

Christian Doppler
Forschungsgesellschaft



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Entwicklung einer miniaturisierten Sensoreinheit unter Verwendung thermoelektrischer Generatoren

Autor:

Alexander LIBISELLER
Matr.-Nr. 00927344

Unter der Anleitung von:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Ernst BAUER

Ausgeführt am

Institut für Festkörperphysik der Technische Universität Wien

im

Christian Doppler Labor für Thermoelektrizität

Wien, am 18. August 2017

(Unterschrift Verfasser)

(Unterschrift Betreuer)

Abstract

Thermoelectric energy harvesting is using a temperature gradient to produce a continuous flow of electric energy. A lot of technical processes produce waste heat. Thermoelectric energy conversion provides a mean to use this energy to power small electrical loads without the use of batteries or tethered energy sources. An electrochemical or electrostatic buffer storage enables such an energy harvesting module to temporarily produce a much higher power output than the one provided by the thermoelectric element.

In the course of this diploma thesis such a miniaturized, autonomous sensor unit, consisting of energy harvesting module and a measure and RF-module powered by the harvesting module, was developed. Because of the use of RF-technology, the unit is able to work without any tethering.

For this purpose an already existing concept, that was used in a preceding thesis [1], was used as a starting point. The measure and RF-module was designed from scratch whereas the energy harvesting module was revised and optimized in regard to its energy efficiency.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Energieverbrauch	2
3	Energy-Harvesting	4
3.1	Thermische Energie	4
3.1.1	Der Seebeck-Effekt	5
3.1.2	Thermoelektrische Generatoren	7
3.2	Mechanische Energie	7
3.2.1	Elektromagnetische Energiewandlung	9
3.2.2	Piezoelektrische Energiewandlung	10
3.3	Licht	10
4	Sensoreinheit	13
5	Energy-Harvesting-Modul	14
5.1	Auswahl des Regelchips	14
5.2	Funktionsweise des Regelchips BQ25570	15
5.3	Leistungsanpassung	17
5.4	Speicherelement	19
5.4.1	Superkondensatoren	21
5.5	Der thermoelektrische Generator	21
5.6	Effizienz des Energy-Harvesting-Moduls	22
5.7	Design des Energy-Harvesting-Moduls	26
5.8	Aufbau des Energy-Harvesting-Moduls	26
6	Mess- und Sendemodul	28
6.1	Überlegungen zum Aufbau des Moduls	28
6.2	Übertragungsprotokolle	28
6.2.1	Zusammenfassung von „Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee, and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario“ [14]	29
6.2.2	Sensorsteuerung	30
6.2.3	I ² C-Schnittstelle	31
6.3	Mikrocontroller für das Mess- und Sendemodul	33
6.4	Software	35
6.5	Design des Mess- und Sendemoduls	38
6.5.1	Antennendesign	38
6.6	Aufbau des Mess- und Sendemoduls	39
6.7	Energieverbrauch	40

7	Aufbau der Module	42
8	Fazit und Ausblick	43
	Abkürzungen	44
Anhang A	Schaltpläne, Board-Layouts und Bestückungslisten	47
A.1	Schaltplan des Energy-Harvesting-Moduls	47
A.2	Board-Layout des Energy-Harvesting-Moduls - top	48
A.3	Board-Layout des Energy-Harvesting-Moduls - bottom	49
A.4	Dimensionen des Energy-Harvesting-Moduls in mm	50
A.5	Bestückungsliste des Energy-Harvesting-Boards	51
A.6	Schaltplan des Mess- und Sendemoduls	52
A.7	Board-Layout des Mess- und Sendemoduls - top	53
A.8	Board-Layout des Mess- und Sendemoduls - bottom	54
A.9	Dimensionen des Mess- und Sendemoduls in mm	55
A.10	Bestückungsliste des Mess- und Sendemoduls	56

1 Einleitung

Beim thermoelektrischen Energy-Harvesting wird ein Temperaturgradient genutzt, um kontinuierlich elektrische Energie zu erzeugen. Da bei vielen technischen Anwendungen Abwärme anfällt, bietet diese Art der Energiegewinnung die Möglichkeit, kleinere Verbraucher, wie Mess- oder Regelsysteme ohne den Einsatz von Batterien oder kabelgebundene Energieversorgung zu betreiben. Durch die Verwendung eines elektrochemischen oder elektrostatischen Zwischenspeichers kann die Ausgangsleistung eines Energy-Harvesting-Systems die kontinuierlich erzeugte Leistung deutlich übersteigen. Somit können Verbraucher mit relativ hoher Leistungsaufnahme, periodisch betrieben werden.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines autonomen Sensorsystems, bestehend aus einem Energy-Harvesting-Modul und einem Mess- und Sendemodul, welches mit der erzeugten elektrischen Energie betrieben wird. Durch den Einsatz von Funktechnologie arbeiten Harvesting- und Messeinheit ohne Verkabelung - weder für die Energieversorgung noch zur Datenübermittlung.

Ein bestehendes Konzept einer vorhergehenden Diplomarbeit [1] wurde als Ausgangspunkt verwendet. Die Mess- und Sendeeinheit wurde vollkommen neu designt, während das Energy-Harvesting-Modul überarbeitet und bezüglich seiner Effizienz verbessert wurde.

2 Energieverbrauch

Neben der in Abschnitt 1 erwähnten Einsatzmöglichkeit von Energy-Harvesting-Systemen, bietet Energy-Harvesting viel allgemeiner die Möglichkeit, potentiell ungenutzte Energie für bestimmte Anwendungen nutzbar zu machen. Um dieses Potential beurteilen zu können, macht es Sinn, die globale Energiesituation und ihre Folgen auf unser Leben und unsere Umwelt zu betrachten. Energie ist eine der maßgeblichen Ressourcen für unser Leben. Unsere heutige Gesellschaft ist ohne eine sichere, zuverlässige und leistbare Energieversorgung nicht vorstellbar. In Abbildung 1 ist die Entwicklung der globalen Energieproduktion von 1971 bis 2014 dokumentiert. Ein Ausblick auf die Energieproduktion der kommenden Jahre (Abbildung 2) zeigt, dass künftig mehr Energie benötigt werden wird.

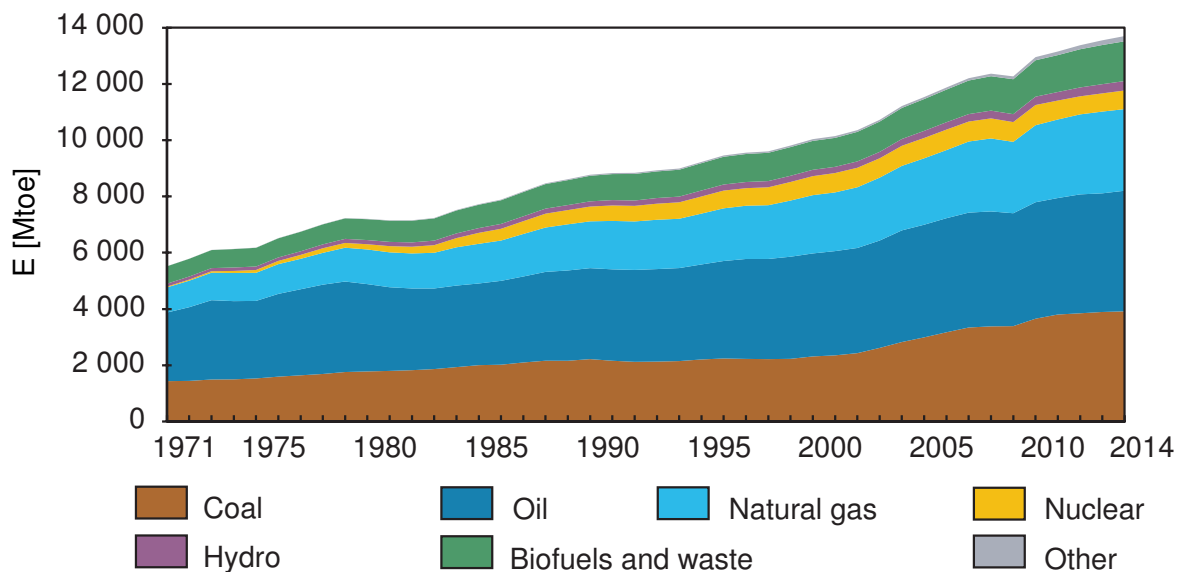


Abbildung 1: Gesamte weltweite Energieproduktion nach Energieträger in Mtoe [2]

Durch die großen Mengen an benötigter Energie stellt sich die Frage der ökologischen Verträglichkeit. Der Großteil unserer Energie wird derzeit aus fossilen Energieträgern gewonnen und der unvermeidbare Wechsel auf erneuerbare Energieträger schreitet nur langsam voran. Der damit in Zusammenhang gebrachte, vom Menschen verursachte Klimawandel, stellt eine ernstzunehmende Bedrohung für viel Regionen der Erde und einen großen Teil unserer Bevölkerung dar.

Neben den potentiellen politischen Konflikten auf Grund von Wasserknappheit in manchen Regionen und den Verlust von Lebensraum durch den prognostizierten Anstieg des Meeresspiegels, wurden allein die volkswirtschaftlichen Schäden der Klimaerwärmung vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung bis zum Jahr 2050 auf bis zu 200 Billionen US-Dollar geschätzt [3]. Die langfristigen Schäden an der Umwelt sind kaum zu beziffern. All diese möglichen Folgen stellen eine große Motivation dar, die Energieproduktion auf erneuerbare Energieträger umzustellen und den Emissionsausstoß zu redu-

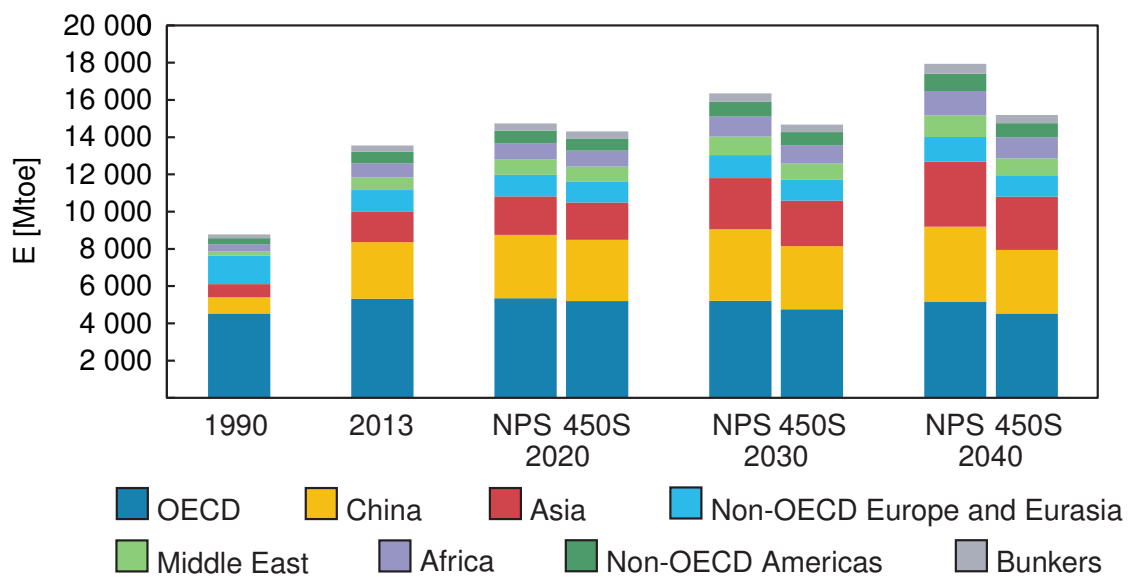


Abbildung 2: Prognose der globalen Energieproduktion (in Mtoe) nach Regionen [2]
 NPS: New Policies Scenario basierend auf angedachten Maßnahmen
 450S: 450 Scenario basierend auf Maßnahmen, welche die durchschnittliche Klimaerwärmung auf 2 °C limitieren sollen

zieren, um die Klimaerwärmung und ihre Folgen möglichst gering zu halten. Neben der Umstellung der Energieerzeugung, ist eine Reduktion des Energiebedarfs durch eine möglichst große Effizienzsteigerung der Energieverbraucher sinnvoll und notwendig. Energy-Harvesting stellt eine Möglichkeit dar, dies zu unterstützen. Als Beispiel können Automobile mit Verbrennungsmotor dienen. Diese benötigen elektrische Energie um die Bordelektronik zu betreiben und erzeugen große Mengen an ungenutzter Abwärme. Bisher wird die mechanische Energie des Motors über einen Generator¹ in elektrische Energie umgewandelt, was zu einem höheren Treibstoffverbrauch führt. Durch den Einsatz von Energy-Harvesting, könnte dieser Generator kleiner dimensioniert werden, was die allgemeine Effizienz des Fahrzeuges verbessert. Auch wenn diese Effizienzsteigerungen relativ gering sind, könnte der flächendeckende Einsatz von Energy-Harvesting-Lösungen einen Beitrag zur Emissionsreduktion liefern. Bei all den obigen Überlegungen muss erwähnt werden, dass Energy-Harvesting derzeit nur relativ geringe Mengen an Verlustenergie in nutzbare elektrische Energie umwandeln kann. Das Potential von Energy-Harvesting zur Senkung des globalen Energieverbrauchs ist entsprechend eher gering. Neue Technologien und die vielen Einsatzmöglichkeiten machen Energy-Harvesting, in dieser Hinsicht, dennoch interessant.

¹Auch Lichtmaschine genannt.

3 Energy-Harvesting

Bei den meisten technischen Vorgängen gibt es unvermeidbare Energieverluste. Energie wird dabei in Form von Licht und anderer elektromagnetischer Strahlung, Wärme, kinetischer Energie, Druck oder Strömungen, ungenutzt an die Umwelt abgegeben. Das Ziel von Energy-Harvesting ist diese Verluste zu verwenden, um relativ kleine Mengen an elektrischer Energie zu gewinnen. Dies kann für eine Effizienzsteigerung des Verlustenergie erzeugenden Systems genutzt werden oder der Energieversorgung von anderen Systemen dienen. Bei letzterem kann Energy-Harvesting Batterien und Akkumulatoren ersetzen, welche produziert, regelmäßig geladen oder getauscht und letztendlich entsorgt werden müssen. Dadurch reduziert sich der notwendige Wartungsaufwand und der Ressourcenverbrauch, je nach Art des Energy-Harvesting-Systems.

Die heutige Hightechindustrie setzt immer mehr Sensoren bei der Entwicklung und Fertigung von Produkten ein. Bei vielen Arbeitsschritten müssen physikalische Größen wie beispielsweise Temperatur, Beschleunigung und Luftdruck ständig an verschiedenen Raumpunkten gemessen und überwacht werden. Dies führt zu einer großen Anzahl von Sensoren und einem entsprechend großen Verkabelungsaufwand. Durch den Einsatz von batteriebetriebenen Sensorsystemen mit Funktechnologie, kann dieser Aufwand reduziert werden, bringt jedoch die oben genannten Nachteile mit sich. Durch die Nutzung von Systemen, welche durch Energy-Harvesting betrieben werden, können Messsysteme energieautark und wartungsarm agieren – eine passende Quelle von nutzbarer Verlustenergie vorausgesetzt.

Neben der Industrie finden sich auch in immer mehr Alltagsgegenständen Sensoren, Mikroprozessoren und RF-Einheiten, welche mit Energie versorgt werden müssen. Die Entwicklung hin zum Smart-Home hat die Zahl der Sensoren in unserem Zuhause stark anwachsen lassen und Energy-Harvesting kann auch für diesen Bereich interessant sein. Um ein Beispiel zu nennen, sei ein Patent [4] auf einen Schuh mit integriertem Schrittzähler genannt, welcher die Bewegungsenergie seiner Trägerin/seines Trägers, durch ein piezoelektrisches Element nutzt. Diese Art der Energiewandlung wird genauer in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt.

Im Folgenden werden die verschiedenen Arten des Energy-Harvesting, kategorisiert nach der Form der Verlustenergie, vorgestellt – ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Abbildung 3 zeigt die verschiedenen Arten von Energie und benennt die zugehörigen Umwandlungsmechanismen.

3.1 Thermische Energie

Thermische Energie oder Wärme tritt bei nahezu jedem technischen Prozess auf und hat daher beim Energy-Harvesting große Bedeutung. Laut einem Dokument des US Department of Energy [6] werden zwischen 20 % und 50 % der verbrauchten Energie der US-amerikanischen Industrie, in Form von Abwärme, ungenutzt an die Umwelt abgegeben. Ein Ziel der Forschung und Entwicklung ist es, diese Verlustwärme zu nutzen und somit

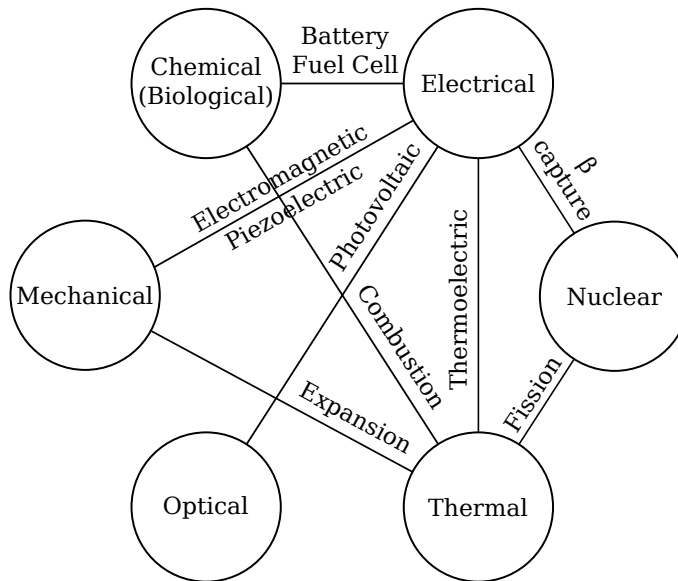


Abbildung 3: Verschiedene Energieformen und Umwandlungsmechanismen. [5]

die Effizienz der Energienutzung zu erhöhen. Als Beispiel sind Motoren zu nennen und dabei insbesondere Verbrennungsmotoren, die trotz relativ hoher Wirkungsgrade sehr große Mengen an Wärme als Verlustenergie erzeugen.

3.1.1 Der Seebeck-Effekt

Der direkte Weg thermische Energie in elektrische Energie umzuwandeln, wird thermoelektrische Energiewandlung genannt. Der zugehörige physikalische Effekt, ist der Seebeck-Effekt. Ein einfacher Schaltkreis (Abbildung 4), bei dem der Seebeck-Effekt beobachtet werden kann, besteht aus zwei elektrische Leiter (A und B) aus unterschiedlichen Materialien, die in Serie nach dem Schema ABA geschaltet werden. Durch eine Temperaturdifferenz an den Kontaktstellen der Leiter, stellt sich eine elektrische Spannung U_T ein, welche ebendieser Temperaturdifferenz und der Differenz der Seebeck-Koeffizienten der Materialien proportional ist. Der Seebeck-Effekt ist auch bei Betrachtung von nur einem Material vorhanden, für Messzwecke benötigt man jedoch zwei unterschiedliche Leiter. Allgemein gilt die Formel

$$U_T = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT, \quad (1)$$

welche sich für kleine Temperaturdifferenzen oder konstante Seebeck-Koeffizienten zu

$$U_T = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

vereinfacht.

