;
140
```

```
141     /* Ganzzahl-in-String Umwandlung */
142     ken5[5]=e/1000 + 0x30;
143     e = e % 1000;
144     ken5[6]=e/100 + 0x30;
145     e = e % 100;
146
147     ken5[7]= ' , ';
148
149     ken5[8]=e/10 + 0x30;
150     e = e % 10;
151     ken5[9]= e + 0x30;
152     ken5[10]= ' , ';
153     ken5[11]= 'C';
154 }
155 #endif
156
157 void SPI_read(void)
158 {
159     unsigned char i = 0;
160
161     /*eventuell muss zum Pollen des DATAREADY-Zustands
162      der SPI-MODE der GPIO ausgeschalten werden!*/
163 //SPIOCN &= 0xFE;
164
165     while(MISO_PIN);    /*warten bis DATAREADY anliegt*/
166
167 //SPIOCN |= 0x01;
168
169     for(i = 0; i < 4; i++)
170     {
171         SPIODAT = 0xAA;
172         while(!SPIF);
173         SPIF = 0;
174         analog.c[i] = SPIODAT;
175     }
```

```
176     analog.c[3] = 0x00;  
177  
178 #ifdef TEMP  
179     wandlascii_signed(analog.longre);  
180 #else  
181     wandlascii_signed(analog.i[0]);  
182 #endif  
183 }
```

Listing 6.3: SPI.c, Umgebung μ Vision4 Keil

```
1 /*dependencies*/
2
3
4 /*Aufloesung waehlen*/
5 // #define MV_OUT
6 #define UV_OUT
7 // #define TEMP
8
9 /* wenn mit dem 4. Semesterboard
10    gearbeitet wird, entkommentieren!*/
11 #define EVAL_BOARD
12
13
14 #define MISO_PIN P0_3
15
16 /*precondition ADC-Calculation)*/
17
18 #define CAL_VOLTAGE 114.6
19 #define CAL_TEMP      26.5
20
21 //Steigung der Temperaturgeradengleichung in mV/C
22 #define GRADIENT      0.379
23 //Temperaturachsenabschnitt bei C gleich Null
24 #define OFFSET        (CAL_VOLTAGE/(CAL_TEMP*GRADIENT))
25 //Referenzspannung in mV
26 #define REFERENCE    3337.0
27 //entspricht (2^23)-1
28 #define RESOLUTION   8388607.0
29
30 #define STEP          (RESOLUTION/(REFERENCE*0.5))
31 #define SUBB          (OFFSET*STEP)
32 #define DIV           (GRADIENT*STEP)
```

Listing 6.4: dependencies.h, Umgebung μ Vision4 Keil

```
1 //*****
2 //  ADS1232_SPI Project
3 //
4 //  Description: Half (two wire) SPI-interface,
5 //  specified for use with the TI ADS1232 24-bit
6 //  analog-to-digital converter for bridge sensors. A
7 //  single measurement is triggered through a push on
8 //  an external piezo buzzer.
9 //
10 //  Warning: no low-power-mode implemented yet. Use
11 //          with USB-debugger supply is recommended.
12 //
13 //  Built was developed through an code example from
14 //  Texas Instruments inc. called "CC430F613x Demo -
15 //  USCI_A0 , SPI 3-Wire Master Incremented Data" and the
16 //  "ez430_chronos" standard workspace for an
17 //  ez430_Chronos developement tool.
