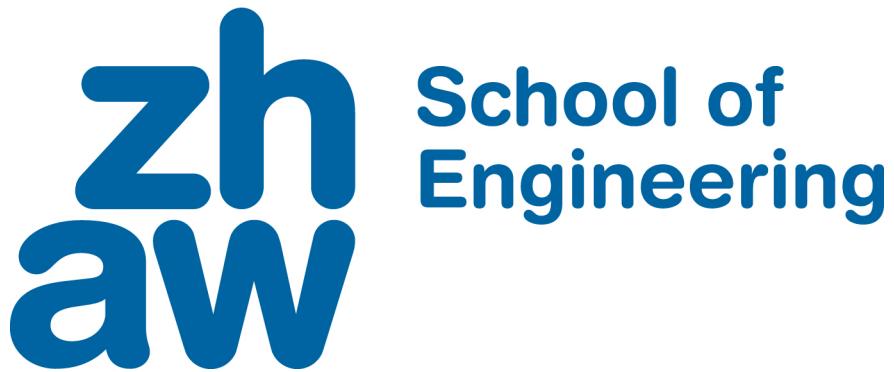


Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Projektarbeit 2015

Bicycle computer and sensoric powered with harvested
energy

Vorgelegt von:
Roman Schneider, Daniel Studer

Hauptbetreuung:
Marcel Meli

Nebenbetreuung:
Dario Dündar

Winterthur, Dezember 2015

ERKLÄRUNG BETREFFEND DAS SELBSTÄNDIGE VERFASSEN EINER PROJEKTARBEIT AN DER SCHOOL OF ENGINEERING

Mit der Abgabe dieser Projektarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle zitierten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt nachgewiesen sind, d.h. dass die Projektarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten der Paragraph 39 (Unredlichkeit und Verfahren bei Unredlichkeit) der ZHAW Rahmenprüfungsordnung sowie die Bestimmungen der Disziplinarmassnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum

Unterschrift

Ort, Datum

Unterschrift

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wird die Problematik „Energy Harvesting“ in Zusammenhang mit einem Fahrrad thematisiert. Es wird hinterfragt, inwiefern es möglich ist, ein Fahrrad in Bewegung als Energiequelle nutzen zu können. Dies ist in der heutigen Zeit - in welcher viel Energie verbraucht wird - ein relevantes Thema.

Das Ziel besteht darin, einen batterielosen Geschwindigkeitssensor für ein Fahrrad zu entwickeln, welcher ein Smartphone als Anzeige verwendet. Es soll eine Hardware entwickelt werden, welche aus der Radbewegung Energie generiert, die Radumlaufzeit erfasst und diese an das Smartphone kabellos weitergibt. Als Untersuchungsmethoden sollen Berechnungen, Simulationen und vor allem praktische Experimente dienen.

Das gesamte zu erreichende System wird aufgeteilt in die Energieerzeugung, die Energieverwaltung, die Datenverarbeitung und die Datenausgabe. Die Energieerzeugung soll mittels Induktion und einem Magneten realisiert werden, die Verwaltung der Energie mit einem Power Management Chip. Dieser soll auf die Funktionsweise mit der entwickelten Hardware konfiguriert und geprüft werden. Die Datenverarbeitung wird mit einem Embedded System und das Versenden der Daten über einen Bluetooth Chip realisiert, welche über die erzeugte Energie betrieben werden. Der letzte Teil besteht darin, die gemessene Radumlaufzeit mit einem Smartphone zu empfangen und auszugeben. Dafür wird eine Applikation programmiert.

Die Energiegewinnung wird mit einem Magneten in der Speiche des Fahrrades und einer Spule am Rahmen, in der eine Spannung induziert wird, gelöst. Das Problem ist dabei die Weitergabe der Energie an den Power Management Chip, welcher nur eine limitierte Gleichspannung aufnehmen kann. Dies wird mit einem Brückengleichrichter und Diode zur Begrenzung der Spannung gelöst. Der Power Management Chip konnte erfolgreich konfiguriert werden, damit das verwendete Embedded System die Radumlaufzeit messen und diese per Bluetooth versenden kann.

Es zeigt sich, dass genügend Energie mit einem Fahrrad erzeugt werden kann, um einen Geschwindigkeitssensor zu entwickeln. Die Hardware hat jedoch noch Potenzial, mehr Energie zu gewinnen und zu speichern, ebenfalls kann die Software für das Embedded System weiterentwickelt werden, damit um einiges weniger Energie verbraucht wird.

ABSTRACT

The topic of this scientific work is Energy Harvesting in the context of a bicycle. The question is, if it is possible to use a riding bicycle as an energy source. This is an essential topic at present time because of the large consumption of energy.

The aim of this work is to develop a battery-less speed sensor which displays the current velocity on a smartphone. The hardware should be able to generate energy from the wheel rotation, capture the round-trip time and transmit this time to a smartphone which calculates and displays the speed. The research methods are calculations, simulations and especially practical experiments.

The whole System will be split up into four subsystems. These are the energy generation, the energy management, the data processing and the data display. The energy should be generated by induction. The energy will be managed by a power management chip which should be configured and tested on the developed hardware. In a further step an embedded system will process and send the incoming data in form of a time to a smartphone. All these components are supplied by the generated energy. The final step is to program an application that can receive and display the data.

The energy will be generated by a magnet that induces a voltage into a coil. Because of the power management chip the voltage has to be limited to a DC voltage. This problem is solved by a fullwave rectifier and diodes which limit the voltage. The power management chip could be successfully configured and the embedded system is able to capture the round-trip time and send it to a smartphone.

The result shows that enough energy can be generated for a speed sensor. The hardware could be improved to generate and save more energy. Also the software could be developed with the aim to consume less energy.

VORWORT

Das gemeinsame Interesse am Fahrradfahren und die komplette Entwicklung einer Hard- und Software für eine Fahrradanwendung hat uns dazu bewegt, diese Projektarbeit zu schreiben. Dabei geht es um die Entwicklung eines batterielosen Geschwindigkeitssensors für das Fahrrad. Wir wollten nicht nur eine theoretische Sichtweise eines Systems beschreiben, sondern wollten selbst aktiv werden im Designen, Entwickeln, Aufbauen und Testen eines kompletten Systems. Es war uns wichtig, von einer Idee ein Produkt zu entwerfen. Dass bei der Abgabe dieser Arbeit ein brauchbares Produkt vor uns liegen soll, hat uns sehr positiv gestimmt. Ein grosses Interesse gehört der Vielfältigkeit dieser Projektarbeit, die das Entwickeln der Hardware und einer geeigneten Software und dazu auch noch eine Smartphone-Applikation zu schreiben beinhaltet.

Das erreichte Endprodukt, einen batterielosen Geschwindigkeitssensor für das Fahrrad, überzeugt uns jedoch noch nicht ganz, da noch einige Probleme bei der aktuellen Lösung vorliegen.

Diese Arbeit richtet sich an interessierte Personen zu Energy Harvesting und Low Energy Applikationen. Ein Vorwissen im Bereich Elektronik ist dafür jedoch notwendig, um gewisse Lösungsansätze zu verstehen.

Eine Projektarbeit wie diese braucht natürlich auch gewisse Hilfestellungen von externen Personen. Vielen Dank an Prof. Dr. Marcel Meli für die Hilfestellungen und Vorschläge als Hauptbetreuer dieser Arbeit. Dem Nebenbetreuer Dario Dündar wollen wir natürlich auch danken, für die uns zur Verfügung gestellten Zeit für Messungen und Fragestellungen. Einen weiteren Dank wollen wir den Mitarbeitern vom InES an der ZHAW, Lukas Hegetschweiler und Manuel Brütsch zukommen lassen für die Hilfestellungen zur Software und Hardwarekonfiguration der verwendeten Bauteile.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
1.1 Ausgangslage	3
1.2 Zielsetzung / Aufgabenstellung / Anforderungen	4
1.2.1 Aufgabenstellung	4
1.2.2 Anforderungen	5
1.2.3 Übersicht der Arbeit	5
1.2.4 Notation	6
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Energy Harvesting	7
2.2 Induktion	7
2.2.1 Magnet	7
2.2.2 Spule	8
2.2.3 Induzierte Spannung	8
2.3 Vorgaben der Hardware	9
2.3.1 Power Management	9
2.3.2 Microcontroller und Bluetooth	9
3 Vorgehen	10
3.1 Harvesting Quelle und Hardware	10
3.1.1 Grundüberlegungen	10
3.1.2 Experimente und Vorgehen	10
3.1.3 Spannungserzeugung mittels Induktion durch Magnet	11
3.1.4 Spannungskennlinie der Spule PREMO 3015N-0238J 32/06	14
3.1.5 Gleichrichten der Wechselspannung	15
3.1.6 Pulsdetektion	22
3.1.7 Schema der realisierten Hardware	25
3.2 Power Management	26
3.2.1 Übersicht EM8500	26
3.2.2 Funktionsweise	27
3.2.3 Vorgehen	28
3.2.4 Einstellungen	28
3.2.5 Finale Konfiguration	35
3.3 Daten Verarbeitung - TI-SensorTag	37
3.3.1 Übersicht	37
3.3.2 Bluetooth Low Energy	37
3.3.3 Software	37
3.4 Daten Ausgabe - Applikation	42
4 Resultate	44
5 Diskussion und Ausblick	46

6 Verzeichnisse	47
6.1 Glossar und Abkürzungen	47
6.2 Literaturverzeichnis	47
6.3 Abbildungsverzeichnis	48
6.4 Tabellenverzeichnis	49
A Datenblätter	50
B Eigenschaften Neodym Magnete	51
C Matlab File	52
D Anforderungsliste	62
E Zeitplan	63
F Konfiguration EM8500	64
G Firmware TI-SensorTag	65
H Quellcode Android Applikation	66
I Daten CD	67

1 EINLEITUNG

Jeden Tag kommen neue elektronische Geräte auf den Markt, welche alles mögliche messen und die gesammelten Daten drahtlos zu einem Computer, Smartphone oder ähnlichem senden. Dies können zum Beispiel Temperatur-, Feuchtigkeits- oder Helligkeits-Sensoren sein, die im Haus gewisse Werte überwachen und aus den gesammelten Daten die Heizung, Rollläden oder anderes steuern. Da diese Sensoren die Daten oftmals drahtlos über WIFI, Bluetooth oder anderes versenden, müssen sie nicht mehr mühsam per Kabel verbunden sein und können somit überall platziert werden. Ein Problem ist jedoch die Stromversorgung der Sensoren. Die meisten heutigen Geräte werden mit einer kleinen Batterie betrieben und können dank sehr geringem Stromverbrauch meist Jahre verwendet werden, bevor die Batterie ausgewechselt werden muss. Genau dieses Auswechseln der Batterie ist je nach Standort des Sensors problematisch bis fast unmöglich. Hier kommt der Begriff Energy Harvesting zum Gebrauch. Energy Harvesting - zu Deutsch „Energie Ernten“ - bedeutet Energie aus der Umgebung ohne Batterie zu gewinnen. Weiteres hierzu ist in Kapitel 2.1 zu erfahren. Diese Projektarbeit macht sich diese Technik zu nutze, um einen batterielosen Geschwindigkeitssensor für das Fahrrad zu entwickeln der die Geschwindigkeitsdaten drahtlos an ein Smartphone sendet.

1.1 Ausgangslage

Um ein genaues Bild über den Stand der Technik und bestehende Produkte im Bereich Fahrradcomputer zu bekommen, ist eine Marktanalyse unumgänglich. Das Hauptinteresse liegt dabei in der Energiegewinnung. Es gibt auf dem Markt eine Vielzahl von Fahrradcomputern. Einfache Modelle, welche die Fahrgeschwindigkeit anzeigen, sind ab einem Preis von 20 bis 30 CHF erhältlich. Diese empfangen von einem externen Sender - meist kabellos - die benötigte Information. Diese Information wird über einen Magneten, welcher an einer Speiche am Fahrrad montiert wird, gewonnen. Nachteile dieser Sets - bestehend aus Computer, Sender/Sensor, Magnet und diversen Befestigungszubehör - sind die Anzahl notwendiger Komponenten und dass sowohl Fahrradcomputer, wie auch Sender/Sensor mit einer Batterie betrieben werden müssen. Die Batterien sorgen für einen zusätzlichen Aufwand, indem man diese ständig kontrollieren und aufladen muss. Für einen enthusiastischen Fahrradfahrer, der seine Leistung verfolgen will, sind diese Fahrradcomputer sicherlich gut geeignet. Für diesen Fall gibt es Modelle auf dem Markt, die nicht nur die Geschwindigkeit messen, sondern zusätzlich ein Höhenprofil erstellen, die gefahrenen Kilometer aufzeigen, diverse Statistiken liefern, welche man am Computer zu hause anschliessen kann, um seine Leistung abzuspeichern. Solche Fahrradcomputer haben aber ihren Preis und sind ab 60 CHF zu ersteigern¹. Eine weitere Möglichkeit eines Fahrradcomputers stellt das Smartphone dar, beziehungsweise eine Applikation dafür. Man benötigt zusätzlich eine Halterung für das Smartphone. Die Apps sind grösstenteils gratis und sehr einfach in der Bedienung. Der Nachteil dieser Variante besteht darin, dass die Applikationen mit Global Positioning System - GPS - arbeiten. Damit ist man einerseits vom Netz abhängig und anderseits verbraucht der Smartphone-Computer sehr viel Energie durch den Gebrauch von GPS. Will man eine längere Fahrradtour unternehmen, ist diese Variante unbrauchbar.

¹www.bikester.ch

Diese zwei genannten Möglichkeiten dominieren den Markt. Betrachtet man den Stand der Technik, bezogen auf die Energieversorgung, beziehungsweise die Energiegewinnung, so existiert noch nicht viel im Bereich „Energy Harvesting“. Die „Google Patent Suche“ ist sehr gut geeignet, um mittels ein paar Stichworten mehr über den Stand der Technik zu erlangen. Zusammengefasst geht aus diesen Recherchen hervor, dass ein paar Systeme entwickelt worden sind, um Energie mittels Harvesting zu gewinnen und diese sinnvoll einzusetzen. In den meisten Fällen besteht das Ziel, mittels Harvesting Fahrradlampen zu betreiben. Oft sind es sehr komplexe Lösungen, welche mit der Herstellung des Fahrrades einhergehen und somit nur mit sehr grossem Aufwand nachrüstbar sind. Nachfolgend sind ein paar interessante Patente aufgelistet²:

- Beleuchtungsvorrichtung für ein Fahrrad
- Energy harvesting device
- Bicycle with a bicycle-mounted energy collector
- Bicycle electrical generator hub
- Electric gernerator for bicycle

Zum Schluss sei noch vermerkt, dass die elektrisch betrieben Fahrräder nicht beleuchtet werden, da diese bereits mit einem Fahrradcomputer ausgestattet sind und somit für ein mögliches Zielpublikum nicht in Betracht kommen.

1.2 Zielsetzung / Aufgabenstellung / Anforderungen

1.2.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Projektarbeit soll für das Institut für Embedded Systems, kurz InES, an der ZHAW³ ein batterieloser Geschwindigkeitssensor entwickelt werden, welcher es ermöglicht, ein Smartphone als Fahrradcomputer zu verwenden. Die meisten Geschwindigkeitssensoren messen die Radumdrehungsfrequenz, um dann zusammen mit dem Radumfang die Geschwindigkeit zu ermitteln. Dies geschieht, indem ein Magnet an einer Speiche befestigt wird und ein fix montierter Magnetsensor am Fahrradgestell jeden Magnetdurchlauf dem Fahrradcomputer meldet. Dieses Prinzip hat den Vorteil, dass jedes Fahrrad nachträglich mit einem Tachometer ausgerüstet werden kann.

Der batterielose Geschwindigkeitssensor soll nach diesem Prinzip funktionieren und die Magnetdurchläufe drahtlos dem Fahrradcomputer (hier dem Smartphone) melden. Die dafür benötigte Energie soll er aus dem Magnetdurchlauf selbst gewinnen. Für diese Energiegewinnung soll ein Energy Harvester entwickelt werden, der ein eigenes Embedded System speist. Die selbst entwickelte Hardware soll die Radrotationen messen, die Geschwindigkeit berechnen und alle Informationen per Bluetooth Low Energy an ein Smartphone senden. Um die Daten auf dem Smartphone zu visualisieren, soll eine App geschrieben werden.

²www.google.ch/patents (Stichwort „Energy Harvesting Bicycle“)

³siehe unter <https://www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/ines/>

1.2.2 Anforderungen

Die grundsätzlichen Anforderungen bei dieser Arbeit sind:

1. Es soll mittels einem Magneten und einer Spule jeder Magnetdurchlauf registriert werden. Mit dieser Information soll dann, zusammen mit dem Raddurchmesser, die Geschwindigkeit ermittelt werden.
2. Die benötigte Energie für die Hardware soll mittels Energy Harvesting aus dem umlaufenden Magneten erzeugt werden und mittels Power Management verwaltet werden.
3. Die berechnete Geschwindigkeit soll per Bluetooth Low Energy an ein Smartphone gesendet und mit einer Applikation angezeigt werden.

Zusätzliche Anforderungen, so wie die hier aufgeführten, findet man im Anhang D. Die Anforderungen wurden mit Wunschforderungen erweitert. Diese sind mit einem W gekennzeichnet und sind nicht zwingend zu erreichen. Sie haben den Zweck, den Horizont zu erweitern, um eine best mögliche Lösung zu finden.

1.2.3 Übersicht der Arbeit

Die gesamte Projektarbeit lässt sich in fünf Teifunktionen aufteilen - siehe Abbildung 1.1. Das Entwickeln der Hardware soll in dieser Arbeit die Hauptaufmerksamkeit haben. Die Verarbeitung, Übertragung und Ausgabe der Daten sind sekundär, aber immer noch ein wichtiger Teil im Gesamtrahmen, damit das Projektziel erfüllt wird.

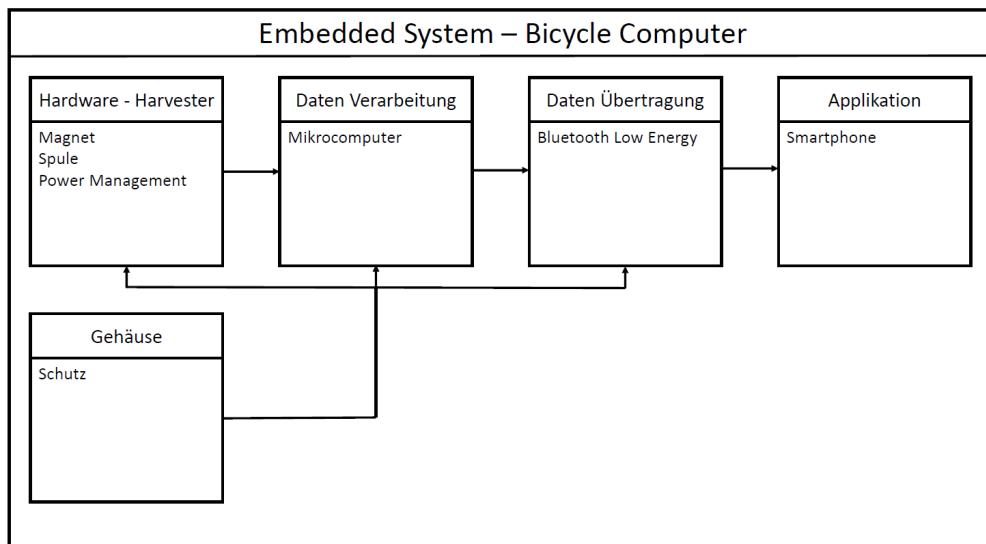


Abbildung 1.1: Die fünf Teifunktionen der Projektarbeit

1.2.4 Notation

In dieser Arbeit werden einige Symbole verwendet, welche in folgender Tabelle 1.1 aufgelistet und beschrieben sind.

Symbol	Beschreibung	Einheit
B_R	Remanenzflussdichte eines Magneten	[T]- Tesla
u	Spannung	[V]- Volt
i	Strom	[A] - Ampère
L	Induktivität der Spule	[H]- Henry
H	magnetische Feldstärke	$\frac{A}{m}$
ϕ	magnetischer Fluss	[Wb]- Weber
J	Stromdichte in einem Leiter	$\frac{A}{mm^2}$
v	Geschwindigkeit	$\frac{km}{h}$ oder $\frac{m}{s}$
W	Energie	[J]- Joule
C	Kondensator	[F]- Farad

Tabelle 1.1: Verwendete Symbole in dieser Arbeit

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Energy Harvesting

Die wörtliche Übersetzung von Energy Harvesting ist „Energie Ernten“. Man versteht darunter die Gewinnung von elektrischer Energie aus der Umgebung, indem Quellen, wie Vibration, Bewegung, Temperaturunterschied, Strömung oder Druck genutzt werden. Für drahtlose Sensoren, die ihre Daten in einem gewissen Intervall an einen Empfänger senden ist diese Technik sehr sinnvoll, da ansonsten die Batterie ausgewechselt werden muss [1]. Bei einigen Systemen ist dies aber nicht mehr möglich, da sie bereits bei der Produktion so verbaut werden, dass man gar keine Batterie auswechseln könnte. Ein geeignetes Beispiel hierfür ist die Überwachung vom Reifendruck im innern des Reifens. Über Energy Harvesting kann der Senor aber gespiesen werden und somit drahtlos seine Daten versenden [2].

Meist ist die gewonnene Energie sehr gering, deshalb werden solche Systeme, welche Energie harvesten, auch als Nanogeneratoren bezeichnet.

Für diese Projektarbeit wird die Bewegung eines Fahrradrades als Quelle genutzt. Dabei soll an einer Fahrradspeiche ein Magnet befestigt werden und dadurch in einer Spule am Fahrradrahmen eine Spannung induziert werden.

2.2 Induktion

Für die Erzeugung der Energie wird auf die Induktion zurückgegriffen. In dieser Arbeit soll mit einem Magneten bzw. mit dessen Magnetfeld eine Spannung in einer Spule induziert werden.

2.2.1 Magnet

Es gibt verschiedene Arten von Magneten. In erster Linie lassen sie sich nach dem verwendeten Material einteilen und auch nach ihrer Geometrie. Je nach verwendetem Material fallen die Magnete unterschiedlich stark aus. Zusätzlich ist nicht jedes Material rostfrei und deshalb - ungeschützt - nur für den trockenen Einsatz geeignet. Die Geometrie des Magneten wählt man je nach Anwendung. Bezüglich Material wird hier auf die Ferrit- und Neodym-Magnete eingegangen. Diese beiden Typen sind auf dem Markt weit verbreitet, in allen Formen erhältlich und verlieren ihre Magnetkraft nur durch spezielle äußere Einwirkungen. Entscheidende Faktoren bezüglich der Eigenschaften sind:

- Neodym besitzt eine höhere Haltekraft und somit eine grösse Remanenzflussdichte B_R , welche einen direkten Einfluss auf die induzierte Spannung in einer Spule hat. Richtwerte sind für Ferrit-Magnete 0.2...0.4 T, für Neodym-Magnete 1.0...1.3 T.
- Ferrit ist rostfrei und somit besser für den Ausseneinsatz geeignet als Neodym. Jedoch sind Neodym-Magnete auf dem Markt erhältlich, welche durch einen Gummiüberzug vor Korrosion geschützt sind.
- Ferrit-Magnete können höheren Temperaturen ausgesetzt werden, ohne an Remanenzflussdichte zu verlieren. Sie können bis zu 250 °C aushalten.

