

# Energy harvesting bicycle computer

Katrin Bächli, Manuel König

22. Mai 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Ausgangslage . . . . .	5
1.2	Definition der Aufgabenstellung . . . . .	6
1.3	Übersicht der Aufgabenblöcke . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Energy Harvesting . . . . .	9
2.1.1	Energy Harvesting Methoden . . . . .	10
2.1.2	Energy Harvesting über Bewegungsindktion . . . . .	11
2.1.3	Unterschiede der Methoden . . . . .	12
2.2	Energy Management . . . . .	15
2.2.1	Kontrollierte Energiespeicherung . . . . .	17
2.2.2	Regelung des optimalen Leistungsbezugs . . . . .	17
2.2.3	Booster . . . . .	20
2.2.4	Energiezustand kennen und In- und Ausgänge schalten	20
2.3	Power Management . . . . .	20
2.3.1	Fähigkeiten eines Low Power Microcontrollers . . . . .	20
2.4	Aufsetzen des Low Power Microcontrollers . . . . .	20
2.5	Bluetooth Low Energy . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Vorgehen</b>	<b>23</b>
3.1	Inbetriebnahme des Modells der Machbarkeitsstudie . . . . .	23
3.1.1	Kapazität für Harvesting-Schaltung verbessern . . . . .	23
3.2	Layout Print . . . . .	27
3.2.1	Das Schema (oder der Stromlaufplan) . . . . .	27
3.2.2	Optimierung der Harvesterschaltung . . . . .	28
3.2.3	Bauteildefinition . . . . .	29
3.2.4	Das Layout . . . . .	29
3.2.5	Energiekalkulation . . . . .	30
3.3	Low Power Einstellungen Sensortag . . . . .	32
3.3.1	VO: SimpleBroadcast . . . . .	32
3.3.2	V1 . . . . .	33

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	<i>3</i>
---------------------------	----------

3.3.3 V2 . . . . .	33
3.4 Applikationsentwicklung . . . . .	33
3.5 Option 1 . . . . .	33
<b>4 Verzeichnisse</b>	<b>35</b>
4.1 Literatur . . . . .	35
4.2 Glossar und Abkürzungen . . . . .	35
4.3 Abbildungsverzeichnis . . . . .	35
4.4 Tabellenverzeichnis . . . . .	35

## Anhang

<b>A Ausschreibung Bachelorarbeit</b>	<b>I</b>
<b>B Projektplanung</b>	<b>III</b>
<b>C Referenz Sensortag von Texas Instrument</b>	<b>V</b>
C.1 Blockschema Sensortag . . . . .	V
<b>D Messprotokoll Energiegewinnung Harvester</b>	<b>VII</b>
<b>E Messprotokoll Energieverbrauch Sensortag</b>	<b>XXI</b>
<b>F Messprotokoll Rippelspannung Ausgangskondensator Har- vesterschaltung</b>	<b>XXIII</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

In der vernetzten Welt können Geräte Daten über ihren oder der Zustand der Umgebung senden. Diese Technologie wird für ein Fahrradfahrer genutzt. Konkret soll das Gerät die aktuelle Geschwindigkeit, die Höhe über dem Meer und die Temperatur an das Handy des Fahrers senden.

Auf dem Markt erhältliche sind sogenannte Fahrradcomputer, also ein Gerät, das Geschwindigkeit und weitere Daten an ein Display sendet, Batterie betriebene. Das Ziel dieser Arbeit ist mit Energy Harvesting die Energie aus dem Fahrradumdrehung und Sensor-Aktivitäten zu sammeln und danach die Daten per Bluetooth Low Energy einem Android-Endgerät zu übermitteln.

### 1.1 Ausgangslage

Als Inspiration dienten Batteriebetriebene Fahrradcomputer zweier Hersteller:

SIGMA SPORT bietet Geräte mit eigenem Display und Sensoren an. Auf dem Display erscheint neben der Geschwindigkeit, die Daten der Sensoren, die GPS-Ortung und den aktuellen Ladestand der Batterie.

Der Hersteller POLAR stellt ein Gerät her, welches die Fahrt über GPS aufzeichnet und wichtige Informationen zur Trainingsverbesserung liefert.