18 //
19 //      CC430F6137
20 //  -----
21 // /|\|           |
22 // | |           |
23 // --|RST         |
24 // |             |
25 // |             P1.6| -> Data Out (UCA0SIM0)
26 // |             |
27 // |             P1.5| <- Piezo-interrupt-input
28 // |             |
29 // |             P1.7| -> Serial Clock Out (UCA0CLK)
30 //
31 //
32 //  sjobstm
33 //  UAS Landshut
34 //  August 2012
35 //*****
```

```
36
37 #include "cc430x613x.h"
38
39 #define ADS_TX_BUFFER          (UCA0TXBUF)
40 #define ADS_RX_BUFFER          (UCA0RXBUF)
41 #define ADS_TX_IFG             (UCTXIFG)
42 #define ADS_RX_IFG             (UCRXIFG)
43 #define ADS_IRQ_REG            (UCAOIFG)
44 #define ADS_SPI_CTL0           (UCAOCTL0)
45 #define ADS_SPI_CTL1           (UCAOCTL1)
46 #define ADS_SPI_BRO            (UCAOBRO)
47 #define ADS_SPI_BR1            (UCAOBR1)
48
49 unsigned char MST_Data,SLV_Data,check[4];
50
51 void main(void)
52 {
53     // Stop watchdog timer
54     WDTCTL = WDTPW+WDTHOLD;
55     // Get write-access to port mapping regs
56     PMAPPWD = 0x02D52;
57     // Map UCA0SOMI output to P1.5
58     P1MAP5 = PM_UCA0SOMI;
59     // Map UCA0CLK output to P1.7
60     P1MAP7 = PM_UCA0CLK;
61     // Lock port mapping registers
62     PMAPPWD = 0;
63
64     // ACLK, MCLK, SMCLK set out to pins
65     P1DIR |= BIT5 + BIT7;
66     // P2.0,2,4 for debugging purposes.
67     P1SEL |= BIT5 + BIT7;
68
69     // **Put state machine in reset**
70     UCAOCTL1 |= UCSWRST;
```

```
71      // 3-pin, 8-bit SPI master
72      UCA0CTL0 |= UCMST+UCSYNC+UCCKPH+UCMSB;
73
74      // Clock polarity high, MSB
75      // SMCLK
76      UCA0CTL1 |= UCSSEL_2;
77      // /120 = 100kHz
78      UCA0BR0 = 0x78;
79      //
80      UCA0BR1 = 0;
81      // No modulation
82      UCA0MCTL = 0;
83      // **Initialize USCI state machine**
84      UCA0CTL1 &= ~UCSWRST;
85      // Set acceleration sensor power on
86      PJDIR |= BIT0;
87      PJOOUT |= BIT0;
88
89      // Set MISO to input
90      P1DIR &= ~(BIT5 + BIT6);
91      // Disable Pull-ups/downs
92      P1REN &= ~(BIT5 + BIT6);
93
94      // Trigger interrupt on rising edge
95      P1IES &= ~BIT6;
96
97      // Reset interrupt flags
98      P1IFG &= ~BIT6;
99
100     // Enable Piezo-interrupt
101    P1IE |= BIT6;
102
103     // Wait for slave to initialize
104    __delay_cycles(100);
105    __enable_interrupt();
```

```
106     while(1);
107 }
108
109 #pragma vector=PORT1_VECTOR
110 __interrupt void PORT1_ISR(void)
111 {
112     P1SEL &= ~BIT5;
113     while((P1IN & BIT5));
114     P1SEL |= BIT5;
115
116     // USCI_A0 TX buffer ready?
117     while (!(UCA0IFG&UCTXIFG));
118     // Write dummy data to TX buffer
119     ADS_TX_BUFFER = 0;
120     // Wait until new data was written into RX buffer
121     while (!(ADS_IRQ_REG & ADS_RX_IFG)) ;
122     // Read RX buffer
123     check[0] = ADS_RX_BUFFER;
124
125     // Write dummy data to TX buffer
126     ADS_TX_BUFFER = 0;
127     // Wait until new data was written into RX buffer
128     while !(ADS_IRQ_REG & ADS_RX_IFG)) ;
129     // Read RX buffer
130     check[1] = ADS_RX_BUFFER;
131
132     // Write dummy data to TX buffer
133     ADS_TX_BUFFER = 0;
134     // Wait until new data was written into RX buffer
135     while !(ADS_IRQ_REG & ADS_RX_IFG)) ;
136     // Read RX buffer
137     check[2] = ADS_RX_BUFFER;
138
139     // Write dummy data to TX buffer
140     ADS_TX_BUFFER = 0;
```

```
141     // Wait until new data was written into RX buffer
142     while (!(ADS_IRQ_REG & ADS_RX_IFG)) ;
143     // Read RX buffer
144     check[3] = ADS_RX_BUFFER;
145     // No valid value inside, so deleted!