Wie bereits erwähnt, besteht die Möglichkeit, dass ein Magnet seine Remanenzfeldstärke - also seine eigentliche, physikalische Kraft - verliert oder sich diese abschwächt. Bezüglich

diesem Projekt besteht dafür keine Gefahr. Denn zum einen geschieht dieser Effekt durch extreme Temperaturen oder durch eine sogenannte Koerzitive Feldstärke, eine Gegenfeldstärke zur Remanenzfeldstärke, welche angelegt werden muss, um die Remanenz auszulöschen. Weiteres hierzu kann in [3] gefunden werden.

2.2.2 Spule

Die wesentliche Eigenschaft einer Spule ist die Induktivität L . An der Induktivität ist die Spannung u proportional zur zeitlichen Änderung des Stromes i [4].

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

$$i = \frac{1}{L} \int u dt + I_0 \quad (2.2)$$

Fliest ein Strom in einer Spule, so entsteht ein Magnetfeld mit der Feldstärke H . Wobei N die Anzahl Windungen der Spule beschreibt und l deren Länge.

$$H = I \cdot \frac{N}{l} \quad (2.3)$$

Besteht ein Magnetfeld, so ergibt sich die Flussdichte B mit μ_r , der magnetischen Materialkonstante und μ_0 , der magnetischen Feldkonstante.

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (2.4)$$

Die ideale Induktivität nimmt elektrische Energie auf und gibt diese als elektrische Energie wieder ab. Sie setzt keine Energie in Wärme um. Die Energie W wird im magnetischen Feld gespeichert und beträgt:

$$W = \int u(t) \cdot i(t) dt + W_0 \quad (2.5)$$

Spulen sind in diversen Formen erhältlich. Ein wichtiger Aspekt sind Spulen mit Eisenkern. Ein Eisenkern hat folgende Konsequenzen:

- bündelt den magnetischen Fluss ϕ
- vergrössert die magnetische Flussdichte B
- Eisenkern aus Blech: zur Verhinderung von Wirbelstromverlusten

Ein weiterer Aspekt ist, der in Spulen eingesetzte Draht. Dieser ist aus dem leitfähigen Material Kupfer und mit einem Lack abgeschirmt. Es muss beachtet werden, dass der Draht nur bis zu einer bestimmten Stromstärke belastet werden kann. Je grösser der Durchmesser des Drahtes, desto grösser die maximale Stromstärke. Ein Kupferdraht sollte die Stromdichte J von 1...5 A/mm² nicht überschreiten, da er sich sonst zu stark erwärmt.

2.2.3 Induzierte Spannung

Befindet sich eine Spule in einem dynamischen Magnetfeld, wird in der Spule eine Spannung induziert. Bei der induzierten Spannung U_{ind} in einer Spule, handelt es sich um eine

Wechselspannung. Sie liegt der dritten Maxwelschen Gleichung zu Grunde. A ist dabei die eingeschlossene Fläche durch die Spulenwicklungen [5].

$$U_{ind} = -\frac{d}{dt} \int B dA \quad (2.6)$$

Geht man davon aus, dass die magnetische Flussdichte und die eingeschlossene Fläche senkrecht aufeinander stehen und die Fläche durch eine Spule hervorgeht, kann man das Integral ersetzen durch:

$$\int B dA = \phi \cdot N = B \cdot A \cdot N \quad (2.7)$$

Somit berechnet sich die induzierte Spannung in einer Spule durch:

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.8)$$

Zusammengefasst kann man die induzierte Spannung beeinflussen durch:

- die eingeschlossene Fläche A der Spule
- die Bewegungsgeschwindigkeit v des Magneten, welche Einfluss auf dt hat
- die magnetische Flussdichte des Magneten
- die Anzahl Windungen der Spule

2.3 Vorgaben der Hardware

2.3.1 Power Management

Da auf dem Markt im Bereich Power Management Chips bereits sehr viele Bauteile erhältlich sind, wird der Power Management Chip für diese Arbeit vorgegeben. Dabei handelt es sich um den im September 2015 erschienenen EM8500 von EM-Microelectronics¹. Dieser Chip ist ausgelegt für Energy Harvesting Quellen wie Solarzellen oder Thermoelektrische Harvester, die einen Spannungsbereich von 0 V - 2 V DC liefern. Beide genannten Harvesting Quellen liefern einen Gleichstrom oder eine Gleichspannung. Die Schwierigkeit besteht nun darin, eine geeignete Hardware zu entwickeln, um die induzierte Spannung in der Spule so aufzubereiten, dass daraus eine Gleichspannung in dem gewünschten Bereich entsteht. Weiteres zu diesem Chip kann im Kapitel 3.2 und im Datenblatt im Anhang A gefunden werden.

2.3.2 Microcontroller und Bluetooth

Um sich in dieser Arbeit auf das Power Management und die Hardware für das Harvesting zu fokussieren, wird der Microcontroller und der Bluetooth Chip ebenfalls vorgegeben. Hierfür bietet Texas Instruments² einen Chip an, der einen Arm-Cortex M3 Microcontroller und einen Bluetoothchip in einem Chip integriert hat. Es handelt sich dabei um den CC2650. Dieser Chip verspricht einen sehr geringen Stromverbrauch im Standby Modus. Für diese Projektarbeit wird der TI-SenorTag gebraucht, welcher diesen Chip und bereits verschiedene Sensoren auf einer kleinen Hardware integriert hat. Dies ist im Kapitel 3.3 genauer beschrieben.

¹siehe auf www.emmicroelectronics.com

²www.ti.com

3 VORGEHEN

3.1 Harvesting Quelle und Hardware

3.1.1 Grundüberlegungen

Die Hardware soll so ausgelegt werden, dass sie die benötigte Energie als Harvester erzeugt und aus einer Wechselspannung eine Gleichspannung richtet, da der Power Management Chip nur mit einer Gleichspannung betrieben werden kann (siehe Kapitel 3.2). Durch den Power Management Chip sind die Spannungswerte eingeschränkt und dürfen nicht überschritten werden. Weiter ist zu beachten, dass die Anziehungskraft des Magneten auf den Eisenkern in der Spule so gering wie möglich gehalten wird, da sonst eine unnötige Bremswirkung entsteht. Da der Puls - in Form einer induzierten Spannung in der Spule - gleichgerichtet werden muss und somit in der Spannungskennlinie verschwindet, muss eine Lösung gefunden werden, diesen Puls zu registrieren. Denn dieser Puls wird schlussendlich benötigt, um die Umlaufzeit des Magneten und somit die eigentliche Fahrgeschwindigkeit zu detektieren. Zusammengefasst gelten folgende Punkte für die Hardware:

- Gleichrichten der induzierten Spannung
- Erzeugte Spannung einschränken
- Pulsdetektion
- keine Bremswirkung

3.1.2 Experimente und Vorgehen

Um den Anforderungen der Hardware gerecht zu werden, wird methodisch schrittweise vorgegangen:

1. Spannung erzeugen mittels Magnet und Spule. Es stellt sich die Frage, wie viel Spannung ist möglich, wie verhalten sich unterschiedliche Spulen und Magnete?
2. Erzeugte Spannung in Form einer Wechselspannung gleichrichten. Was für Gleichrichterschaltungen kommen in Frage und was für konstante Spannungswerte sind zu erreichen?
3. Gleichspannung begrenzen um Power Management Chip vor Überspannung zu schützen.
4. Puls detektieren.

Alle Experimente und Messungen werden mit folgenden Messgeräten durchgeführt:

Messgerät	Bezeichnung	Serien Nummer
Multimeter	MASTECK PM334	20060226639
Oszilloskop	Tektronix MDO 3014	C021219
DC Power Analyzer	Agilent N6705B	My50000795

Tabelle 3.1: Verwendete Messgeräte

Damit die Experimente auch der Realität entsprechen, wird bereits während der Entwicklung ein Fahrrad gebraucht, welches auf dem Kopf stehend von Hand an den Pedalen betrieben

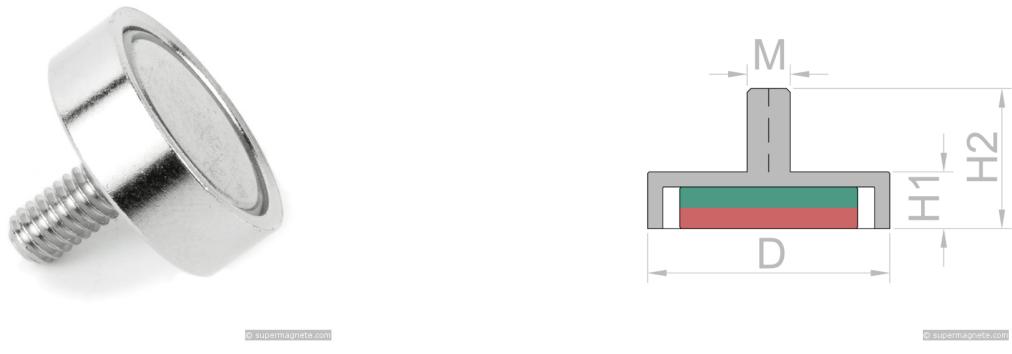
wird. Das verwendete Fahrrad ist von der Marke EUROTEAM, das Modell „Rocky“. Es wird im Folgenden oft das Wort Geschwindigkeit verwendet. Mit Geschwindigkeit wird die Geschwindigkeit, welche das Fahrrad auf der Strasse hätte, gemeint. Diese berechnet sich über den Raddurchmesser oder den Umfang (welcher aus dem Raddurchmesser berechnet werden kann) des Rades und der Umlaufzeit des Rades:

$$\text{Geschwindigkeit } v = \frac{\text{Radumfang [m]}}{\text{Umlaufzeit [s]}} \quad (3.1)$$

Der Umfang des verwendeten Rades misst 2.04 m. Der Durchmesser beträgt 65 cm. Die Umlaufzeit wird jeweils mit dem Oszilloskop anhand der Spannungsspitzen gemessen.

Für Simulationen wird die Gratis-Software von Linear Technologies LTSpice IV verwendet.

Für die Versuche werden Topfmagnete mit Gewindezapfen mit verschiedenen Durchmessern von Supermagnete.ch¹ verwendet. Diese entsprechen gemäss Kapitel 2.2.1 den Anforderungen und sind an der Fahrradspeiche gut montierbar. Die genaue Modellbezeichnung ist GTN-16 und GTN-25 (16/25 mm Durchmesser). Die Datenblätter sind in Anhang A zu finden. In Abbildung 3.1 ist das Modell GTN-16 und die Polarität der Magnete zu sehen.



(a) Ansicht vom Magneten GTN-16

(b) Polarität der Topfmagnete

Abbildung 3.1: Verwendete Magnete [6]

3.1.3 Spannungserzeugung mittels Induktion durch Magnet

Versuchsdurchführung:

Verschiedene Versuche sind in folgender Tabelle 3.2 auf Seite 13 festgehalten. Ziel ist es, festzustellen, wie sich die induzierte Spannung bei unterschiedlichen Spulen und Magneten verhält. Bei der Versuchsdurchführung wird der Magnet an die Speiche des Fahrrades montiert und die Spule, jeweils mit minimalem Abstand zum Magneten, an den Rahmen. An den beiden Polen der Spule folgt die Spannungsmessung mittels Oszilloskop. Es wird mit einer konstanten Umlaufgeschwindigkeit des Magneten experimentiert, damit die verschiedenen Versuche vergleichbar sind. Es werden gekaufte und selbst gewickelte Spulen ausgetestet.

¹<http://www.supermagnete.ch>

Für eine Umdrehung des Rades werden für folgende Versuche 5 Sekunden beansprucht. Das Verhältnis vom Durchmesser vom Magneten zum Umlaufweg für eine Umdrehung entspricht 1:98, wie in Gleichung 3.3 hergeleitet wird. Somit lässt sich eine Zeit ΔT berechnen

$$\Delta T = \frac{5s}{98} = 0.05s \quad (3.2)$$

wobei der Abstand vom Radmittelpunkt zum Magneten $r = 0.25\text{ m}$ beträgt und sich somit das Verhältnis berechnen lässt:

$$\frac{\text{Umlaufweg Magnet}}{\text{Durchmesser Magnet}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0.25}{0.016} = 98.17 \quad (3.3)$$

Der Unterschied des Durchmessers zum grossen Magneten wurde vernachlässigt - da die Differenz 0.003 m ist - und somit auch nicht exakt einstellbar ist. Der Remanenzwert des Magneten ist bestimmt durch die Magnetisierungs-Güte; bei den hier eingesetzten Magneten N42. Diese Güte wird dem Datenblatt des Magneten Anhang A des Hersteller entnommen und dann mittels der Tabelle Eigenschaften der Neodym Magnete in Anhang B die Flussdichte abgeleitet.

Nachfolgend der Versuchsaufbau mit (1) Magnete, (2) Spule und (3) Anschluss Messgerät.

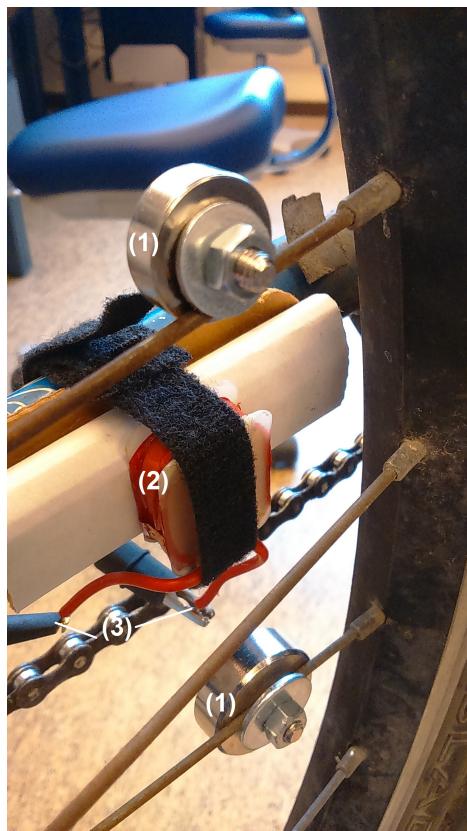


Abbildung 3.2: Versuchsaufbau zum Messen der induzierten Spannung in der Spule

Versuchsresultate:

Die Resultate sind in der Tabelle 3.2 aufgeführt. Dabei gilt:

- A: eingeschlossene Fläche der Spule
- n: Anzahl Windungen der Spule
- E: mit Eisenkern oder ohne
- B: Remanenz des Magneten
- A: Fläche des Magneten
- deltaT: Zeit in der B in der Spule wirkt
- calc: Berechnete induzierte Spannung gemäss Gleichung 2.8 auf Seite 9
- mess: gemessene Spannungsspitzenwerte

V	Spule		Magnet		deltaT	U induziert		
-	A [m ²]	n	E	B [T]	A [m ²]	[s]	calc [V]	mess [V]
1	1.8e-4	60	ja	1.3	2.01e-4	0.05	0.28	0.10
2	1.8e-4	60	ja	1.3	4.91e-4	0.05	0.28	0.10
3	2.5e-4	20	nein	1.3	2.01e-4	0.05	0.10	0.05
4	1.8e-4	120	ja	1.3	2.01e-4	0.05	0.56	0.20
5	6.0e-4	300	ja	1.3	2.01e-4	0.05	4.68	0.80
6	6.0e-4	300	nein	1.3	2.01e-4	0.05	4.68	0.50
7	6.0e-4	300	ja	1.3	4.91e-4	0.05	4.68	4.10
8	6.0e-4	300	nein	1.3	4.91e-4	0.05	4.68	3.50
9	2.1e-4	281	ja	1.3	2.01e-4	0.05	1.53	0.40

Tabelle 3.2: Versuchsresultate induzierte Spannung in verschiedenen Spulen mit verschiedenen Magnetgrößen

Versuchsauswertung:

In den Versuchen 1 und 2 wird dieselbe selbst gewickelte Spule verwendet, aber jeweils ein anderer Magnet. Die beiden Magnete unterscheiden sich nur in der Grösse. Die gemessenen Spannungsspitzenwerte sind exakt gleich, aber sehr tief. Daraus folgt, dass die Fläche des Magneten keinen Einfluss mehr hat, wenn die Fläche der Spule überschritten wird. Bei Versuch 4 wird die Anzahl Windungen der Spule aus Versuch 1 und 2 verdoppelt. Das Resultat zeigt eine Übereinstimmung mit der Berechnung: die induzierte Spannung hat sich leicht erhöht und steigt von 0.15 V auf 0.20 V. Wird die Anzahl Windungen verkleinert und die Fläche erhöht, wie in Versuch 3, zeigt das gemessene Resultat einen deutlichen Abfall der Spannungsspitze. Auch das Verzichten auf einen Eisenkern wird zu diesem schlechten Resultat beitragen.

In den Versuchen 5 bis 8 wird eine deutlich grössere Spule verwendet. Die hier verwendete Spule ist in Abbildung 3.2 auf der vorherigen Seite ersichtlich. In den ersten beiden Versuchen - 5 und 6 - wird der kleine Magnet verwendet, die Spule jeweils einmal mit und ohne Eisenkern. Die gemessene Spannung ist mit Eisenkern höher. Beide Resultate stimmen jedoch bei Weitem nicht mit den Berechnungen überein. Eine mögliche Ursache dafür könnten die Größen-Verhältnisse der Flächen sein. Deshalb hat man die beiden Versuche mit einem grösseren Magneten wiederholt. Das Resultat in Versuch 7 und 8 ist eindeutig und zeigt, dass im Idealfall die Spule und der Magnet dieselben Flächen haben sollten.

Da die Anforderungen einen möglichst kleinen Magneten verlangen, wird ein weiterer Versuch mit einer Spule, die möglichst dieselbe Fläche hat, durchgeführt. Das Resultat aus Versuch 9 mit 0.4 V ist sehr gut, da die Umlaufgeschwindigkeit des Rades doch sehr langsam ist. Dies soll folgende Rechnung kurz verdeutlichen:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{t} = \frac{2 \cdot 0.25 \text{ m} \cdot \pi}{5 \text{ s}} = 0.31 \text{ m/s} = 1.13 \text{ km/h} \quad (3.4)$$

Die Spule aus Versuch 9 kommt vom Hersteller PREMO² und hat die Bezeichnung 3015N-0238J 32/06. Die Spule ist eigentlich für RFID-Anwendungen gedacht und hat deshalb drei Wicklungen in die x-, y- und z-Ebene. Für die Hauptanwendung wird die z-Wicklung verwendet. Mit dieser Spule sollen weitere Versuche durchgeführt werden, um zu klären, ob sie geeignet ist und die für den Power Management Chip geforderte Spannung liefert. Das Datenblatt zur Spule ist im Anhang A hinterlegt.

3.1.4 Spannungskennlinie der Spule PREMO 3015N-0238J 32/06

Versuchsdurchführung:

Die Spule wird wieder mit möglichst geringem Abstand zum Magneten an den Rahmen des Fahrrades befestigt. Der Abstand zum Radmittelpunkt soll 0.25 m, also möglichst weit außen am Rad sein, damit die Geschwindigkeit v des Magneten möglichst hoch wird. Es werden nun mit verschiedenen Geschwindigkeiten von 5 km/h bis 50 km/h die Spannungsspitzen gemessen und aufgezeichnet. Für diese Messungen ist die Spule unbelastet.

Versuchsresultate:

Die nachfolgende Abbildung 3.3 zeigt den Spannungsverlauf eines Magnetdurchlaufes. Bei höheren Geschwindigkeiten des Magneten ist die induzierte Spannung höher, jedoch die Zeit des Impulses kürzer.



Abbildung 3.3: Spannungsverlauf an der Spule PREMO bei Magnetdurchlauf

Die einzelnen Messergebnisse sind im Anhang C einzusehen. Daraus wird die Kennlinie erzeugt, die in Abbildung 3.4 auf der nächsten Seite zu sehen ist.

²<https://www.grupopremo.com>

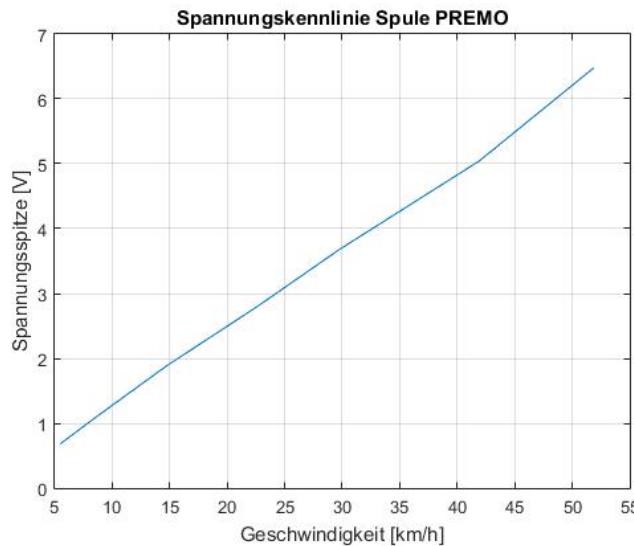


Abbildung 3.4: Spannungskennlinie der induzierten Spannung in der Spule PREMO

Versuchsauswertung:

Die Abbildung 3.3 zeigt den erwarteten Spannungsverlauf der induzierten Spannung in der Spule. Die identischen Spannungsspitzen (positiv und negativ) zeigen, dass die Spule gut ausgerichtet ist und der Magnet ideal auf die Spule wirken kann. Die Spannungskennlinie in Abbildung 3.4 zeigt einen linearen Verlauf. Dies bestätigt sich, wenn man den Einfluss von ΔT auf die induzierte Spannung analysiert. Denn in der Formel 2.8 auf Seite 9 hat ΔT mit Potenz 1 einen linearen Einfluss. Weiter stellt man fest, dass die Spannung auch sehr hohe Werte erreichen kann und bei einer mittleren Geschwindigkeit von 25 km/h in etwa 3 V annimmt. Mit dem Vorwissen, dass durch Gleichrichten der Spannung und durch Belasten der Spule noch Verluste abfallen werden, ist dies ein Resultat, mit welchem man weiter fahren kann. Es gilt nun in einem weiteren Schritt, die resultierende Wechselspannung in eine Gleichspannung zu richten und diese auch zu begrenzen.

3.1.5 Gleichrichten der Wechselspannung

Es gilt nun die erreichte induzierte Wechselspannung für den Power Management Chip gleichzurichten. Dafür stellen sich verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. In dieser Arbeit werden zwei Varianten getestet. Zum einen soll eine Spannungsvervielfachung und zum anderen eine Gleichrichtung mit Dioden getestet werden. Nachfolgend soll kurz mit ein paar entscheidenden Punkten erläutert werden, aus welchen Gründen man sich dafür entschieden hat.

- Ein Transformator hat höhere Verluste gegenüber einer Gleichrichtung mit Dioden.
- Es gibt die Möglichkeit, eine Gleichrichtung mittels einem CMOS-Gleichrichter auszuführen, damit keine Diodenverluste entstehen. Diese Gleichrichter existieren aber noch nicht auf dem Markt. Sie wären ideal, da diese speziell für Harvesting-Anwendungen entwickelt wurden. Siehe Anhang A CMOS Gleichrichter.