Der Seebeck-Effekt basiert auf zwei verschiedenen Mechanismen: Der Diffusion der Ladungsträger und ihrer energieabhängigen Streuung im Festkörper. Wenn ein Festkörper

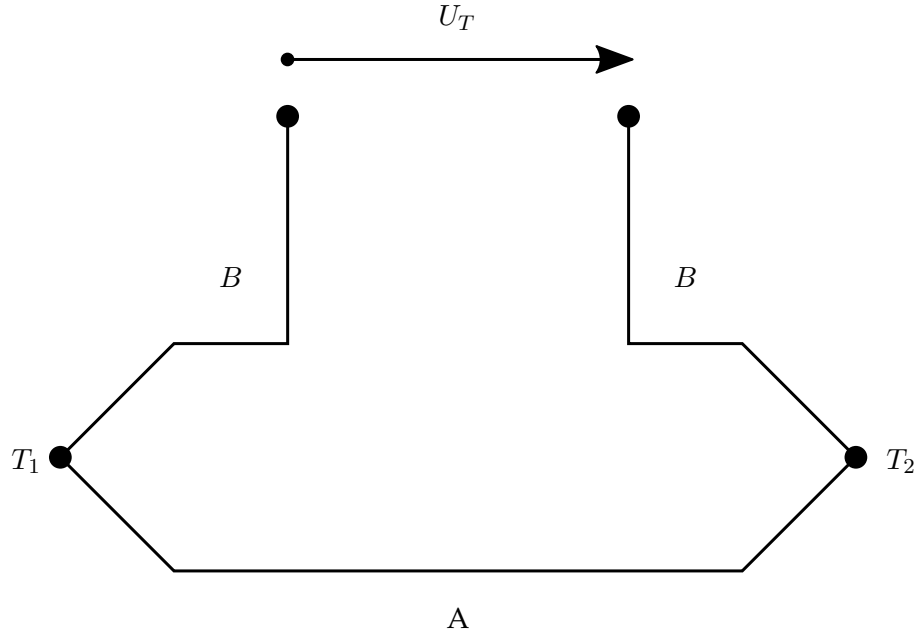


Abbildung 4: Seebeck-Effekt-Schaltkreis

eine Temperaturdifferenz an seinen Enden aufweist, diffundieren die heißen Ladungsträger zum kalten Ende, da die Dichte der heißen Ladungsträger dort geringer ist und umgekehrt. Bei einer konstanten Temperaturdifferenz und Vernachlässigung des zweiten Effekts, stellen sich im thermischen Gleichgewicht zwei gleich große entgegengesetzte Ströme von Ladungsträgern ein, da die Diffusionsraten gleich sind. Die Streuung der Ladungsträger an Streuzentren, wie Störstellen, Unreinheiten und Phononen, ist jedoch von der Energie der Ladungsträger abhängig. Daher werden warme und kalte Ladungsträger unterschiedlich stark gestreut. Es bildet sich ein Nettostrom an Ladungsträgern und damit Bereiche unterschiedlicher Ladungsträgerdichten. Entsprechend bildet sich ein elektrisches Feld, welches eine elektrostatische Spannung an den Enden des Festkörpers bedingt. Diese Spannung wird als Seebeck- oder Thermospannung bezeichnet. Der Seebeck-Effekt ist somit ein Beispiel für eine elektromotorische Kraft E_{EMF} . Die lokale Stromdichte J setzt sich damit wie folgt zusammen:

$$J = \sigma(-\nabla V + E_{EMF}) \quad (3)$$

mit

$$E_{EMF} = -S \cdot \nabla T \quad (4)$$

Dabei ist σ die elektrische Leitfähigkeit des Materials und V das elektrische Potential. Dieser Zusammenhang ist eine Erweiterung des ohmschen Gesetzes um eine elektromotorische Kraft. Da die Stromdichte im thermischen Gleichgewicht Null sein muss, ergibt sich der Zusammenhang aus Gleichung 1.

Der Seebeck-Koeffizient hängt von der treibenden Kraft durch die Diffusion und der hin-

dernden Kraft durch die Streuung der Ladungsträger ab. Die Diffusionsrate wird von der Beweglichkeit und Zustandsdichte der Ladungsträger beeinflusst und steigt gewöhnlich mit der Temperatur. Da bei der Streuung verschiedene Prozesse in Abhängigkeit der Temperatur auftreten, ist der Zusammenhang zwischen Streuung und Temperatur nicht trivial und bei verschiedenen Materialien höchst unterschiedlich. Der Seebeck-Effekt hängt entsprechend in hohem Maße von Unreinheiten, Fehlern in der Kristallstruktur und anderen Faktoren, die sich mit der Temperatur und der elektrischen Feldstärke ändern, ab.

3.1.2 Thermoelektrische Generatoren

Ein thermoelektrischer Generator (kurz TEG) besteht aus einer Serienschaltung von thermoelektrischen Materialien mit unterschiedlichen Seebeck-Koeffizienten. Die erzeugte Spannung hängt von der Temperaturdifferenz, den verwendeten Materialien und der Zahl n , der in Serie geschalteten Elemente ab. Meist werden p- und n-dotierte Halbleiter verwendet, da diese je nach Dotierung im Vorzeichen unterschiedliche Seebeck-Koeffizienten aufweisen. Dieser Umstand ergibt sich daraus, dass die Majoritätsladungsträger im Falle eines n-dotierten Halbleiters Elektronen, bei p-Dotierung jedoch Löcher oder Defektelektronen mit positiver Ladung sind. Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau eines thermoelektrischen Generators. Die Serienschaltung der thermoelektrischen Elemente vergrößert sowohl die Ausgangsspannung, als auch den Innenwiderstand des TEGs. Aus diesem Grund sind sinnvoll erreichbaren Ausgangsspannungen Grenzen gesetzt.

Um die maximale Leistung von einem TEG zu erhalten, muss der angeschlossene Verbraucher eine Leistungsanpassung vornehmen. Eine Regelelektronik misst die Leerlaufspannung des TEGs in regelmäßigen Abständen und regelt den Lastwiderstand entsprechend. Der bei dieser Diplomarbeit verwendete Regelchip BQ25570 von Texas Instruments, stellt die Spannung auf 50 % der Leerlaufspannung des TEG ein, was einer Anpassung des Lastwiderstandes an den Wert des Innenwiderstandes des TEGs entspricht. Mehr dazu in Abschnitt 5.

Auf Grund der Wärmeleitfähigkeit des TEGs ist bei einer Energy-Harvesting-Anwendung eine Wärmezufuhr an der heißen Seite und eine Wärmeabfuhr auf der kalten Seite – zum Beispiel durch einen Kühlkörper – notwendig. Die beiden Seiten des TEGs werden meist mit einer keramischen Schicht abgeschlossen, da Keramiken im Allgemeinen sehr gute elektrische Isolatoren mit guter Wärmeleitfähigkeit sind. Der TEG, welcher beim konstruierten Energy-Harvesting-Modul zum Einsatz kommt, ist in Abbildung 6 dargestellt.

3.2 Mechanische Energie

Mechanische Energie kommt in unserer Umgebung beinahe überall vor. Sich bewegende Objekte, Fluidströmungen und Vibrationen sind dabei ihre häufigsten Erscheinungsfor-

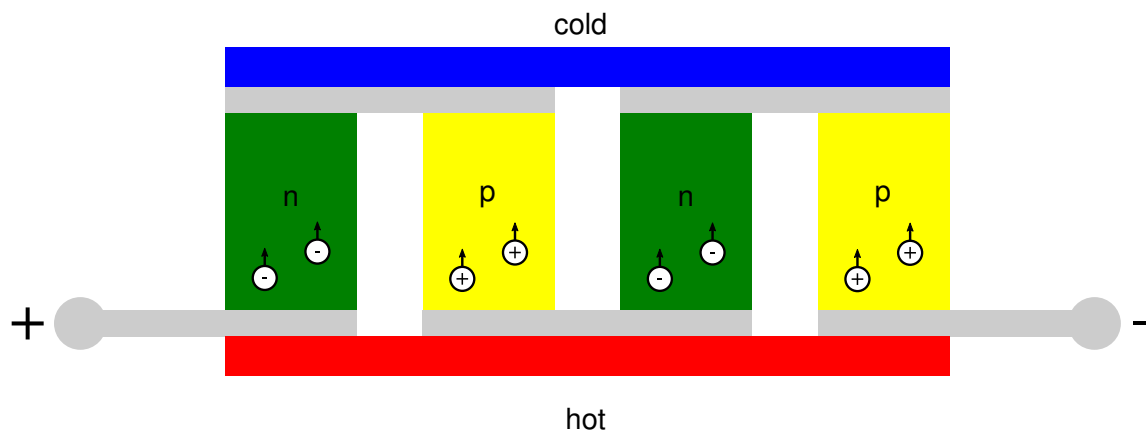
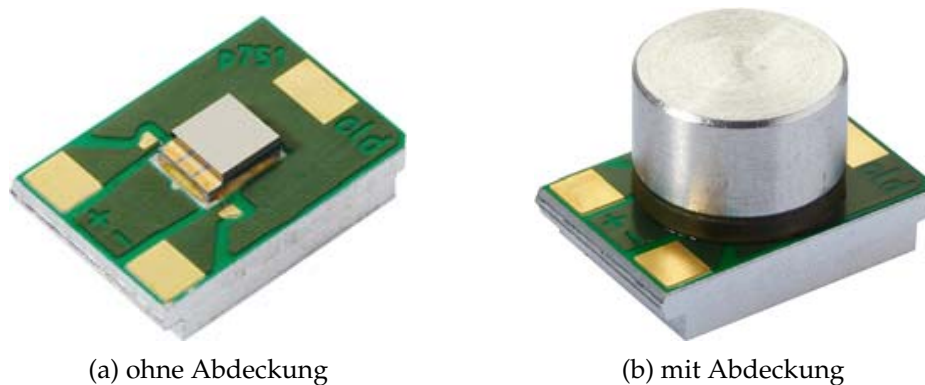


Abbildung 5: Aufbau eines TEG

Die unterschiedlich dotierten Halbleitermaterialien, hier mit n und p bezeichnet, sind das zentrale Element des TEG. Durch die Dotierung gibt es bei den beiden Thermoelektrika unterschiedliche Vorzeichen bei den Ladungsträgern. Durch das Prinzip, welches unter Punkt 3.1.1 beschrieben ist, ergibt sich, bei richtiger Wahl der Halbleiter ein Netto-Ladungsträgerstrom, von der heißen zur kalten Seite des TEG und damit eine elektrische Spannung mit jeweils unterschiedlicher Polarität. Defektelektronen oder Löcher, die in eine Richtung fließen, erzeugen einen äquivalenten Effekt, wie Elektronen, welche in die entgegengesetzte Richtung fließen.



(a) ohne Abdeckung

(b) mit Abdeckung

Abbildung 6: Thermoelektrisches Generator-Package TGP-651 [7]
(Maße mit Abdeckung: 15,0 x 10,0 x 9,3 mm)

men. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, kann mechanische Energie elektromagnetisch oder piezoelektrisch in elektrische Energie umgewandelt werden. Eine untergeordnete Rolle spielt die ebenfalls mögliche elektrostatische Umwandlung, bei der durch mechanische Energie, wie zum Beispiel Reibung, eine Ladungstrennung erreicht wird. Die größte Beachtung beim Energy-Harvesting findet derzeit die Energiewandlung durch piezoelektrische Materialien.

Es sei angemerkt, dass mechanische Energie in Wind- und Wasserkraftwerken auch großtechnisch in elektrische Energie umgewandelt wird. Für das Energy-Harvesting ist jedoch die Umwandlung von relativ kleinen Energiemengen interessant.

3.2.1 Elektromagnetische Energiewandlung

Bei der elektromagnetischen Energiewandlung wird nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion durch eine lineare oder rotatorische Bewegung eine elektrische Spannung induziert. Ein einfaches Beispiel ist ein Dynamo oder ein Permanentmagnet, welcher linear durch eine Spule bewegt wird. Letzteres Prinzip wird beispielsweise in manchen Taschenlampen eingesetzt (Abbildung 7). Eine weitere Möglichkeit diese Art der Energiewandlung zu nutzen, ist die Integration von Energy-Harvesting-Modulen in den Boden, welche beim darüber Gehen elektrische Energie erzeugen. Abbildung 8 zeigt ein solches Element der Firma Pavegen Systems am Flughafen Heathrow in Großbritannien. Die Bewegungsenergie wird in eine Rotation umgewandelt, die einen Generator betreibt. Laut einem Patent der Firma Pavegen Systems [8], ist bei diesen Modulen auch eine Energiegewinnung mittels des piezoelektrischen Effekts (siehe Abschnitt 3.2.2) in der Zukunft angedacht.



Abbildung 7: Taschenlampe mit elektromagnetischer Energiewandlung [9]



Abbildung 8: Elemente zur Energiegewinnung aus Schritten [10]

3.2.2 Piezoelektrische Energiewandlung

Der piezoelektrische Effekt beschreibt die Verschiebung der Ladungsschwerpunkte in einem dielektrischen Festkörper durch eine mechanische Verformung, bei der eine elektrische Polarisation entsteht. Umgekehrt verformen sich Piezoelektrika bei anlegen einer elektrischen Spannung - dies wird als inverser Piezoeffekt bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen mechanischer Spannung T und Polarisation P_{pz} über die piezoelektrischen Verzerrungskoeffizienten d lautet

$$P_{pz} = d \cdot T \quad (5)$$

mit

$$d_{ij,k} = \frac{\partial S_{ij}}{\partial E_k}, \quad (6)$$

wobei S die dimensionslose Verformung ist. Der piezoelektrische Verzerrungskoeffizient besitzt zwei Indizes, da eine Verformung in eine der Raumrichtungen jeweils eine Polarisation in x-, y- und/oder z-Richtung hervorrufen kann.

Dieser Zusammenhang kann genutzt werden um aus einer mechanischen Spannung direkt elektrische Energie zu gewinnen. Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig, da neben einzelnen Ereignissen, die eine Kraft auf ein Energy-Harvesting-Modul ausüben, auch Vibrationen zur Energiegewinnung genutzt werden können. Einzelne Ereignisse können zum Beispiel Menschen, Fahrzeuge oder Bauteile sein, welche ein Modul überqueren. Vibrationen auf der anderen Seite treten unter anderem in Fahrzeugen, in der Nähe von Maschinen oder allgemein fast überall dort auf, wo eine Energieform kontinuierlich in mechanische Energie umgewandelt wird. Ein Beispiel für einen piezoelektrischen Energy-Harvester der Vibrationen nutzt ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Firma Mide Technology, welche dieses Element herstellt, gibt als mögliches Einsatzgebiet den Eisenbahnverkehr an, bei dem das Modul kabellose Sensoren und/oder Funkmodule betreibt. Auch Strömungen können flexible Strukturen in Schwingung versetzen und stellen neben der klassischen Nutzung von durch Strömung verursachter Rotation – wie zum Beispiel bei einem Windrad – eine Möglichkeit zur Energiegewinnung dar.

3.3 Licht

Die Nutzung von sichtbarem Licht zum Zweck des Energy-Harvesting, ist bereits weit verbreitet. Produkte, die Photovoltaik im kleinen Maßstab nutzen, sind unter anderem Uhren, Taschenrechner, Computertastaturen, Fernbedienungen, Beleuchtungsmodule, Parkscheinautomaten und vieles mehr. In den meisten dieser Produkte wird eine Solarzelle mit einer aufladbaren Batterie kombiniert, um einen zeitweisen Betrieb ohne Licht einstrahlung zu gewährleisten. Die große Auswahl und Verfügbarkeit an Photovoltaik-Modulen, in Hinsicht auf Größe und Leistungsfähigkeit, ermöglicht eine kostengünstige Herstellung von Produkten mit Energy-Harvesting-Lösungen. Hinzu kommt, dass Photovoltaik, je nach eingesetzter Technologie, für elektronische Geräte sinnvolle elektri-

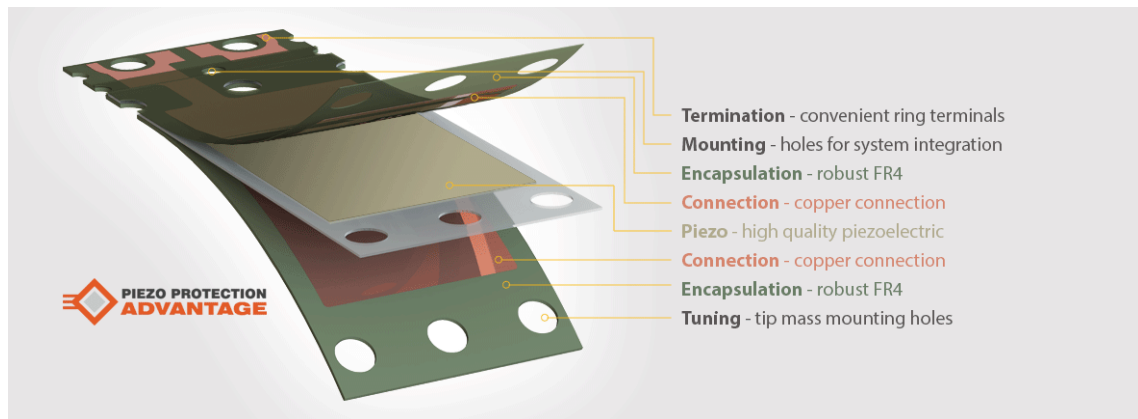


Abbildung 9: Piezoelektrisches Energy-Harvesting Modul zur Nutzung von Vibrationsenergie [11]

sche Spannungen liefert und somit keine umständliche Spannungswandlung notwendig macht. Es sei noch angemerkt, dass Licht in der Regel nicht als Verlustenergie entsteht und somit meist das Sonnen- oder Umgebungslicht zum Zweck des Energy-Harvesting genutzt wird.

Die photovoltaische Energiewandlung wird von elektrischen Bauelementen – den photovoltaischen Zellen oder kurz Solarzellen – durchgeführt. Solarzellen aus Halbleitermaterialien funktionieren wie Photodioden mit einer großen Oberfläche. Eintreffende Photonen erzeugen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Elektronen-Loch-Paare im Halbleiter. Das nun freie Elektron wird durch die Energie in das Leitungsband gehoben, während das Loch im Valenzband verbleibt. Damit ein elektrischer Strom entstehen kann, müssen die negativ geladenen Elektronen und die positiv geladenen Löcher voneinander räumlich getrennt werden. Andernfalls würden die Elektronen mit den Löchern wieder rekombinieren. Bei Halbleiter-Solarzellen geschieht dies in der Regel durch einen p-n-Übergang, dessen Raumladungszone die unterschiedlichen Ladungsträger in unterschiedliche Richtungen beschleunigt. Bei organischen Solarzellen, gibt es andere Effekte, die für die Paar-Bildung und Ladungstrennung verantwortlich sind, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Eines der wichtigsten Charakterisierungsmerkmale einer Solarzelle ist ihre Strom-Spannungs-Kennlinie. Eine solche Kennlinie, mit der Kennzeichnung der relevanten Punkte, ist qualitativ in Abbildung 10 dargestellt. Wie eine Diode, verfügt auch eine Solarzelle über eine stark nicht-lineare Kennlinie. Wird die Zelle beleuchtet, verschiebt sich die Kennlinie im Vergleich zur nicht-beleuchteten Zelle, entlang der y-Achse. Die erzeugte Leistung ist dann die positive Fläche eines Rechtecks, welches von einem Punkt auf der Kennlinie zu den Achsen aufgespannt wird. Aus dieser Tatsache lässt sich der Punkt der maximalen Leistung bestimmen. Dieser Punkt stellt den optimalen Betriebspunkt einer Solarzelle dar und liegt bei typischen Solarzellen in etwa bei einer Spannung, die 80 % der Leerlaufspannung entspricht. Eine entsprechende Leistungsanpassung muss

bei der Verwendung von Solarzellen also vorgenommen werden, will man die maximale Leistung entnehmen.