146     check[3] = 0x00;
147
148     __disable_interrupt();
149     P1IFG = 0x00;
150     P1IE = BIT6;
151     __enable_interrupt();
152 }
```

Listing 6.5: ADS1232.c, Umgebung Code Composer Studio v4

7. Ergebnis

Bei dieser Arbeit konnte die Aufgabenstellung komplett erfüllt werden. Lediglich das Modul für den Baustein CC430F6137 konnte nicht verifiziert werden. Da allerdings ein Prototyp aus einem proprietären Testaufbau¹ durch sinngemäße Modifikationen erstellt wurde und dieser alle Erwartungen erfüllt hat, ist auch hier von einem erfolgreichen Aufbau zu sprechen. Es wurden verschiedene Konzepte der Energiezuführung getestet und dabei das Attraktivste mit den besten Leistungsübertragungsdaten ausgewählt. Dies wurde mit einem WPC-konformen Empfängeraufbau zum drahtlosen Energieempfang realisiert. Jener wurde in Dick-schichttechnik an der Hochschule Landshut im Hybridlabor angefertigt und anschließend erfolgreich getestet. Zum Energiespeichern fiel die Auswahl nach einer Voruntersuchung auf Lithium-Ionen-Technologie. Hierfür wurde ein Aufbau zum Laden eines handelsüblichen Akkus erstellt und erfolgreich mit einem der weit-verbreiteten Mobiltelefon-Akkus validiert. Die geforderte Sensorik wurde mit dem bereits weiter oben im Text erwähnten modifizierten Testaufbau erfolgreich gekoppelt. Die passende Software zur Sensorauswertung, Generierung eines Warnsignals und Ansteuerung eines