Simulation Multiplexerschaltung:

Die Idee ist, mittels einer kleinen Spule - was eine kleine induzierte Spannung bedeutet - die Spannung zu vervielfachen. Dies soll mit einer Villardschaltung umgesetzt werden. Zuerst wird die Schaltung mit einer Simulation getestet. Dabei wird die induzierte Spannung mit einem Sinus simuliert. In den zwei nachfolgenden Abbildungen sind zwei Simulationen zu sehen. Die erste simulierte eine induzierte Spannung von 0.5 V, die zweite 2.0 V. Es wird eine 2-Stufen Villardschaltung eingesetzt [7].

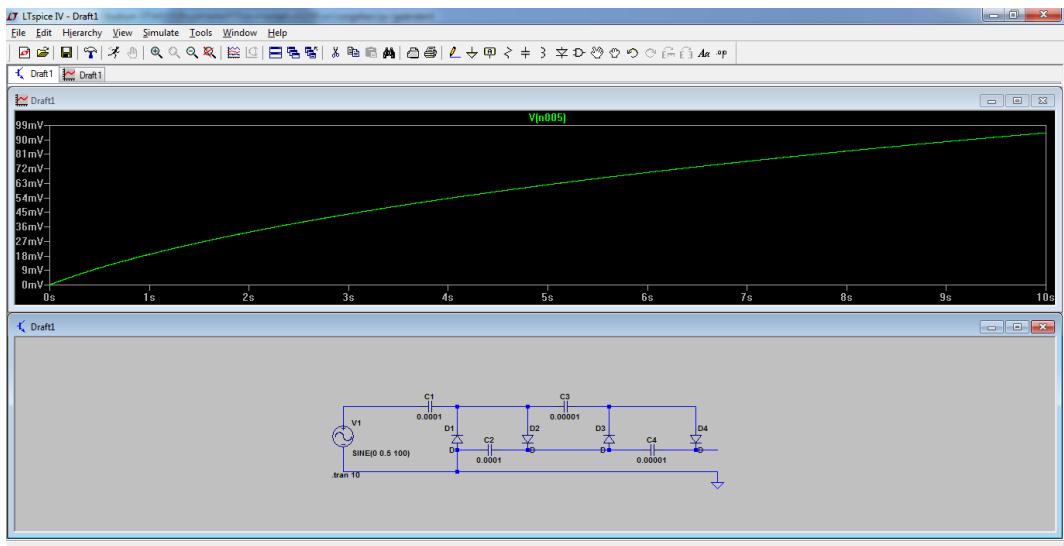


Abbildung 3.5: Villardschaltung (2 Stufen), Eingang 0.5 V, sinus

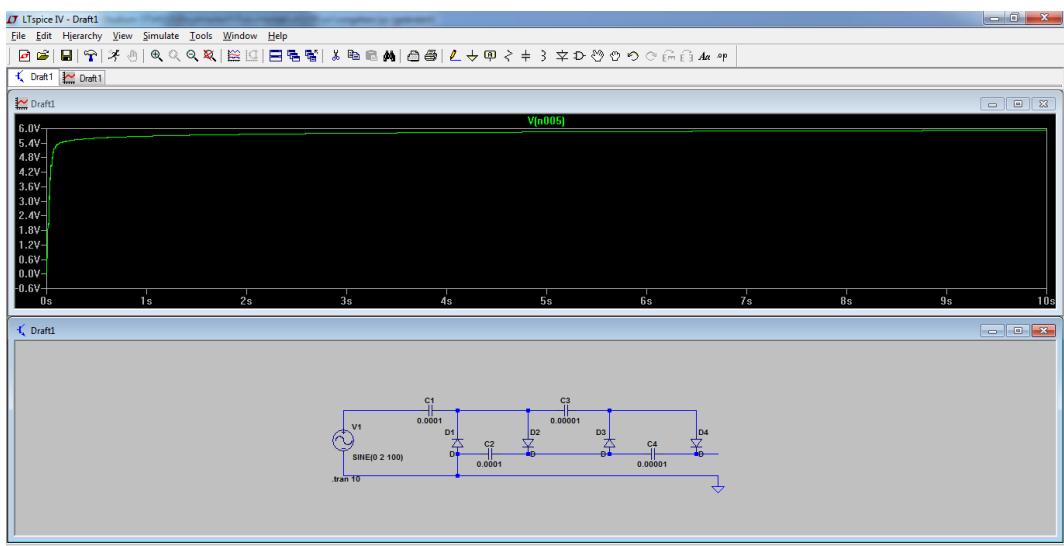


Abbildung 3.6: Villardschaltung (2 Stufen), Eingang 2.0 V, sinus

Es ist deutlich zu sehen, dass bei einer Eingangsspannung von 0.5 V keine brauchbare Ausgangsspannung entsteht. Bei 2 V ist eine Vervielfachung der Spannung zu sehen. Der Effekt ist auf die Dioden zurückzuführen, welche eine mindesteingangsspannung von 0.7 V verlangen, damit sie leiten. Da beim Harvesting Spannungen erzeugt werden, welche auch unter

0.7 V sind, ist diese Methode nicht brauchbar.

Versuch Gleichrichtung mittels Dioden:

Es gibt verschiedene Gleichrichterschaltungen mit Dioden. Der Einweggleichrichter verliert die negative Halbwelle der Wechselspannung und ist somit für diese Anwendung nicht interessant. Der nachfolgende erste Versuch soll mit einer Brückenschaltung realisiert werden.

Simulation Brückenschaltung:

In einem ersten Schritt soll getestet werden, ob eine Brückenschaltung auch bei kleinen Spannungen funktioniert. Die Abbildung 3.7 zeigt bei einer Sinus-Eingangsspannung mit Spitzenwert 0.5 V (grüne Kurve), dass am Ausgang (blaue Kurve) eine brauchbare Spannung erzielt wird. Die negative Halbwelle wird dabei wie gewünscht zu einer positiven Welle transformiert (Bemerkung: da gegenüber Ground gemessen wird, ist die negative Halbwelle der grünen Kurven - der Eingangsspannung - nicht voll ausgeprägt).

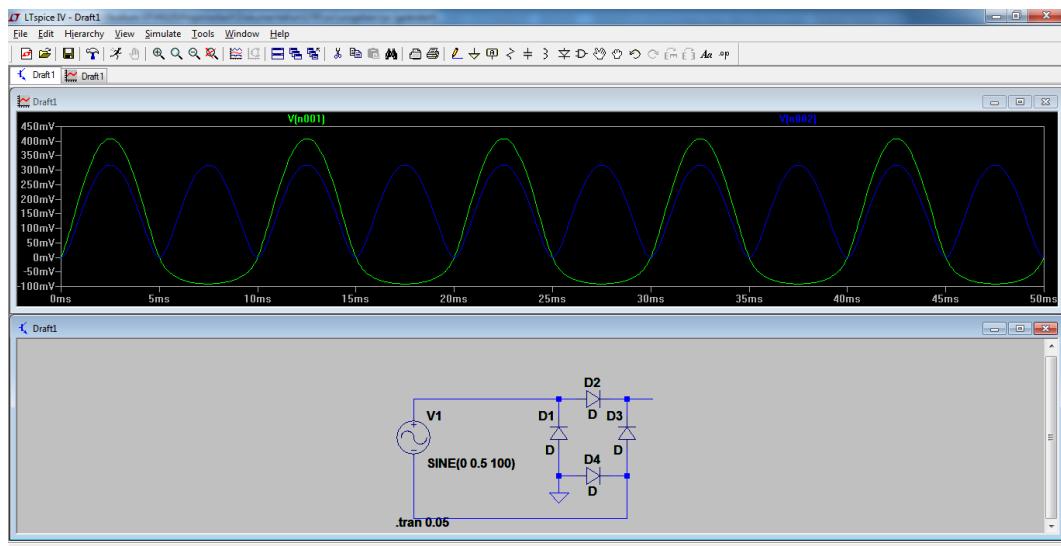


Abbildung 3.7: Simulation Brückenschaltung mit Eingang 0.5 V

Die Verluste - Differenz zwischen grüner und blauer Kurve - bleiben gering und somit ist diese Schaltung eine mögliche Lösung. Um nun eine Gleichspannung zu erzielen, soll die Schaltung mit Kondensatoren erweitert werden, damit die erzeugte Energie gespeichert wird. Zusätzlich werden die Dioden durch Schottky-Dioden ersetzt, um die Verluste weiter zu reduzieren. Normale Dioden haben einen Spannungsabfall von 0.7 V, wohingegen Schottky-Dioden nur einen Spannungsabfall von 0.3 V haben. Abbildung 3.8 zeigt am Ausgang die erwartete Gleichspannung.

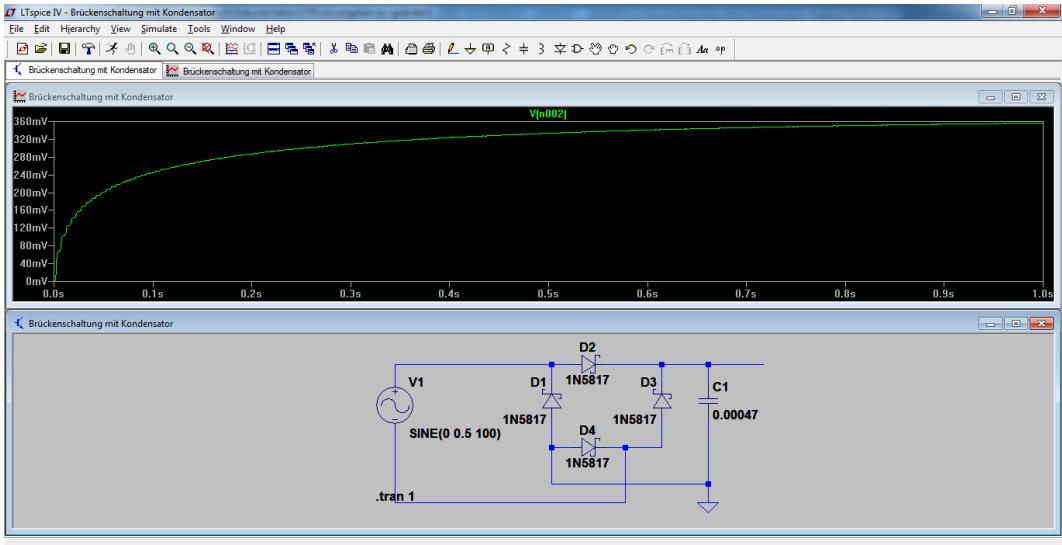


Abbildung 3.8: Simulation Brückengleichrichter mit Kondensator, Eingang 0.5 V

Da die Spannung bezüglich des Power Management Chips auf höchstens 2 V begrenzt werden muss, wird in einer weiteren Simulation die Schaltung mit Dioden so ausgelegt, dass eine maximale Spannung von 2 V (maximaler DC Eingangspegel des Power Management Chips) nicht überschritten wird. Dabei werden drei normale Dioden in Serie geschaltet und somit wird unter irrealen Bedingungen (d.h. mit idealen Voraussetzungen)

$$3 \cdot 0.7 V = 2.1 V \quad (3.5)$$

am Ausgang erwartet. Da die Schaltung später unter Last steht, werden diese 2.1 V nicht erreicht. In Abbildung 3.9 wird die Schaltung simuliert. Bei einer Eingangsspannung von 6 V wird die Ausgangsspannung wie erwünscht begrenzt. Anzumerken ist, dass die Simulation eine Spannung von 2.7 V zeigt. Dies ist unter realen Bedingungen mit einer Last nicht zu erwarten und soll mit einem realen Versuch gezeigt werden.

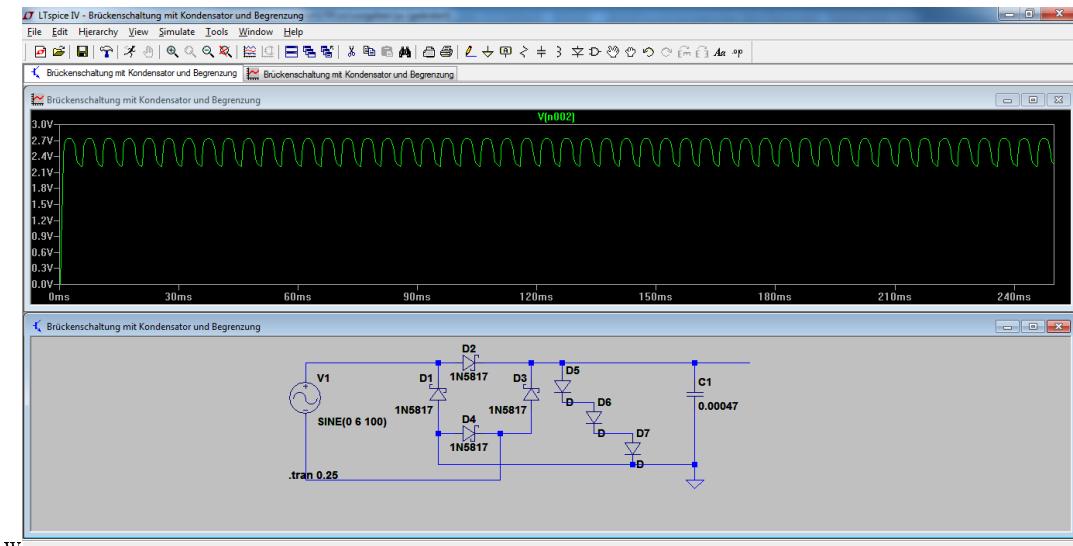


Abbildung 3.9: Simulation Brückengleichrichter mit Kondensator und Begrenzung, Eingang 6 V

Versuchsdurchführung:

Die Schaltung wird nun gemäss Simulation (Abbildung 3.9) aufgebaut und soll unter verschiedenen Bedingungen ausgewertet werden. Für das Experiment werden folgende Komponenten eingesetzt (inklusive Bauteile für die Schaltung):

- Spule PREMO 3015N-0238J 32/06 (1)
- 4 Schottky Barrier Rectifier Dioden 1N5819 (2)
- 3 Switching Dioden CDSV4148-G (3)
- 1 CS0470/25 Capacitor 470uF 25V (4)

Die Datenblätter zu den Halbleitern findet man im Anhang A.

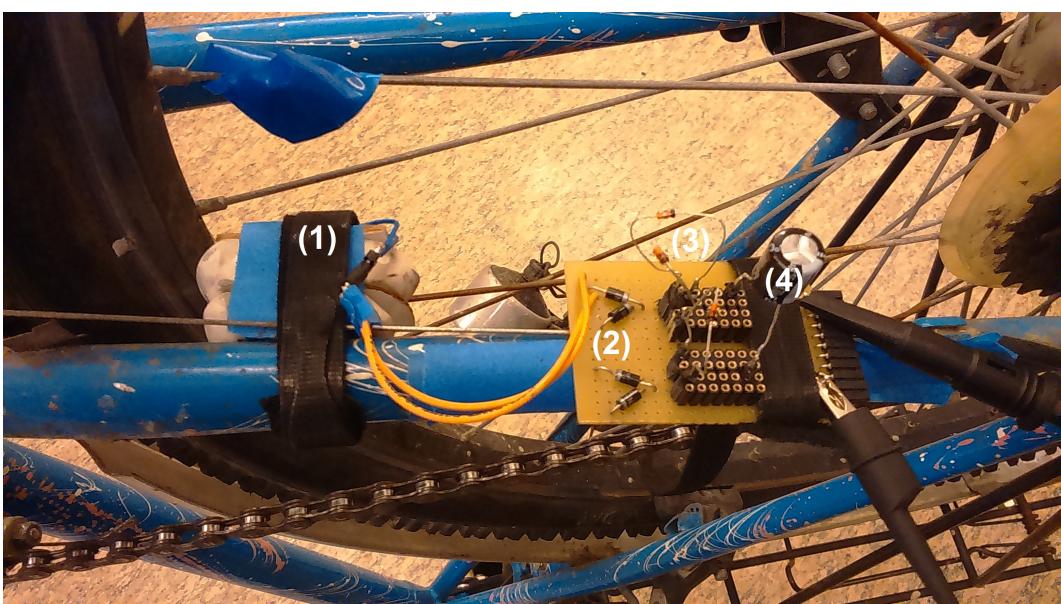


Abbildung 3.10: Versuchsaufbau der Hardware mit den bisherigen Simulationen

Das Ziel besteht nun darin, die Hardware unter verschiedenen Bedingungen zu testen und Resultate zu erzielen. Aus den Resultaten soll dann eine Aussage gemacht werden können, ob die Hardware als Harvester-Komponente geeignet ist. Die folgenden Punkte sollen abgeklärt werden:

1. Ist die Ausgangsspannung eine geeignete Gleichspannung?
2. Wie hoch ist die maximale Spannung am Ausgang? Kann diese wie gewünscht begrenzt werden?
3. Was für Spannungen werden bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten erzielt?

Versuchsresultate:

Die nachfolgende Abbildung 3.11 zeigt den Verlauf der Spannung am Eingang (Gelb) und am Ausgang (Grün) der Hardware. Da gegenüber Ground gemessen wird, ist die negative Halbwelle am Eingang nicht vollständig zu sehen.

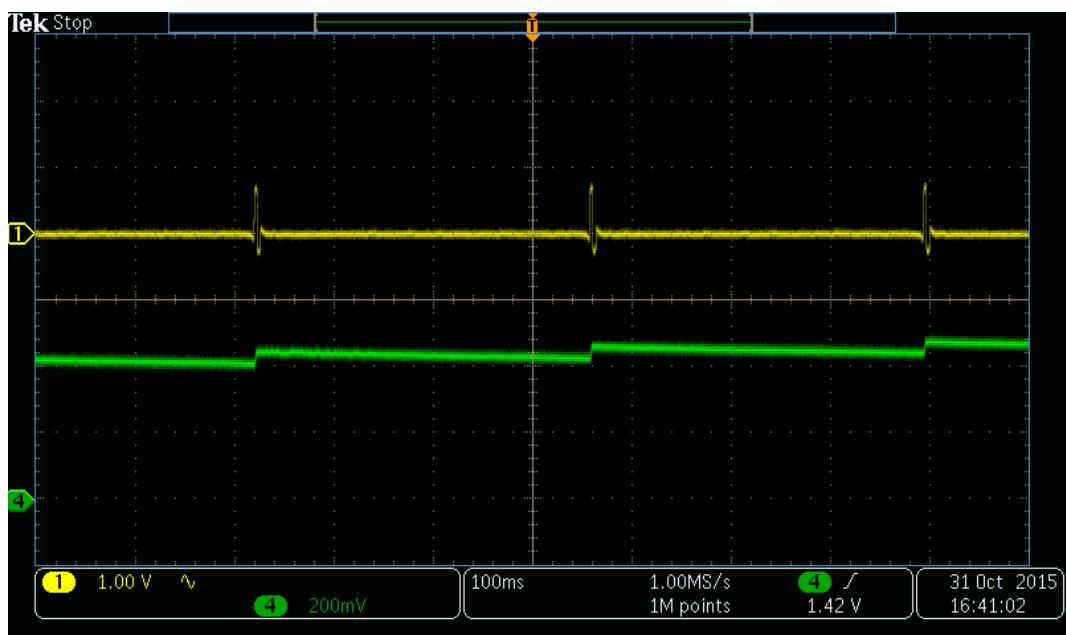


Abbildung 3.11: Spannungsverlauf Hardware, induzierte Spannung am Eingang (Gelb), Ausgang am Kondensator (Grün)

Die einzelnen gesessenen Resultate sind in der Tabelle 3.3 aufgeführt und als Kennlinie in Abbildung 3.12 dargestellt. Damit der Kondensator sich wieder entladen kann - um auch an realen Bedingungen heran zu kommen - wird eine Last von 10 kOhm an den Ausgang angeschlossen. Dabei gilt:

Δt : Zeit zwischen Durchlauf des Magneten.

v : Geschwindigkeit des Fahrrades. Berechnet mit 3.1 mit $t = \Delta t$.

U_{min} : Gemessene minimale Spannung am Kondensator.

U_{max} : Gemessene maximale Spannung am Kondensator.

v [km/h]	4.97	8.84	15.58	20.00	30.08	35.34	44.53	67.32
deltaT [s]	1.137	0.640	0.363	0.283	0.188	0.160	0.127	0.084
Umax [V]	0.108	0.300	0.560	0.740	1.080	1.280	1.520	1.870
Umin [V]	0.080	0.240	0.480	0.660	1.000	1.240	1.420	1.730

Tabelle 3.3: Versuchsresultate Hardware

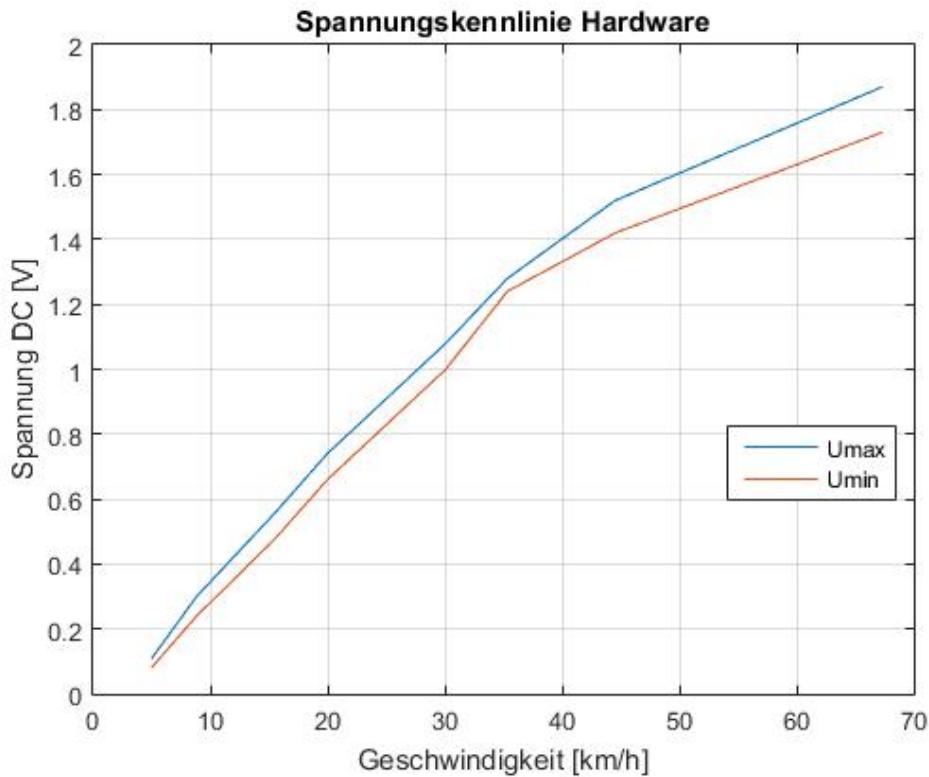


Abbildung 3.12: Spannungskennlinie Hardware

Die nachfolgende Abbildung zeigt, wie gemessen wird und stellt zugleich den letzten Spalteintrag in Tabelle 3.3 dar. Hier wurde die höchstmögliche Geschwindigkeit erzeugt, um ein Resultat zu erhalten, bezüglich der Begrenzung durch die Dioden-Serie-Schaltung.