Abgesehen von der Photovoltaik sei auch der pyroelektrische Effekt genannt. Dabei führt eine zeitliche Temperaturänderung in bestimmten piezoelektrischen Kristallen zu einer Ladungstrennung. Dieser Effekt kann für das Energy-Harvesting genutzt werden, findet aber derzeit vor allem in der Sensorik Anwendung.

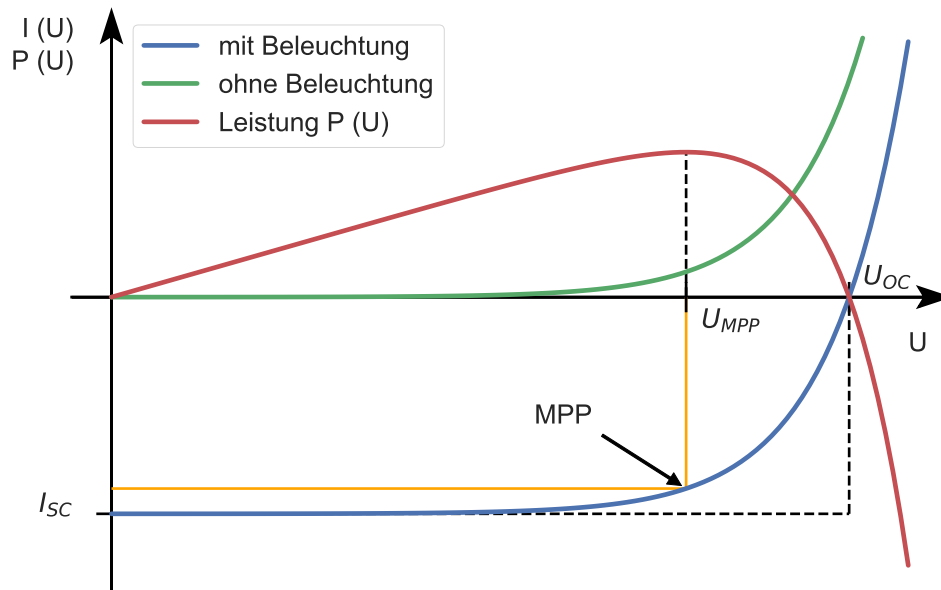


Abbildung 10: Qualitative Kennlinie einer Solarzelle im beleuchteten und nicht beleuchteten Zustand, sowie die erzeugte Leistung. Eingezeichnet ist der Kurzschlussstrom I_{SC} , die Leerlaufspannung U_{OC} , sowie der Punkt maximaler Leistung MPP und die zugehörige Spannung U_{MPP} .

4 Sensoreinheit

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelte Sensoreinheit hat die Aufgabe, Abwärme zu nutzen, um elektrische Energie zu erzeugen. Diese Energie wird genutzt um physikalische Größen zu messen und per Funktechnologie an einen entfernten Empfänger zu übertragen. Zur Energiewandlung wird ein thermoelektrischer Generator verwendet. Dieses Konzept wurde bereits bei einer vorhergehenden Diplomarbeit [1] teilweise umgesetzt und ist auch in Form eines kommerziellen Produkts der Firma Micropelt erhältlich.

Die konstruierte Sensoreinheit ist modular aufgebaut und besteht aus zwei verschiedenen Modulen. Das Mess- und Sendemodul (kurz M-RF-Modul; siehe Abschnitt 6) wird vom Energy-Harvesting-Modul (siehe Abschnitt 5) mit Energie versorgt. Das M-RF-Modul selbst verfügt über keinerlei Sensoren, wohl aber über passende Anschlussmöglichkeiten. Das Modul übernimmt die Ansteuerung und Auswertung der angeschlossenen Sensoren. Der modulare Aufbau erlaubt die separate Entwicklung und Evaluation der beiden Module. Die Verbindung wird über einen Zehn-Pin-Anschluss hergestellt. Die gesamte Sensoreinheit (ohne Sensoren) ist in Abbildung 11 dargestellt.

Die Sensoreinheit wird im Betrieb mittels eines starken Permanentmagneten, welcher an die Unterseite des Harvesting-Moduls geklebt wird, an einer heißen ferromagnetischen Fläche befestigt, sodass der TEG mit dieser im thermischen Kontakt ist. Durch die Wärmeleitung des TEGs, muss seiner anderen Seite ein Kühlkörper befestigt werden, um Wärme an die Umgebungsluft abzugeben, damit bei Erreichen des thermischen Gleichgewichts ein möglichst großer Temperaturgradient auftritt. Als Abstandhalter zwischen heißer Oberfläche und dem Sensormodul dienen Holz- oder Kunststoffscheiben mit möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit.

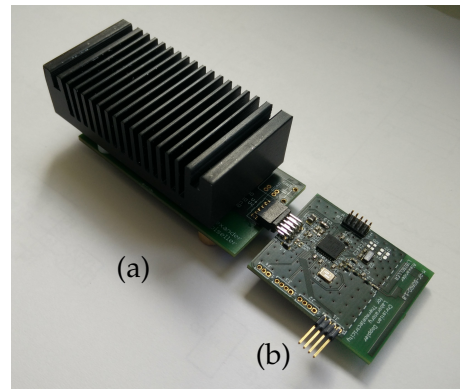


Abbildung 11: Sensoreinheit bestehend aus Energy-Harvesting-Modul (a) und Mess- und Sendemodul (b)

5 Energy-Harvesting-Modul

Um einen TEG für den Zweck des Energy-Harvesting nutzbar zu machen, ist im Allgemeinen eine Regelelektronik erforderlich. Um die Energieausbeute zu optimieren, sollte diese Elektronik eine Leistungsanpassung durchführen, indem sie die Ausgangsspannung des TEGs durch eine Widerstandsanpassung regelt. Eine effiziente Möglichkeit dies zu erreichen, ist das Maximum-Power-Point-Tracking oder MPPT. Mehr dazu in Abschnitt 5.3. Weiters erzeugen thermoelektrische Generatoren, welche geringe Temperaturdifferenzen nutzen, auf Grund des Zusammenhangs in Formel 1 eine entsprechend geringe Thermospannung, typischerweise unter 1 Volt. Da die notwendige Versorgungsspannung vieler elektronischer Verbraucher im Bereich einiger Volt liegt, muss die Ausgangsspannung des TEGs durch einen DC-DC-Wandler angepasst werden. Falls die Energie zwischengespeichert werden soll, beispielsweise um einen Verbraucher mit variabler Leistung, welche die Ausgangsleistung des TEG zeitweise übersteigt, versorgen zu können, ist ein weiteres Spannungsniveau und die entsprechende Ladesteuerung erforderlich. Am Markt sind verschiedene ICs erhältlich, welche zumindest einen Großteil der genannten Aufgaben erfüllen können.

5.1 Auswahl des Regelchips

Da die Steuerung des Harvesting-Moduls durch einen einzelnen IC und relativ wenigen passiven Bauteilen realisiert werden kann, wurde von der Entwicklung einer eigenen Regellogik abgesehen. Bei der Auswahl des ICs wurden vier verschiedene Chips miteinander verglichen. Siehe Tabelle 1. Der MAX17710 stellte sich auf Grund der minimalen Eingangsspannung von 750 mV als ungeeignet heraus. Viele TEGs liefern, vor allem bei geringen Temperaturgradienten kleinere Spannungen. Der größte Unterschied der restlichen drei Module zeigt sich in der Ausführung der Spannungswandlung vom Speicher zum Ausgangsniveau. Während der SPV1050 auf einen Low-Drop-Spannungsregler (LDO) setzt, besitzt der BQ25570 einen Schalt-Regler mit einer deutlich höheren Effizienz. Der BQ25504 besitzt im Gegensatz dazu keinen integrierten Abwärtswandler und benötigt entsprechend ein weiteres Bauelement, welches die Spannungsreduktion übernimmt.

Bei LDO-Reglern sinkt die Effizienz, je größer der Abfall im Spannungsniveau sein soll. Die Verlustleistung ist dabei

$$P_D = (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot I_{OUT} \quad (7)$$

und wird in Form von Wärme dissipiert. Die Effizienz ergibt sich entsprechend zu

$$Effizienz = \frac{I_{OUT} \cdot U_{OUT}}{(I_{OUT} + I_q) \cdot U_{IN}}, \quad (8)$$

	MAX17710	SPV1050	BQ25504	BQ25570
Hersteller	Maxim Integrated	STMicroelectronics	Texas Instruments	Texas Instruments
U_{IN_MIN}	750 mV	75 mV	80 mV	100 mV
$U_{STORAGE}$	4,125 V	2,2 V - 5,3 V	2,5 V - 5,25 V	2,2 V - 5,5 V
U_{OUT}	1,8 V, 2,3 V oder 3,3 V	1,8 V oder 3,3 V	$V_{STORAGE}$	2 V - 5,5 V
DC-DC Converter*	LDO	LDO	keiner	switching
MPPT	nein	ja	ja	ja
Preis	~ EUR 15,0	~ EUR 3,0	~ EUR 5,5	~ EUR 6,5

Tabelle 1: Vergleich von ICs zum Zweck des Energy-Harvestings
Die Daten der Tabelle wurden den jeweiligen Handbüchern entnommen. Der Preis bezieht sich auf einen Einzelkauf. *Buck-Converter

wobei I_q der Ruhestrom ist, welcher fließt, auch wenn das Bauelement inaktiv ist. Bei einer Eingangsspannung $U_{IN} = 5$ V und einer Ausgangsspannung $U_{OUT} = 2,5$ V ergibt sich beispielsweise eine Effizienz von unter 50 %. Je nach Ruhestrom und Ausgangsstrom kann die Effizienz auch deutlich unter diesem Wert liegen. Die maximale Ausgangsspannung für das Mess- und Sendemodul (siehe Abschnitt 6.3) liegt bei 3,8 Volt, was die Effizienz auf maximal 76 % begrenzt und auch die Effizienz des Mess- und Sendemoduls reduziert. Die Eingangsspannung von ungefähr 5 V ergibt sich aus dem verwendeten Speichermodule (siehe Abschnitt 5.4) und der maximalen Ausgangsspannung des Boost-Converters.

Schalt-Regler sind komplexer im Aufbau, erreichen aber eine höhere Effizienz. Im Fall des BQ25570 besitzt der entsprechende DC-DC-Wandler laut Handbuch eine Effizienz von ungefähr 90 %, abhängig von den Spannungsniveaus. Dieser Umstand macht den BQ25570 zur ersten Wahl für das Harvesting-Modul. Der BQ25504 kann zwar ebenfalls mit einem Schalt-Wandler kombiniert werden, jedoch verkompliziert dies das Layout des Harvesting-Moduls unnötig.

5.2 Funktionsweise des Regelchips BQ25570

Da der IC BQ25570 von Texas Instruments sich als passende Wahl herausgestellt hat, wird in diesem Abschnitt dessen Funktionsweise beschrieben. Dazu kann der Verlauf der verschiedenen Spannungen betrachtet werden, wie in Abbildung 12 dargestellt. Die nachfolgenden Bezeichnungen der verschiedenen Spannungen wurden dem Handbuch

[12] entnommen, um mit den dortigen Abbildungen konsistent zu sein.

Das Modul wird zuerst auf eine heiße Oberfläche gesetzt. Anschließend wird ein entladener Kondensator als Speicherelement angeschlossen, dessen Spannung mit VBAT bezeichnet wird. Zu Demonstrationszwecken wurde ein Kondensator mit geringer Kapazität gewählt, damit die Spannungsänderungen gut zu sehen sind. Bei Einsatz eines Superkondensators mit relativ hoher Kapazität, sind die Änderungsraten zu gering, um in einer akzeptablen Zeit aussagekräftige Kurven zu erhalten. Die Punkte (a), (b), (e) und (f) sind jeweils als Schnittpunkte der horizontalen Linien mit VBAT zu verstehen, während (c) und (d) Anfang und Ende des Spannungsplateaus markieren.

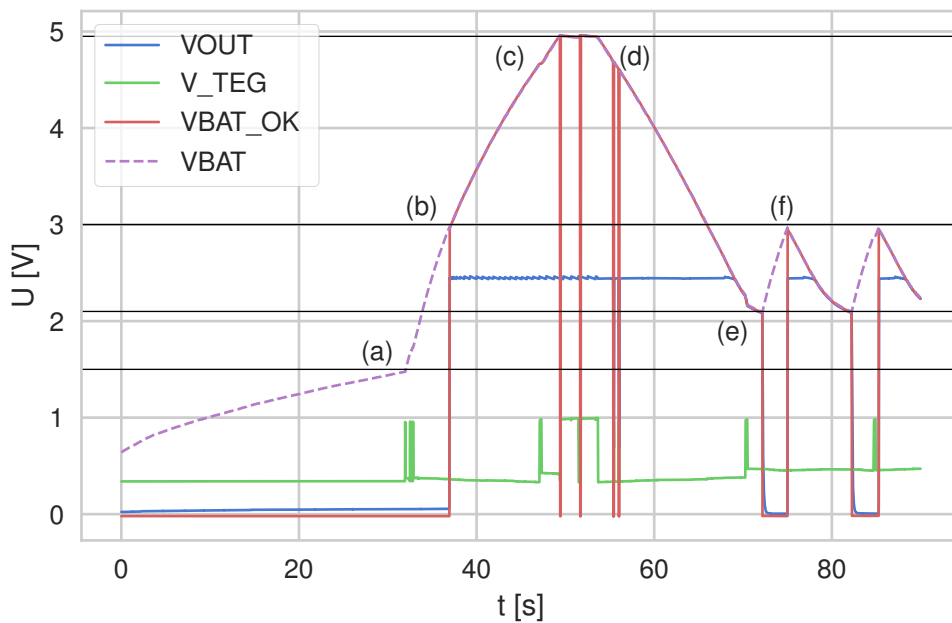


Abbildung 12: Verlauf der verschiedenen Spannungen beim Betrieb des Energy-Harvesting-Moduls.

Da die Spannung VSTOR (Spannung, die den Haupt-Spannungswandler betreibt) am Anfang unter der Spannung VSTOR_CHGEN (1,8 V) liegt, beginnt der BQ25570 im Kaltstartmodus und lädt das Speicherelement, wenn die vom Generator gelieferte Spannung 100 mV übersteigt. Dabei wird keine Leistungsanpassung durchgeführt, wodurch der Ladevorgang relativ langsam abläuft. Sobald $VSTOR \geq VSTOR_CHGEN$ gilt, beginnt die Leistungsanpassung, der Kaltstartmodus wird verlassen und der Main-Boost-Charger stattdessen aktiviert. Dieser Punkt ist in Abbildung 12 als (a) bezeichnet. Die Beginn der Leistungsanpassung ist an dem kurzen Puls in der Generatorspannung V_TEG ersichtlich. Das Speicherelement wird nun mit einer deutlich größeren Leistung geladen. Bei (b) erreicht VBAT den Wert von VBAT_OK_HYST was das Einschalten der Spannung am Ausgang (VOUT) zur Folge hat. Ohne Last am Ausgang des Moduls, wird der Kondensator weiter geladen bis bei (c) die Spannung VBAT_OV erreicht ist.

Bei (d) wird eine Last angeschlossen, welche deutlich mehr Leistung dissipiert, als vom Generator geliefert wird. Als Folge wird der Kondensator entladen, um die Leistung am Ausgang bereit stellen zu können. So lange $V_{BAT} > V_{OUT}$ gilt, bleibt die Ausgangsspannung konstant. Fällt V_{BAT} unter den eingestellten Wert für V_{OUT} , wird der Kondensator mit dem Ausgang kurzgeschlossen und es gilt $V_{BAT} = V_{OUT}$.

Sinkt die Spannung am Kondensator weiter bis zum Grenzwert $V_{BAT_OK_PROG}$, wird der Ausgang bei Punkt (e) abgeschaltet und der Kondensator wieder bis zur Spannung $V_{BAT_OK_HYST}$ geladen, bevor die Ausgangsspannung bei Punkt (f) wieder eingeschaltet wird. Diese Schalthysterese verhindert das permanente Ein- und wieder Ausschalten der Ausgangsspannung bei Lasten, die groß genug sind, um das Speicherelement zu entladen.

Die Spannung V_{BAT_OK} ist gleich Null, wenn der Ausgang ausgeschaltet ist und folgt andernfalls V_{BAT} . Die Sprünge von V_{BAT_OK} bei $40 < t < 60$ sind nicht vorhergesehen, beeinflussen den Betrieb des Energy-Harvesting-Moduls bei den typischen Anwendungsfällen jedoch nicht. Bei einer höheren Kapazität ($> 5 \text{ mF}$) des Speicherkondensators, sind diese Sprünge kaum zu beobachten. Eine kurze Internetrecherche ergab, dass dieses Verhalten auch von anderen, bei Einsatz des BQ25570 beobachtet werden konnte. Auch der Chip BQ25504, welcher im Modul aus der vorhergehenden Diplomarbeit [1] verwendet wurde, zeigt dieses Verhalten.

Die abgebildete Kurve zeigt das Verhalten des Regelchips unter verschiedenen Bedingungen. Im erwarteten Anwendungsfall wird von einem Regelbetrieb ausgegangen, der am ehesten dem Zustand zwischen (c) und (d) entspricht.

5.3 Leistungsanpassung

Unter Leistungsanpassung versteht man die Auswahl eines passenden Innenwiderstandes² einer Energiequelle oder ihres Außenwiderstandes mit dem Ziel die von der Quelle maximal übertragbare Leistung zu erhalten.

Thermoelektrische Generatoren besitzen keinen regelbaren Innenwiderstand und aus diesem Grund bezieht sich die Leistungsanpassung des Harvesting-Moduls auf die Regelung des Außenwiderstandes.

Um das Konzept der Leistungsanpassung einfach zu erklären, können zwei Grenzfälle betrachtet werden:

1. $R_a \gg R_i$ - der Außenwiderstand ist viel größer als der Innenwiderstand. Die Klemmenspannung fällt kaum ab und es fließt nur ein minimaler Strom.
2. $R_a \ll R_i$ - der Außenwiderstand ist viel kleiner als der Innenwiderstand. Die Klemmenspannung bricht ein, was zu einer geringen Leistung am Außenwiderstand führt.

²Die Regelung eines Innenwiderstandes ist im Allgemeinen nicht möglich. Wenn die Parameter eines Verbrauchers gegeben sind, kann jedoch eine Energiequelle mit passendem Innenwiderstand gewählt werden.

Auf Grund der Erkenntnisse aus diesen Extremfällen, müssen die Widerstände von der gleichen Größenordnung sein. Abbildung 13 zeigt einen einfachen Schaltkreis, um die Leistungsanpassung zu verstehen. Es gilt:

$$P_a = U_a \cdot I_a = I_a^2 \cdot R_a = \frac{U_0^2}{(R_i + R_a)^2} \cdot R_a \quad (9)$$

$$\frac{dP_a}{dR_a} = U_0^2 \cdot \frac{R_i - R_a}{(R_i + R_a)^3} \quad (10)$$

$$\Rightarrow P_{max} \text{ bei } \underline{\underline{R_i = R_a}}$$

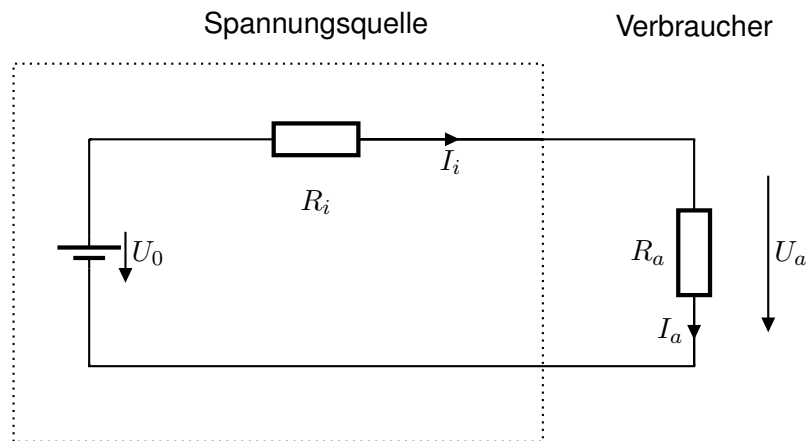


Abbildung 13: Schaltung zur Leistungsanpassung

Die maximale Leistung am Ausgangswiderstand ergibt sich also genau dann, wenn Innen- und Außenwiderstand gleich groß sind. Damit dies gilt, muss die Energiequelle einen linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung aufweisen, was bei einem TEG in guter Näherung erfüllt ist³. Abbildung 14 zeigt den Verlauf der Leistung am Außenwiderstand in Abhängigkeit vom Widerstandsverhältnis bei einem ohmschen Innenwiderstand. Die Effizienz η ⁴ steigt mit größerem Außenwiderstand an, da immer weniger Leistung am Innenwiderstand in Wärme umgewandelt wird und beträgt beim Punkt der maximalen Leistung 50 %.