Controller-externen Interrupts wurde ebenfalls entwickelt, verbessert und mit Erfolg getestet. Vorausgehende Untersuchungen des kapazitiven Verhaltens von Piezo-Elementen unter Last haben die Zielrichtung der Arbeit entscheidend geprägt. Grundlegende Sachverhalte sind erläutert worden und beschreiben Wirkungsweisen und Funktion der einzelnen Komponenten im Allgemeinen.

¹ez430-Chronos

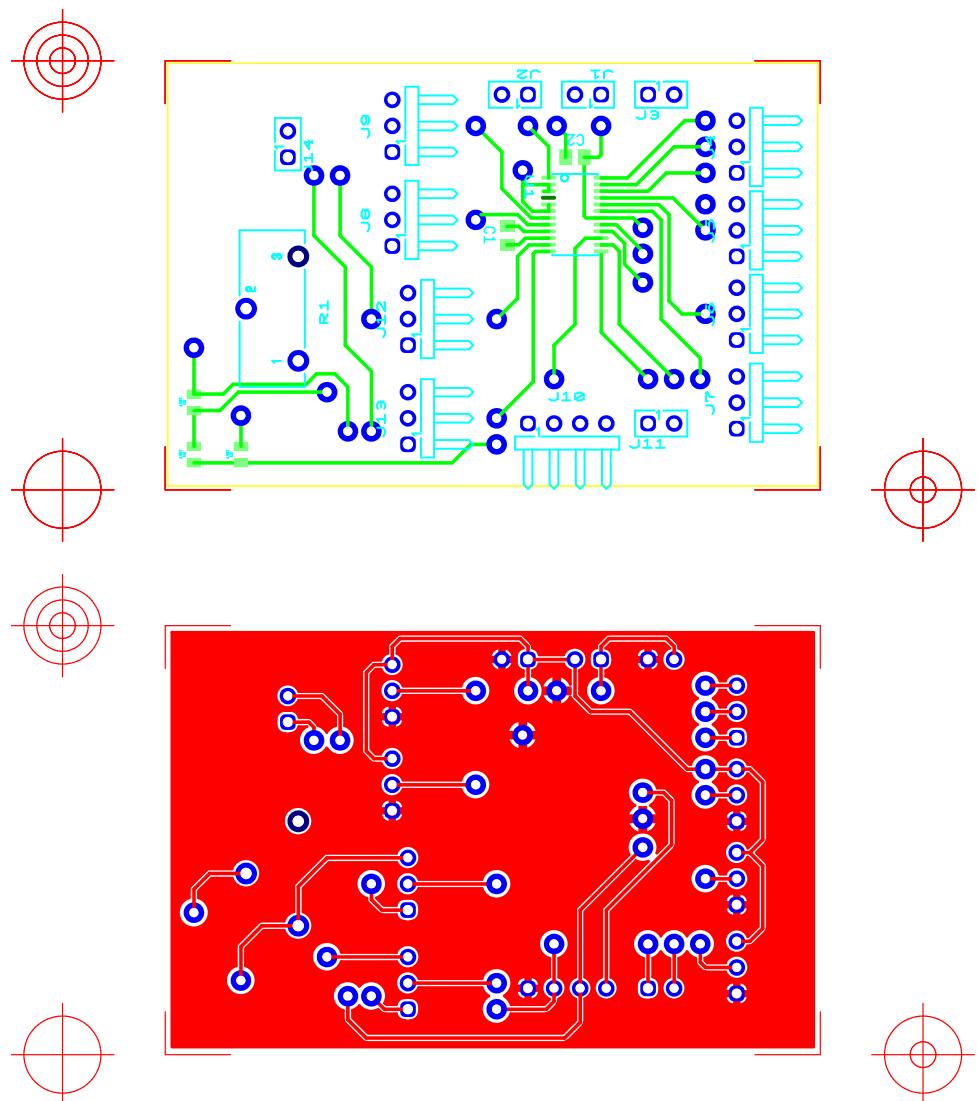
8. Ausblick

Nachfolgende weiterführende Arbeiten können sich Stabilisierung und die Verbesserung der Reproduzierbarkeit der einzelnen Komponenten zum Ziel haben. Mit einem monolithischen Aufbau sollte die Weiterentwicklung durch die Firma Siegert abgeschlossen werden. So können folgende Arbeitspunkte für zukünftige Aufgaben genannt werden:

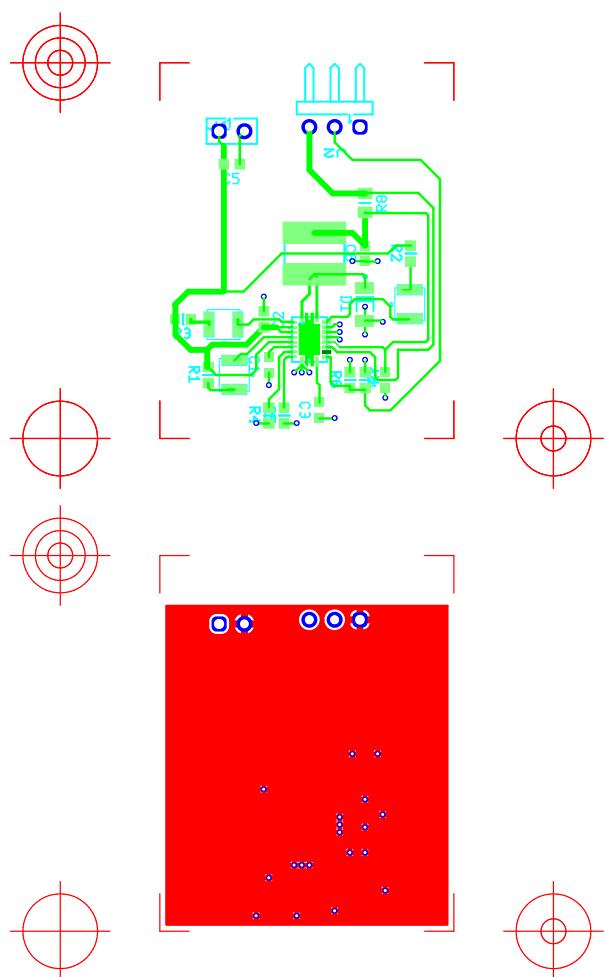
- Minimierung der Ausmaße der Leiterplattenlayouts
- Verbesserung der spezifischen Eigenschaften der einzelnen Module
- Zusammenführen einzelner Komponenten, beispielsweise drahtlose Energie-Übertragung und Lade-Schaltung
- Vereinigung aller modularen Aufbauten

Parallel zu den aufgeführten, auf dieser Arbeit basierenden Themen kann auch noch ein Messsystem, das auf einem kapazitiven Sensor der Firma CeramTec beruht, aufgebaut werden. Mit der Ausführung, Verifizierung und Validierung dieser weiteren Arbeitsschritte ist das Gerät, das Fußmodul für das Projekt MedLast, tauglich zur Serienfertigung.