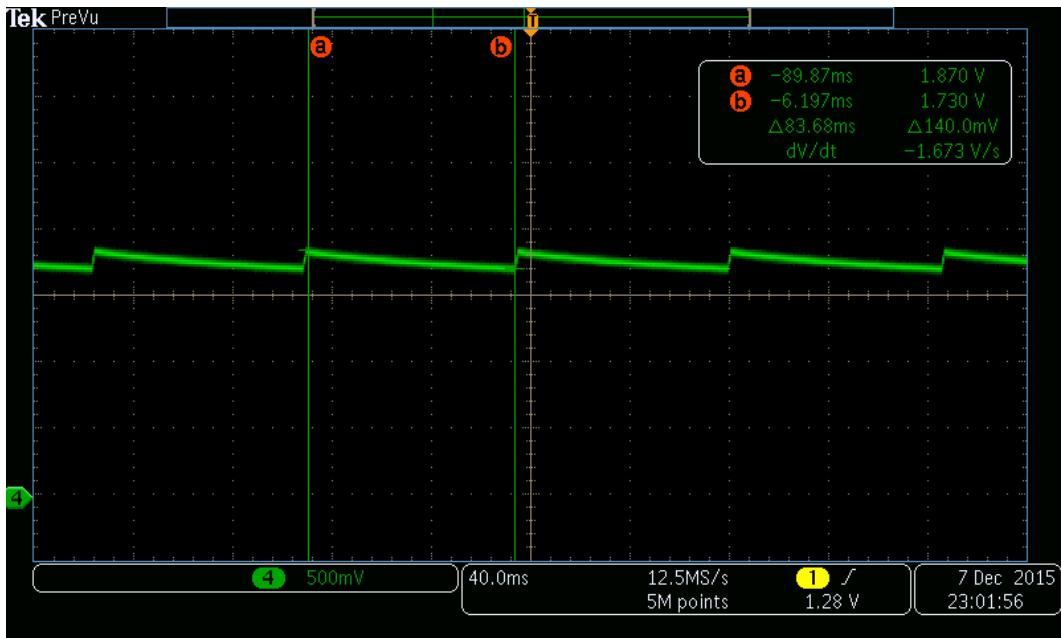


Abbildung 3.13: Maximale Spannung bei maximaler Geschwindigkeit

Versuchsauswertung:

Die Resultate zeigen, dass eine Gleichspannung erzielt werden kann. Diese erreicht einen Spitzenwert von 1.87 V DC bei einer Geschwindigkeit von 67.32 km/h. Eine höhere Geschwindigkeit ist von Hand schwer zu erreichen, jedoch sollten 67.32 km/h für einen Maximalwert ausreichen. Wie zuvor in 3.5 berechnet, sollte der Spitzenwert bei 2.1 V DC erreicht werden. Im Vergleich zur Messung beträgt der Unterschied 0.23 V DC. Diese Differenz ist akzeptabel und ist durch die realen Bedingungen zu erwarten. Da der Power Management Chip eine maximale Spannung von 2 V DC vorgibt, ist die Hardware sehr gut ausgelegt. Insgesamt erreicht die Hardware die Voraussetzungen und soll nun im gesamten System getestet werden.

Bemerkung: Die eben ausgeführten Messungen und weitere sind im Anhang C festgehalten.

3.1.6 Pulsdetektion

Damit die Magnetumlaufzeit gemessen werden kann, muss der Puls jedes Durchlaufes detektiert werden. Dafür gibt es verschiedene Ansätze, wie diese Detektion aussehen kann.

Versuch Pulsdetektion mit Spule (PREMO)

Versuchsdurchführung:

Die PREMO-Spule besitzt drei Wicklungen, je eine in jeder Raum-Ebene (x, y, z). Die Wicklung in der z-Ebene wird für die Erzeugung der Betriebsspannung benutzt. Da die induzierte Spannung gleichgerichtet und geglättet wird, kann damit keine Pulsdetektion mehr gemacht werden. Es sollen nun die beiden Wicklungen in der x- und y-Ebene getestet werden.

Die Hardware bleibt erhalten und an die z-Spule angeschlossen. Die beiden Anschlüsse der Spule für die beiden anderen Wicklungen sollen nun detektiert werden. Ziel ist es, herauszufinden, ob in diesen Wicklungen eine Induktion entsteht und ob die erzeugte Spannung als

Puls genutzt werden kann. Da das Magnetfeld der Spule nicht mehr senkrecht zur Fläche steht, sollten die induzierten Spannungen (in der x- und y-Ebene) geringer ausfallen.

Versuchsresultat:

Abbildung 3.14 zeigt die gemessenen induzierten Spannungen. Es gilt:

Gelb: Induzierte Spannung in z-Ebene (als Referenz).

Blau: Induzierte Spannung in x-Ebene.

Rot: Induzierte Spannung in y-Ebene.

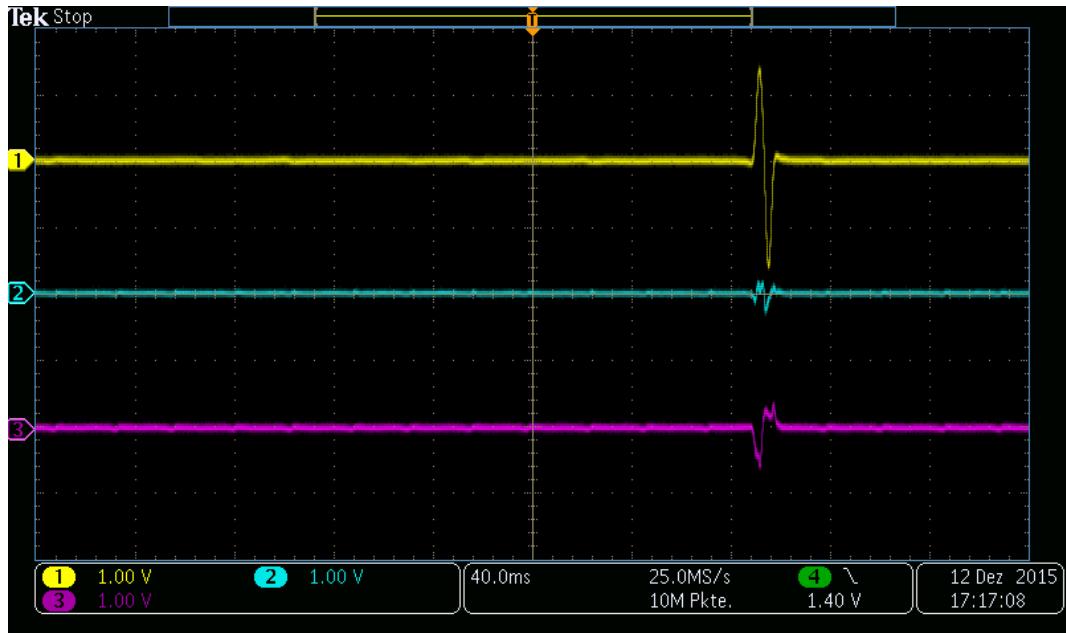


Abbildung 3.14: Induzierte Spannungen in der Spule PREMO in allen Wicklungen

Versuchsauswertung:

Die Messung zeigt eine deutlich geringere Spannung in den beiden Wicklungen, die nicht senkrecht zum Magnetfeld stehen. In einem weiteren Schritt müsste man nun die Spannung gleichrichten oder mit einer Diode die positive Halbwelle filtern, da der Pin am TI-SensorTag eine positive Spannung erwartet. Der TI-SensorTag verlangt aber weiter eine Spannung am Pin von 1.5 bis 2 V DC, um diese als einen High-Pegel zu erkennen und somit kann die Spule als Pulsdetektion nicht verwendet werden. Bei Geschwindigkeiten unter 30 km/h wäre keine Detektion möglich.

Versuch Pulsdetektion mittels Reed Relay

Eine zweite und einfache Methode ist die Detektion mittels Reed Relay zu machen. Ein Reed Relay hat zwei Metallkontakte, welche im Vakuum verschweisst sind. Die Metallkontakte haben dabei einen minimalen Abstand zueinander, welcher im mikrometer Bereich ist. Wird das Reed Relay in die Nähe eines magnetischen Feldes betrieben, schliessen sich die Kontakte.

Versuchsdurchführung:

Für den Versuch wird ein Reed Relay von einem gekauften Geschwindigkeitssensor ausgebaut und verwendet, da diese in der Grösse optimiert sind. Aus diesem Grund kann auch kein Typ angegeben werden. Der Kontakt auf der einen Seite des Reed Relay wird an die Speisung angeschlossen, die andere Seite wird über einen Widerstand von 100 kOhm auf Ground gesetzt. Am Widerstand wird die Spannung gemessen.

Versuchsresultat:

In Abbildung 3.15 ist im oberen Bildbereich ein Impuls zu sehen, wenn der Magnet am Reed Relay vorbeifährt. Im Zoombereich ist die positive Flanke besser sichtbar. Es ist zu sehen, dass der Puls prellen kann.

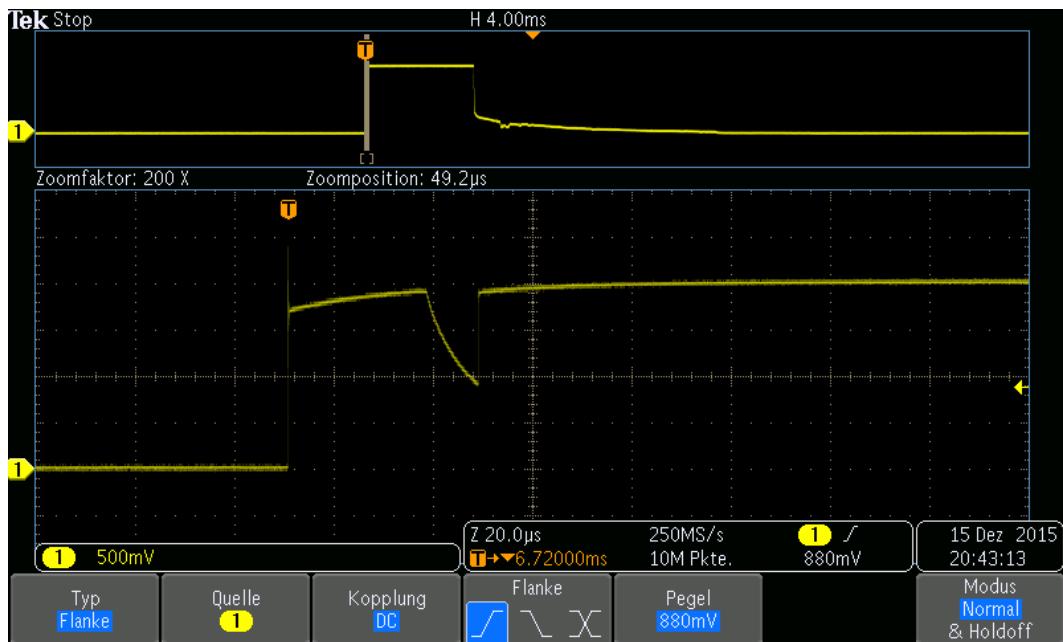


Abbildung 3.15: Reed Relay Schaltvorgang bei Magnetdurchlauf

Versuchsauswertung:

Die Pulsdetektion mit dem Reed Relay ist sehr einfach aufgebaut und funktioniert in jedem Fall. Das prellen des Pulses muss später in der Software gehandhabt werden. Es wird im Folgenden das Reed Relay für die Pulsdetektion verwendet.

3.1.7 Schema der realisierten Hardware

Das Schema der entwickelten Harvesting Hardware ist in nachstehender Abbildung 3.16 zu sehen. Diese wird für die folgenden Versuche verwendet und nicht mehr verändert.

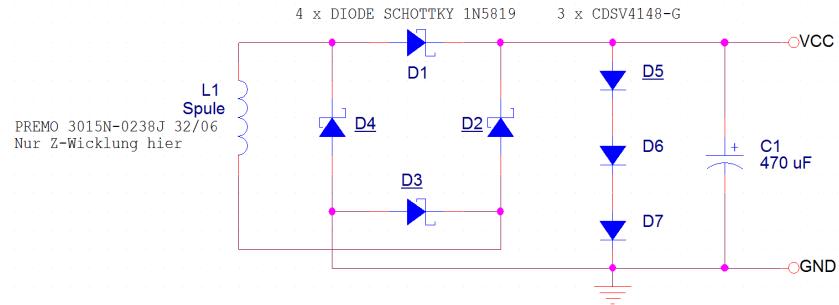


Abbildung 3.16: Schema der entwickelten Harvesting Hardware

3.2 Power Management

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 erwähnt, wird für das Power Management der Chip EM8500 von EM-Microelectronics verwendet. Dieser Chip verspricht eine sehr effiziente Energiespeicherung und -gewinnung von geeigneten Energy Harvesting Quellen im Bereich von μW bis mW . Als geeignete Quellen werden Solarzellen oder Thermoelektrische Generatoren (TEG) vorgeschlagen. Der Chip hat sehr viele Konfigurationsmöglichkeiten, die vorprogrammiert oder während dem Gebrauch über eine serielle Schnittstelle verändert werden können. In dieser Projektarbeit wird die Methode des Vorprogrammierens gewählt, da somit während dem Betrieb keine weitere Peripherie, wie SPI oder I²C vom Microcontroller gebraucht wird und somit wiederum Energie gespart werden kann.

3.2.1 Übersicht EM8500

In Abbildung 3.17 ist das Blockschaltbild des EM8500 zu sehen.

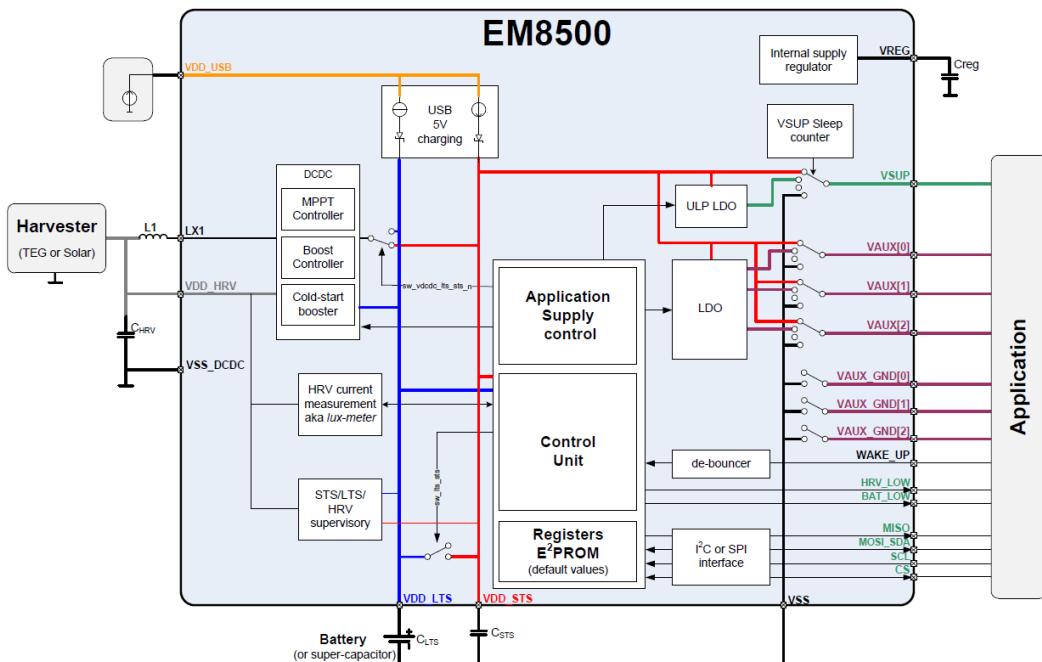


Abbildung 3.17: Blockschaltbild EM8500 [8]

Der Chip erwartet am Eingang VDD_HRV eine DC Spannung bis maximal 2 V DC. Diese Spannung wird über einen DCDC Converter in ein Short Time Storage (STS), welches ein Kondensator ist, geladen. Der DCDC Converter hat einen Maximum Power Point Controller (MPPT), über welchen eingestellt werden kann, bei welcher Eingangsspannung die maximale Leistung zu erwarten ist. Die Ausgangsspannung für die Applikation ist VSUP, welche einstellbar ist und je nach Spannungslevel vom STS eingeschaltet oder ausgeschaltet ist. Zudem kann auch eine konstante Spannung an VSUP über den ULP LDO eingestellt werden. VAUX[0..2] sind zusätzliche Ausgänge, die bei Bedarf ein- und ausgeschaltet werden können, um zum Beispiel Sensoren einzuschalten. Neben dem STS gibt es auch noch ein Long Term Storage (LTS), welcher die überschüssige Energie, welche nicht mehr im STS gespeichert werden kann, aufnimmt. Der LTS kann ein Super-Capacitor oder ein Akku sein.

Daher hat der Chip auch Funktionen um die Akkuspannung zu überwachen und diesen vom DCDC Converter oder von VSUP zu trennen, falls eine maximale oder minimale Spannung am Akku detektiert wird. Der Chip hat viele weitere Funktionen. In dieser Arbeit wird nur auf Funktionen eingegangen, die auch angewendet werden. Informationen über weitere Funktionen können aus dem Datenblatt im Anhang A genommen werden.

3.2.2 Funktionsweise

In Abbildung 3.18 ist die Start- und normale Betriebssequenz des EM8500 zu sehen. Dabei sind die Spannungen von STS, LTS und VSUP ersichtlich, welche die Hauptfunktionen des Chips ausmachen. Im Folgenden sind die Sequenzen 1 - 6 erklärt:

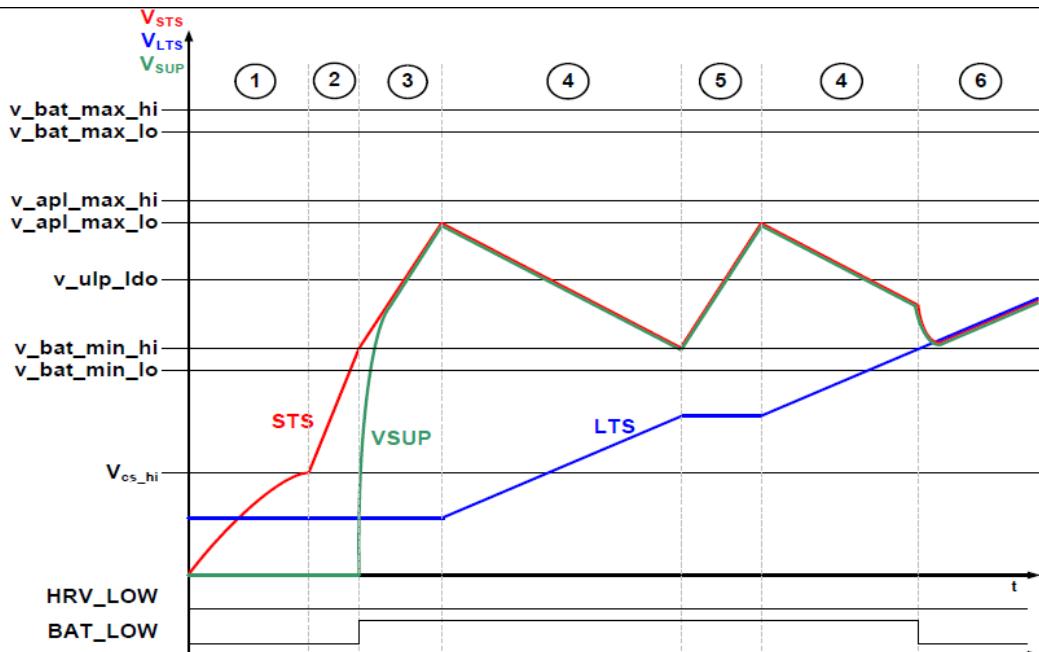


Abbildung 3.18: Funktionsweise EM8500 [9]

1. Der DCDC Converter transferiert Energie von HRV in den STS.
2. Wenn VSTS grösser ist als V_{CS_hi} , ist die Kalt-Start Sequenz beendet und der Chip startet auf. Der DCDC Converter arbeitet nun im Main-Charging Modus, wobei er den MPPT eingeschaltet hat.
3. Wenn VSTS über den Pegel von $v_bat_min_hi$ steigt, wird VSUP mit dem STS verbunden, welcher die Applikation somit speist.
4. Wenn VSTS die maximale Applikationsspannung $v_apl_max_lo$ erreicht, transferiert der DCDC Converter die überschüssige Energie in den LTS. Die Applikation ist weiterhin nur mit dem CSTS gespiesen.
5. Sinkt VSTS unter einen Minimalwert $v_bat_min_hi$, transferiert der DCDC Converter wieder Energie in der STS.
6. Der Chip bleibt nun in den Sequenzen 4 & 5, bis VLTS über dem Pegel $v_bat_min_hi$ steigt. Dies ist die minimale Spannung um die Applikation zu speisen. Ab diesem

Moment sind STS und LTS zusammengeschaltet und beide werden parallel geladen. Ab hier ist der Ausgang BAT_LOW auf '0' gesetzt.

Damit der Chip nicht ständig Ein- und Ausschaltvorgänge regelt, können bei den verschiedenen Spannungspegeln jeweils Hysteresen programmiert werden.

3.2.3 Vorgehen

Alle Versuche mit dem EM8500 werden mit dem Evaluation Board EMEVB8500 gemacht. Dies ist das einsteigerboard, auf dem bereits ein STS von $100 \mu\text{F}$ und ein LTS von 0.1 F vorhanden sind. Das Board ist über einen mitgelieferten Programmer vom Computer programmierbar. Wahlweise kann das Board über die Konsole programmiert werden, wobei die Register alle von Hand eingestellt und programmiert werden müssen. Auf der Homepage von EM Microelectronic kann aber auch eine Excel-VBA Datei heruntergeladen werden³, indem alle Einstellungen gemacht und diese auf das Board programmiert werden können. Diese Methode wird auch gewählt, wobei die VBA Datei noch einige Fehler hat. Wichtig ist, dass der Programmer nicht mit dem Board verbunden ist, wenn es getestet wird.

Die geerntete Energie vom Magnet und der Spule wird direkt am Board angeschlossen. Als Last an VSUP wird während der Entwicklungsphase ein $10 \text{ k}\Omega$ Potentiometer mit einem Schalter angeschlossen. Mit dem Oszilloskop werden während dem Betrieb die Spannungen der Harvesting Quelle (V_{HRV}), am STS (V_{STS}) und LTS (V_{LTS}) und an VSUP gemessen.

3.2.4 Einstellungen

Da die Software für den Microcontroller auf dem TI SensorTag parallel zum Power Management entwickelt wird, kann nicht von Anfang an berechnet werden, wie viel Energie für die Applikation überhaupt notwendig ist. Deshalb können die Werte für STS, LTS und Spannungslevels auch nicht von Anfang an bestimmt werden. Der TI SensorTag kann mit 1.8 V bis 3.8 V gespeist werden. Daraus folgt, dass der ULP LDO für VSUP gebraucht wird, damit ein konstanter Spannungspegel erwartet werden kann. Als Ausgangsspannung wird 2 V gewählt, weil - gemäss Datenblatt - kann dieser Wert um $\pm 10\%$ schwanken. Mit der Last von $10 \text{ k}\Omega$ sind das also 200 uA , die an VSUP gezogen werden können.