Der verwendete Regelchip BQ25570 kann durch seine Außenbeschaltung so konfiguriert werden, dass er die Ausgangsspannung des TEG auf 50 % seiner Leerlaufspannung regelt und damit exakt den oben gezeigten Zustand der maximalen Leistung herstellt. Alle 16 Sekunden misst der Regelchip die Leerlaufspannung des TEGs und regelt den Lastwiderstand entsprechend. Der Messvorgang und die Anpassung des Widerstandes nehmen

³Solarzellen erfüllen diese Bedingung nicht, da sie eine stark nicht-lineare Strom-Spannungs-Kennlinie besitzen.

⁴ $\eta = P_a / P_i$

ungefähr 256 ms in Anspruch. Diese Methode des MPPT erhöht die nutzbare Leistung, da ein thermoelektrischer Generator, abhängig von der Temperatur, einen variablen Innenwiderstand besitzt. Eine Regelung ohne Leistungsanpassung kann bei konstanten Bedingungen effizienter arbeiten, da ein MPPT-Zyklus selbst Energie benötigt. Eine solche Regelung muss jedoch im Voraus auf einen bestimmten Anwendungsfall und TEG ausgelegt werden und bietet daher eine geringere Flexibilität.

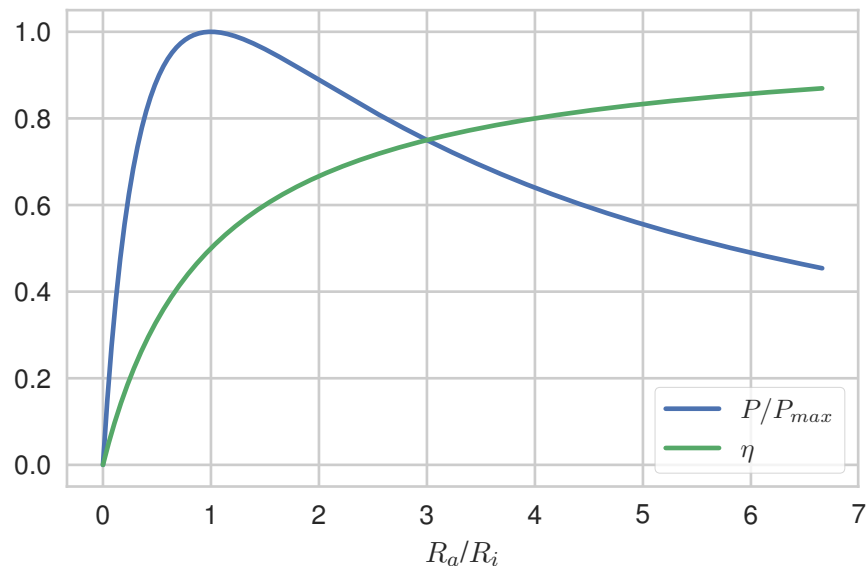


Abbildung 14: Relative Leistungsabgabe und Effizienz einer Energiequelle mit linearer Strom-Spannungs-Kennlinie, in Abhängigkeit vom Widerstandsverhältnis R_a/R_i .

5.4 Speicherelement

Für das Speicherelement des Harvesting-Boards bieten sich verschiedene Technologien an. Eine möglichst hohe Kapazität des Elements ist von Vorteil, um bei einem Energieüberschuss viel Energie speichern zu können und damit Phasen, mit geringer Energieproduktion überbrücken zu können. Um diese Eigenschaft bei geringer Bauteilgröße erreichen zu können, ist eine hohe Energiedichte des Speichers erforderlich. Neben der speicherbaren Energiemenge ist auch die Effizienz, so wie die Selbstentladungsrate von entscheidender Bedeutung. Letztlich ist auch noch die Zyklierbarkeit des Energiespeichers von Interesse, da eine hohe Standzeit den Wartungsaufwand reduziert.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren und Superkondensatoren sind attraktive Energiespeicher, welche die oben genannten Anforderungen erfüllen. Da der für das Harvesting-Board gewählte Regelchip beide Technologien unterstützt, ist eine Festlegung auf eine der beiden Möglichkeiten bei der Entwicklung des Harvesting-Moduls nicht erforderlich. Die obere Grenzspannung für den Ladevorgang, sowie die untere Grenzspannung für den Entladevorgang kann durch die Außenbeschaltung des Regelchips einfach geän-

dert werden und ermöglicht den einfachen Wechsel zwischen den beiden Technologien. Tabelle 2 zeigt die wesentlichen Unterschiede im Bezug auf die genannten Kriterien.

	Energiekapazität	Zyklrierbarkeit	Selbstentladungszeit bei Raumtemperatur
Li-Ionen-Akku	~ 500 mWh	~ 500	Monate
Superkondensator	~ 2 mWh	> 10 ⁵	Wochen

Tabelle 2: Vergleich von Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit Superkondensatoren. Die Werte wurden verschiedenen Datenblättern zu erhältlichen Speicherelementen in passender Größe entnommen.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren verlieren dauerhaft an Kapazität, wenn sie unter Entladeschlussspannung entladen werden. Trotz der relativ geringen Selbstentladung kann eine längere Lagerzeit oder ein Fehler in der Ladesteuerung einen Lithium-Ionen-Akkumulator vollkommen unbrauchbar machen. Superkondensatoren können hingegen beliebig weit entladen werden, ohne Schaden zu nehmen und erfordern daher keine besondere Aufmerksamkeit bei längerer Inaktivität des Harvesting-Moduls. Da bei der Evaluierung des konstruierten Energy-Harvesting-Moduls öfter das Speicherelement getauscht wurde, um verschiedene Situationen zu simulieren, ist ein Superkondensator zu diesem Zweck die bessere Wahl, da nicht auf eine untere Grenzspannung geachtet werden muss.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren weisen eine geringere Selbstentladung auf, sodass die Spannung bei Inaktivität des Harvesting-Moduls nicht so stark abfällt, wie bei einem Superkondensator. Dies hat zur Folge, dass der Regelchip BQ25507 seltener in den „Kaltstart-Modus“ wechseln muss, der bei Spannungen am Speicherelement von unter 1,8 V aktiv wird und eine deutlich geringere Effizienz als der normale Betriebsmodus aufweist. Die Selbstentladung von Superkondensatoren ist für die erwarteten Anwendungsfälle jedoch ausreichend. Aus diesem Grund wurden zur Evaluierung des Energy-Harvesting-Moduls hauptsächlich Superkondensatoren mit einer Kapazität von 47 mF und einer Nennspannung von 5,5 V verwendet.

Bei Speicherelementen muss auch der Energieverlust durch den Spannungsabfall am Innenwiderstand der jeweiligen Speicherelemente betrachtet werden. Bei geringen Lade- und Entladeströmen, wie sie im vorliegenden Anwendungsfall auftreten, sind diese Verluste relativ klein gegenüber den Verlusten durch die Spannungswandlung am Energy-Harvesting-Modul (siehe Abschnitt 5.6).

5.4.1 Superkondensatoren

Superkondensatoren verfügen im Gegensatz zu Elektrolytkondensatoren⁵ über Anode, Kathode und einen Elektrolyt dazwischen. Durch diese Anordnung bildet sich beim Superkondensator eine Doppelschichtkapazität, welche Energie in elektrischen Feldern speichert. Zusätzlich zu diesem Effekt, wird oft auch eine reversible Redoxreaktion an den Elektroden, durch Einlagerung der Ionen des Elektrolyts genutzt. Das adsorbierte Ion reagiert mit der leitenden Elektrode, ohne eine chemische Bindung einzugehen⁶ und gibt dabei seine Ladung ab. Es entsteht eine sogenannte Pseudokapazität, welche jene der Doppelschicht durchaus übersteigen kann und der anliegenden Spannung proportional ist. Superkondensatoren reagieren sehr empfindlich auf das Überschreiten der Nennspannung und können dabei leicht zerstört werden.

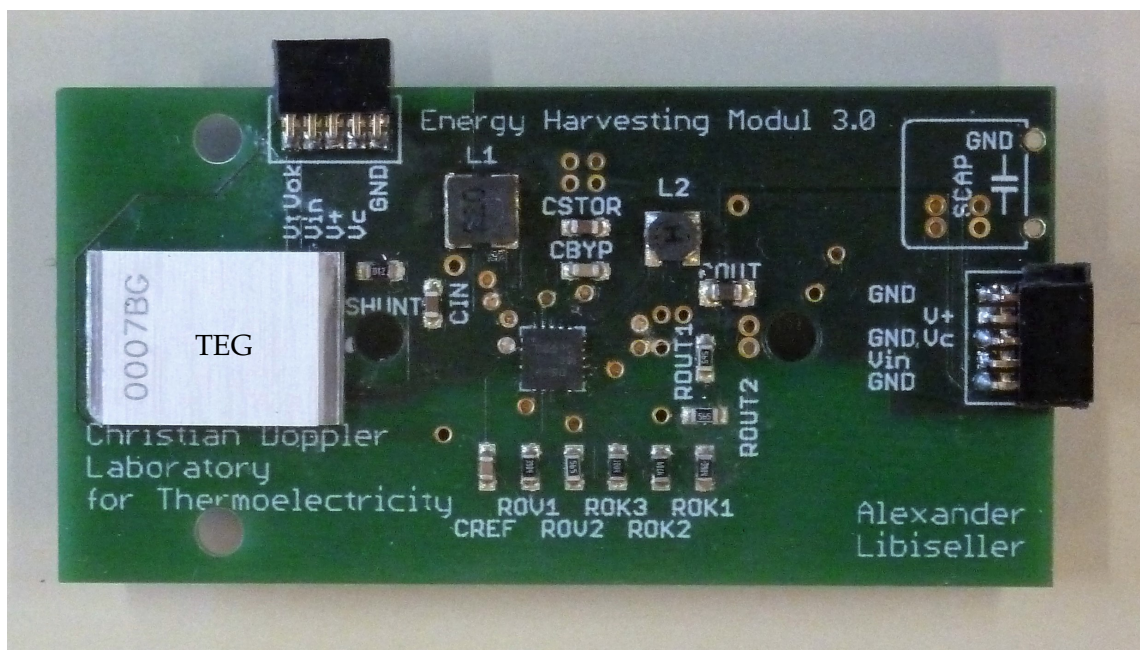


Abbildung 15: Energy Harvesting Modul 3.0 ohne Kühlkörper.

5.5 Der thermoelektrische Generator

Im Energy-Harvesting-Modul kommt ein thermoelektrisches Generatorpackage (TGP-651; Abbildung 6) der Firma Micropelt zum Einsatz. Dieser TEG basiert auf Dünnschicht- und Solid-State-Technologie. Er kann auf Grund seiner Bauweise einfach im Energy-Harvesting-Modul verbaut werden, was durch SMD-Löten bewerkstelligt wurde. Die zulässige Temperatur für den Dauerbetrieb des Generators liegt zwischen 0 und 85 °C. Der Thermogenerator liefert eine ausreichende Leistung, um das Mess- und Sendemodul

⁵Der Elektrolyt ist die Kathode. Eine isolierende Oxidschicht dient als Dielektrikum.

⁶Im Unterschied dazu, werden bei einem Akkumulator chemische Bindungen an den Elektroden eingegangen.

(Abschnitt 6) bei moderaten Temperaturgradienten betreiben zu können. Bei einer Messreihe wurde ermittelt, dass bereits eine Temperaturdifferenz von $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ zwischen warmer und kalter Seite ausreicht, um den Temperatursensor TMP105 mit einer Messung pro Sekunde zu betreiben. Die Temperatur der heißen Seite betrug dabei $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Kühlung erfolgte passiv durch einen Kühlkörper bei einer Raumtemperatur von $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Mess- und Sendemodul hat im eben genannten Fall, eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von $110\text{ }\mu\text{W}$ und der Generator liefert bei diesen Bedingungen ungefähr $500\text{ }\mu\text{W}$. Mit dem in Abschnitt 5.6 berechneten Wirkungsgrad des Regelchips von rund 60% war die Funktion bei diesen Bedingungen zu erwarten. Abbildung 16 zeigt die Ausgangsleistung des Generators bei verschiedenen Temperaturen.

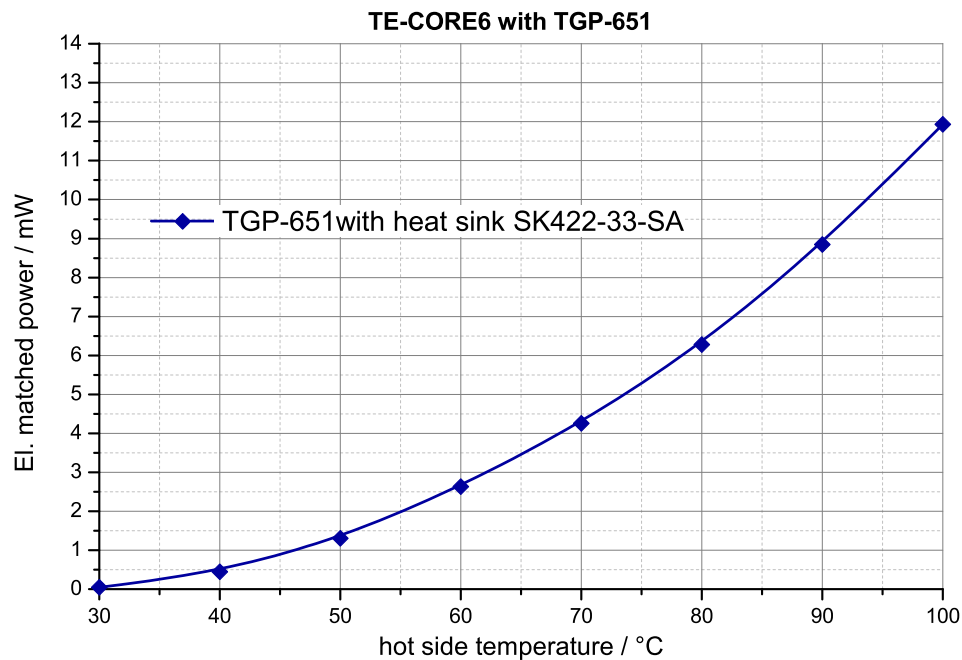


Abbildung 16: Ausgangsleistung des TGP-651. [7]

5.6 Effizienz des Energy-Harvesting-Moduls

Eine der wichtigsten Größen des Energy-Harvesting-Moduls, ist dessen Energieeffizienz, also das Verhältnis zwischen Ausgangs- und Eingangsleistung. Damit dieser Wert ermittelt werden kann, muss die Ausgangsleistung entweder so gering sein, dass ein Betrieb ohne Energiespeicher möglich ist oder es muss die Lade- beziehungsweise Entladeleistung des Speicherelements berücksichtigt werden. Da der Regelchip BQ25570 ohne angeschlossenen Energiespeicher ständig zwischen seinen verschiedenen Betriebsmodi wechselt, ist eine Effizienzmessung nur sehr eingeschränkt möglich. Aus diesem Grund wurde der Messaufbau gewählt, welcher in Abbildung 17 zu sehen ist. Der Lastwiderstand R_L wurde so ausgesucht, dass an etwas weniger Leistung dissipiert wird, als der TEG liefert. Das Speicherelement, ein Superkondensator mit einer Kapazität von 47 mF , konnte dadurch auf einem relativ konstanten Spannungsniveau gehalten werden, wel-

ches der oberen Grenzspannung beim Laden relativ nahe kam. Dieses Spannungsniveau entspricht auch einem realistischen Anwendungsfall, bei dem der TEG genügend Energie liefert, um einen Verbraucher auf Dauer mit Energie zu versorgen. Der Energiespeicher dient in diesem Szenario lediglich als Puffer, damit temporär größere Energiemengen abgegeben werden können. Der vom Generator gelieferte Strom, wurde indirekt über den Shuntwiderstand R_S gemessen.

Daraus ergeben sich Eingangs-, Ausgangs- und Ladeleistung wie folgt:

$$P_i = U_{TEG} \cdot I_{TEG} = \frac{U_{TEG} \cdot U_{R_S}}{R_S}. \quad (11)$$

$$P_a = U_a \cdot I_a = U_a \cdot \frac{U_L}{R_L} = \frac{U_a^2}{R_L} \quad (12)$$

$$P_{STOR} = U_{STOR} \cdot I_{STOR} \quad (13)$$

Daraus lässt sich die ungefähre Effizienz η bestimmen:

$$\eta \approx \frac{P_a + P_{STOR} \cdot 0,87}{P_i} \quad (14)$$

Die Lade- oder Entladeleistung wird bei dieser Berechnung mit dem Faktor 0,87 bei Ausgangsleistung berücksichtigt. Dieser Wert wurde dem Handbuch [12] entnommen und entspricht der Effizienz des Schaltreglers zur Spannungsreduktion am Ausgang, bei der gemessenen Spannung U_{STOR} und dem indirekt gemessenen Ausgangsstrom I_a .

Die Messung wurde 13 Mal durchgeführt und dabei der Wert $0,62 \pm 0,09$ für die Effizienz η ermittelt. Dieser Wert muss jedoch unter der Beachtung folgender Aspekte betrachtet werden:

- Die Effizienz des Spannungswandlers am Ausgang ist unter anderem von der Spannung am Speicherelement abhängig, welche bei den Messungen zwischen 4,7 und 4,9 V lag. Entsprechend ist der ermittelte Wert für η für diesen Spannungsreich zu verstehen.
- Die Ablesung der verschiedenen Messgeräte erfolgte manuell und daher nicht gleichzeitig. Obwohl die Anzeigen relativ geringe Änderungsraten aufwiesen, kann ein eventueller Fehler durch Messwertänderungen während der Ablesezeit nicht ausgeschlossen werden.

Neben der absoluten Effizienz des Moduls wurden auch Messungen durchgeführt, um die Effizienz relativ zu den vorhandenen Energy-Harvesting-Lösungen zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde in das Energy-Harvesting-Board aus der vorhergehenden Diplomarbeit [1] und jenes der Firma Micropelt (TE-CORE [13]) mit dem neu Entwickeltem verglichen. Beim Versuchsaufbau wurden die Module mit dem gleichen thermoelektrischen Generator ausgestattet und hintereinander auf einer heißen Oberfläche befestigt.