Als Nachteil bewerteten wir, dass ein (verdrahtetes) Display gebraucht wird. Idealerweise können die Sensordaten an ein privates, mobiles Endgerät gesendet werden.

Als Grundlage dient der Aufbau aus der Machbarkeitsstudie "Bicycle computer and sensoric powered with harvested energy" (Roman Schneider (2015)). Es wurde der Beweis erbracht, dass durch Bewegungsinduktion ge-

nug Energie erzeugt werden kann, um die Geschwindigkeit des Fahrrads, welche über die Detektion eines Magnets an den Speichen des Fahrrads ermittelt wird, per Bluetooth Smart zu übermitteln. Der Aufbau funktioniert nach vorangehendem vollem Laden der Speicher (durch Fahren bei 50 km/h) danach zuverlässig bei 20 km/h.

Das Ziel der Arbeit besteht somit in einer verbesserten Energiegewinnung, einer ev. besserem Verbrauchsmanagement und einer ansprechenden Applikation, die der Kunde auf sein eigenes mobiles Endgerät laden kann.

Einen neuen Ansatz zur Energiegewinnung bei Die Möglichkeit vom Hersteller Reelight, die Energie über Wirbelströme zu erzeugen, wäre eine interessante Idee jedoch benötigt das bewegliche Teile, welche problematisch sind, dass diese nach einigen Jahren evtl. nicht mehr richtig funktionieren und ausgetauscht werden müssen. Aufgrund der oben genannten Punkten wurde eine Aufgabenstellung für die Entwicklung eines Fahrradcomputers erstellt, welche über Energy Harvesting funktioniert. Die Arbeit soll auf der vorangegangenen Machbarkeitsstudie aufbauen.

Der Hersteller Reelight stellt keine Fahrradcomputer her, jedoch hat er eine interessante Methode, um Energie beim Fahrrad zu gewinnen. Es werden Wirbelströme zur Energieerzeugung genutzt, das genaue Prinzip wird auf der Homepage nicht erklärt. Die erzeugte Energie wird bei dem Produkt City Supreme von Reelight über eine LED in Licht umgewandelt und so als Lampe für das Fahrrad benutzt. Bei der Benutzung fühlt man, dass sich im Innern der Lampe etwas bewegt. Unserer Meinung nach ist ein Magnet so gelagert, dass er sich drehen kann. Der Magnet (produziert auf der Felge ein Magnetfeld??) durchsetzt die Felge des Fahrrads mit einem Magnetfeld, was Wirbelströme erzeugt und ein Magnetfeld, welches dem des Magneten im Produkt entgegenwirkt. Die Lagerung des Magneten erlaubt ihm jetzt sich zu drehen, so dass das Magnetfeld, welches die Felge durchsetzt sich ändert und wieder ein Magnetfeld erzeugt, dass den Magneten bewegt. Die Vermutung liegt nahe, dass um den Magneten eine Spule positioniert ist, durch die Bewegung des Magneten wird dann eine Spannung in der Spule induziert und die LED kann betrieben werden.

## 1.2 Definition der Aufgabenstellung

In der Ausschreibung der Arbeit ist der Inhalt der Bachelorarbeit zusammengefasst (siehe A). Das Ziel der Arbeit besteht darin, einen bestehenden

Prototypen eines batterielosen Fahrradcomputers zu verbessern und zu optimieren. Die bestehende Hardware soll optimiert und bestenfalls verkleinert werden. Weiter soll eine App für ein Android-Endgerät entwickelt werden, in der die Messwerte dargestellt werden.