Harvesting Power Überwachung

Da der Chip für Solarzellen oder Thermoelektrische Generatoren (TEG) optimiert ist, stellt sich als erstes die Frage, als was die Spule mit dem Magnet gilt. Der Chip kann am Harvesting Eingang die Spannung oder den Strom detektieren, um interne Vorgänge zu schalten. Für Solarzellen wird der Strom detektiert und für Thermoelektrische Generatoren die Spannung. Nach der Spule und dem Gleichrichter wird die Spannung in einen Kondensator geladen und somit wird hierfür die Spannung detektiert. Ein zweiter Ansatz wäre eine Konstantstromquelle über einen J-FET zu realisieren, die über einen grossen Bereich ausgelegt ist. Aus zeitlichen Gründen wird in dieser Arbeit nur der erste Ansatz verfolgt. Die Detektion ist notwendig, um zu entscheiden, wann keine Energie mehr geerntet werden kann. Dafür

³<http://www.emmicroelectronic.com/products/power-management/pmu-dc-energy-harvesting-controller/em8500>

wird eine Spannungsuntergrenze gesetzt. Allgemein können alle Spannungen in der Auflösung von 73 mV eingestellt werden, was dem LSB in den einstellbaren Voltage Registern entspricht. Die Untergrenze wird auf $3 * 73mV = 219mV$ gesetzt. Unter diesem Wert soll VSUP abgeschaltet werden, da das Fahrrad sich dann nicht mehr bewegt und somit keine Geschwindigkeit gemessen werden muss.

Der Chip muss also die Harvesting Spannung messen. Dies geschieht periodisch und ist im Bereich von 256 ms bis 32 s einstellbar. Dabei wird jeweils die Open Voltage von der Harvesting Quelle gemessen. Wie lange die Open Voltage gemessen wird, ist im Bereich von 16 ms bis 2 s einstellbar, damit die Harvesting Quelle in dieser Zeit nicht belastet wird. Da sich ein Kondensator nach dem Gleichrichter befindet, muss dieser über den Magneten und die Spule aufgeladen werden. Wie schnell dieser aufgeladen ist, hängt von der Geschwindigkeit des Rades ab. Um den Chip auch bei Geschwindigkeiten um ca. 10 km/h optimal auszunutzen, wird die Open Voltage Zeit t_{hrv_meas} auf 1 s - 2 s und die Periode t_{hrv_period} auf 8 s eingestellt.

Über den MPPT kann das Verhältnis in %, bei welcher Spannung oder welchem Strom die maximale Leistung der Harvesting Quelle zu erwarten ist, eingestellt werden. Für Solarzellen wird der Wert von 80%, bei einem TEG der Wert von 50% vorgeschlagen. Für die verwendete Anwendung wird der maximale Wert von 88% eingestellt. Am DCDC Converter Eingang wird also 88% der Kondensatorspannung vom Energy Harvester zur Verfügung gestellt, da die maximale Energie bei der maximalen Spannung im Kondensator zu erwarten ist. In Abbildung 3.19 ist der interne Messvorgang vom EM8500 zu sehen.

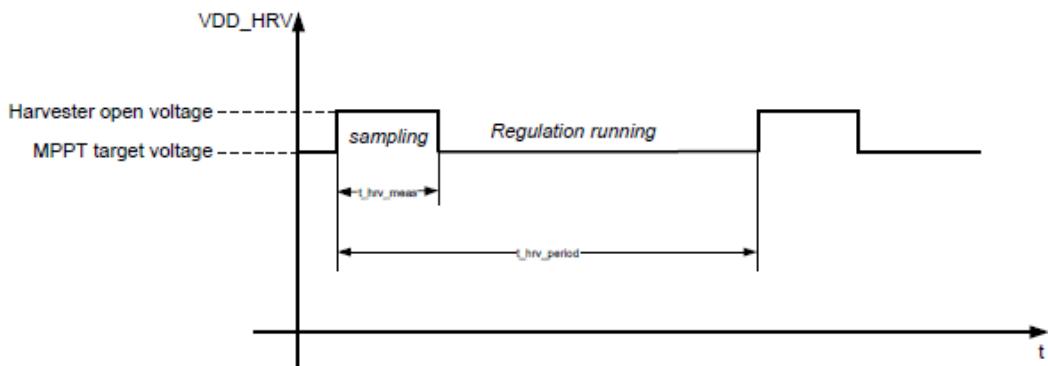


Abbildung 3.19: Harvesting Power Überwachung [10]

Als erstes wird eine Messung gemacht, um das Verhalten des MPPT und der internen Messvorgänge im Chip auszutesten. In Abbildung 3.20 ist die Spannung an V_HRV bei verschiedenen Geschwindigkeiten zu sehen. Es ist gut zu erkennen, dass alle 8 s die Open Voltage im Chip für 1 s gemessen wird, in der sich der Kondensator nach dem Gleichrichter aufladen kann. Der MPPT wird hierfür auf 88 % gesetzt. Die Einstellungen sind in Tabelle 3.4 zu sehen. Die Geschwindigkeit wurde konstant von Hand erhöht bis zu einem Maximum und danach wurde das Rad auslaufen gelassen.

Harvesting Parameter Einstellungen	
t_hrv_period	8 s
t_hrv_meas	1 s
t_sts_period	8 ms
t_lts_period	1 s
MPPT ratio	88 %

Tabelle 3.4: Einstellungen EM8500 für die Harvesting Parameter

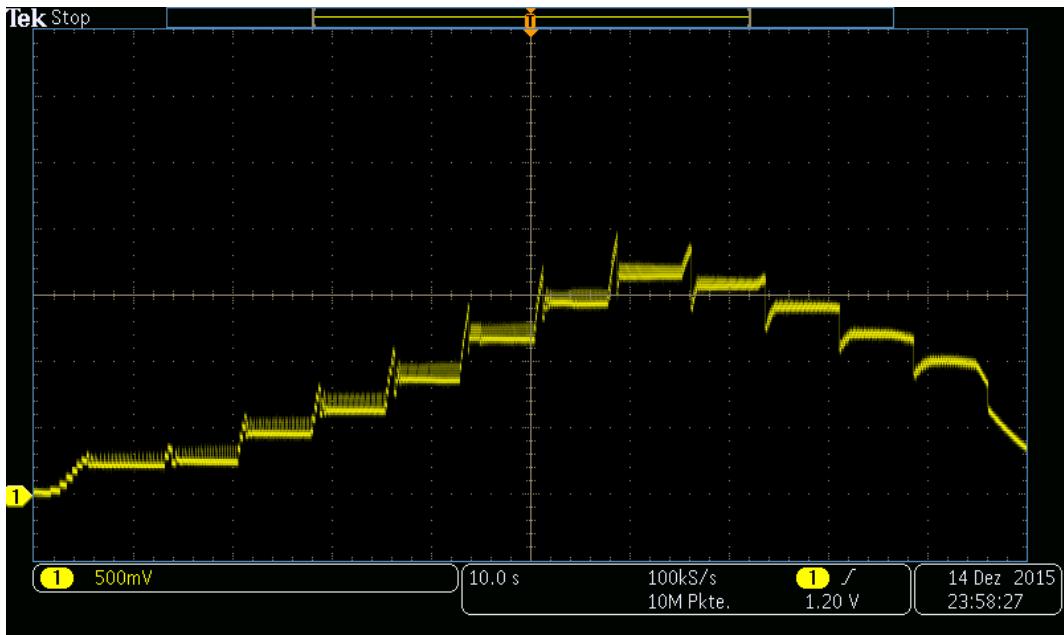


Abbildung 3.20: Messung an V_HRV bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Spannungslevels

Die Spannungslevels, wie sie in Abbildung 3.18 zu sehen sind, bestimmen die Hauptfunktionsweise des EM8500. Verschiedene Konfigurationen werden im Verlauf des Projektes ausprobiert, da sich die Werte für den STS verändern und die richtigen Einstellungen nicht ganz einfach zu finden sind. Die ersten Versuche werden mit dem auf dem Board integrierten STS von 100 μ F und dem LTS, welcher ein 100 mF grosser Super Cap ist, gemacht. Da die geernetet Energie relativ gering ist, wird dieser LTS jedoch sehr langsam geladen, wodurch der Ladevorgang mit dem Oszilloskop nur über sehr lange Messzeiten zu sehen ist. Deshalb wird ein externer Kondensator als LTS von 3300 μ F angeschlossen.

Als erstes werden die Register `reg_v_bat_max_hi` und `reg_v_bat_max_lo` eingestellt. Für einen LiPo Akku würde `v_bat_max_hi` auf 4.2 Volt eingestellt werden, da dies die maximale Spannung an einem LiPo ist. Für den verwendeten LTS kann dieser Wert auch höher gesetzt werden. Der Wert wird im ersten Versuch auf 5.5 V eingestellt, `v_bat_max_lo` auf 5.4 V. Die ersten Messungen ergeben jedoch, dass der EM Chip mit dieser Konfiguration nicht mehr richtig funktioniert. VSUP wird unterhalb vom Pegel vom STS abgeschaltet. Aus diesem Grund werden die Werte -hi auf 4.2 V und -lo auf 4.1 V konfiguriert.

Die nächsten Register sind `reg_v_apl_max_hi` und `reg_v_apl_max_lo`. Diese werden auf

die Werte 3.5 V und 3.4 V eingestellt. Erreicht der STS den Pegel von 3.5 V, wird die überschüssige Energie in den LTS transferiert. Die Register `v_bat_min_lo`, `v_bat_min_hi_con` und `v_bat_min_hi_dis` werden auf die Werte 1.8 V, 1.9 V und 2.9 V eingestellt. In der Messung Abbildung 3.21 ist ersichtlich, das VSUP eingeschaltet wird, sobald der STS den Pegel von `v_bat_min_hi_dis`, also 2.9 V, erreicht. Die Energie wird dann vollständig vom STS an VSUP zur Verfügung gestellt und ist solange verfügbar, bis sich der STS auf den Pegel von `v_bat_min_lo` entladen hat. VSUP wird dann abgeschaltet und der STS wird wieder geladen. Da an VSUP ein 10 kOhm Widerstand angeschlossen ist, wird die Energie auch gebraucht. In der Messung ist der ULP LDO ausgeschaltet, damit das Verhalten an VSUP gesehen wird. Es ist ersichtlich, dass VSUP eingeschaltet wird, wenn der STS den Pegel von 2.9 V erreicht und ausgeschaltet wird VSUP, wenn der STS auf den Pegel von 1.8 V gefallen ist. Der LTS kann nicht geladen werden, da sich der STS gleich entlädt beim einschalten von VSUP. Der STS müsste sich weiter auf `v_apl_max_lo` aufladen können, damit danach die überschüssige Energie in den LTS transferiert werden kann. Es kann also über die Zeit, in der VSUP eingeschaltet ist (436 ms) 200 uA gezogen werden. Die eingestellten Spannungslevels sind in Tabelle 3.5 nochmals zusammengefasst. Für die folgenden Messungen werden die Harvesting Parameter gemäss Tabelle 3.4 eingestellt.

Spannungslevels Register Einstellungen	
<code>v_bat_max_hi</code>	4.2 V
<code>v_bat_max_lo</code>	4.1 V
<code>v_bat_min_hi_dis</code>	2.9 V
<code>v_bat_min_hi_con</code>	1.9 V
<code>v_bat_min_lo</code>	1.8 V
<code>v_apl_max_hi</code>	3.5 V
<code>v_apl_max_lo</code>	3.4 V

Tabelle 3.5: Einstellungen EM8500 für die Spannungslevels von Messung 1



Abbildung 3.21: EM8500 Messung Versuch 1. Gelb = V_HRV, Grün = V_STS, Blau = V_LTS, Rot = VSUP

In der nächsten Messung wird v_bat_min_hi_dis auf 3.3 V gestellt. Somit muss sich der STS auf diesen Pegel laden, damit VSUP eingeschaltet werden kann. Das heisst, es steht mehr Energie für VSUP zur verfüzung. In Abbildung 3.22 ist wiederum das Ergebnis der Messung zu sehen. Es wurde in etwa die gleiche Geschwindigkeit, wie bei der vorherigen Messung gewählt. VSUP ist jetzt für 619 ms verfügbar.



Abbildung 3.22: EM8500 Messung Versuch 2. Gelb = V_HRV, Grün = V_STS, Blau = V_LTS, Rot = VSUP

Bis anhin wird der LTS nie geladen, da sich der STS beim Einschalten von VSUP gleich wieder entlädt. Während der Entwicklung der Software für den TI-SensorTag werden Probleme mit dem Energieverbrauch festgestellt (Kapitel 3.3), wodurch viel Energie benötigt wird. Aus diesem Grund wird die Hauptfunktionsweise des EM Chips die oben beschriebene sein, wobei die Energie immer nur aus dem STS genommen werden kann, da sich der STS nicht weiter aufladen kann. Mit hohen Geschwindigkeiten wird mehr Energie erzeugt und der STS kann sich weiter aufladen, womit überschüssige Energie in den LTS transferiert werden kann. In Abbildung 3.23 ist der Ladevorgang vom LTS ersichtlich. Dabei ist an VSUP kein Verbraucher angeschlossen, damit der Effekt besser sichtbar wird.

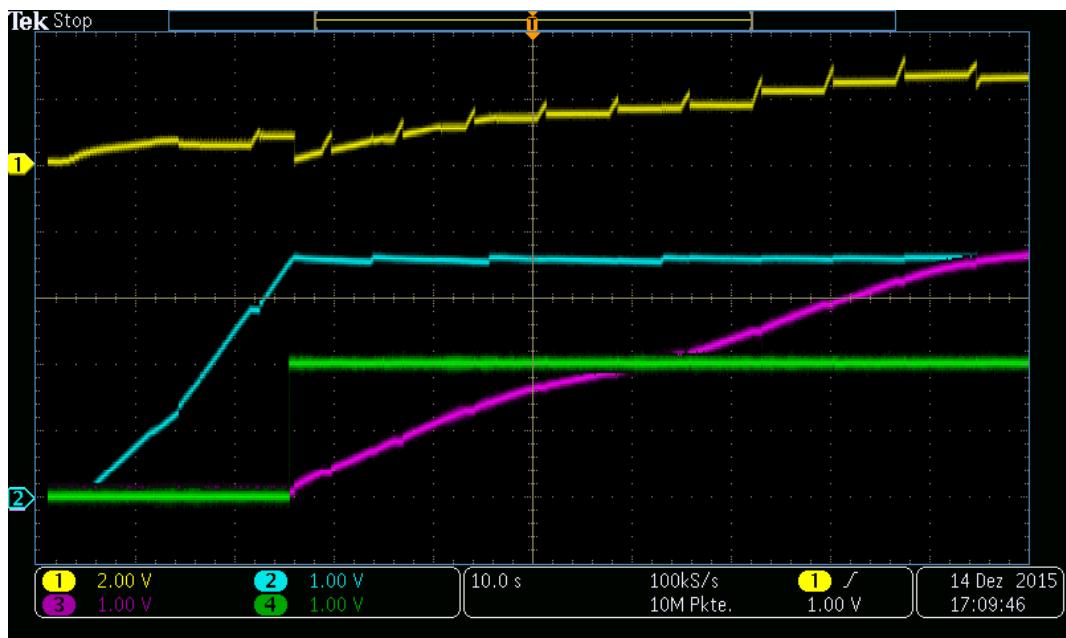


Abbildung 3.23: EM8500 Ladevorgang LTS. Gelb = V_HRV, Blau = V_STS, Rot = V_LTS, Grün = VSUP

Energiemessung an V_HRV

Um die geerntete Energie, welche im Power Management Chip verwendet wird zu messen, werden wieder Energiemessungen gemacht. Diese sind bei verschiedenen Geschwindigkeiten in folgender Abbildung 3.24 von langsamer (oben links) bis schnelle Geschwindigkeit (unten rechts) abgebildet. Die geerntete Energie ist dabei zwischen zwei Magnetdurchläufen gemessen, woraus auch die Geschwindigkeit mit der Zeitangabe zwischen den Markern berechnet werden kann. Die Spannung ist dabei der obere Verlauf mit den Peaks vom Magnetdurchlauf. Die gelbe Linie ist der gemessene Strom, welcher in V_HRV hinein fliesst. Wie man an den Energiewerten sieht, ist bei langsamem Geschwindigkeiten nicht viel Energie zu ernten, wohingegen bei hohen Geschwindigkeiten viel Energie geerntet werden kann.

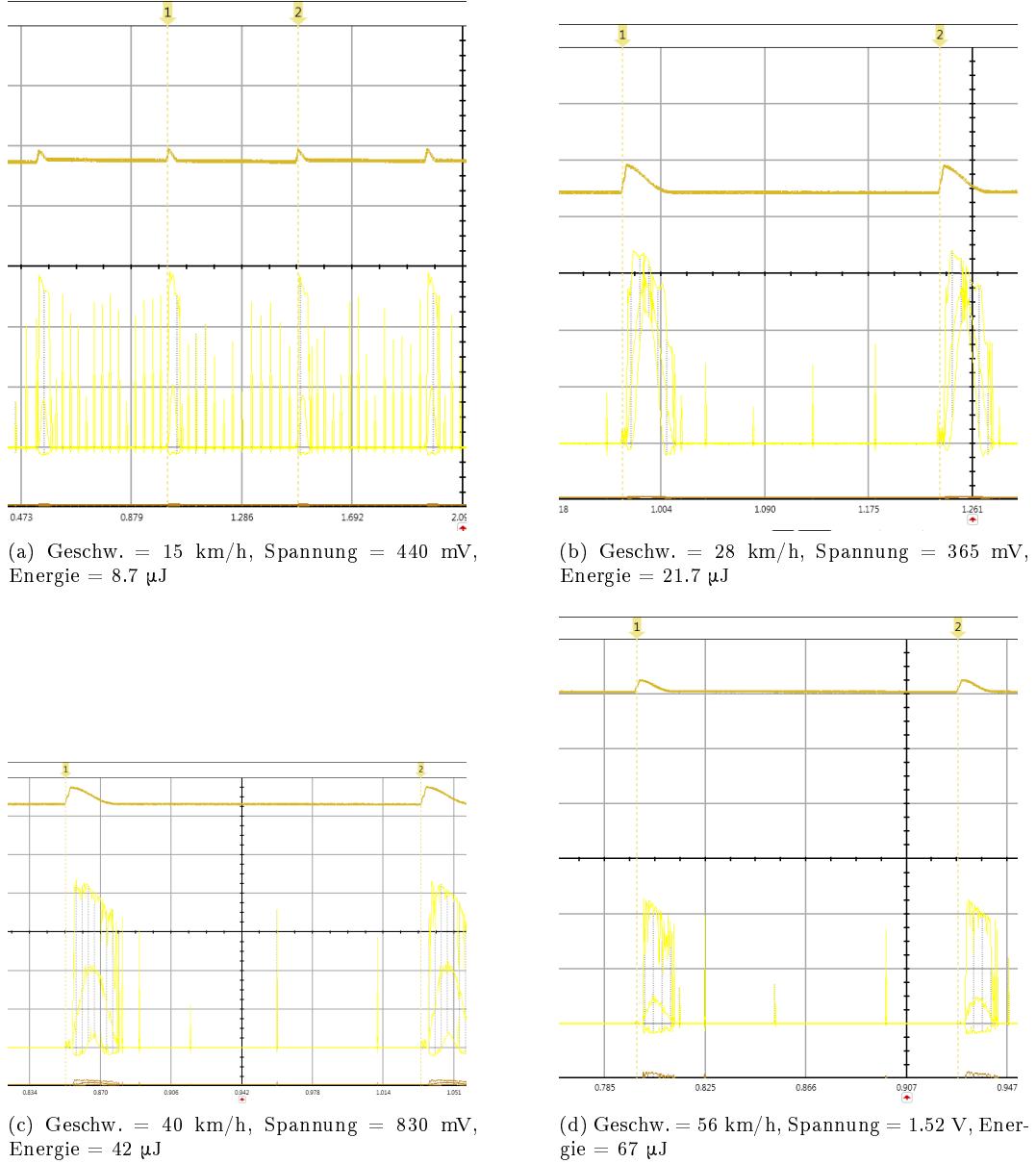


Abbildung 3.24: Energiemesung an V_HRV

Weitere Einstellungen

- Der Chip ist im secondary cell mode. Das heisst der LTS wird geladen und ist keine Batterie, sondern ein wiederaufladbarer Akku / Kondensator.
- Damit der STS und LTS zuerst geladen werden können beim Aufstarten des Chips, bevor VSUP eingeschaltet wird, kann ein Timer eingestellt werden. Dieser wird auf 10 s eingestellt, danach wird VSUP eingeschaltet. Über einen Taster auf dem Board kann der Chip auch früher über den Wake-Up Pin aufgeweckt werden.
- Beim Stillstand des Rades wird keine Energie produziert und die Geschwindigkeit muss nicht mehr gemessen werden. Deshalb wird VSUP abgeschaltet und erst bei Weiterfahrt wieder eingeschaltet.

- Die Battery Protection ist eingeschaltet. Damit wird der LTS nicht unter einen einstellbaren Wert entladen. Der eingestellte Pegel `v_bat_min_lo` ist 1.8 V.
- Alle VAUX Ausgänge sind deaktiviert, da sie nicht gebraucht werden.
- Der ULP LDO ist immer eingeschaltet auf 2 V, damit eine konstante Ausgangsspannung an VSUP anliegt.

3.2.5 Finale Konfiguration

Für die resultierende Konfiguration muss als erstes der Energieverbrauch von der Applikation, also vom TI-SensorTag, bekannt sein. Damit ein geeigneter STS gewählt werden kann, muss die verfügbare Energie im Kondensator berechnet werden. Diese berechnet sich an einer Gleichspannung wie folgt [11]:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (3.6)$$

Die verfügbare Spannung am Kondensator ist dabei `v_bat_min_hi_dis` und `v_bat_min_lo`. Es ist also zu empfehlen, dass `v_bat_min_hi_dis` möglichst hoch gewählt wird, damit ein kleinerer STS gewählt werden kann. Damit der Pegel `v_bat_min_hi_dis` möglichst hoch gewählt werden kann, muss dafür auch `v_apl_max_hi` und `_lo` auf einen höheren Pegel gesetzt werden. In nachstehender Tabelle 3.6 sind die neuen eingestellten Pegel aufgelistet.

Spannungslevels Register Einstellungen	
<code>v_bat_max_hi</code>	4.2 V
<code>v_bat_max_lo</code>	4.1 V
<code>v_bat_min_hi_dis</code>	3.6 V
<code>v_bat_min_hi_con</code>	2.1 V
<code>v_bat_min_lo</code>	1.8 V
<code>v_apl_max_hi</code>	3.8 V
<code>v_apl_max_lo</code>	3.7 V

Tabelle 3.6: Einstellungen EM8500 für die Spannungslevels

Aus dem Kapitel 3.3 kann entnommen werden, dass die verwendete Software bei der Geschwindigkeit von 20 km/h die Energie von $1300 \mu J$ braucht. Für höhere Geschwindigkeiten wird weniger Energie benötigt. Aus den erwähnten Energieproblemen in Kapitel 3.3 wird VSUP nach einem Messvorgang aktiv ausgeschaltet, damit sich der STS wieder aufladen kann. Der TI-SensorTag wird aufgestartet, misst zwei Magnetrückläufe, versendet über BLE die gemessene Zeit und schaltet über die serielle Schnittstelle VSUP am EM Chip ab. Dabei wird im Register `reg_pwr_mgt` an der Adresse 0x19 das Bit `sleep_vsup` gesetzt. Der EM Chip schaltet VSUP aus und wartet die eingestellte Sleep Time von 10 s, bis VSUP wieder eingeschaltet wird. Somit kann ein geeigneter STS berechnet werden:

$$C = \frac{2 \cdot W}{U^2} = \frac{2 \cdot 1300 \mu J}{(3.6 V)^2 - (2.1 V)^2} = 304 \mu F$$

Damit eine Messung auch bei langsameren Geschwindigkeiten funktioniert, wird ein Kondensator von $470 \mu F$ gewählt. Somit sollte es möglich sein, alle 10 s die Radumlaufzeit zu messen und diese drahtlos zu versenden.