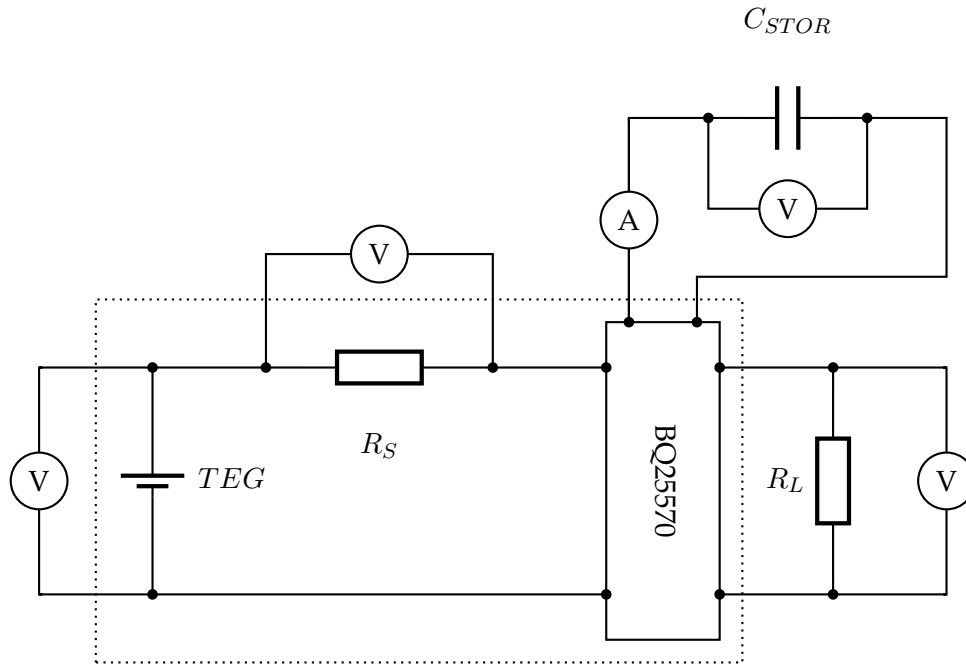


Abbildung 17: Schaltung zur Effizienzmessung

Bei jeder Messung wurde der Lastwiderstand mit einem Potentiometer so geregelt, dass die Spannung am Speicherelement sich auf einen konstanten Wert von einmal drei und einmal vier Volt einstellte. Dieser Vorgang wurde bei drei verschiedenen Temperaturgradienten wiederholt, indem die Heizleistung der Wärmequelle verändert wurde. Nach jeder Leistungsänderung wurde gewartet, bis sich ein konstanter Temperaturunterschied zwischen heißer und kalter Seite einstellte. Die gemessene Ausgangsleistung der Module ist in diesem Setting der Leistungseffizienz der jeweiligen Module proportional, da die gelieferte elektrische Leistung, bei gleicher Temperaturdifferenz, überall gleich sein sollte. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 18 ersichtlich und entspricht, in etwa dem zu erwartenden Ergebnis. Tabelle 3 zeigt die wesentlichen Unterschiede der verschiedenen Energy-Harvesting-Platinen.

Board-Name	Leistungsanpassung	Boost-Converter	Buck-Converter
E.-H.-Module 3.0	MPPT	Schaltwandler (IC)	Schaltwandler
E.-H.-Module 2.0	MPPT	Schaltwandler (IC)	LDO-Wandler
Micropelt TE-CORE	fest	Schaltwandler (analog)	LDO-Wandler

Tabelle 3: Vergleich der Energy-Harvesting-Module. Modul 3.0 wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit konstruiert. Modul 2.0 stammt aus [1] und das Modul TE-Core [13] wurde von Micropelt entwickelt.

Durch seine fehlende Leistungsanpassung mittels der MPPT-Methode, kann der TE-CORE von Micropelt nicht über den gesamten Temperaturbereich die maximale Leistung

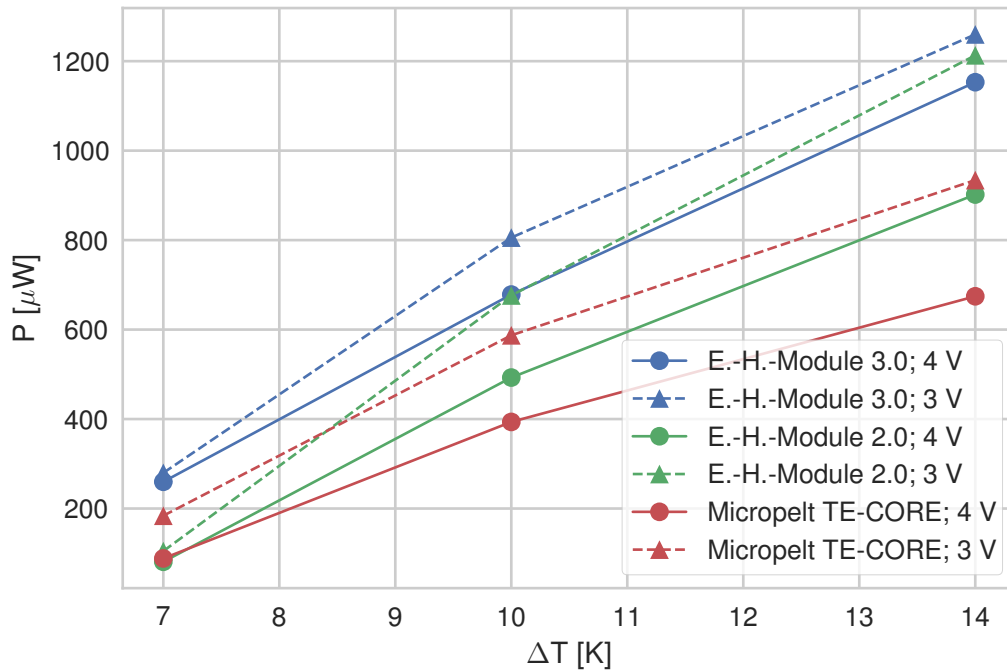


Abbildung 18: Ausgangsleistung der verschiedenen Energy-Harvesting-Module, bei konstant drei oder vier Volt am Energiespeicher.

vom TEG beziehen. Entsprechend leidet seine Effizienz bei verschiedenen Temperaturen unterschiedlich stark im Vergleich zu den anderen Modulen, da diese auf den veränderten Innenwiderstand des Thermogenerators reagieren können. Dies zeigt sich in der Messung vor allem bei den größeren Temperaturdifferenzen, welche mit einer höheren Temperatur des TEG einher gehen. Da die aktive Leistungsanpassung der anderen Module Energie benötigt, arbeitet der Schaltkreis des TE-COREs zur Spannungserhöhung bei der relativ niedrigen Temperatur mit einem ΔT von 7 K effizienter als jener des Moduls 2.0. Dieser Schluss ist insofern zulässig, da beide Module über das selbe Bauelement zur Spannungsreduktion verfügen und der Unterschied daher vom Schaltkreis zur Spannungserhöhung herrühren muss.

Ein Unterschied zwischen dem neu entwickelten Modul und den Vergleichsmodulen liegt, wie in Abschnitt 5.1 bemerkt, beim verwendeten Buck-Converter, da es als einziges einen Schaltwandler zur Spannungsreduktion nutzt. Dies zeigt sich allgemein durch eine höhere Effizienz, macht sich jedoch besonders bei hohen Spannungen am Speichermodule (relativ zur erzeugten Ausgangsspannung) bemerkbar. Während das Modul 2.0 bei einer Temperaturdifferenz von 14 K und einer Spannung am Speicherelement von 3 V eine ähnliche Ausgangsleistung liefern, ist der Unterschied bei einer Erhöhung der Spannung am Speicherelement auf 4 V wesentlich größer.

Zusammenfassend zeigen diese Messungen, dass Modul 3.0 im Vergleich am effizientesten arbeitet und sich dieser Umstand generell umso stärker bemerkbar macht, je höher

die Spannung am Speicherelement ist. Das Modul von Micropelt fällt im Vergleich weiter ab, wenn sich der Innenwiderstand des TEGs auf Grund seiner steigenden Temperatur erhöht.

		U = 3 V			U = 4 V		
		ΔT [K]					
relative Ausgangsleistung	E.-H.-Board 3.0	1	1	1	1	1	1
	E.-H.-Board 2.0	0,38	0,84	0,96	0,31	0,73	0,78
	Micropelt TE-CORE	0,66	0,73	0,74	0,34	0,58	0,59

Tabelle 4: Daten zu Abbildung 18. Die relative Ausgangsleistung, bezieht sich auf das Energy-Harvesting-Board 3.0.

5.7 Design des Energy-Harvesting-Moduls

Bei der Entwicklung des Energy-Harvesting-Moduls wurde als Ausgangspunkt der Beispielschaltkreis für den Regelchip BQ25570 (Abbildung 19) verwendet. Um den Anforderungen des Moduls zu genügen, mussten einige Änderungen an diesem Beispielschaltkreis vorgenommen werden. Des weiteren wurden für alle Bauelemente passende Dimensionen und Werte für Widerstand, Kapazität beziehungsweise Induktivität gewählt⁷. Der entworfene Schaltplan ist in Anhang A.1 zu finden. Die im Anhang befindlichen Grafiken zeigen nicht das tatsächlich produzierte Modul, sondern eine Weiterentwicklung, welche sich im wesentlichen durch einige kleine Designanpassungen, einer übersichtlicheren Beschriftung und für SMD-Löten optimierte Löt pads unterscheidet. Grund für diese Änderungen ist die im Laufe des Designprozesses des Mess- und Sendemoduls hinzugewonnene Erfahrung beim PCB-Design und bei der verwendeten Software. Das fertige Layout der Leiterplatte ist in Anhang A.2 (Oberseite) und A.3 (Unterseite) zu finden.

5.8 Aufbau des Energy-Harvesting-Moduls

Das Energy-Harvesting-Modul besteht im Wesentlichen aus der Leiterplatte, dem thermoelektrischen Generator, der Regelelektronik, einem Kühlkörper und den Verbindungssteckern um das Modul mit dem Mess- und Sendemodul zu verbinden. Die Leiterplatte wurde nicht selbst hergestellt, sondern von einer Firma gefertigt. Aus Kostengründen wurde die Leiterplatte per Hand bestückt und mittels Reflow-Verfahren (siehe Abschnitt 7) gelötet. Der TEG wurde als fertiges Package (siehe Abschnitt 5.5) von Micropelt erworben und konnte einfach mit der Leiterplatte durch auflöten verbunden werden. Nach dem Reflow-Löten wurden die Steckverbindungen per Hand angelötet.

⁷Ersichtlich in Anhang A.5



6 Mess- und Sendemodul

Eine Aufgabe dieser Diplomarbeit ist die Konzeption eines Moduls, welches die Energie des Energy-Harvesting-Moduls nutzt, um einen oder mehrere Sensoren ansteuert und die Messergebnisse kabellos an einen Empfänger überträgt. Die Anforderungen für ein solches Modul sind unter anderem:

- Möglichst geringer Energieverbrauch während und zwischen Messungen
- Einfach um weitere Sensoren erweiterbar
- Einfach zu programmieren
- Geringes Gewicht und Größe.
- Soll ein Low-Energy-Funkprotokoll beherrschen
- Soll Versorgungsspannung und eventuell Storage-Spannung vom Energy-Harvesting-Modul messen können

Der im Rahmen dieser Diplomarbeit konstruierte Prototyp des Mess- und Sendemoduls trägt die Bezeichnung M-RF-Board.

6.1 Überlegungen zum Aufbau des Moduls

Da ein Sendemodul, ebenso wie ein Sensor-Controller für diese Anwendung programmierbar sein sollen, ist es naheliegend, einen einzigen Mikrocontroller zu verbauen, der beide Aufgaben erfüllen kann und das Energiemanagement für beide Aufgaben übernimmt. Dies hat den Vorteil, dass es nur eine programmierbare Komponente gibt, was auch einen übersichtlichen und kompakten Aufbau des Moduls ermöglicht. Außerdem haben Mikrocontroller gegenüber diskreten Komponenten oft den Vorteil energiesparender agieren zu können. Um einen passenden Mikrocontroller zu finden, ist es von Vorteil, sich über das passende Übertragungsprotokoll Gedanken zu machen. Auch die Art der Sensorsteuerung muss bei der Auswahl des Mikrocontrollers beachtet werden.

6.2 Übertragungsprotokolle

Bei der Auswahl des Übertragungsprotokolls ist ein möglichst geringer Energieverbrauch zu priorisieren, da dies der limitierende Faktor bei durch Energy-Harvesting betriebenen Systemen ist. Bei den 2,4 GHz Funktechnologien scheiden das weit verbreitete WLAN nach einem Standard der IEEE-802.11-Familie und Bluetooth aus, da sie nicht für Low-Energy-Anwendungen geeignet sind und eher in Richtung Datenübertragungsrate und hoher Sendeleistung optimiert sind.

6.2.1 Zusammenfassung von „Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee, and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario“ [14]

Damit bleiben unter anderem, die für geringen Energieverbrauch optimierten Protokolle, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee und ANT übrig, welche in einem Paper [14] miteinander, bezüglich ihres Energieverbrauchs, verglichen werden. Im Folgenden werden die Überlegungen und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

Ein Funkprotokoll mit geringem Energieverbrauch wird typischer Weise für Anwendungen benutzt, bei denen in regelmäßigen Abständen relativ geringe Datenmengen von einem Sensormodul zu einem Empfänger gesendet werden. Dabei ist weder eine hohe Datenrate noch eine große Reichweite wichtig und entsprechend ist der Energieverbrauch relativ gering. In diesem Paper werden die drei oben genannten Low-Energy-Protokolle in einem Szenario evaluiert, bei dem das Sensormodul in regelmäßigen Abständen 8 Byte große Datenpakete wie Sensordaten an einen Empfänger sendet. Ziel des Papers ist es, Entwickler von Funksystemen bei der Auswahl eines Protokolls zu unterstützen.

Die relevanten Größen für den Energieverbrauch sind die Zeit, die eine Verbindung (Senden und Empfangsbestätigung erhalten) benötigt und der Energieverbrauch im Sleep- und Active-Modus des Sendemoduls. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

	BLE	ZigBee	ANT
Time of one connection ± SD	1150 ms ± 260 ms	250 ms ± 9,1 ms	930 ms ± 230 ms
Sleep current	0,78 uA	4,18 uA	3,1 uA
Awake current	4,5 mA	9,3 mA	2,9 mA

Tabelle 5: Experimentelle Ergebnisse bei Verwendung einer 3,3 V Spannungsquelle [14]

Diese Ergebnisse zeigen, dass BLE den geringsten Stromverbrauch im Sleep- und Active-Modus aufweist, aber eine vollständige Verbindung die längste Zeit benötigt. Nach einer Analyse des gesamten Stromverbrauchs bei verschiedenen Sleep-Intervallen, kommt die Studie zu dem Schluss, dass BLE den geringsten Energieverbrauch hat. Dahinter liegt ZigBee, gefolgt von ANT. Der entscheidende Faktor dafür war nicht nur der Energieverbrauch in den Active- und Sleep-Phasen, sondern auch die Zeit, die benötigt wurde, um die Verbindung zum Empfänger nach einer Sleep-Phase herzustellen und die Zeit, die das RF-Modul zwischen den einzelnen RF-Paketen im Sleep-Modus verbringen konnte.

Im Paper wurde auch untersucht, wie einfach die jeweiligen Controller zu programmieren waren, um den geringen Energieverbrauch und die unterschiedlichen Sendeintervalle zu realisieren. ZigBee war dabei am einfachsten zu programmieren und ANT am schwierigsten. BLE lag dazwischen.

6.2.2 Sensorsteuerung

Da der Mikrocontroller für das Mess- und Sendemodul angeschlossene Sensoren steuern und auslesen muss, ist die Art der Schnittstelle der verwendeten Sensoren von Bedeutung. Sensoren, welche das Messsignal analog ausgeben, haben gegenüber ihren digitalen Pendanten⁸ einige Nachteile bei dieser Art der Anwendung:

- Ein zusätzlicher A/D-Wandler⁹ ist notwendig, falls die Messwerte digital übertragen werden sollen.
- Das Messsignal muss den A/D-Wandler am Mikrocontroller möglichst unverändert erreichen. Eine Fehlererkennung, wie bei digitaler Übertragung, ist nicht möglich.
- Die notwendige Versorgungsspannung von analogen Sensoren kann relativ stark variieren, was eventuell zusätzliche Spannungswandler notwendig macht.
- Sensoren wie Widerstandstemperatursensoren benötigen eine Konstantstromquelle.
- Bei nicht kontinuierlichen Messungen muss eine eventuelle Vorlaufzeit beachtet werden, damit der Sensor verlässliche Ergebnisse liefert.
- Jeder Sensor muss über eine eigene Leitung zum A/D-Wandler verfügen.

Digitale Sensoren auf der anderen Seite, besitzen diese Nachteile nicht. Aus diesem Grund wurde ein Mikrocontroller gesucht, der Sensoren mit digitalen Schnittstellen ansteuern kann. I²C stellte sich dabei als geeignete serielle Schnittstelle heraus. Für das Design der Mess- und Sendeplatine sind folgende Eigenschaften relevant:

- Das Interface ist bei vielen ICs bereits integriert.
- Es sind nur zwei Leitungen notwendig. Mit der Energieversorgung sind es insgesamt vier Leitungen.
- Am Bus können relativ einfach¹⁰ weitere I²C-fähige Sensoren angeschlossen und auch wieder entfernt werden.
- Sehr geringer Strombedarf.
- Hohe Immunität gegen Rauschen.
- Gute Debugging-Möglichkeiten

⁸Unter einem digitalen Sensor versteht man ein Bauteil, welches einen analogen Sensor mit einem passenden A/D-Wandler und einer entsprechenden Schnittstelle kombiniert.

⁹Bei digitalen Sensor-Packages ist dieser bereits integriert.

¹⁰Dabei muss lediglich beachtet werden, dass die Sensoren unterschiedliche Adressen besitzen und mit dem gewählten I²C-Betriebsmodus kompatibel sind.

- Betriebsspannung von I²C-fähigen Sensoren meist im Bereich um 3 V.

In Abschnitt 6.2.3 wird diese Schnittstelle näher betrachtet und die Funktionsweise teilweise erklärt.

6.2.3 I²C-Schnittstelle

I²C steht für Inter-Integrated Circuit und ist ein serieller Datenbus, welcher 1982 veröffentlicht wurde. Die aktuelle Version 6 stammt aus dem Jahr 2014. Sämtliche Daten aus diesem Abschnitt wurden dem aktuellen Benutzerhandbuch zu I²C [15] entnommen. Der I²C-Bus wird inzwischen von über 1000 verschiedenen ICs von über 50 Herstellern verwendet.

Der seriell I²C-Bus zeichnet sich dadurch aus, dass er nur zwei Busleitungen, SDA (Datenleitung) und SCL (Clock-Leitung) benötigt. Dieser Bus operiert als Master-Slave-Bus. Jede Übertragung wird von einem Master initiiert und alle anderen verbundenen Geräte agieren bei dieser Übertragung als Slave¹¹. Eine Kollisionserkennung ist integriert um Datenkollisionen zu verhindern. Es gibt verschiedene Betriebsmodi, die jeweils verschiedene Datenübertragungsraten (100 kbit/s bis 3,4 Mbit/s) unterstützen und verschiedene Hardwareanforderungen besitzen. Die Zahl der maximal verbundenen ICs ist durch die elektrische Kapazität der Leitungen und den Adressraum limitiert. 7- und 10-Bit-Adressen¹² sind möglich.