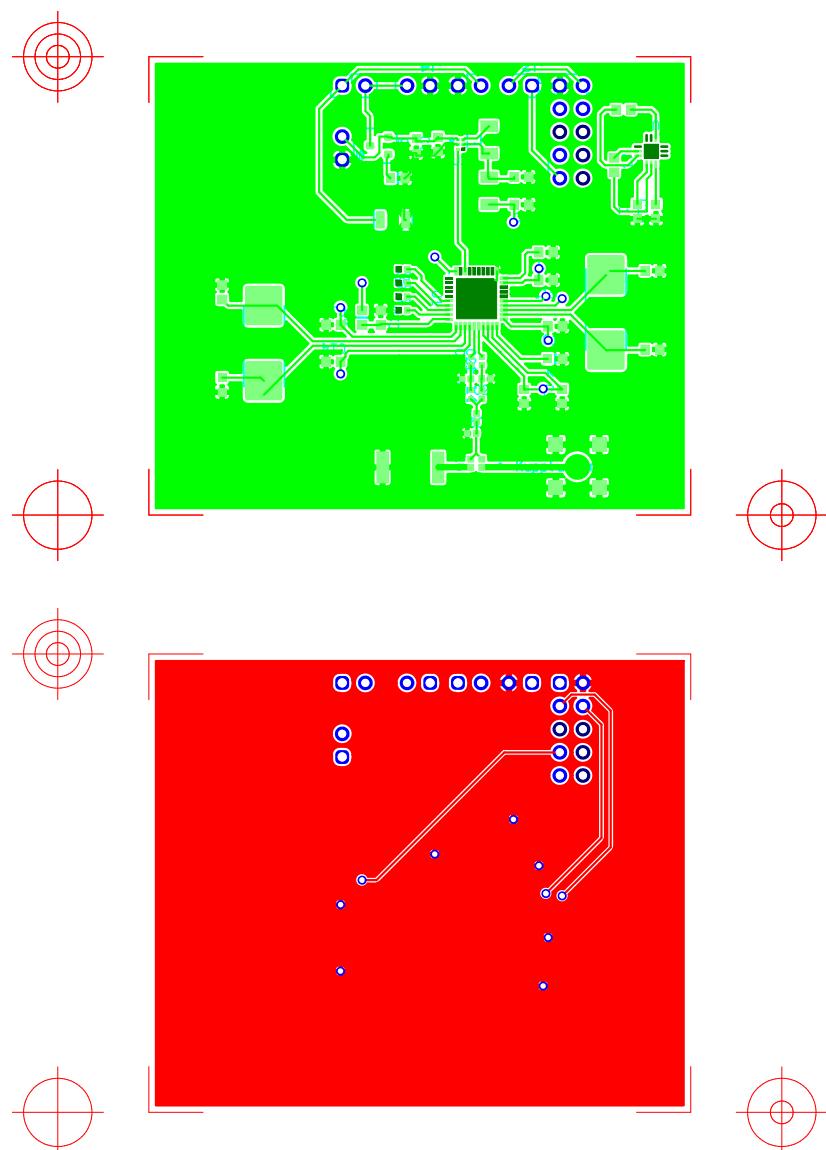
A. Layout: AD1232 Sensorik (verifiziert)



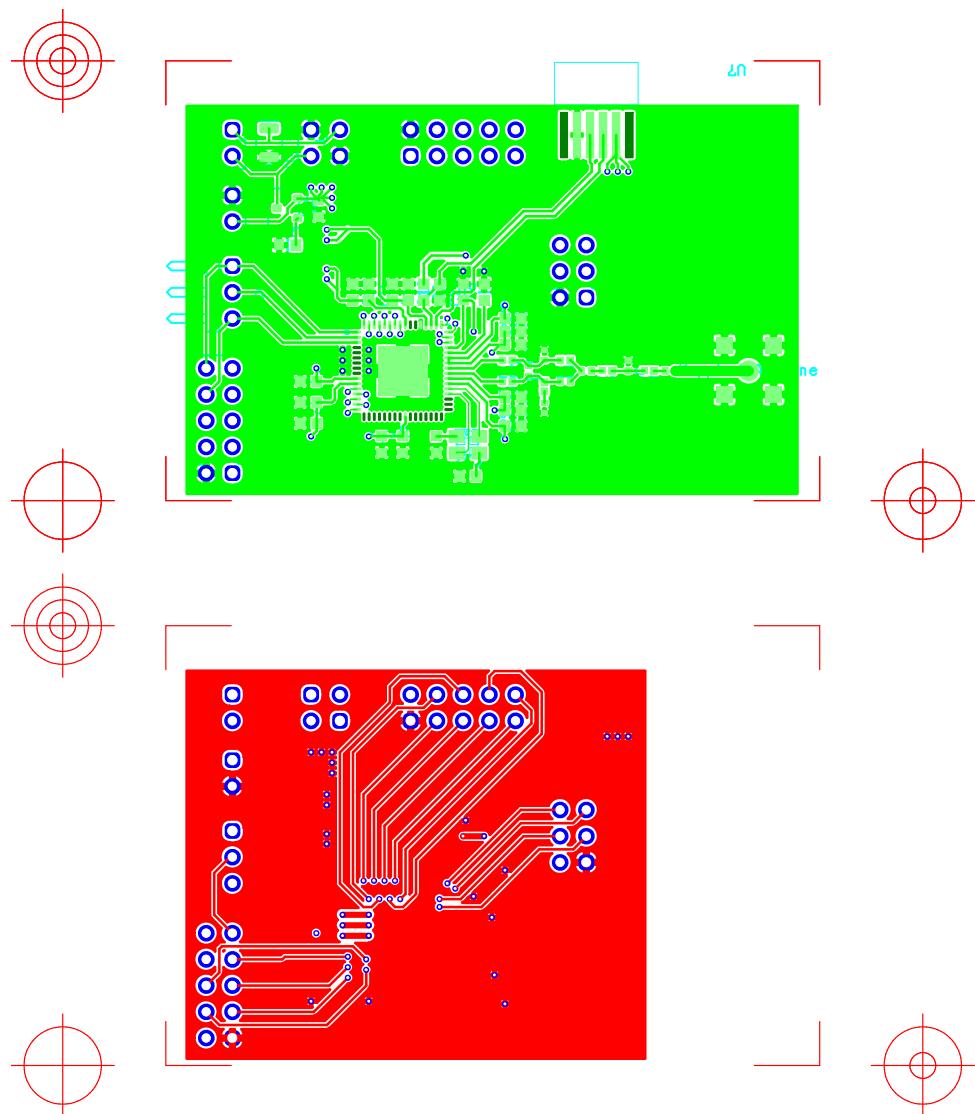
B. Layout: LiIon-Akku-Lader (verifiziert)



C. Layout: CC2541, 2,4GHz SoC (verifiziert)



D. Layout: CC430F6137 868MHz SoC



Abbildungsverzeichnis

3.1	Ladungskurve eines typischen Lithium-Ionen-Akkumulators	11
3.2	Longitudinaler Piezoeffekt; Kristallstruktur und Ladungsverschiebung	15
4.1	Messung 1; Sonox 502 Kapazitives Verhalten	21
4.2	Messung 2a; Sonox 502 Statisches Verhalten	23
4.3	Messung 2b; Statisches Verhalten des stabileren Schraubstocks . . .	24
4.4	Messung 3 und 4; Sonox 502 unter Einsatz besserer Spannvorrichtung	26
4.5	Messung 5; 1kHz Messfrequenz	28
4.6	Einführende Messung Piezostack	31
4.7	Messung 7; mit Entladung, ohne Setz-Zeit; Piezostack; Kapazität .	33
4.8	Messung 8; ohne Setz-Zeit; Parallelwiderstand	35
4.9	Messung 9; 2 Minuten Setz-Zeit; Piezostack; Kapazität	38
4.10	Messung 10; 2 Minuten Setz-Zeit; Piezostack; Parallelwiderstand .	39
5.1	AD1232 A/D-Wandler Schaltbild	42
5.2	AD1232 A/D-Wandler Modul mit Drucksensor	43
5.3	Schaltbild des Lademoduls, BQ24100	51
5.4	Schaltbild des Moduls, CC2541	52
5.5	Programm TXLine; Berechnung der Leiterbahnbreite	56
5.6	Modul CC2541; Hergestellt an der Hochschule Landshut	57
5.7	Modifizierte ez430-Chronos Uhr	59
5.8	Schaltbild des Modulentwurfs, CC430F6137	60
5.9	Modulplatine für CC430F6137 auf FR4-Substrat	61
5.10	Transmitter-Modul bq500110EVM-688	63
5.11	Receiver-Modul bq51013EVM-725	63
5.12	Receiver-Modul auf LTCC- Al_2O_3 -Keramik Substrat	66
5.13	LTC3108 Board von Ambient Sensors	68

Listings

6.1	main.c, Umgebung IAR Embedded Workbench for 8051	71
6.2	portingDefines.h, Umgebung IAR Embedded Workbench for 8051 .	72
6.3	SPI.c, Umgebung μ Vision4 Keil	75
6.4	dependencies.h, Umgebung μ Vision4 Keil	81
6.5	ADS1232.c, Umgebung Code Composer Studio v4	82