Die Messung in Abbildung 3.25 zeigt nun das Verhalten vom EM Chip mit dem angeschlossenen TI-SensorTag an VSUP an. Für die Messung wurde der EM8500 gemäß Tabelle 3.4 und

3.6 konfiguriert. Der STS ist ein $470 \mu\text{F}$ und der LTS ein $3300 \mu\text{F}$ Elektrolyt-Kondensator. In Abbildung 3.25a ist zu sehen, dass die ersten fünf Messungen erfolgreich sind und die 6. nicht erfolgreich beendet werden konnte, da der STS zu tief entladen wird. In Abbildung 3.25b ist die 5. erfolgreiche Messungen des Raddurchlaufes zu sehen. Der STS entlädt sich in der Messzeit von ca. 600 ms fast bis auf den minimalen Pegel. Durch die Geschwindigkeit von ca. 25 km/h kann der STS in 10 s nicht genügend aufgeladen werden für eine weitere Messung. Dies ist in Abbildung 3.25c zu sehen. Der STS entlädt sich auf 1.8 V, wobei auch VSUP zusammenbricht und der TI-SensorTag nicht mehr richtig arbeiten kann. Die gesamte Konfiguration des Chips ist im Anhang F zu finden.



(b) Zoom Ausschnitt 1

(c) Zoom Ausschnitt 2

Abbildung 3.25: EM8500 Messungen mit angeschlossenem TI-SensorTag als Verbraucher an VSUP. Gelb = V_HRV, Blau = V_STS, Rot = V_LTS, Grün = VSUP

3.3 Daten Verarbeitung - TI-SensorTag

3.3.1 Übersicht

Für die Datenverarbeitung und die drahtlose Kommunikation zum Smartphone wird wie bereits in Kapitel 2.3.2 erwähnt, der TI-SensorTag von Texas Instruments verwendet. Dieser hat den Microcontroller CC2650 verbaut, welcher einen Cortex-M3 Prozessor und für die Drahtloskommunikation einen Cortex-M0 im gleichen Chip verbaut hat. Der Cortex-M0 ist für das gesamte Handling von Bluetooth zuständig und kann nicht vom User selbst programmiert werden. Für die zu entwickelnde Software wird nur der Cortex-M3 Prozessor verwendet. Die genaue Übersicht über den Chip kann aus dem Datenblatt und dem Reference Manual vom CC2650 entnommen werden Anhang A. Die Software wird im Code Composer Studio von Texas Instruments entworfen.

Die zu entwickelnde Software für den TI-SensorTag hat folgende Anforderungen, um einen Geschwindigkeitssensor zu implementieren:

- Aufstarten des Chips
- Messen der Zeit zwischen zwei Magnetdurchläufen
- Die gemessene Zeit per Bluetooth Advertising an das Smartphone senden
- Dabei soll der Chip möglichst wenig Strom verbrauchen für die gesamte Anwendung

3.3.2 Bluetooth Low Energy

Für die drahtlose Kommunikation zum Smartphone wird die Bluetooth Low Energy (BLE) Technologie verwendet, welche in diesem Chip zur Verfügung steht. Für eine aktive Verbindung zwischen dem Geschwindigkeitssensor und dem Smartphone muss das Bluetooth Protokoll eingehalten werden. Dabei muss eine Verbindung aufgebaut und beibehalten werden, was sich negativ auf den Stromverbrauch auswirkt. Hierfür müsste der Chip immer eingeschaltet sein, was bei einem Stillstand mit dem Fahrrad aber nicht mehr möglich ist. Deshalb wird auf eine aktive Verbindung verzichtet und es wird nur der BLE Advertising-Modus verwendet. Dieser wird auch für den Aufbaumodus einer aktiven Verbindung verwendet. Ein Gerät muss sich zuerst über BLE Advertising den umliegenden Geräten zeigen, damit man weiß, mit welchem Gerät man eine Verbindung aufbauen will. Das heißt, dass über ein BLE Advertising-Paket die Geräteinformationen und auch schon einige Datenbytes versendet werden können. Dabei wird das Advertising-Paket auf drei Kanälen gesendet [12]. Diese Datenbytes werden in dieser Arbeit verwendet, um die gemessene Radumlaufzeit zu versenden. Somit besteht eine einseitige BLE Kommunikation vom Geschwindigkeitssensor zum Smartphone. Die BLE Advertising-Pakete können von allen BLE-fähigen Geräten empfangen werden.

3.3.3 Software

Die Grundüberlegungen wie die Software die Anforderungen handhaben soll sind die folgenden:

1. Der Chip soll aufstarten, sobald VSUP vom EM8500 eingeschaltet wird
2. Den Real Time Clock (RTC) als free running counter aktivieren, damit Zeitmessungen gemacht werden können

3. Den Chip in einen tiefen Energiemodus versetzen
4. Den Chip über den vom Magneten erzeugten Impuls aufwecken und die aktuelle Zeit vom RTC abspeichern, danach wieder in den Standby Modus schalten
5. Den Chip wieder über den Magnetimpuls aufwecken und wiederum die aktuelle Zeit vom RTC abspeichern
6. Die Differenz von den zwei Zeiten bilden und diese per Bluetooth Advertising Paket versenden, danach wieder in den Standby Modus schalten

Die Schritte 2 - 6 wiederholen sich danach kontinuierlich.

Energiemodi CC2650 und Bluetooth

Der CC2650 hat vier verschiedene Energiemodi (diese können aus dem Reference Manual auf Seite 425 im Kapitel 6.6 - Power Modes entnommen werden). Im Energiemodus Idle kann der RF Core für das Bluetooth noch verwendet werden, der Stromverbrauch ist softwareabhängig und im Standby verbraucht der Chip noch ca. $1 \mu\text{A}$. Im Standby ist der RTC noch aktiv und der Chip kann über einen Pin aufgeweckt werden. Damit im Standby die Registerkonfigurationen beibehalten werden, wacht der Chip zyklisch auf, damit diese aktualisiert werden (Register refreshing). Diese zwei Energiemodi wirken also sehr vielversprechend für die oben genannten Anforderungen.

Die Software für die Energiemodi und das Versenden von Bluetooth Paketen wurde vom INES an der ZHAW bereits entwickelt und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Die erhaltene Software verwendet den RTC, um zyklisch aus dem Standby Modus aufzuwachen und Temperatur- und Feuchtigkeitswerte per BLE Advertising zu versenden. Diese wird um die oben genannten Anforderungen erweitert und angepasst.

Diese Softwarevorlage wird mit dem entwickelten Power Management getestet und ausgemessen. Die Software funktioniert dabei wie folgt:

1. Aufstarten des Chips, sobald VSUP vom EM8500 eingeschaltet ist
2. Konfigurieren des RTC, damit der Chip alle 5 s aus dem Standby Modus aufwacht
3. Senden einen BLE Advertising Paketes mit Temperatur- und Feuchtigkeitswerten auf allen drei Advertising Kanälen
4. Den Chip in den Standby Modus schalten
5. Aufwachen vom Standby mittels RTC nach 5s

Die Software wiederholt sich kontinuierlich in den Schritten 3-5. Mit dieser Software ist es möglich alle 5 s ein BLE Advertising Paket zu versenden. Im Standby Modus verbraucht der Chip gemessen noch $16 \mu\text{A}$, was aus Energiemessungen herausgelesen werden kann. Somit können STS und LTS geladen werden. Mit der Änderung, dass der Chip über einen Pin aufwacht und das BLE Paket versendet, wird der Energieverbrauch etwas höher sein, aber es sollte möglich sein, einen Geschwindigkeitssensor Energieeffizient zu implementieren.

Blockdiagrammdarstellung der Software

In Abbildung 3.26 ist das Sequenzdiagramm über den Ablauf der Software gemäss den bereits erwähnten Schritten 1-6 ersichtlich. Die meiste Zeit ist der Microcontroller im Standby Modus und braucht ca. $16 \mu\text{A}$ (blauer Teil). Das Senden per BLE auf allen 3 Kanälen ist in

Abbildung 3.27 zu sehen. Der Energieverbrauch liegt zwischen den Markern 1 & 2 bei $73 \mu\text{J}$ in der Zeit von 3.5 ms (violetter Teil in Abbildung 3.26). Die Software wiederholt danach den blauen und violetten Teil immer wieder.

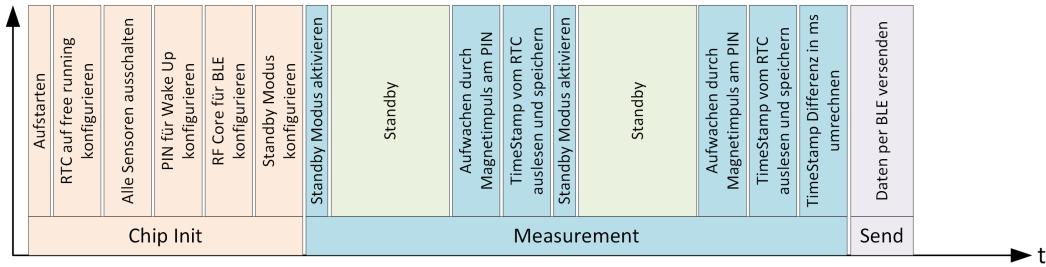


Abbildung 3.26: Sequenzdiagramm Software Lösungsansatz 1

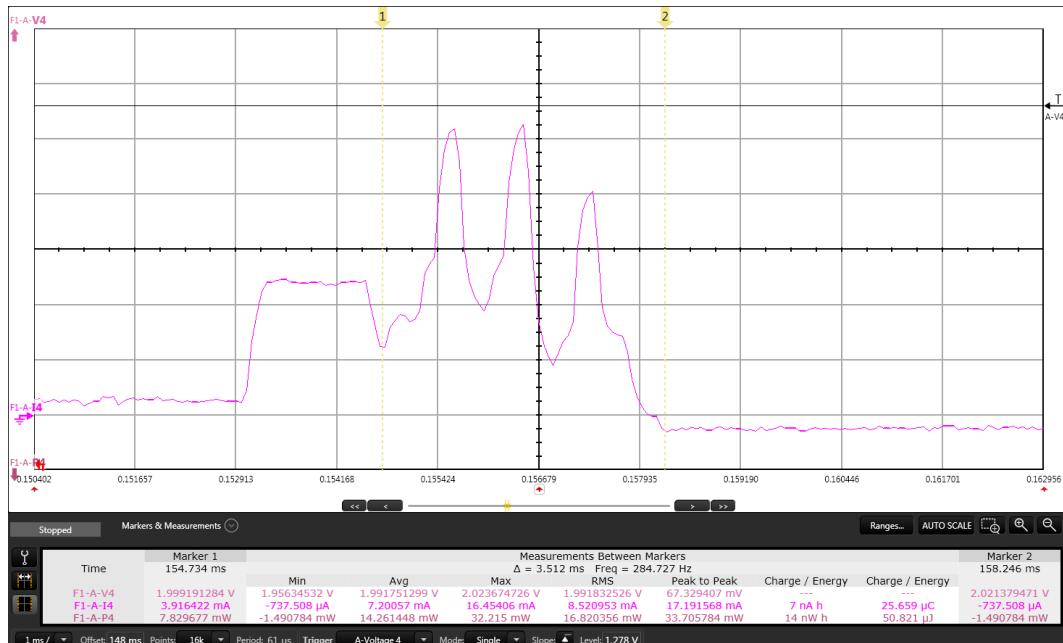


Abbildung 3.27: Energiemessung TI-SensorTag BLE Advertising auf drei Kanälen

Damit der Chip über einen Pin aufgeweckt werden kann, muss dieser dafür konfiguriert werden. Hierbei treten jedoch Probleme auf, welche auch mit Hilfe des INES an der ZHAW bis Projektabschluss nicht gelöst werden konnten. Das Problem ist, dass das Aufwachen mit einem Pin Event vom Standby Modus nicht funktioniert. Es muss also ein zweiter Lösungsansatz entwickelt werden, welcher in Abbildung 3.28 und in folgender Aufzählung ersichtlich ist:

1. Aufstarten des Chips, sobald VSUP vom EM8500 eingeschaltet ist
2. Den Chip in den Idle Modus versetzen
3. Warten auf den 1. Magnetimpuls und herauslesen der RTC Zeit
4. Warten auf den 2. Magnetimpuls und herauslesen der RTC Zeit
5. Zeitdifferenz bilden und über BLE versenden
6. VSUP am EM8500 per SPI ausschalten

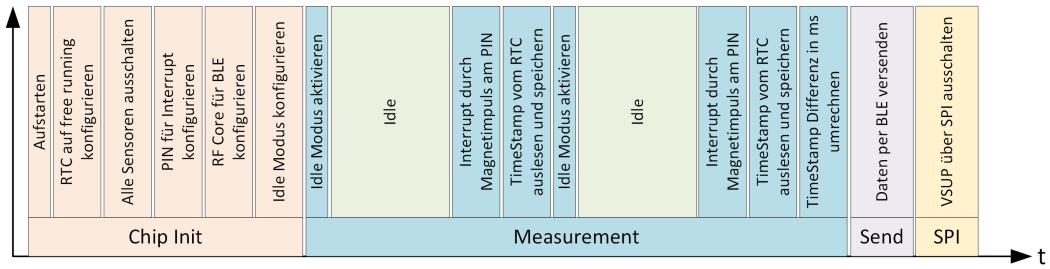


Abbildung 3.28: Sequenzdiagramm Software Lösungsansatz 2

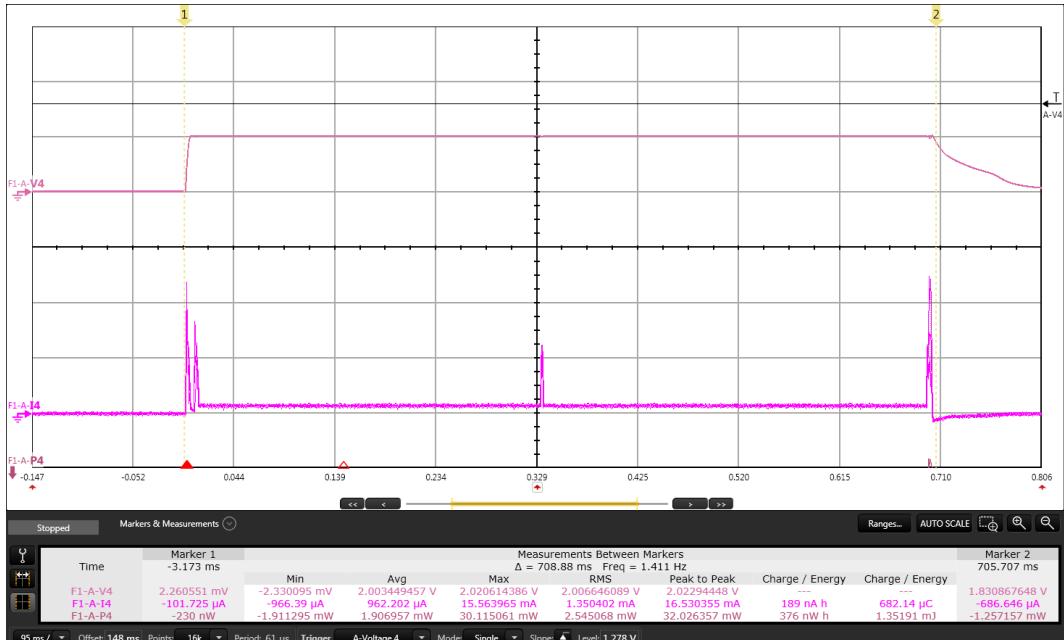


Abbildung 3.29: Energiemessung TI-SensorTag mit Lösungsansatz 2

Diese Version der Software verbraucht jedoch sehr viel mehr Energie, da der Chip immer im Idle Modus ist. Im Idle Modus verbraucht der TI-SensorTag zwischen 600 µA und 1 mA. Die Energiemessung in Abbildung 3.29 wurde mit 20 km/h des Rades gemacht. Die beschriebene Sequenz in Abbildung 3.28 wird hierbei durchgelaufen und stellt VSUP am Ende ab. Die erste Stromspitze ist das Aufwachen und Konfigurieren des Pin Interrupts, die zweite Spalte ist der 1. Magnetimpuls und die Spalte am Ende ist der 2. Magnetimpuls mit anschliessendem Senden der Daten per BLE. Die gesamte Energieaufnahme ist bei 1.3 mJ, was im Gegensatz zu ein paar µJ im 1. Lösungsansatz ein sehr grosser Unterschied ist. Der Durchschnittsverbrauch liegt bei 962 µA, was dem Idle Strom entspricht. Für höhere Geschwindigkeiten nimmt die verbrauchte Energie ab, da die gesamte Messzeit kürzer wird.

In Abbildung 3.30 ist eine Energiemessung zu sehen, in der die Energie im STS nicht ausreicht. Bereits vor der 3. Stromspitze bricht die Spannung VSUP zusammen, was dazu führt, dass der TI-SensorTag die Daten nicht mehr über BLE versenden kann. Ebenfalls funktioniert anscheinend die SPI Schnittstelle nicht mehr, da VSUP nicht ausgeschaltet wird. Diesen Problemfall gibt es mit der Software bei Geschwindigkeiten unter 20 km/h leider oft.

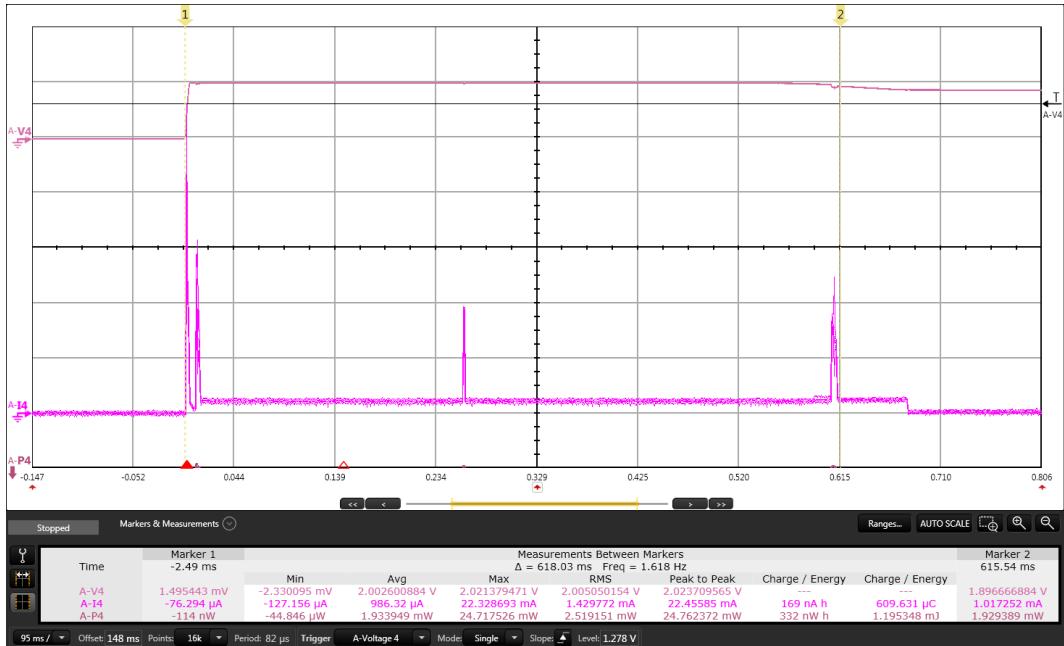


Abbildung 3.30: Energiemessung TI-SensorTag mit Lösungsansatz 2 mit zu wenig Energie im STS

Berechnung der Radlaufzeit

Die Radlaufzeit wird anhand von zwei Magnetimpulsen berechnet. Hierfür wird der RTC verwendet, da dieser auch im Standbymodus noch verfügbar ist. Der RTC wird von einer Frequenz von 32.768 kHz getaktet und hat zwei Register in dem die aktuelle Zeit gespeichert ist. Das eine Register ist der Sekundenzähler und das zweite ein Subsekundenzähler. Mit dem Einschalten des RTC, werden diese beiden 32-Bit Register kontinuierlich inkrementiert. Bei einem Magnetimpuls wird jeweils ein Interrupt am Pin ausgelöst und in diesem wird der aktuelle Wert aus dem Subsekundenregister gelesen. Dadurch kann zwischen zwei Interrupts die Differenz von den beiden gelesenen Werten gebildet und diese in Millisekunden umgerechnet werden. Dieser Wert wird per BLE versendet und in der Smartphone-Applikation mit dem Wissen des Radumfangs in die Geschwindigkeit umgerechnet. Die Geschwindigkeit kann wegen dem fehlenden Wissen des Radumfangs nicht direkt auf dem Microcontroller berechnet werden. Ansonsten wäre die Software nur für einen Radumfang zu gebrauchen.

3.4 Daten Ausgabe - Applikation

Die Ausgabe der Daten soll eine Applikation übernehmen, welche auf einem Andriod-System läuft. Sie soll folgende Funktionen erfüllen können:

- Empfangen der Daten über Bluetooth Low Energy
- Verarbeitung der Daten
- Darstellung der Daten

Es existiert bereits ein Programmrahmen, welcher vom InES zur Verfügung gestellt wird. Diese Applikation empfängt Daten per Bluetooth Low Energy und gibt diese aus. Die App wurde für verschiedene Devices geschrieben. Somit besteht nun die Aufgabe, ein weites Device in Form eines Fahrradcomputers hinzuzufügen.

Wie im Unterabschnitt 3.3.3 beschrieben, sind die zu empfangenen Daten als Radumlaufzeit in Millisekunden zu interpretieren. Nachfolgend folgt jeweils eine kurze Beschreibung, wie die Applikation aufgebaut wird. Das gesamte Softwareprojekt ist auf der CD zu finden und wurde mit der Software „Android Studio“ geschrieben bzw. bearbeitet.

Empfangen der Daten über Bluetooth Low Energy

Empfangen wird ein 32-Bit Wert, welcher im Advertising Paket aus vier 8-Bit Werten zusammengefügt wird. Diese werden zum Typ „double“ gecastet:

```
inData = (((long)(data[12])) & 0x00ff) << 24;
inData = inData + (((long)(data[11])) & 0x00ff) << 16;
inData = inData + (((long)(data[10])) & 0x00ff) << 8;
inData = inData + (((long)(data[9]))) & 0x00ff);
time = (double)inData;
```

Verarbeitung der Daten:

In einem weiteren Schritt sollen nun die Daten in eine Geschwindigkeit in km/h umgerechnet werden. Dazu wird der Radumfang benötigt, welcher sich wie folgt berechnen lässt:

$$U = d \cdot \pi \quad (3.7)$$

Um die Geschwindigkeit zu erhalten, muss jetzt nur noch der Umfang durch die Zeit geteilt werden:

$$v = \frac{U}{t} \quad (3.8)$$

Am Ende dieses Abschnittes folgt die Umrechnung von m/s in km/h.

```

circumference = (durchmesser/100) * pi;
speed = (circumference / (time/1000)) * 3.6;

```

Darstellung der Daten

Die Ausgabe der Geschwindigkeit erfolgt über den vorgegebenen Programrahmen. Da dies noch keine Endlösung ist, werden zusätzliche Informationen, wie der Raddurchmesser des Fahrrades und die Umlaufzeit des Rades ausgegeben. Siehe Abbildung 3.31.