In Abbildung 20 ist das Byte-Format einer Datenübertragung an den Busleitungen SDA und SCL dargestellt. Die Übertragung wird vom Master mit der Start-Bedingung initiiert und muss nach erfolgter Übertragung jedes Byte mit einem ACK-Bit vom Slave bestätigt werden. Die Bytes werden dabei in der Big-Endian-Reihenfolge¹³ übertragen. Der Slave kann den Master nach jedem ACK-Signal durch halten der SCL-Leitung auf Low in einen Wartezustand zwingen. Der Master beendet nach erfolgtem ACK-Signal den Transfer durch senden der Stop-Bedingung oder initiiert eine erneute Übertragung durch senden einer Repeated-Start-Bedingung. Falls der Slave statt dem Acknowledge-Signal ein Not-Acknowledge-Signal sendet, entscheidet der Master ob er die Übermittlung wiederholt oder nicht.

Abbildung 21 zeigt die Struktur einer Datenübertragung von einem Master zu einem Slave mit einer 7-Bit-Adresse. In Abbildung 22 ist die Struktur einer Datenübertragung vom Slave zum Master zu sehen. Auch diese Verbindung muss durch den Master initiiert werden.

¹¹Mehrere Master sind möglich. Alle außer dem Initiierenden agieren bei einem Datentransfer als Slave. Dieser Betriebszustand wird Multimaster-Mode genannt.

¹²Das achte bzw. elfte Bit bei der Adressübertragung signalisiert jeweils, ob ein Lese- oder Schreibzugriff auf den Slave erfolgen soll.

¹³Mit dem höchstwertigen Bit zuerst.

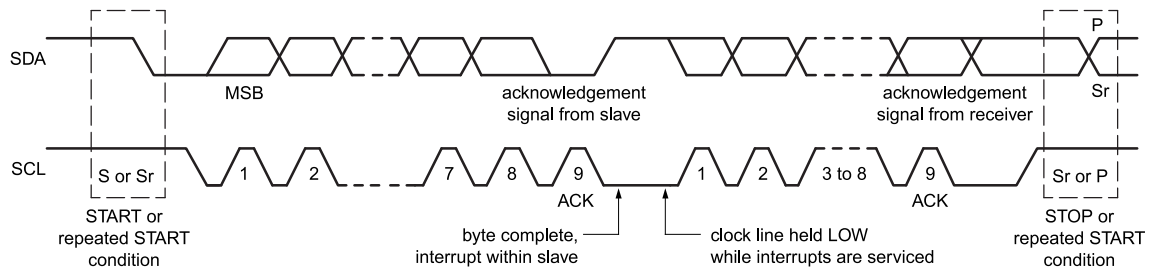


Abbildung 20: Datenübertragung am I²C-Bus [15]

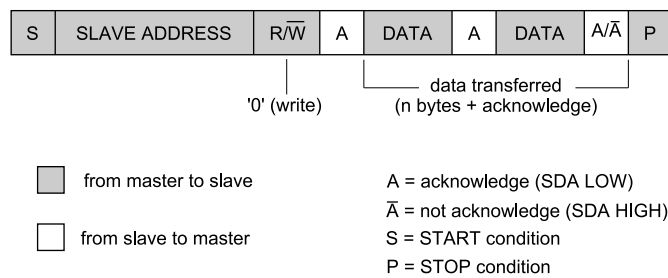


Abbildung 21: Datenübertragung von Master an Slave [15]

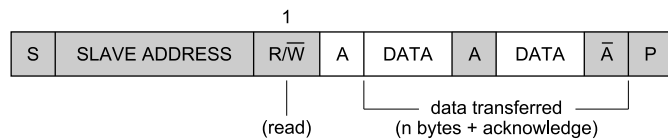


Abbildung 22: Datenübertragung von Slave an Master [15]. Der I²C-Master initiiert auch die Übertragung von Slave zu Master. Legende in Abbildung 21.

6.3 Mikrocontroller für das Mess- und Sendemodul

Auf der Suche nach einem Mikrocontroller, der die in Abschnitt 6 genannten Anforderungen erfüllt, stellte sich die Mikrocontrollerfamilie CC26xx von Texas Instruments als geeignet heraus. Die wesentlichen Unterschiede der einzelnen ICs der CC26xx-Reihe liegen in den unterstützten Funkprotokollen. Das Modell CC2630 eignet sich für Funkübertragungen mittels ZigBee, Modell CC2640 wurde für Funkübertragungen mittels BLE entwickelt und Modell CC2650 beherrscht beide Protokolle. Um bei der Anwendung möglichst flexibel zu bleiben, wurde das Mess- und Sendemodul mit dem CC2650 entworfen. Im folgenden wird der Chip kurz vorgestellt. Sämtliche Informationen aus diesem Abschnitt wurden dem Handbuch zum CC2650 [16] entnommen.

Wie in Abbildung 23 ersichtlich ist, besitzt der CC2650 über mehrere Prozessoren mit verschiedenen Aufgaben. Im Wesentlichen besteht der Mikrocontroller aus einem ARM Cortex-M3 als Haupt-CPU, dem Funkmodul, dem Sensor-Controller, sowie diversen Peripheriekomponenten und anderen Modulen. Dieser getrennte Aufbau bietet einige Vorteile, was das Energiemanagement betrifft. Es müssen nur jene Komponenten aktiv sein, welche für eine Operation benötigt werden. So können zum Beispiel der Hauptprozessor und das RF-Modul in den Ruhemodus wechseln, während der Sensorcontroller eine Messung steuert. Nach Abschluss einer solchen Messung, wird der Hauptprozessor wieder aktiv geschaltet und kann vor dem Senden verschiedene Datenmanipulationen vornehmen oder warten, bis eine programmierte Zahl von Messwerten vorhanden ist, bevor die Funkübertragung initiiert wird.

Der CC2650 wird in drei verschiedenen Packages angeboten, die sich in ihrer Größe und der Zahl der I/O-Schnittstellen unterscheidet. Das mittlere Package mit der Bauteilnummer CC2650F128RHB wurde für das Mess- und Sendemodul gewählt, da es einen guten Kompromiss zwischen Größe und Zahl der Schnittstellen bietet.

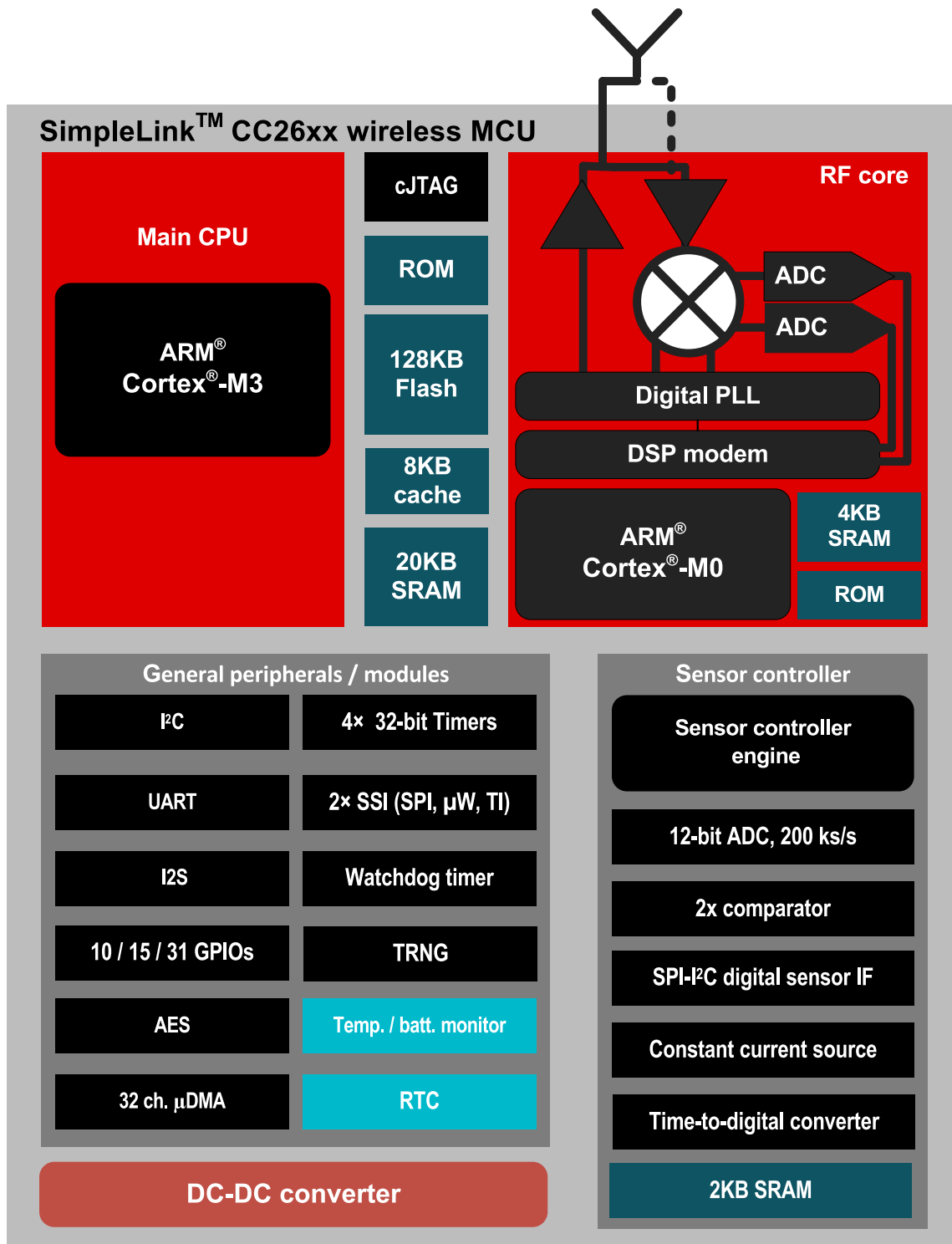
Texas Instruments bietet auch eine passende Softwareumgebung, um Code für den CC2650 zu schreiben, kompilieren und debuggen. Es besteht außerdem die Möglichkeit, das von Texas Instruments verfügbare Real-Time Operating System¹⁴ for Microcontrollers [17] für den CC2650 zu nutzen, was die Programmierung deutlich vereinfacht. Mehr zur Software ist unter Punkt 6.4 zu finden.

Ein entscheidendes Kriterium, welches zur Wahl des CC2650 führte, ist dessen Energieverbrauch und -management. In Tabelle 6 ist der Energieverbrauch der Haupt CPU des CC2650 in den verschiedenen Power-Modi und deren für das Mess- und Sendemodul wichtigen Merkmale aufgelistet. Diese Power-Modi können durch die Software gesteuert werden. Neben der Haupt-CPU sind der Sensor-Controller und der RF-Core die größten Energieverbraucher, des Mess- und Sendemoduls. Tabelle 7 zeigt den Stromverbrauch der einzelnen Komponenten.

Texas Instruments vertreibt das SimpleLink CC2650 Wireless MCU¹⁵ Launchpad Kit,

¹⁴kurz RTOS

¹⁵Microcontroller Unit



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Abbildung 23: Blockdiagramm des CC2650 [16]

welches eine Platine mit dem CC2650 und dem passenden Debugger (XDS110 JTAG debugger) beinhaltet. Die Platine besitzt zahlreiche Ein- und Ausgänge um den CC2650 ausgiebig testen und evaluieren zu können, was vor Designbeginn des Mess- und Sendemoduls auch gemacht wurde. Dieses Kit wurde neben dem eigentlichen Mess- und Sendemodul dazu verwendet, den Energieverbrauch des Mikro-Controllers, in einem für diese Arbeit anwendungsnahen Fall zu bestimmen. Mehr dazu in Abschnitt 6.7.

Modus	Active	Idle	Standby	Shutdown
Current	1,45 mA + 31 μ A/MHz	550 μ A	1 μ A	0,15 μ A
SRAM retention	Full	Full	Full	No
Sensor Controller	Available	Available	Available	Off
Peripherals	Available	Available	Off	Off
Wake up on RTC	Available	Available	Available	Off

Tabelle 6: Die verschiedenen Power-Modi des CC2650. [16]

	RF-Core Active Transmission (5-dBm)	Main Core Active	Sensor Controller Active
Current consumption	9,1 mA	1,45 mA + 31 μ A/MHz	8,2 μ A/MHz

Tabelle 7: Stromverbrauch einzelner Komponenten des CC2650. [16]

6.4 Software

Die Software des CC2650 kann großen Einfluss auf den Energieverbrauch des Mess- und Sendemoduls haben. Entsprechend wurde bei der Programmierung darauf geachtet, einen möglichst energiesparenden Betrieb des Moduls zu ermöglichen. Für die Programmierung wurde unterschiedliche Software verwendet, welche von Texas Instruments bereitgestellt wird:

- Code Composer Studio (CCS): Code Composer Studio ist eine IDE, welche auf das Eclipse Software-Framework aufbaut und viele Mikrocontroller von Texas Instruments unterstützt. Die Software bietet eine einfache Möglichkeit, Code für den CC2650 zu schreiben, kompilieren und debuggen.
- Sensor Controller Studio: Diese Software wird verwendet um Code für den Sensor-Controller des CC2650 zu schreiben, zu testen und debuggen. Der mit Hilfe des Sensor Controller Studios geschriebene Code wird in CCS importiert und ermöglicht damit der Haupt-CPU die Steuerung des Sensor-Controllers.

- Bluetooth low energy software stack: Der BLE-Stack 2.x von Texas Instruments beinhaltet Software, welche die einfache Verwendung des BLE-Protokolls mit dem CC2650 ermöglicht.
- SmartRF Studio: Das SmartRF Studio hilft Entwicklern von RF-Systemen, welche Komponenten von Texas Instruments verwenden, das einfache testen und Debuggen besagter Systeme. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde es verwendet um die vom Mess- und Sendemodul übertragenen Daten zu empfangen und auszugeben.

Texas Instruments stellt für die SimpleLink-Produktfamilie, welcher auch der CC2650 angehört, zahlreiche Software-Beispiele zur Verfügung, die verwendet wurden, um den Aufbau von Software für den CC2650 nachzuvollziehen.

Der Ablauf, der für diese Arbeit geschriebenen Software, ist in Abbildung 24 dargestellt. Nachdem das Mess- und Sendemodul vom Energy-Harvesting-Modul mit Energie versorgt wird, startet der CC2650. Nachdem das RTOS geladen wurde, beginnt das geschriebene Programm abzulaufen. Nachdem die Hardware initialisiert wurde, sendet der Hauptprozessor dem Sensor-Controller ein Signal, um eine Messung anzustoßen und geht anschließend selbst in den Standby-Modus. Dies geschieht bei entsprechenden Einstellungen in der Software automatisch durch das RTOS, ohne dass der Hauptprozessor manuell in diesen Zustand versetzt werden muss. Sobald der Sensor-Controller eine erfolgreiche Messung durchgeführt hat, meldet er das dem Hauptprozessor, welcher dann vom Standby- in den Active-Modus wechselt und die Messwerte empfängt. Im Anschluss wird das RF-Modul des CC2650 benutzt, um die Messwerte per BLE an einen Empfänger zu übertragen. Danach wird der Sensor-Controller wieder angewiesen eine Messung durchzuführen. Die Software wurde so konfiguriert, dass sich dieser Zyklus einmal pro Sekunde wiederholt – es wird also ein Messwert pro Sekunde übertragen.

Der Code für den Sensor-Controller muss dafür zuerst mit dem Sensor Controller Studio geschrieben werden. Dieser Code beinhaltet auch die Informationen, welche Sensoren angeschlossen sind und wie diese anzusteuern sind. Für den Proof of Concept wurde ein digitaler Temperatursensor (TMP105) von Texas Instruments verwendet. Weitere Sensoren mit I²C-Schnittstellen können durch Erweitern des Codes einfach hinzugefügt werden.

Als Sendeprotokoll wurde BLE gewählt. Um den Energieverbrauch der Einheit möglichst gering zu halten, sendet das RF-Modul die Daten, ohne vorher eine Verbindung mit einem Empfänger aufzubauen, was die notwendige Anzahl an Datenpaketen reduziert. Das sogenannte BLE-Advertising, welches dafür verwendet wird, benutzt dabei die Kanäle 37, 38 und 39 des 2,4-GHz-Bandes. Damit kann jeder Empfänger, der auf diesen Kanälen lauscht, die Messdaten empfangen. Eine zyklische Redundanzprüfung (CRC) wird dabei verwendet um Übertragungsfehler festzustellen. Eine Verschlüsselung der Daten ist möglich, wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht implementiert.

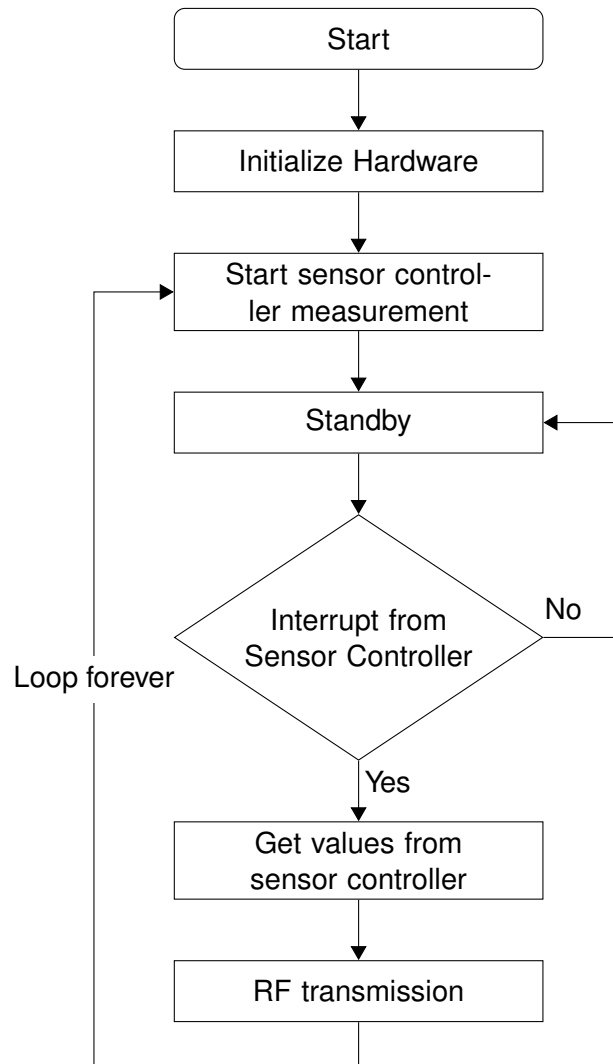


Abbildung 24: Flussdiagramm der Software des CC2650

6.5 Design des Mess- und Sendemoduls

Die Dimensionen des Moduls wurden so gewählt, dass es die selbe Breite wie das Energy-Harvesting-Modul (29,21 mm) besitzt und ansonsten so gering wie möglich sind. Entsprechend wurden die elektrischen Bauteile so klein wie möglich gewählt, ohne eine maschinelle Bestückung der Leiterplatte notwendig zu machen. Beim Antennendesign wurde ein Kompromiss aus Leistungsfähigkeit und notwendiger Bauteilzahl gewählt (mehr dazu in Abschnitte 6.5.1). Der gewählte Mikrocontroller CC2650 erfordert bestimmte externe Bauteile, um zu funktionieren – ein Teil des Schaltplans ist dadurch bereits vorgegeben. Der vollständige Schaltplan ist in Anhang A.6 dargestellt. Das fertige Platinenlayout, sowie die Bauteilliste sind in den Anhängen A.7, A.8 und A.10 zu finden. Der Chip CC2650 verfügt im gewählten Package über 15 digitale I/O-Pins, wovon acht auch als analoge I/O-Pins verwendet werden können. Bis auf zwei dieser Pins werden alle nach außen geführt. Bei Bedarf können also weitere, externe Komponenten an das Modul angeschlossen werden. Zu Evaluierungszwecken wurden nur zwei I/O-Pins, gemeinsam mit der Versorgungsspannung und dem Erdkontakt mit einer Steckverbindung versehen¹⁶. Diese Schnittstelle wird als I²C-Bus genutzt und kann auch über den Sensorcontroller des CC2650 angesprochen werden.