Aus den Themen entstand eine Aufgabenstellung mit folgenden Punkten:

1. Inbetriebnahme des Prototypen, Einlesen in die vorangegangene Projektarbeit und Beschäftigung mit der Materie, sind die Hauptpunkte des ersten Schrittes.
2. Die bestehende Hardware muss verkleinert und überarbeitet werden. Dafür wird ein neues PCB entworfen, welches verschiedene vorhandene Platinen vereint.
3. Initialisierung der Bluetooth-Schnittstelle muss auf dem Android-Endgerät und der Hardware vorgenommen werden. Eine erste Bluetooth-Kommunikation zwischen der Hardware und der Applikationen ist implementiert.
4. Das bestehende Energiemanagement soll auf die Anwendung eines Fahrradcomputers optimiert werden.
5. Die Benutzeroberfläche der Android-Applikation soll benutzerfreundlich und optisch ansprechend gestaltet werden.
6. Die erfassten Messwerte der Geschwindigkeit und der aktuellen Höhe sollen über Bluetooth übermittelt werden.
7. Die erfassten Daten sollen gespeichert und nur dann übertragen werden, wenn die nötige Energie vorhanden ist.
8. Per GPS soll die aktuelle Position ermittelt, sowie die bereits abgefahrene Route erfasst werden. Alles soll auf einer Karte veranschaulicht werden.
9. Die Beschleunigung, Luftfeuchtigkeit und Temperatur sollen ebenfalls erfasst und über Bluetooth übermittelt werden.
10. Das Energiemanagement soll für verschiedene Geschwindigkeiten optimiert werden.

Für diese Bachelorarbeit sind die Punkte a) bis f) als Minimalanforderungen zu verstehen, während sich die Punkte f) bis j) dynamisch und in Abhängigkeit des Projektfortschritts gestalten lassen.

Aus diesen Anforderungen entstand der im Anhang B abgelegte Projektplan.

### 1.3 Übersicht der Aufgabenblöcke

Aus der Aufgabenstellung sind folgende Arbeitsblöcke (siehe Abbildung 1.3) entstanden. Die gepunkteten Blöcke sind optional, die voll umrandeten das Minimum. Die Projektplanung ist so aufgebaut, dass bei Meilenstein 1, das Layout gezeichnet ist, bei Meilenstein 2 die Kommunikation zur App besteht, bei Meilenstein 3 die überarbeitete Version des Prototyps gezeigt wird und bis dahin das Minimum erreicht ist. Welche optionalen Ziele realisiert werden, wird im Meilenstein 3 definiert. Der Projektplan findet sich im Anhang B.

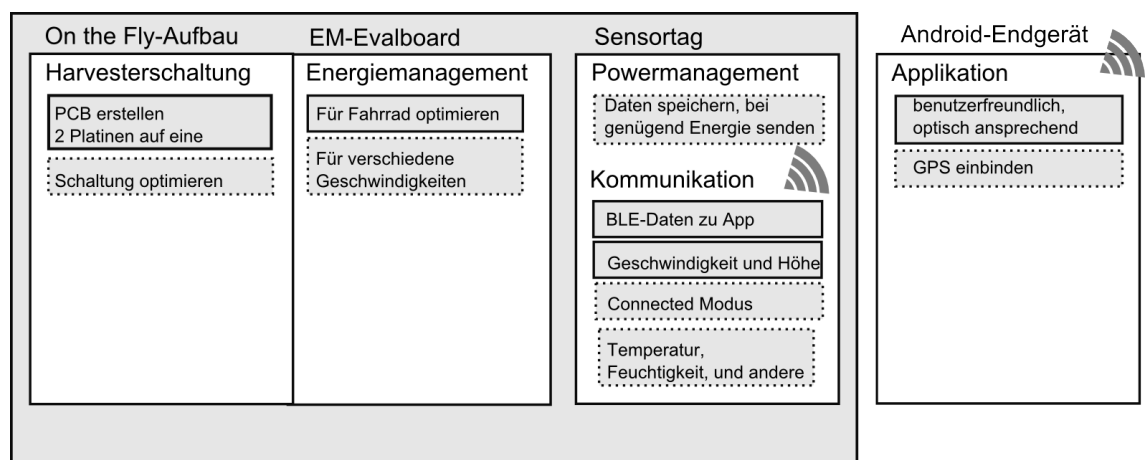


Abbildung 1.1: Arbeitsblöcke



# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

Der Bicycle Computer basiert auf Energy Harvesting. Was Energie ernten bedeutet und welche Art von Energy Harvesting in dieser Arbeit benutzt wird, wird im ersten Unterkapitel 2.1 beschrieben.