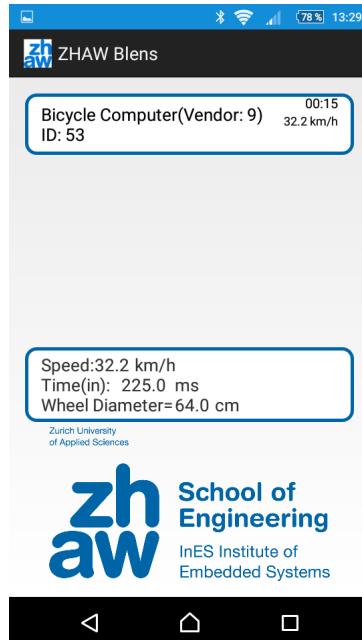


Abbildung 3.31: Ausgabe der Daten auf dem Smartphone

Bemerkung: Das Device wird nur bei der erhaltenen Vendor Nummer 9 angezeigt. Diese Nummer wird im TI-SensorTag programmiert. Der gesamte Quellcode befindet sich im Anhang H.

4 RESULTATE

Die gewonnenen Erkenntnisse werden hier nochmals zusammengefasst. Im vorhergehenden Kapitel sind die meisten erreichten Resultate bereits ersichtlich und mit Messungen aufgeführt. Mit der entwickelten Harvesting Hardware und der richtigen Konfiguration des EM8500 kann genügend Energie geerntet und gespeichert werden, um das Embedded System mit dem TI-SensorTag zu speisen und um den geforderten Geschwindigkeitssensor zu implementieren. Es ist nun möglich, alle 10 s einen neuen Geschwindigkeitswert per BLE zu versenden. In folgender Abbildung 4.1 ist das Blockdiagramm des realisierten Aufbaus zu sehen. Das Resultat soll hier jedoch bezüglich Umsetzung und Effizienz kritisch hinterfragt werden.

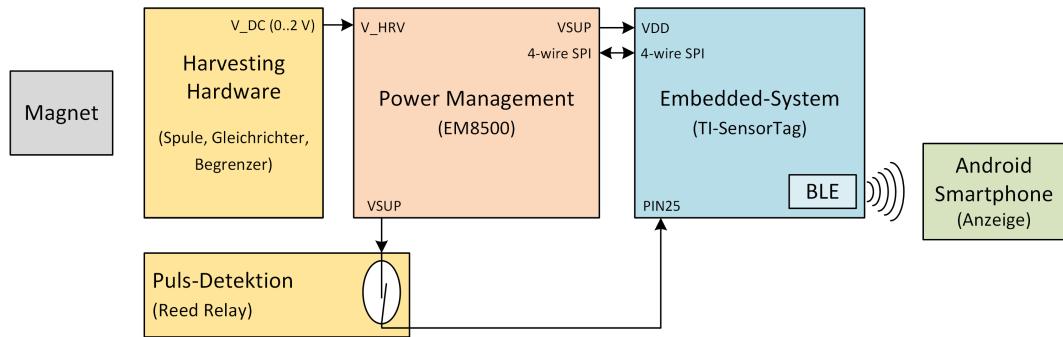


Abbildung 4.1: Blockschaltbild des aufgebauten Geschwindigkeitssensors mit allen verwendeten Komponenten

Bei der Harvesting Schaltung werden dafür die drei Dioden in serie entfernt und es wird eine Energiemessung gemacht. Somit wird die Spannung nicht beschränkt und die meiste Energie von der Spule wird in den Kondensator geladen. Dabei ist eine Last von 120 kOhm angeschlossen. Die Messung ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Dabei wird die Geschwindigkeit bis auf ein Maximum erhöht und danach rollt das Rad ohne weiteren Anschub aus. Es wird eine maximale Spannung von 5.7 V erzeugt, wobei ein Strom von 47 μ A fliesst.

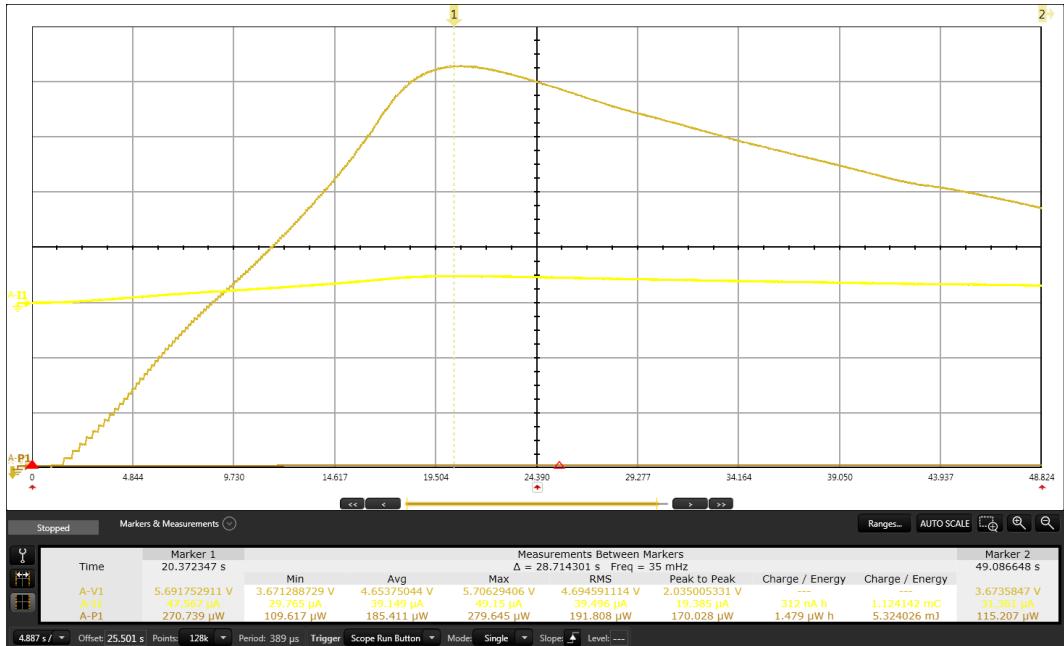


Abbildung 4.2: Energiemessung der Hardware ohne Spannungsbeschränkung

Über die verwendete Spannungsbegrenzung wird ein grosser Teil der Energie durch die Dioden vernichtet, was nicht optimal ist. Dieser Aufbau kann sicherlich verbessert werden, damit das Maximum an geernteter Energie auch verwendet werden kann. Dazu kann ein weiteres Konzept, wie bereits erwähnt, zum Beispiel mit einer Konstantstromquelle entwickelt werden.

Weiter kann die Software auf dem TI-SensorTag mit dem erwähnten Pin Wake-Up vom Standby Modus entwickelt werden, damit nur noch ein minimum an Energie verbraucht wird. Mit dieser Lösung sollte es möglich sein, alle 1 - 2 s einen neuen Geschwindigkeitswert per BLE zu erhalten, damit ein brauchbarer Geschwindigkeitssensor entsteht. Dafür sollte aber auch der EM8500 neu konfiguriert werden, damit der LTS optimal genutzt wird. Eine aktive Kommunikation über die serielle Schnittstelle zum EM-Chip kann während dem Betrieb zusätzlich als Informationsquelle über die geerntete Energie sein, damit die Effizienz des Sensors nochmals gesteigert werden kann. Das Hauptproblem bei dem jetzigen Lösungsansatz ist aber nach wie vor der TI-SensorTag.

5 DISKUSSION UND AUSBLICK

Das Ziel der Aufgabenstellung wurde von unserer Sichtweise erreicht und es wurde bewiesen, dass es möglich ist, einen Geschwindigkeitssensor an einem Fahrrad mittels Energy Harvesting zu entwerfen.

Das erreichen des Ziels war nicht einfach und auch nicht immer klar ersichtlich. Da die Software für den TI-SensorTag und die Konfiguration des EM8500 parallel entwickelt wurden, mussten immer wieder Parameter verändert und neue Berechnungen gemacht werden. Das machte die Arbeit zwar sehr interessant, war aber nicht so vorgesehen. Es ist ein wenig enttäuschend, dass der TI-SensorTag nicht wie gewünscht mit dem 1. Lösungsansatz, mit dem Pin Wake-Up aus dem Standby Modus, geweckt werden konnte. Dadurch wäre der Energieverbrauch des Sensors sehr viel kleiner. Der Energieverbrauch mit der aktuellen Software ist leider nicht wirklich eine Low Energy Anwendung, trotzdem konnte aber ein funktionierender, batterieloser Geschwindigkeitssensor entwickelt werden.

Allgemein ist die Verwendung der Energiemodi des TI-SensorTags sehr kompliziert zu programmieren, ebenfalls sind die Einstellungen für gewisse Register im EM8500 Chip noch nicht ganz ausgereift. Zu Beginn der Arbeit dachten wir, dass die Software und die Konfiguration für die beiden Chips eher einen kleinen Teil der Arbeit ausmachen würden. Jetzt am Schluss müssen wir jedoch eingestehen, dass genau diese zwei Teile die meiste Zeit in Anspruch genommen haben. Wir wollten uns eigentlich mehr auf die harvesting Hardware konzentrieren, um diese möglichst effizient zu designen. Dies ist uns leider nicht ganz gelungen. Trotzdem sind wir mit den erreichten Ergebnissen sehr zufrieden, da wir die Probleme genau lokalisieren konnten.

Ein weiterer Ausblick ist, das gesamte System so kompakt wie möglich zu designen. Somit besteht die Möglichkeit ein schützendes Gehäuse zu konstruieren, welches mit einer einfachen Mechanik - zum Beispiel einer Schnappvorrichtung - an den Rahmen des Fahrrades angebracht werden könnte. Zusätzlich müsste man auch den Magneten schützen. Die Neodym Magnete sind nicht rostfrei und für eine Anwendung im Freien ohne Gummischutz nicht gedacht. Solche Magnete sind auf dem Markt zu ersteigern. Siehe Datenblatt Topfmagnet mit Innengewinde und Gummischutz ITNG16 unter Anhang A.

In einer weiterführenden Arbeit müssen die erwähnten Probleme sicherlich nochmals überdacht werden.

Zur Zeitplanung im Anhang ist noch etwas anzumerken: die Zeitplanung beinhaltet die Evaluierung aller Bauteile und das Designen einer eigenen Elektronikplatine mit allen Bauteilen, da zu Beginn der Projektarbeit noch nicht klar war, dass der TI-SensorTag und der EM8500 verwendet werden sollen. Deshalb ist dieser Zeitplan nicht mehr aussagekräftig. Das Zeitmanagement hatten wir aber trotzdem gut im Griff. Ebenfalls funktionierte die Zusammenarbeit zwischen uns als Team sehr gut. Wir konnten die wichtigsten Erkenntnisse zusammen erarbeiten und die weiterführenden Arbeiten aufteilen.

6 VERZEICHNISSE

6.1 Glossar und Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
TEG	Thermo-Elektrischer-Generator
WIFI	Wireless Fidelity
GPS	Global Positioning System
STS	Short Time Storage für den EM8500
LTS	Long Time Storage für den EM8500
BLE	Bluetooth Low Energy
InES	Institute of Embedded Systems
ZHAW	Zürcher Fachhochschule für Angewandte Wissenschaften
RFID	Radio Frequency Identification
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DC	Direct Current
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter Integrated Circuit
MPPT	Maximum Power Point Controller
LiPo	Lithium Polymer
RTC	Real Time Clock

Tabelle 6.1: Tabelle Abkürzungsverzeichnis

6.2 Literaturverzeichnis

- [1] E. H. Forum. (26. Aug. 2009). Energy harvesting forum, Energy harvesting applications, Adresse: <http://www.energyharvesting.net/> (besucht am 13. 10. 2015).
- [2] C. U. of Technology. (2012). Energy harvesting wheel speed sensor, Adresse: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/159168.pdf> (besucht am 13. 10. 2015).
- [3] Supermagnete. (2013). Wissenswertes zu Magneten, Adresse: <http://www.supermagnete.ch/information> (besucht am 03. 11. 2015).
- [4] R. Kories und H. Schmidt-Walter, «Taschenbuch der Elektrotechnik», in. Verlag Harri Deutsch, 2013, Kap. 1.1.7 Induktivität, S. 4.
- [5] ——, «Taschenbuch der Elektrotechnik», in. Verlag Harri Deutsch, 2013, Kap. 2.3.13 Induktion, S. 87–95.
- [6] Supermagnete. (2013). Gtn-16 Topfmagnet mit Gewindezapfen, Adresse: http://www.supermagnete.ch/topfmagnete-mit-gewindezapfen/topfmagnet-mit-gewindezapfen-durchmesser-16mm-neodym-n42-vernickelt_GTN-16?img=5 (besucht am 12. 12. 2015).
- [7] R. Kories und H. Schmidt-Walter, «Taschenbuch der Elektrotechnik», in. Verlag Harri Deutsch, 2013, Kap. 10.2.3 Villard-Schaltung, S. 571.
- [8] EM-Microelectronics, *Power management controller with energy harvesting interface datasheet EM8500*, Version 1.0, 15. Juli 2015, S. 4.

- [9] ——, *Power management controller with energy harvesting interface datasheet EM8500*, Version 1.0, 15. Juli 2015, S. 5.
- [10] ——, *Power management controller with energy harvesting interface datasheet EM8500*, Version 1.0, 15. Juli 2015, S. 14.
- [11] R. Kories und H. Schmidt-Walter, «Taschenbuch der Elektrotechnik», in: Verlag Harri Deutsch, 2000, Kap. 1.1.12.3 Energie in der Kapazität, S. 9–10.
- [12] M. Galeev. (14. Juli 2011). Bluetooth 4.0: An introduction to bluetooth low energy-part I, Adresse: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278927 (besucht am 17.11.2015).

6.3 Abbildungsverzeichnis

1.1 Die fünf Teifunktionen der Projektarbeit	5
3.1 Verwendete Magnete [6]	11
3.2 Versuchsaufbau zum Messen der induzierten Spannung in der Spule	12
3.3 Spannungsverlauf an der Spule PREMO bei Magnetdurchlauf	14
3.4 Spannungskennlinie der induzierten Spannung in der Spule PREMO	15
3.5 Villardschaltung (2 Stufen), Eingang 0.5 V, sinus	16
3.6 Villardschaltung (2 Stufen), Eingang 2.0 V, sinus	16
3.7 Simulation Brückenschaltung mit Eingang 0.5 V	17
3.8 Simulation Brückengleichrichter mit Kondensator, Eingang 0.5 V	18
3.9 Simulation Brückengleichrichter mit Kondensator und Begrenzung, Eingang 6 V	19
3.10 Versuchsaufbau der Hardware mit den bisherigen Simulationen	19
3.11 Spannungsverlauf Hardware, induzierte Spannung am Eingang (Gelb), Ausgang am Kondensator (Grün)	20
3.12 Spannungskennlinie Hardware	21
3.13 Maximale Spannung bei maximaler Geschwindigkeit	22
3.14 Induzierte Spannungen in der Spule PREMO in allen Wicklungen	23
3.15 Reed Relay Schaltvorgang bei Magnetdurchlauf	24
3.16 Schema der entwickelten Harvesting Hardware	25
3.17 Blockschaltbild EM8500 [8]	26
3.18 Funktionsweise EM8500 [9]	27
3.19 Harvesting Power Überwachung [10]	29
3.20 Messung an V_HRV bei verschiedenen Geschwindigkeiten	30
3.21 EM8500 Messung Versuch 1. Gelb = V_HRV, Grün = V_STS, Blau = V_LTS, Rot = VSUP	32

3.22	EM8500 Messung Versuch 2. Gelb = V_HRV, Grün = V_STS, Blau = V_LTS, Rot = VSUP	32
3.23	EM8500 Ladevorgang LTS. Gelb = V_HRV, Blau = V_STS, Rot = V_LTS, Grün = VSUP	33
3.24	Energiemesung an V_HRV	34
3.25	EM8500 Messungen mit angeschlossenem TI-SensorTag als Verbraucher an VSUP. Gelb = V_HRV, Blau = V_STS, Rot = V_LTS, Grün = VSUP	36
3.26	Sequenzdiagramm Software Lösungsansatz 1	39
3.27	Energiemessung TI-SensorTag BLE Advertising auf drei Kanälen	39
3.28	Sequenzdiagramm Software Lösungsansatz 2	40
3.29	Energiemessung TI-SensorTag mit Lösungsansatz 2	40
3.30	Energiemessung TI-SensorTag mit Lösungsansatz 2 mit zu wenig Energie im STS	41
3.31	Ausgabe der Daten auf dem Smartphone	43
4.1	Blockschaltbild des aufgebauten Geschwindigkeitssensors mit allen verwendeten Komponenten	44
4.2	Energiemessung der Hardware ohne Spannungsbeschränkung	45
B.1	Eigenschaften Neodym Magnete	51
I.1	Ordnerstruktur der beigelegten Daten-CD	67

6.4 Tabellenverzeichnis

1.1	Verwendete Symbole in dieser Arbeit	6
3.1	Verwendete Messgeräte	10
3.2	Versuchsresultate induzierte Spannung in verschiedenen Spulen mit verschiede- nen Magnetgrößen	13
3.3	Versuchsresultate Hardware	21
3.4	Einstellungen EM8500 für die Harvesting Parameter	30
3.5	Einstellungen EM8500 für die Spannungslevels von Messung 1	31
3.6	Einstellungen EM8500 für die Spannungslevels	35
6.1	Tabelle Abkürzungsverzeichnis	47

A DATENBLÄTTER

Da die Datenblätter mehrere Seiten beanspruchen, sind diese auf der beigelegten Daten-CD (Anhang I) im Ordner „Datenblätter“ zu finden und hier nicht abgedruckt.

- Topfmagnet mit Gewindezapfen GTN16
- Topfmagnet mit Innengewinde und Gummischutz ITNG16
- Tabelle Eingenschaften der Neodym Magnete
- CMOS Gleichrichter
- Spule PREMO 3015N-0238J 32/06
- Capacitor CS0470
- Diode V4148
- Schottky Barrier Rectifier 1N5819
- EM8500 Datasheet - Power Management Controller with Energy Harvesting Interface
- CC26xx SimpleLink Wireless MCU Technical Reference Manual
- CC2650 Datasheet

B EIGENSCHAFTEN NEODYM MAGNETE

Neodym-Magnete

Güte	Remanenz		Koerzitivfeldstärke				Energie- produkt		max. Einsatz- temp.	
	Br		bHc		iHc		(BxH)max			
	Gauss (G)	Tesla (T)	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m³		
N30	10800-11200	1.08-1.12	9.8-10.5	780-836	≥12	≥955	28-30	223-239	≤80	
N33	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥12	≥955	31-33	247-263	≤80	
N35	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	33-35	263-279	≤80	
N38	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	36-38	287-303	≤80	
N40	12600-12900	1.26-1.29	10.5-12.0	860-955	≥12	≥955	38-40	303-318	≤80	
N42	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12.0	860-955	≥12	≥955	40-42	318-334	≤80	
N45	13200-13700	1.32-1.37	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	43-45	342-358	≤80	
N48	13700-14200	1.37-1.42	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	45-48	358-382	≤80	
N50	14000-14600	1.40-1.46	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	47-51	374-406	≤80	
N52	14200-14700	1.42-1.47	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	48-53	380-422	≤65	

Abbildung B.1: Eigenschaften Neodym Magnete

C MATLAB FILE

Im folgenden sind die Messergebnisse und die davon erzeugten Grafiken im Matlab von verschiedenen Messungen der entwickelten Hardware zu finden. In dieser Arbeit wird nicht auf jede dieser Messungen eingegangen.

Projekt Arbeit HS15 ZHAW

Table of Contents

Geschwindigkeit - Durchlaufzeit Magnet	1
Spannungskennlinie der Spule	2
Spannungskennlinie Hardware	3
Spannungskennlinie Hardware	5
Spannungskennlinie Hardware	7

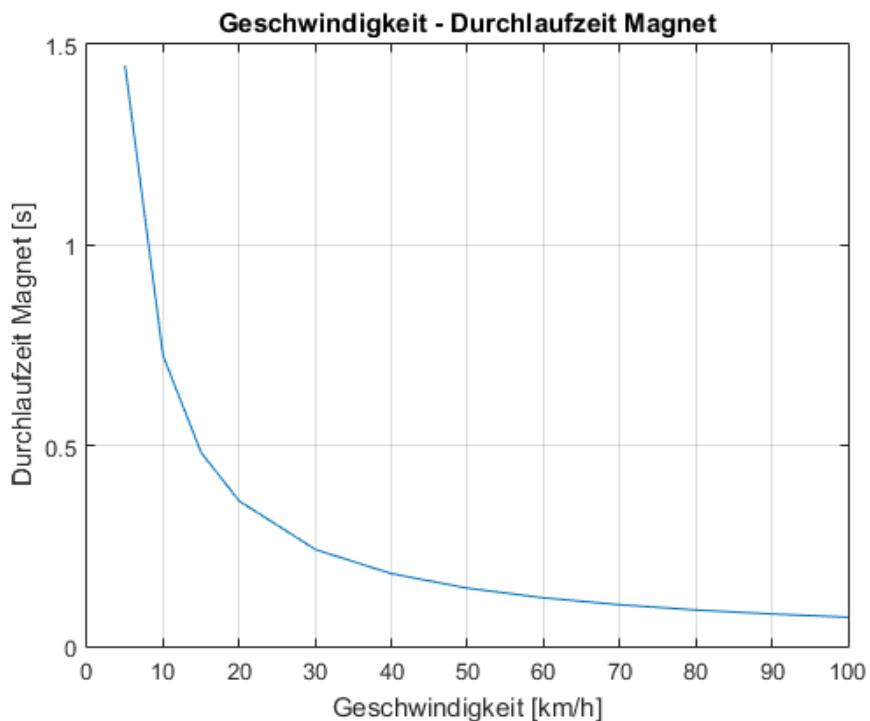
Messprotokoll Hardware

@Daniel Studer, Roman Schneider
18.12.2015

Geschwindigkeit - Durchlaufzeit Magnet

```
v = [5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 90 100]; % Geschwindigkeit [km/h]
r = 0.320; % Rad-Radius [m]
s = 2*pi*r; % Rad-Umfang [m]
delta_t = s./(v/3.6); % Zeit Magnetdurchlauf [s]

% Plot:
figure(1); plot(v,delta_t)
grid on
title('Geschwindigkeit - Durchlaufzeit Magnet')
xlabel('Geschwindigkeit [km/h]')
ylabel('Durchlaufzeit Magnet [s]')
```