Zwei weitere Steckverbindungen dienen der Verbindung mit dem Energy-Harvesting-Modul, beziehungsweise als JTAG-Schnittstelle mit zehn Pins, um den Mikrocontroller programmieren und debuggen zu können.

6.5.1 Antennendesign

Da der gewählte Mikrocontroller RF-Übertragungen im 2,4-GHz-Band durchführen kann, ist eine entsprechende Antenne erforderlich. Bei der Wahl einer passenden Antenne gibt es verschiedene Aspekte, welche berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden sind einige davon aufgelistet:

- Dimensionen
- Impedanz
- Abstrahlcharakteristik
- Energieeffizienz
- Kosten

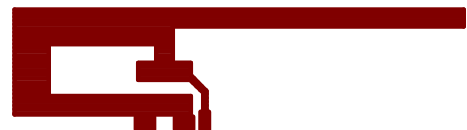


Abbildung 25: Inverted-F Antenne
(25 x 8 mm)

Generell kann zwischen (Halbwellen-)Dipol-Antennen und Monopol-Antennen (auch Groundplane-Antennen oder Viertelwellenstrahler genannt) unterschieden werden. Letztere benötigt nur einen Zweig des Halbwellendipols. Das Konzept der Monopol-Antenne funktioniert, da Induktionsströme in der am Antennenfuß anschließenden

¹⁶Weitere Steckverbindungen können einfach nachgerüstet werden.

Ground-Fläche erzeugt werden, welche den nicht vorhandenen Antennenarm spiegeln. Je höher die elektrische Leitfähigkeit dieser Spiegelfläche ist, desto besser funktioniert das Konzept. Aus diesem Grund wurden beim Mess- und Sendemodul möglichst viele Durchkontaktierungen von Ober- und Unterseite in diesem Bereich eingefügt.

Eine Dipol-Antenne muss Dimensionen in der Größenordnung der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) des zu übertragenden Signals besitzen, während für eine Monopol-Antenne Dimensionen von $\lambda/4$ ausreichen. Tabelle 8 zeigt, dass eine Dipol-Antenne im Frequenzbereich von 2,4 GHz zu groß sein müsste, um sinnvoll am Mess- und Sendemodul untergebracht werden zu können.

Für den Einsatz am Mess- und Sendemodul bieten sich Chipantennen und auf die Lei-

Frequenz	λ	$\lambda/2$	$\lambda/4$
2,4 GHz	12,49 cm	6,25 cm	3,12 cm

Tabelle 8: Wellenlängen einer elektromagnetischen Welle im 2,4-GHz-Band.

terplatte direkt aufgedruckte Antennen an. Keramische Chip-Antennen für eine SMD-Anwendung gibt es von verschiedenen Herstellern und in verschiedenen Ausführungen. Der Vorteil gegenüber gedruckten Antennen ist die oft geringere Größe und die im Datenblatt genau ersichtliche Charakteristik und Effizienz. Für das Mess- und Sendemodul, wurde jedoch eine gedruckte Inverted-F Antenne (Abbildung 25) gewählt, da diese mit einer Chip-Antenne vergleichbare oder bessere Eigenschaften besitzt und die technisch einfachste Lösung darstellt. Der Platzbedarf dieser Antenne beläuft sich auf ungefähr 25×8 mm. Die Antenne wurde nach dem frei verfügbaren Referenzdesign [18] von Texas Instruments entworfen. Die Antennenimpedanz beträgt 50Ω , was auch der Senderingimpedanz entspricht. Diese Antenne besitzt laut Angaben von Texas Instruments eine Effizienz von 80 %, was die typische Effizienz von erhältlichen Chip-Antennen¹⁷ übersteigt.

Am Mikroprozessor CC2650, kann eine Monopol-Antenne durch einen oder zwei seiner Ausgänge betrieben werden. Trotz des höheren Bauteilaufwandes von neun gegen vier Bauelementen, wurde der Betrieb mit zwei Ausgängen gewählt, da er, falls erforderlich, eine ungefähr 50 % höhere Sendeleistung ermöglicht.

6.6 Aufbau des Mess- und Sendemoduls

Das Mess- und Sendemodul besteht aus einer Leiterplatte mit integrierter Antenne, dem Mikrocontroller CC2650, dessen notwendige Beschaltung, sowie drei Steckverbindungen. Die Leiterplatte wurde von einer externen Firma gefertigt. Der Mikrocontroller und seine externe Beschaltung wurde mittels manueller Bestückung und Reflow-Löten (siehe Abschnitt 7) mit der Leiterplatte verbunden. Die drei Steckverbindungen wurden im

¹⁷ $\sim 40 - 75$ %

Anschluss per Hand angelötet.

6.7 Energieverbrauch

Da der Mikro-Controller CC2650 neben eventuellen Sensoren das einzige aktive Bauelement des Mess- und Sendemoduls ist, wird der Energieverbrauch des Moduls maßgeblich von dessen Eigenschaften beeinflusst. Abbildung 26 zeigt den zeitlichen Verlauf der Leistung, bei periodischer Messwerterfassung und anschließender Übertragung, bei der Periodendauer von einer Sekunde. Als Sensor wurde der TMP102 Temperatursensor von Texas Instruments verwendet, welcher mit passender Schnittstelle bereits am Institut vorhanden war.

Abbildung 26 zeigt sehr deutlich, dass die Leistungsaufnahme die meiste Zeit über sehr gering ($\ll 1\text{mW}$) ist und einzelne Operationen des Mikrocontrollers kurzzeitig eine relativ große Menge an Energie verbrauchen. Die dadurch entstehenden Peaks sind deutlich zu erkennen und stellen über die Dauer einer Periode den Großteil des Energieverbrauchs. Die Peaks (a) bis (c) stellen Aktivitäten des Sensorcontrollers und des Temperatursensors dar, während Peak (d) von der Aktivität des Hauptprozessors und dem Sendevorgang der Messdaten her rührt.

Die Leistungsaufnahme zwischen den Peaks wurde mit Hilfe eines Shuntwiderstandes auf $1,99 \pm 0,2 \mu\text{W}$ bestimmt. Abbildung 27 zeigt die Vergrößerung von (d). Durch Integration dieser Kurve wurde der Energieverbrauch des gezeigten Sendevorgangs zu $97,50 \pm 1,76 \mu\text{J}$ ermittelt. (a) bis (c) aus Abbildung 26 ergeben im Mittel jeweils $2,7 \pm 1,1 \mu\text{J}$. Aus diesen Messungen ergibt sich eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von ungefähr $110 \mu\text{W}$ bei einer Messung und Übertragung pro Sekunde. Daraus ist ersichtlich, dass der Energieverbrauch des CC2650 zu rund 90 % durch das Senden der Messdaten zustande kommt.

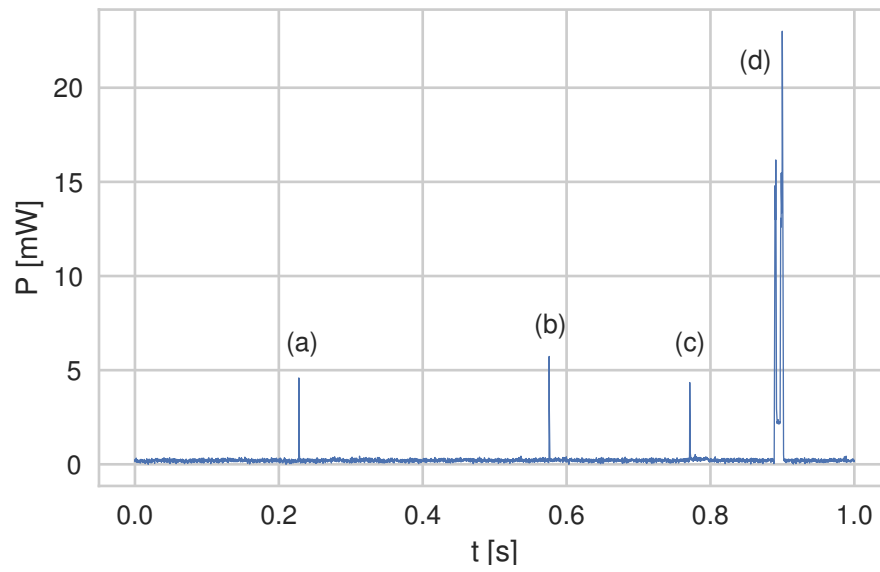


Abbildung 26: Leistungsaufnahme des CC2650 während eines Messzyklus mit Temperatursensor TMP102

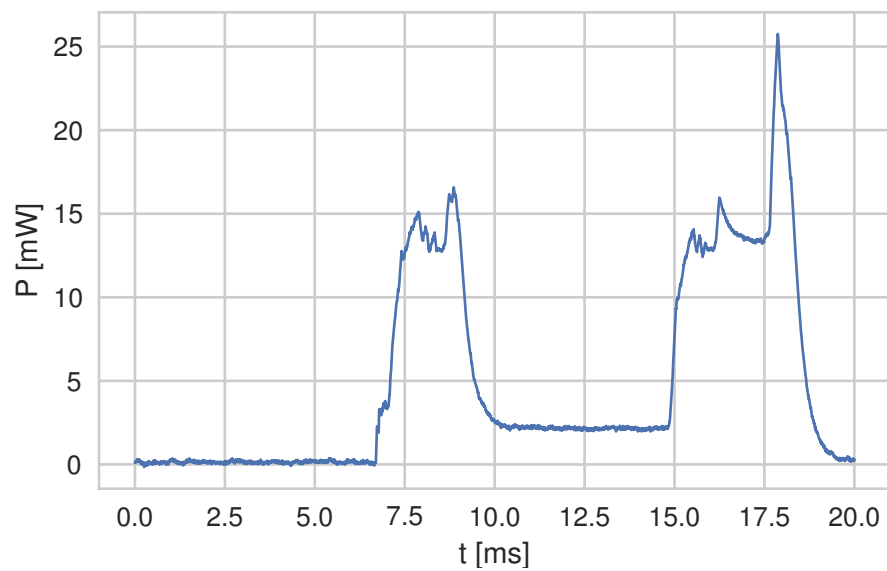


Abbildung 27: Leistungsaufnahme des CC2650 während eines BLE-Sende-Events

7 Aufbau der Module

Beim Design der Sensoreinheit wurde auf eine möglichst geringe Größe Wert gelegt. Aus diesem Grund kamen ausschließlich elektronische Bauteile zur Oberflächenmontage zum Einsatz. Eine Möglichkeit solche Bauteile an eine Leiterplatte zu löten, ist das SMD-Reflow-Verfahren. Dabei wird mit Hilfe einer Edelstahl-Schablone (Abbildung 28), eine dünne Schicht Lötpaste¹⁸ auf die Löt-Pads aufgetragen. Die Bauteile werden im Anschluss unter einem Mikroskop, mittels Pinzette und Hand, auf die Lötstellen gesetzt. Die beim Mess- und Sendemodul verwendete Bauteilgröße von minimal 1,02 x 0,5 mm, stellte sich bei der Handbestückung als schwierig, aber gerade noch machbar heraus. Nachdem die Leiterplatte vollständig bestückt ist, wird sie mit den Bauteilen in einem handelsüblichen Backofen (Abbildung 29) mittels IR-Strahlung erhitzt. Das notwendige Temperaturprofil, welches für ein erfolgreiches Reflow-Löten durchlaufen werden muss, wurde dem Datenblatt der Lötpaste entnommen. Ein manuell gesteuerter Trenntransformator wurde benutzt, um diese Kurve im Rahmen der Möglichkeiten des Ofens, zu durchlaufen. Die benutzten Steckverbindungen wurden zum Abschluss per Hand angelötet, da diese über Durchsteckkontakte verfügen.



Abbildung 28: Schablonen zum Auftragen der Lötpaste



Abbildung 29: Backofen zum Reflow-Löten

Nach dem Löten war das Mess- und Sendemodul fertig aufgebaut. Am Energy-Harvesting-Modul wurde noch ein Kühlkörper mittels Kunststoffschrauben befestigt. Für einen guten thermischen Kontakt zwischen Kühlkörper und TEG, wurde Wärmeleitpaste verwendet. Ein Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet und drei Abstandhalter wurden noch mit Superkleber an der Modulunterseite befestigt, um eine einfache Montage an einer ferromagnetischen Oberfläche zu ermöglichen. Auf Grund der geringen Größe und des geringen Gewichts des Mess- und Sendemoduls, benötigt es neben der Steckverbindung keine weiteren Elemente, um relativ stabil mit dem Energy-Harvesting-Modul verbunden werden zu können.

¹⁸Schichtdicke $\sim 150 \mu\text{m}$; Lötpaste besteht zu ungefähr 90 % aus Lotmetallpulver und 10 % Flussmittel.

8 Fazit und Ausblick

Das Konzept der in dieser Arbeit entwickelten Sensoreinheit hat sich als vielversprechend erwiesen. Das Energy-Harvesting-Modul kann bereits aus relativ geringen Temperaturdifferenzen eine nutzbare Menge an elektrischer Energie erzeugen. Was eine nutzbare Menge an elektrischer Energie ist, wird über den Verbraucher definiert. Aus diesem Grund mussten viele verschiedene Aspekte auf der Erzeuger-, aber auch Verbraucherseite beachtet werden, um einen effizienten Betrieb zu ermöglichen.

Auf der Erzeugerseite muss die Regelelektronik über effiziente Spannungswandler verfügen. Zum Beispiel konnte bei der Spannungsreduktion am Ausgang des Energy-Harvesting-Moduls, durch den Wechsel auf einen Schaltwandler, eine Effizienzsteigerung von bis zu¹⁹ über 25 % erreicht werden. Eine regelmäßige Leistungsanpassung hat sich als kritisch erwiesen, um einen effizienten Betrieb über verschiedene Temperatur- und Leistungsbereiche zu ermöglichen.

Für die Verbraucherseite, wurde ein Mess- und Sendemodul, welches bereits bei einer Leistung von 110 μW in der Lage ist, eine Temperaturmessung pro Sekunde durchzuführen und die Messergebnisse per BLE an einen Empfänger übertragen kann, entwickelt. Um einen möglichst geringen Energieverbrauch zu gewährleisten, ist eine sorgfältige Programmierung des Mikrocontrollers erforderlich, um ihn im Regelbetrieb des Moduls so lange wie möglich in den Ruhemodus zu versetzen. Die sehr geringe Leistungsaufnahme des Moduls in diesem Betriebsmodus²⁰ bietet weitere Entwicklungsmöglichkeiten. Eine Anpassung des Mess- und/oder Sendeintervalls bei sinkender Spannung am Speicherelement kann beispielsweise die Betriebszeit, ohne Energieversorgung durch den TEG, wesentlich²¹ verlängern.

Da der Mikrocontroller über vielen ungenutzte GPIO-Pins verfügt, ist eine Verwendung des Moduls nicht nur zu Mess-, sondern auch zu Regelzwecken denkbar. Auch kann die Software so modifiziert werden, dass auch das Empfangen von Befehlen über Bluetooth möglich ist, was weitere Anwendungsmöglichkeiten eröffnet.

¹⁹ Abhängig von der Spannung am Energiezwischenspeicher

²⁰ $\sim 2 \mu\text{W}$

²¹ Umstellung auf eine Messung alle 3 Sekunden, bei Unterschreiten von 3 V am Speicherelement verdoppelt in etwa die Betriebsdauer, ohne Energieversorgung durch den TEG

Abkürzungen und Begriffserklärungen

A/D Analog/Digital

BLE Bluetooth Low Energy

Boost-Converter Spannungswandler zur Spannungserhöhung; auch Step-Up-Converter

Buck-Converter Spannungswandler zur Spannungserniedrigung; auch Step-Down-Converter

DC-DC-Wandler Gleichspannungswandler

GPIO General Purpose Input Output

I/O Input/Output

I²C Inter-Integrated Circuit

IDE Integrated Development Environment; deutsch: Integrierte Entwicklungsumgebung

I_q Quiescent current; deutsch: Ruhestrom

IR Infrarot

LDO Low Drop-Out; siehe Abschnitt 5.1

MPPT Maximum Power Point Tracking

Mtoe Megatonne Öleinheiten: Energie die bei der Verbrennung von einer Megatonne Rohöl frei wird. 1 Mtoe entspricht 11,63 TWh.