Tabellenverzeichnis

3.1	Richtwerte nach der ICNIRP[ICN98]	9
4.1	Messung 1; Sonox 502 Kapazitives Verhalten	20
4.2	Messung 2; Sonox 502 Statisches Verhalten	20
4.3	Messung 2; Statisches Verhalten, stabilerer Schraubstock	22
4.4	Messung 3; mit 100k Ω Parallelwiderstand	25
4.5	Messung 4; ohne Parallelwiderstand	25
4.6	Messung 5; 1kHz Messfrequenz	27
4.7	Messung 6; Piezostack; Einführende Messung	30
4.8	Messung 7; ohne Setz-Zeit; Kapazität	32
4.9	Messung 8; ohne Setz-Zeit; Parallelwiderstand	34
4.10	Messung 9; 2 Minuten Setz-Zeit; Piezostack; Kapazität	36
4.11	Messung 10; 2 Minuten Setz-Zeit; Piezostack; Parallelwiderstand . .	37

Literaturverzeichnis

- [BAT13] *Charging Lithium-Ion Batteries - Battery University*. Cadex Electronics Incorporated,
http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries [Zugegriffen am: 28. 01. 2013].
- [CC113] *cc1101.pdf*. Texas Instruments Incorporated,
www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [CC413] *MSP430 16-Bit Ultra-Low Power MCUs - RF SoC Series - CC430F6137*. Texas Instruments Incorporated,
[http://www.ti.com/product/cc430f6137:Software/CC430F613x_C_Examples_\(IAR_and_CCS\)__\(Rev._C\)](http://www.ti.com/product/cc430f6137:Software/CC430F613x_C_Examples_(IAR_and_CCS)__(Rev._C)) [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [CCD13] *Debugger and Programmer for RF-System-on-Chips - CC-Debugger*.
Texas Instruments Incorporated,
<http://www.ti.com/tool/cc-debugger> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [Dem11] K. Dembowksi. *Energy Harvesting für die Mikroelektronik*. VDE Verlag GmbH, Berlin, 1. edition, 2011.
- [DLR13a] *DLR -Institut für Robotik und Mechatronik - Motion Compensation in Minimally Invasive Heart Surgery*. DLR,
http://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabcid-3830/6256_read-9016/ [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [DLR13b] *Paralyzed individuals control robotic arms to reach and grasp using brain computer interface*. DLR,