Da die gewonnene Energie im  $\mu\text{W}$ -Bereich liegt, ist ein Sammeln der Energie notwendig, sodass Leistungen im  $\text{mW}$ -Bereich zur Verfügung stehen. Ansätze zur Umsetzung zum Sammeln und Weiterleiten von Energie werden im Unterkapitel 2.2 beschrieben.

Die gewonnene Energie darf nicht sofort verbraucht werden, deshalb ist auch ein Power Management notwendig. Dieses regelt, wie schnell wie viel Energie verbraucht werden kann (siehe 2.3).

Als letzte Stufe in der Umsetzung ist eine energiearme Kommunikation notwendig. Da bietet die Bluetooth Low Energie Technologie ideale Voraussetzungen. Das Protokoll und die Technologie werden im letzten Grundlagenteil 2.5 vorgestellt.

### 2.1 Energy Harvesting

„Mit Energy Harvesting ... wird die Gewinnung von elektrischer Energie in kleinen Mengen aus dem Umfeld elektronischer Geräte für deren Betrieb bezeichnet.“<http://www.harvesting-energy.de/> (2016).

Als erstes werden Methoden zur Energiegewinnung vorgestellt 2.1.1 und danach die im Bicycle Computer verwendete Harvesting Art genauer beschrieben 2.1.2. Als letztes wird der Unterschied zwischen den Harvestingmethoden festgehalten. Denn diese Unterschiede werden in der Implementation des Bicycle Computers wichtig

### 2.1.1 Energy Harvesting Methoden

Bekannte Methoden sind die Solarzelle, die aus der Energie der Sonnenstrahlen Strom erzeugt, die Thermogeneratoren (TEG), die aus Umgebungswärme Energie gewinnen, passive RFID-Tags, die aus der elektromagnetischen Strahlung Energie gewinnen und der piezoelektrische Effekt, der mechanischen Druck in elektrische Spannung umwandelt.

Da der im Prototyp verwendete Energy Management-Chip ?? für die Energieoptimierung von Solarzellen oder von Thermogeneratoren spezialisiert ist, werden diese zwei Methoden vorgestellt.

#### Energy Harvesting mit einer Solarzelle

Bei der Umwandlung von Elektromagnetischen Wellen (Licht) in Strom wird eine spezielle Eigenschaft des Siliziums genutzt: Führt man Silizium Energie zu, entstehen freie Ladungsträger, bzw. Elektronen und Löcher. Um aus diesen Ladungen einen elektrischen Strom zu erzeugen, ist es nötig, die erzeugten freien Ladungsträger in unterschiedliche Richtungen zu lenken; dies geschieht ... durch ein internes elektrisches Feld, welches durch einen p-n-Übergang erzeugt werden kann.” (<https://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle> ((21.5.16:12:04), 12:22) Auf der einen Seite sammelt sich positive, auf der anderen Seite negative Ladung an. Werden diese verbunden, entsteht ein Strom.

(<http://sms.ckw.ch/content/ckwsms/de/startseite/mittelstufe/solaranlage-erklaert.html> (21.5.16:12:04)) Abschnitt Funktionsprinzip).

Diese Harvestingmethode produziert ein Gleichstrom. Die Spannung am Ausgang ist konstant, da es sich um eine Stromquelle handelt (stimmt das?). Größen- und materialabhängig kann Energie im kW-Bereich gesammelt werden.

#### Energy Harvesting mit einem TEG

TEG steht für Thermoelectric Generator und bezeichnet eine Konstruktion, die aus einem Temperaturunterschied elektrische Spannung erzeugt. (<https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelement>)

Erzeugt wird die Spannung am Ende zweier metallischer Leiter aus unterschiedlichem Material, die an einem Ende verbunden sind. (<https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelement>)

Diese Harvestingmethode produziert eine Gleichspannung. Die produzierte Spannung ist vergleichsweise klein und bewegt sich im Bereich einiger 10

$\mu$  V pro  $1^\circ\text{C}$  Temperaturdifferenz.