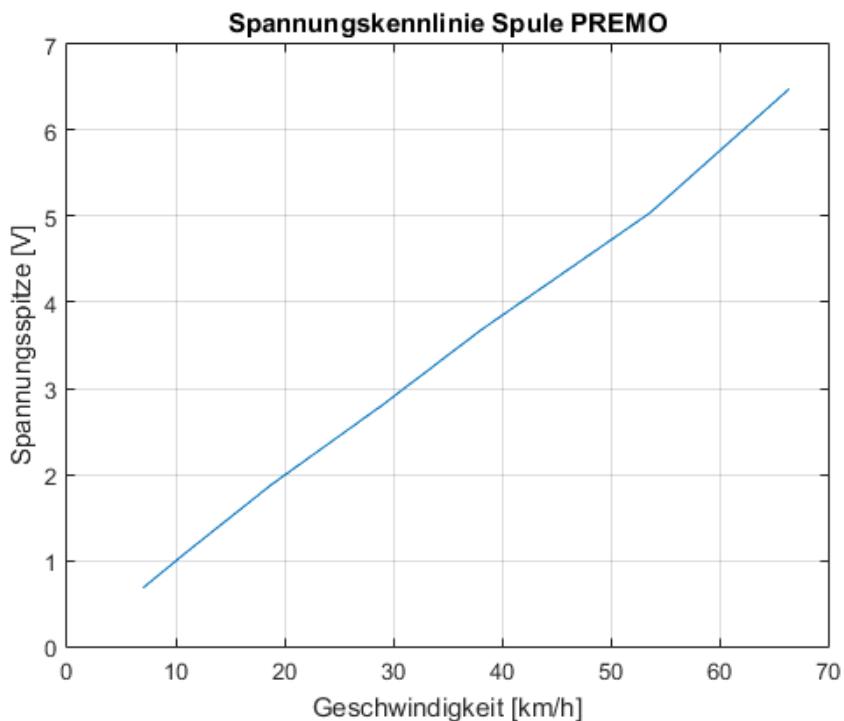
Spannungskennlinie der Spule

Spulen-Typ: PREMO 3015N-0238J 32/06
Versuch-Nr.: 1

```
% Aufgenommene Messpunkte:
t1 = [1.033 0.667 0.385 0.250 0.190 0.135 0.109]; % delta t [s]
u1 = [0.680 1.080 1.880 2.800 3.680 5.040 6.480]; % Spitzenwert [V]

% Berechnung:
v1 = s./t1*3.6; % Geschwindigkeit [km/h]

% Plot:
figure(2);
plot(v1,u1)
grid on
title('Spannungskennlinie Spule PREMO')
xlabel('Geschwindigkeit [km/h]')
ylabel('Spannungsspitze [V]')
```



Spannungskennlinie Hardware

Versuchs-Nr.: 2
Komponente: - Diodenbrücke - 2 Begrenzungs-Dioden
 - Kondensator - Lastwiderstand 10kOhm

```
% Aufgenommene Messpunkte:  

t2      = [1.122 0.638 0.395 0.193 0.149 0.124 0.108]; % delta t [s]  

u2_max = [0.100 0.276 0.500 0.940 0.992 1.040 1.056]; % max.  

    Spannung [V]  

u2_min = [0.076 0.244 0.468 0.900 0.960 1.000 1.016]; % min.  

    Spannung [V]  

% Berechnungen:  

i2_mittel = ((u2_max + u2_min)/2)/1e4; % Strom [A]  

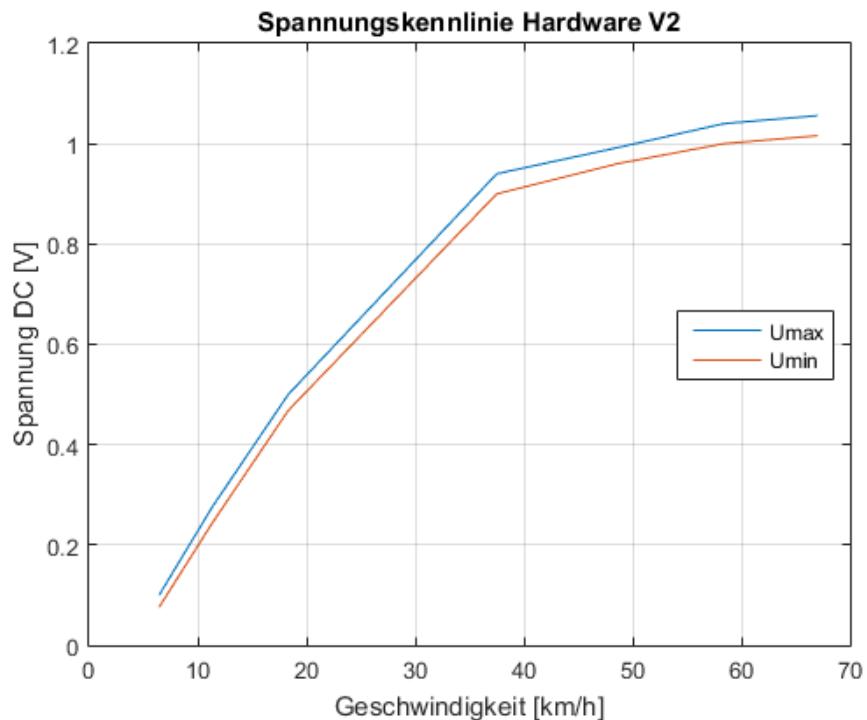
v2 = s./t2*3.6; % Geschwindigkeit  

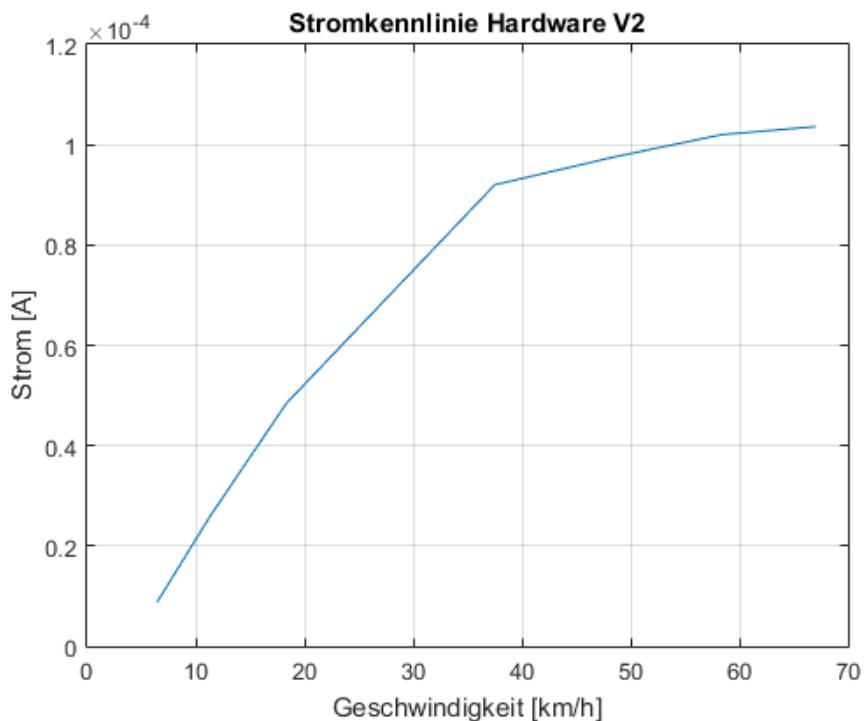
    [km/h]  

% Plot:  

figure(3); plot(v2,u2_max,v2,u2_min)
grid on
title('Spannungskennlinie Hardware V2')
xlabel('Geschwindigkeit [km/h]')
ylabel('Spannung DC [V]')
legend('Umax','Umin','Location','best')
```

```
figure(4); plot(v2,i2_mittel)
grid on
title('Stromkennlinie Hardware V2')
xlabel('Geschwindigkeit [km/h]')
ylabel('Strom [A]')
```





Spannungskennlinie Hardware

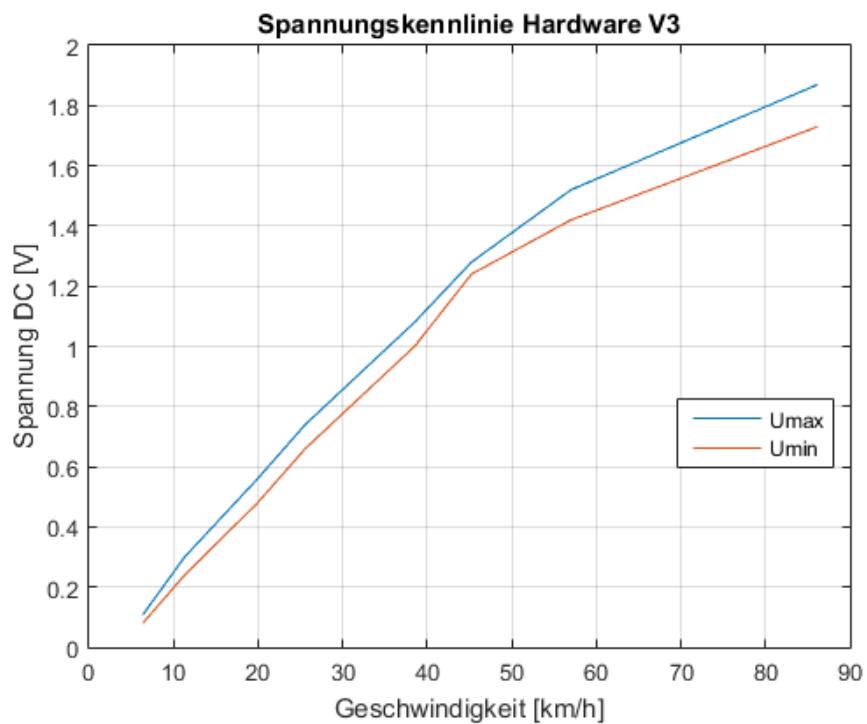
Versuchs-Nr.: 3
 Komponente: - Diodenbrücke - 3 Begrenzungs-Dioden
 - Kondensator - Lastwiderstand 10kOhm

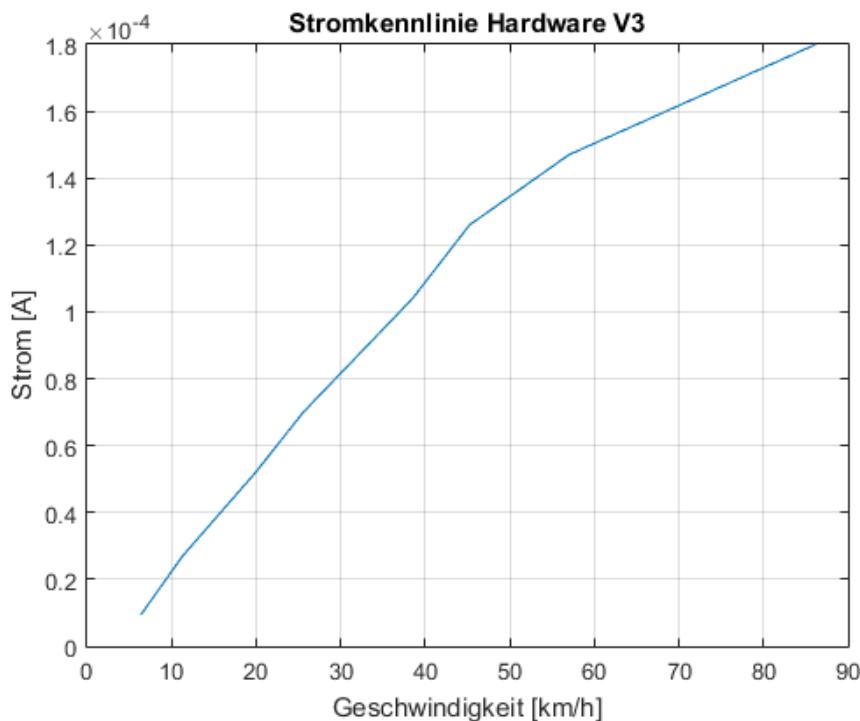
```
% Aufgenommene Messpunkte:
t3      = [1.137 0.640 0.363 0.283 0.188 0.160 0.127 0.084];
% delta t [s]
u3_max = [0.108 0.300 0.560 0.740 1.080 1.280 1.520 1.870];
% max. Spannung [V]
u3_min = [0.080 0.240 0.480 0.660 1.000 1.240 1.420 1.730];
% min. Spannung [V]

% Berechnungen:
i3_mittel = ((u3_max + u3_min)/2)/1e4; % Strom [A]
v3 = s./t3*3.6; % Geschwindigkeit
[km/h]

% Plot:
figure(5); plot(v3,u3_max,v3,u3_min)
grid on
title('Spannungskennlinie Hardware V3')
xlabel('Geschwindigkeit [km/h]')
ylabel('Spannung DC [V]')
legend('Umax','Umin','Location','best')
```

```
figure(6); plot(v3,i3_mittel)
grid on
title('Stromkennlinie Hardware V3')
xlabel('Geschwindigkeit [km/h]')
ylabel('Strom [A]')
```





Spannungskennlinie Hardware

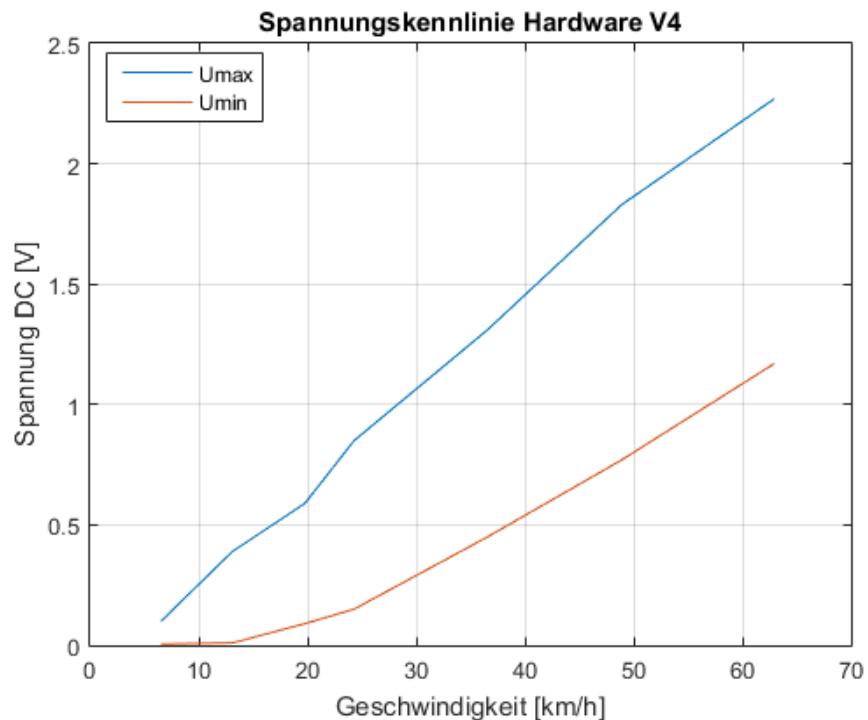
Versuchs-Nr.: 4
Komponente: - Villardschaltung(2 Stufen)
- Lastwiderstand 10kOhm

```
% Aufgenommene Messpunkte:
t4      = [1.108 0.552 0.366 0.298 0.198 0.148 0.115]; % delta t [s]
u4_max = [0.100 0.390 0.590 0.850 1.310 1.830 2.270]; % max. Spannung
% [V]
u4_min = [0.005 0.010 0.090 0.150 0.450 0.770 1.170]; % min. Spannung
% [V]

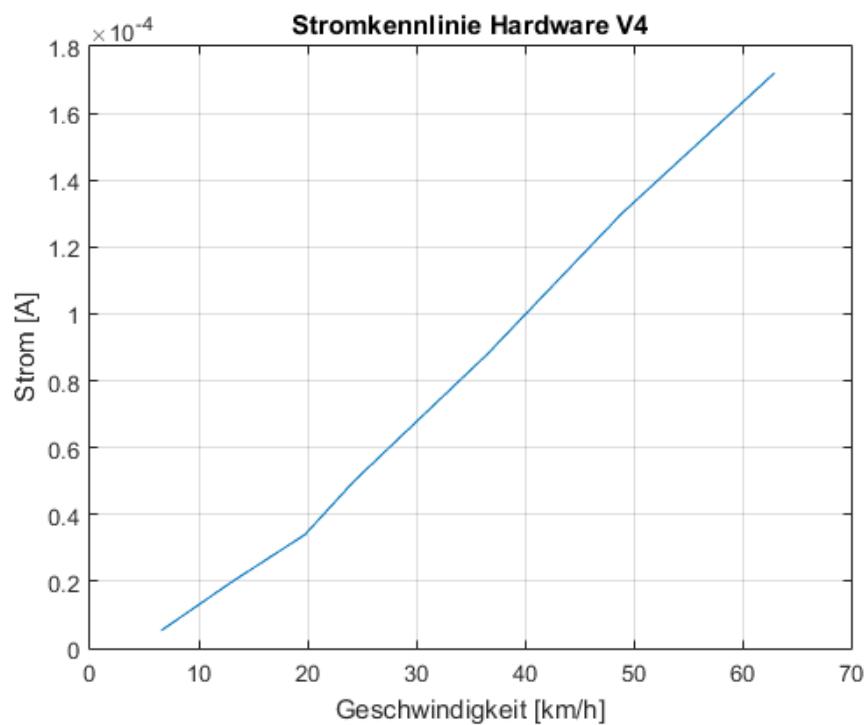
% Berechnungen:
i4_mittel = ((u4_max + u4_min)/2)/1e4; % Strom [A]
v4 = s./t4*3.6; % Geschwindigkeit
% [km/h]

% Plot:
figure(7); plot(v4,u4_max,v4,u4_min)
grid on
title('Spannungskennlinie Hardware V4')
xlabel('Geschwindigkeit [km/h]')
ylabel('Spannung DC [V]')
legend('Umax','Umin','Location','best')
```

```
figure(8); plot(v4,i4_mittel)
grid on
title('Stromkennlinie Hardware V4')
xlabel('Geschwindigkeit [km/h]')
ylabel('Strom [A]')
```



Projekt Arbeit HS15 ZHAW



Published with MATLAB® R2015a

D ANFORDERUNGSLISTE

Anforderungsliste		
F, W	Anforderung	Definition
Embedded System - Energiegewinnung		
F	batterielose Speisung	N/A
F	drahtlose Datenübertragung	Bluetooth Low Energy
W	Anzahl Magnete an Speiche	1
W	Funktion für aufladen des Smartphone	N/A
Applikation Fahrradcomputer		
F	Verwendung eines Smartphone	BS: Android
F	Anzeige der Geschwindigkeit	N/A
W	Anzeige der Beschleunigung	N/A
W	Anzeigen des zurückgelegten Weg	in Meter
W	Höhenprofil mittels Barometer	N/A
W	Anzeigen von Statistiken	N/A
W	automatische Erkennung Position Magnet	N/A
W	App für andere Betriebssysteme	iOS
Gehäuse		
F	Dimensionen	möglichst Kompakt
F	Schutz	IP6K6K
F	Prototypherstellung	3D Druck
W	Anbindung soll möglichst Flexibel sein	N/A
W	Diebstahlschutz	N/A
Wirtschaftlich		
F	Entwicklungskosten	N/A
F	Fertigungskosten	N/A
F	Kostenrahmen Entwicklung	N/A
Terminlich		
	Projektstart	14.09.2015
	Projektabgabe	18.12.2015
	Deadline Print	N/A
	Deadline Gehäuse	N/A
F:	Festforderung	
W:	Wunschforderung	

E ZEITPLAN

	Zeitplan PA2015 Roman Schneider, Daniel Studer	KW38	September KW39	KW40	KW41	KW42	Okttober KW43	KW44	KW45	KW46	November KW47	KW48	KW49	KW50	Dezember KW51	
1. Planung																
1.1 Zeitplanung																
1.2 Recherchen																
1.3 Anforderungsliste																
2. Konzipieren																
2.1 Zeigen in Teilfunktionen																
2.2 Suchen nach Lösungen der Teilfunktionen																
2.2.1 Energy Harvesting (Spule und Magnet)																
2.2.2 Powermanagement (Power Chip)																
2.2.3 Mikrocontroller Anforderungen																
2.2.3.1 Stromverbrauch																
2.2.3.2 Datenverarbeitung																
2.2.3.3 Übertragung (Bluetooth)																
2.2.4 Smartphone Applikation (iOS Android)																
2.2.5 Gehäuse / Befestigung																
3. Entwerfen																
3.1 Blockdiagramm/Schema																
3.2 Layout																
3.3 Bestücken/Aufbauen																
3.4 Testen (Hardwaretest)																
3.5 Firmware Mikrocontroller																
3.5 Software Applikation																
4. Ausarbeiten																
4.1 Optimieren / Auswerten																
4.2 Stückliste erstellen																
4.3 Produkt weiter testen																
5. Dokumentation																

F KONFIGURATION EM8500

Die folgende Konfiguration ist bei Projektabschluss auf dem EMEVB8500 Evaluation-Board programmiert worden. Dafür wurde der EM-Wizard verwendet.

Register	EEPROM Address	Value [HEX]	Description
reg_t_hrv_period	0x40	0x05	8192 ms
reg_t_hrv_meas	0x41	0x06	1024 ms
reg_t_sts_period	0x42	0x02	8 ms
reg_t_lts_period	0x43	0x05	1024 ms
reg_v_hrv_cfg	0x44	0x43	open voltage, 219 mV
reg_hrv_check_lvl	0x45	0x00	1 uA
reg_lts_cfg	0x46	0x00	rechargeable, bat. prot. on
reg_v_bat_max_hi	0x47	0x38	4.2 V
reg_v_bat_max_lo	0x48	0x37	4.1 V
reg_v_bat_min_hi_dis	0x49	0x30	3.6 V
reg_v_bat_min_hi_con	0x4A	0x1B	2.1 V
reg_v_bat_min_lo	0x4B	0x17	1.8 V
reg_v_apl_max_hi	0x4C	0x33	3.8 V
reg_v_apl_max_lo	0x4D	0x31	3.7 V
reg_ldo_cfg	0x4E	0xCC	VAUX LDO: 2 V, ULP LDO: 2 V
reg_pwr_cg	0x4F	0x01	
reg_vaux_cfg	0x50	0x00	
reg_vaux_gnd_cfg	0x51	0x00	
reg_mppt_ratio	0x52	0x0C	88%
reg_ext_cfg	0x53	0x61	USB 5 mA
reg_t_sleep_vsup_lo	0x54	0x10	Sleep Delay
reg_t_sleep_vsup_mid	0x55	0x27	h:min:sec:ms
reg_t_sleep_vsup_hi	0x56	0x00	0:0:10:0
reg_t_hrv_low_cfg	0x57	0x35	2048 ms
reg_spi_i2c_cfg	0x58	0x77	I2C address: 77
reg_pwr_mgt	0x59	0x01	Sleep timer on

G FIRMWARE TI-SENSORTAG

Die Firmware für den TI-SensorTag ist auf der beigelegten CD zu finden unter dem Verzeichnis:

Firmware/SensorTag/Software_PA15/PA15_Bicycle_Speed_Measurement_Device.zip.

Diese kann im Code Composer Studio von Texas Instruments importiert werden. Es befinden sich auch die erhaltenen Projekte vom InES und Test-Projekte von dieser Arbeit im Verzeichnis *Firmware/SensorTag*

H QUELLCODE ANDROID APPLIKATION

Der selbst geschriebene Code ist mit Kommentaren (START und END) markiert. Das Projekt befindet sich auf der beigelegte CD unter:

Firmware/Android/BLE_PA15.

Die .apk Datei für das Smartphone ist unter:

Firmware/Android/BLE_PA15/BLEInES/BLEInES/BLE_PA15_Bicycle_Computer

I DATEN CD

Auf der beigelegten CD sind sämtliche während der Arbeit als relevant empfundene Dateien abgelegt. Diese ist wie in Abbildung I.1 ersichtlich in 7 Hauptordner unterteilt, welche mit dem gegebenen Namen selbsterklärend sind.



Abbildung I.1: Ordnerstruktur der beigelegten Daten-CD