<http://medicalxpress.com/news/2012-05-paralyzed-individuals-robotic-arms-grasp.html> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].

- [eGCK12] Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG. *WE-WPCC Wireless Power Charging Coil, 760308201*. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG, Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg, Germany,
<http://katalog.we-online.de/pbs/datasheet/760308201.pdf> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013] 2012.
- [ENE13] *Qi Inductive Wireless Charging Energizer*. Texas Instruments Incorporated,
<http://www.energizer.com/portable-power/wireless-chargers/qi-wireless/Pages/default.aspx> [Zugegriffen am: 27. 01. 2013].
- [ES12] B. Zagar E. Schrüfer, L. Reindl. *Elektrische Messtechnik*. Hanser Verlag, 10. edition, 2012.
- [EZ413] *EZ430-Chronos Texas Instruments Embedde Processors Wiki*. Texas Instruments Incorporated,
<http://processors.wiki.ti.com/index.php/EZ430-Chronos> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [GIT13] *Github Repository of wa7iut*. Robert Davidson,
<https://github.com/wa7iut> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [IAR13] *C/C++ Compiler 8051 - IAR Embedded Workbench for 8051*. IAR Systems,
<http://www.iar.com/en/Products/IAR-Embedded-Workbench/8051/> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [ICN98] *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields*. Number 4. Health Physics, 74 edition, April 1998.
- [Ins08] Texas Instruments. *ADS1232 24-Bit Analog-to-Digital Converter For Bridge Sensors*. Texas Instruments Incorporated, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265,
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1232.pdf> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013] 2008.