PCB Printed Circuit Board; deutsch: gedruckte Schaltung

RF Radio Frequency; deutsch: Hochfrequenz

SD Standard Deviation

SMD Surface-mount Device; deutsch: oberflächenmontiertes Bauelement

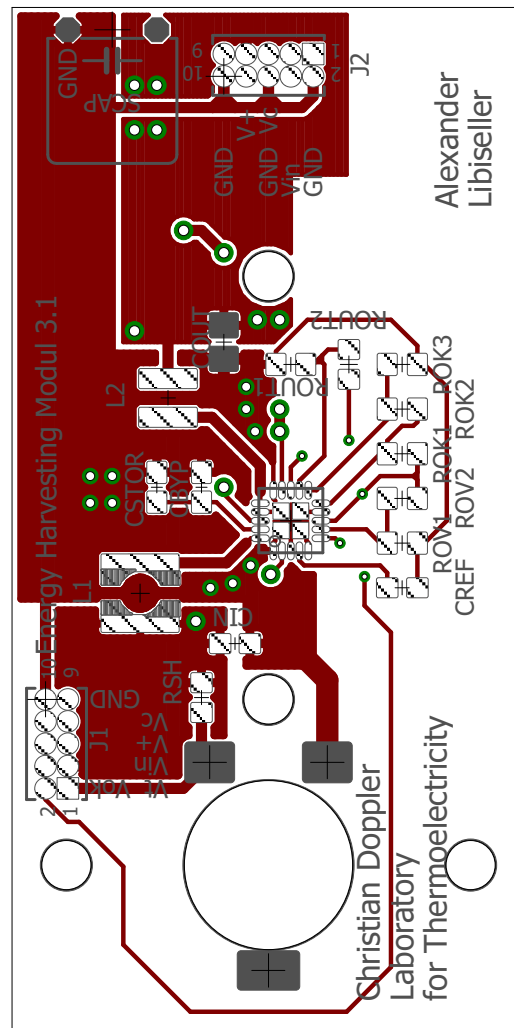
TEG Thermoelektrischer Generator

Literatur

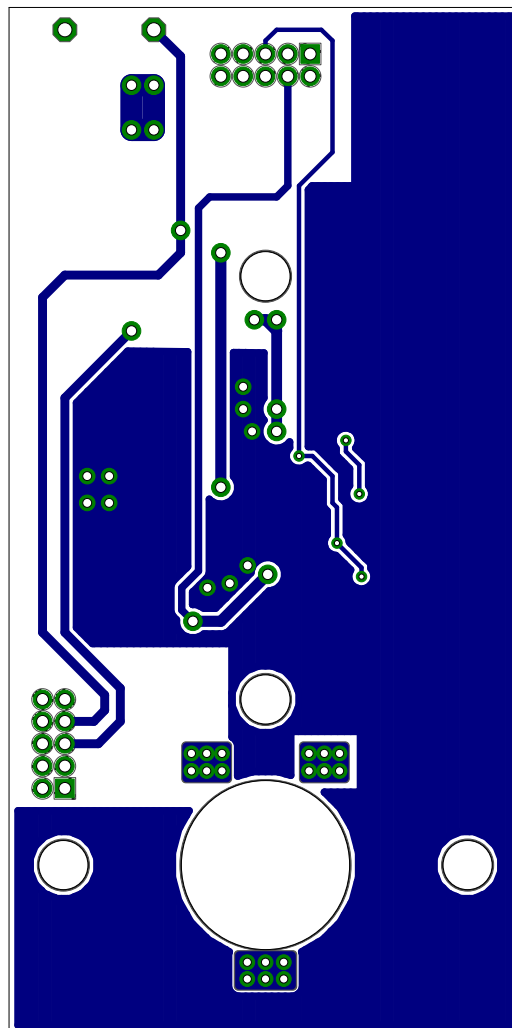
- [1] Bernhard Hinterleitner. „Entwicklung eines durch Abwärme betrieben Moduls zur Versorgung eines autonomen Sensorsystems“. Magisterarb. Technische Universität Wien, 2015.
- [2] International Energy Agency. *Key world energy statistics*. International Energy Agency, 2016.
- [3] Claudia Kemfert und Barbara Praetorius. „Die ökonomischen Kosten des Klimawandels und der Klimapolitik“. In: *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung* 74.2 (2005), S. 133–136.
- [4] N. Scherm, O. AUL und M. Hezel. *Schuh mit integriertem Schrittzähler*. EP Patent App. EP20,130,783,952. 2015. URL: <http://www.google.at/patents/EP2914139A1?cl=de> (besucht am 02. 08. 2017).
- [5] Ling Bing Kong u. a. „Waste Energy Harvesting“. In: *Springer, New York* (2014).
- [6] US DOE. „Waste Heat Recovery: Techonology and Opportunities in US Industry“. In: *Washington DC: US Department of Energy Industrial Technologies Program* (2008).
- [7] Micropelt GmbH. *TGP-651*. 2014. URL: http://micropelt.com/downloads/datasheet_thermogenerator_package.pdf (besucht am 02. 08. 2017).
- [8] L. Kemball-Cook und P. Tucker. *Energy harvesting*. US Patent 8,736,088. 2014. URL: <https://www.google.com/patents/US8736088> (besucht am 02. 08. 2017).
- [9] Arbor Scientific. *Elektromagnetische Taschenlampe*. 2017. URL: <http://www.arborsci.com/electromagnetic-flashlight> (besucht am 02. 08. 2017).
- [10] Pavegen Systems. 2017. URL: <http://www.pavegen.com/> (besucht am 02. 08. 2017).
- [11] Mide Technology. 2017. URL: <http://www.mide.com/collections/vibration-energy-harvesting-with-protected-piezoes> (besucht am 02. 08. 2017).
- [12] Texas Instruments Inc. *BQ25570*. 2016. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf> (besucht am 02. 08. 2017).
- [13] Micropelt GmbH. *TE-CORE*. 2015. URL: http://micropelt.com/downloads/datasheet_te_core.pdf (besucht am 02. 08. 2017).
- [14] Artem Dementyev u. a. „Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee, and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario“. In: *Proceedings of IEEE International Wireless Symposium (IWS)*. IEEE, 2013. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/power-consumption-analysis-of-bluetooth-low-energy-zigbee-and-ant-sensor-nodes-in-a-cyclic-sleep-scenario/> (besucht am 02. 08. 2017).
- [15] NXP Semiconductors. *UM10204 I²C-bus specification and user manual*. 2014. URL: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf (besucht am 02. 08. 2017).

- [16] Texas Instruments Inc. *CC2650*. 2016. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/cc2650.pdf> (besucht am 02.08.2017).
- [17] Texas Instruments Inc. *TI-RTOS: Real-Time Operating System (RTOS) for Microcontrollers (MCU)*. 2016. URL: <http://www.ti.com/tool/ti-rtos-mcu> (besucht am 02.08.2017).
- [18] Texas Instruments Inc. *2.4-GHz Inverted F Antenna*. Techn. Ber. 2017. URL: <http://www.ti.com/lit/an/swru120c/swru120c.pdf> (besucht am 02.08.2017).

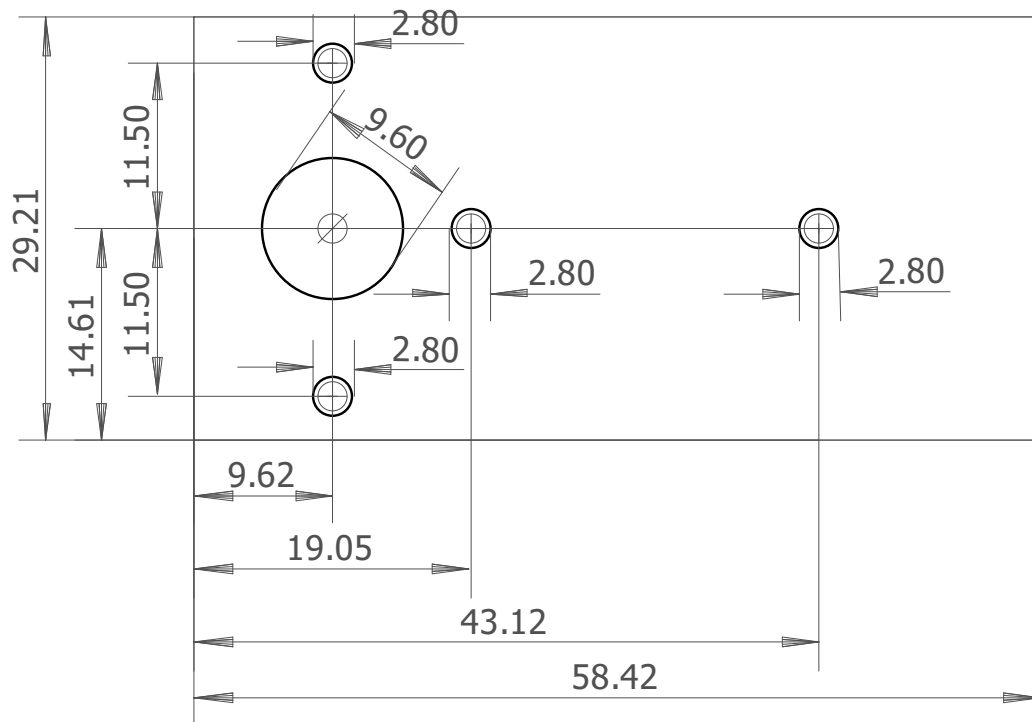
A.2 Board-Layout des Energy-Harvesting-Moduls - top



A.3 Board-Layout des Energy-Harvesting-Moduls - bottom



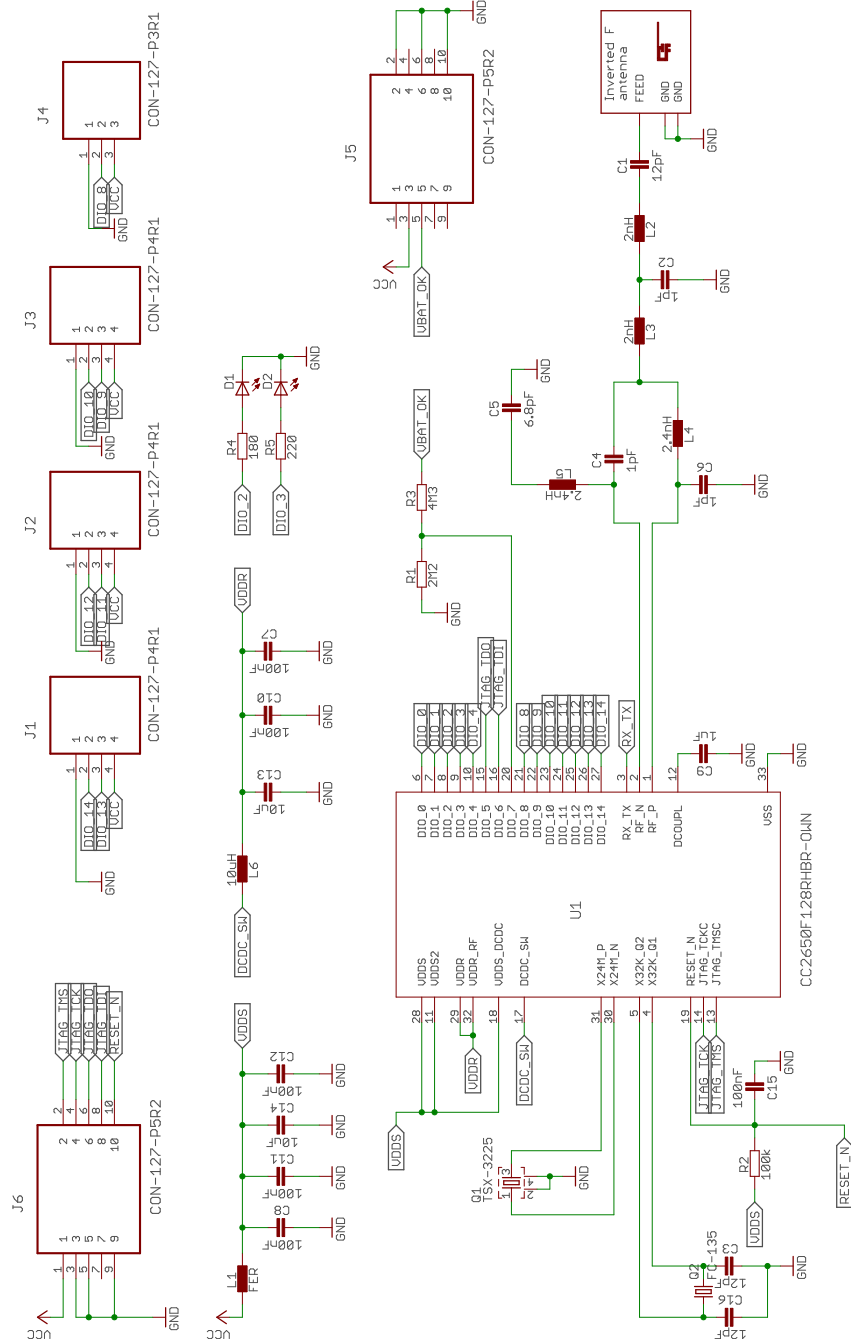
A.4 Dimensionen des Energy-Harvesting-Moduls in mm



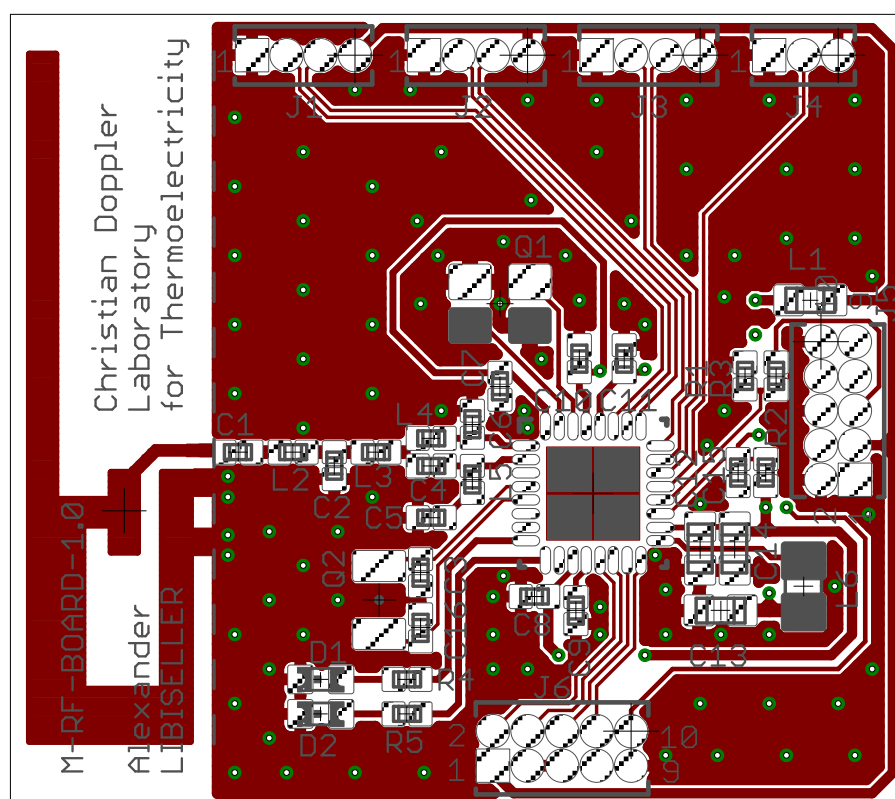
A.5 Bestückungsliste des Energy-Harvesting-Boards

Anz.	Name	Beschreibung	Wert	Package
1	SCAP	Superkondensator	470 mF	-
1	RSH	Shunt-Widerstand	100 mΩ	0603
1	ROV1	-	3,3 MΩ	0603
3	ROUT1, ROUT2, ROV2	-	5,6 MΩ	0603
1	ROK1	-	1 MΩ	0603
1	ROK2	-	4,7 MΩ	0603
1	ROK3	-	3,9 MΩ	0603
1	CBYP	-	100 nF	0603
1	CREF	-	10 nF	0603
1	COUT	-	22 uF	0804
2	CIN, CSTOR	-	4,7 uF	0603
1	L1	-	22 uH	WE-TPC 2811/2813
1	L2	-	10 uH	WE-TPC 3816
2	J1, J2	10WAY CONN HEADER	10 uH	1,27 mm
1	U1	BQ25570	-	-

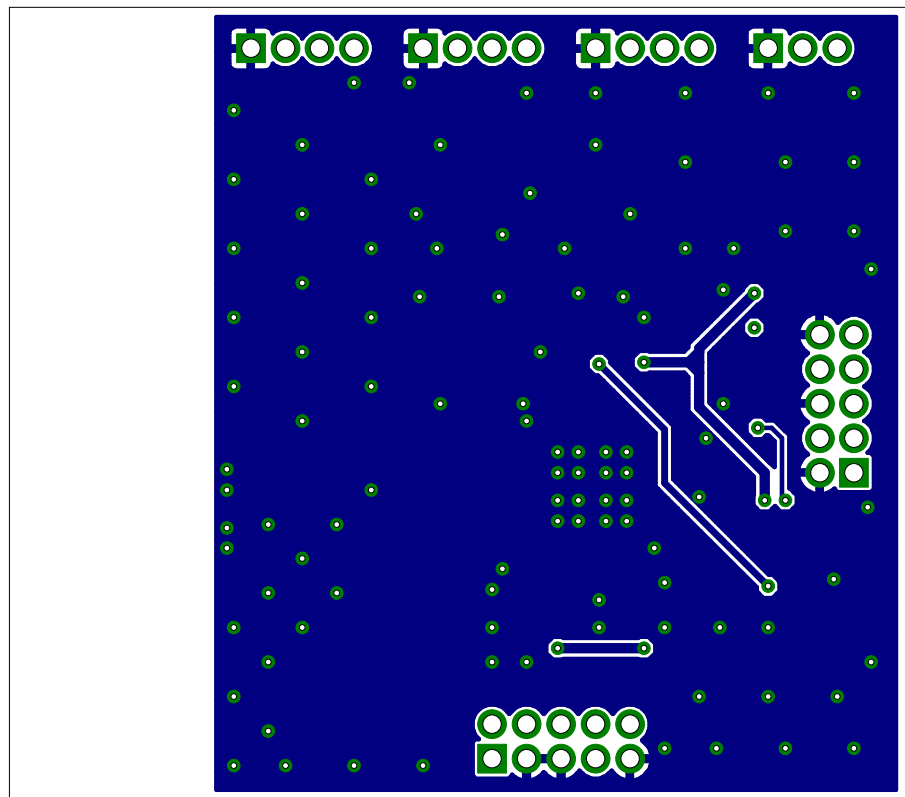
A.6 Schaltplan des Mess- und Sendemoduls



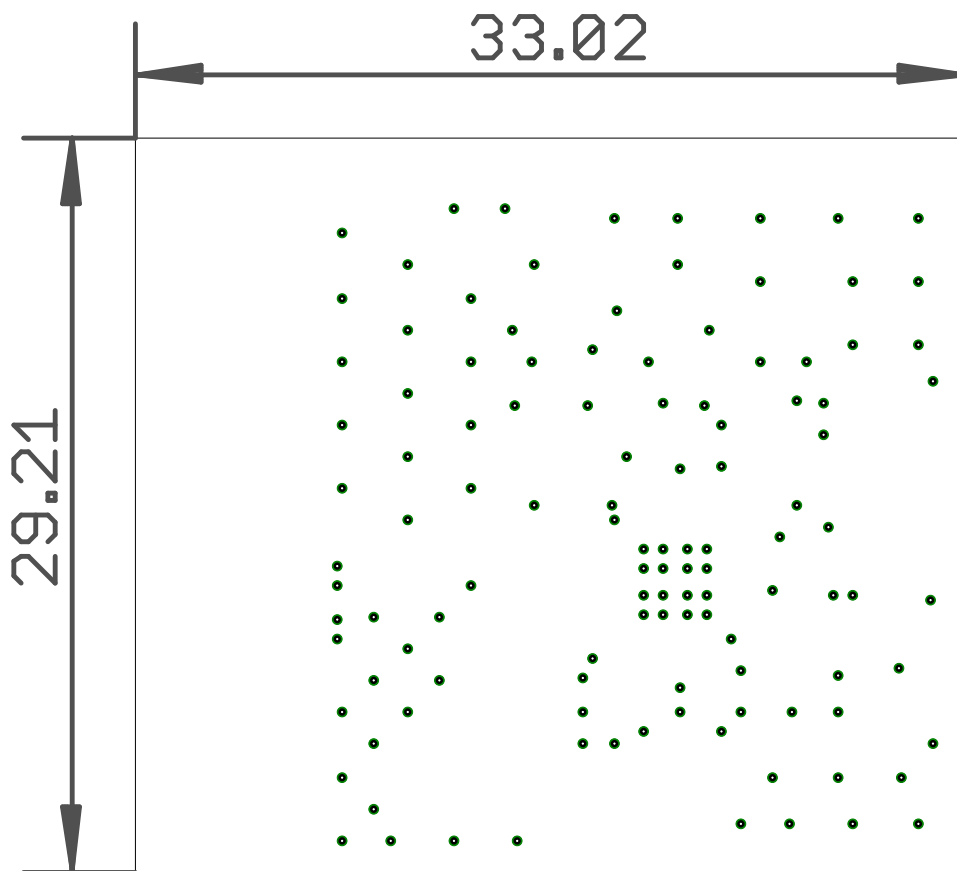
A.7 Board-Layout des Mess- und Sendemoduls - top



A.8 Board-Layout des Mess- und Sendemoduls - bottom



A.9 Dimensionen des Mess- und Sendemoduls in mm



A.10 Bestückungsliste des Mess- und Sendemoduls

Anz.	Name	Beschreibung	Wert	Package
2	D1, D2	LED	red, green	0603
1	R1	-	2,2 M Ω	0402
1	R2	-	100 k Ω	0402
1	R3	-	4,3 M Ω	0402
1	R4	-	180 Ω	0402
1	R5	-	220 Ω	0402
3	C1, C3, C16	-	12 pF	0402
3	C2, C4, C6	-	1 pF	0402
1	C5	-	6,8 pF	0402
5	C7, C8, C10, C11, C15	-	100 nF	0402
1	C9	-	1 μ F	0402
1	C12	-	100 nF	0603
2	C13, C14	-	10 μ F	0603
1	C12	-	100 nF	0603
1	L1	Ferritkern	-	0603
2	L2, L3	-	2 nH	0402
2	L4, L5	-	2,4 nH	0402
1	L6	-	10 μ H	0805
1	U1	CC2650	-	-
1	U\$1	2,4 GHz Inverted F Antenna	-	-
3	J1, J2, J3	4WAY CONN HEADER	-	1,27 mm
1	J4	3WAY CONN HEADER	-	1,27 mm
2	J5, J6	10WAY CONN HEADER	-	1,27 mm
1	Q1	TSX-3225 Oszillator	-	-
1	Q2	FC-135 Oszillator	-	-