- [Ins12a] Texas Instruments. *BQ24100 SYNCHRONOUS SWITCHMODE, LI-ION AND LI-POLYMER CHARGE-MANAGEMENT IC WITH INTEGRATED POWER FETs*. Texas Instruments Incorporated, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265,
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24100.pdf> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013] 2012.
- [Ins12b] Texas Instruments. *BQ51013 INTEGRATED WIRELESS POWER SUPPLY RECEIVER, Qi (WIRELESS POWER CONSORTIUM) COMPLIANT*. Texas Instruments Incorporated, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265,
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq51013.pdf> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013] 2012.
- [Ins12c] Texas Instruments. *bq51013EVM-725 Evaluation Module*. Texas Instruments Incorporated, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265,
<http://www.ti.com/lit/ug/slvu447a/slvu447a.pdf> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013] 2012.
- [Ins12d] Texas Instruments. *CC541 2.4-GHz Bluetooth low energy and Proprietary System-on-Chip*. Texas Instruments Incorporated, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265,
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2541.pdf> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013] 2012.
- [Ins12e] Texas Instruments. *swru191c CC2540/41 System-on-Chip Solution for 2.4-GHz Bluetooth low energy Applications User's Guide*. Texas Instruments Incorporated, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265,
<http://www.ti.com/lit/ug/swru191c/swru191c.pdf> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013] 2012.
- [Job12] S. Jobstmann. *Auswertung der Messungen über Kapazitätsänderung von Piezoelementen in Abhängigkeit von eindimensionaler mechanischer Druckbelastung*. unpublished, 2012.

- [LTC10] LTC. *LTC3108 Ultralow voltage Step-Up Converter and Power Manager*. Linear Technology Corporation, 1630 McCarthy Blvd., Milpitas, CA 95035-7417,
<http://www.linear.com/product/LTC3108> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013] 2010.
- [LTC13] *LTC3108 - Ultralow voltage Step-Up Converter and Power Manager*. LTC,
<http://www.linear.com/product/LTC3108> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [MAS13] *Low Noise/EMI Piezo Buzzer Driver - Micro Analog Systems*. Micro Analog Systems,
<http://www.mas-oy.com/products/audio/mas6240/> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [MTK98] Johannes W. Steiner Manfred T. Kalivoda. *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik*. Springer Technik, 1998.
- [MUL13] *Software für den Schaltungsentwurf: NI Multisim*. National Instruments,
<http://www.ni.com/multisim/d/> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [NOK13] *Kabellose Nokia Tischladestation Bedienungsanleitung Nokia Deutschland*. Nokia GmbH,
<http://www.nokia.com/de-de/support/smartphones-und-handys/kabellose-tischladestation/anleitungen/> [Zugegriffen am: 27. 01. 2013].
- [SRI13] *SRI - Spezialist für Elektronikfertigung, Entwicklung und Lean Consulting*. SRI Radio Systems GmbH,
<http://www.sri.de/> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].

- [TES13] *Nikola Tesla Lebensdaten / Nikola Tesla - vergessenes Genie.* Thomas Gobmaier, Feldmochinger Str. 210 b D-80995 München,
<http://www.tesla-info.de/Lebenslauf.htm> [Zugegriffen am: 28. 01. 2013].
- [TIB13] *Battery Management Products - Battery Charger Solutions BQ24100.* Texas Instruments Incorporated,
<https://www.ti.com/product/bq24100> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [TIC13] *Personal Area Networks - Bluetooth Low Energy Technology - CC2541.* Texas Instruments Incorporated,
<http://www.ti.com/product/cc2541> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [TON13] *Uelzen: Explodiertes Notebook löst Feuerwehreinsatz aus.* T-Online,
http://computer.t-online.de/uelzen-explodiertes-Notebook-löst-feuerwehreinsatz-aus/id_42553726/index [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [TXL13] *TX-Line: Transmission Line Calculator AWR Corporation.* AWR Corporation,
<http://www.awrcorp.com/products/optional-products/tx-line-transmission-line-calculator> [Zugegriffen am: 26. 01. 2013].
- [WPC13] *Wireless Power Technology - Wireless Power Consortium.* Administration by IEEE-ISTO, Piscataway, NJ, United States,
<http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology> [Zugegriffen am: 28. 01. 2013].