### 2.1.2 Energy Harvesting über Bewegungsinduktion

Beim Bicycle Computer wird Energie über Bewegungsinduktion gewonnen. Die Funktionsweise ist in der Machbarkeitsstudie beschrieben Roman Schneider (2015) S.8. :

Befindet sich eine Spule in einem *dynamischen* „Magnetfeld“, wird in der Spule eine Spannung induziert. Dies sieht man in der Formel (2.1).

$$U_{ind} = -\frac{d}{dt} \int A dB \quad (2.1)$$

Der magnetische Fluss  $B$  durch die Fläche einer Spule  $A$  ist gleich dem magnetischen Fluss  $\phi$ . Hat die Spule mehrere Wicklungen  $N$ , so verstärkt sich der magnetische Fluss proportional.

$$\frac{d}{dt} \int A dB = \phi \cdot N \quad (2.2)$$

Verläuft der **magnetische Fluss**  $\phi$  senkrecht zur Fläche der Spule  $A$  kann das Integral durch eine Multiplikation ersetzt werden (siehe Formel).

$$\frac{d}{dt} \int A \perp dB = \frac{d}{dt} \int \phi \cdot N = B \cdot A \cdot N \quad (2.3)$$

In diesem Fall berechnet sich die induzierte Spannung in einer Spule vereinfacht mit

$$U_{ind} = -N \cdot A \cdot B \quad (2.4)$$

Das dynamische Magnetfeld wird durch das Bewegen, oder im Fall eines Fahrrads einem Vorbeiziehen, eines Magneten an einer fix verankerten Spule erzeugt. Die produzierte Spannung hängt von drei Kriterien ab:

Eine induzierte Spannung wird somit durch folgende vier Faktoren beeinflusst:

1. die eingeschlossene Fläche  $A$  der Spule
2. die magnetische Flussdichte des Magneten  $B$
3. die Anzahl Windungen  $N$  der Spule und
4. die Bewegungsgeschwindigkeit  $v$  des Magneten, welche Einfluss auf  $dt$  hat

Diese Harvestingmethode produziert einen Wechselstrom. Ein Gleichrichter und einen Kondensator zur Glättung der Rippelspannung ist nach der Energiegewinnung notwendig. Die Leistung der produzierten Spannung geht vom  $\mu\text{W}$ -Bereich bis zu für die Industrie optimierten Anlagen mit Leistung MW-Bereich wie z. B. durch Drehstrom-Generatoren.

### 2.1.3 Unterschiede der Methoden

Der grösste Unterschied besteht in der Art in der die Energie zur Verfügung steht.

#### Gleichmässige Energie versus gepulster Energie

Die Solarzelle und ein TEG liefern Gleichstrom bzw. -spannung. Wodurch kein Gleichrichterschaltung und Glättung notwendig sind.

Die durch Bewegungsinduktion gewonnene Energie ist eine Wechselspannung. Im Fall des Bicycle Computers ist diese gleichzeitig gepulst. Die Energie ist somit nicht konstant da, sondern nur in Zeitintervallen.

#### Konstanter Maximum Power Point zu dynamischem

Die drei Harvester unterscheiden sich in ihrer Leistungskurve. Das Leistungsmaximum, der Maximum Power Point (MPP), liegt auf der Skala von Kurzschluss bis Leerlauf proportional an unterschiedlichen Stellen. Bei einem TEG liegt das MPP in der Mitte dieser Skala. Die MPPT-Ratio beträgt 50 %. Bei der Solarzelle liegt das Leistungsmaximum auf der Skala bei ca. 80 % der maximalen Spannung. Die MPPT-Ratio ist 80 %. Bei der Bewegungsinduktion existiert kein fixe MPPT-Ratio. Wie bei der Spule, wandert das Leistungsmaximum aufgrund mehrerer Indikatoren (wie Geschwindigkeit des Magneten durch die Spule, Abstand von Magnet und Spule) auf der Skala hin und her.

Zur Verdeutlichung der Unterschiede sind für jedes Leistungsverhalten eine Graphik angefügt.

Das TEG hat unabhängig von der gewonnenen Energie und der Temperatur das Leistungsmaximum immer bei 50 %. Die Graphik 2.1.3 zeigt, dieses unabhängige Verhalten.

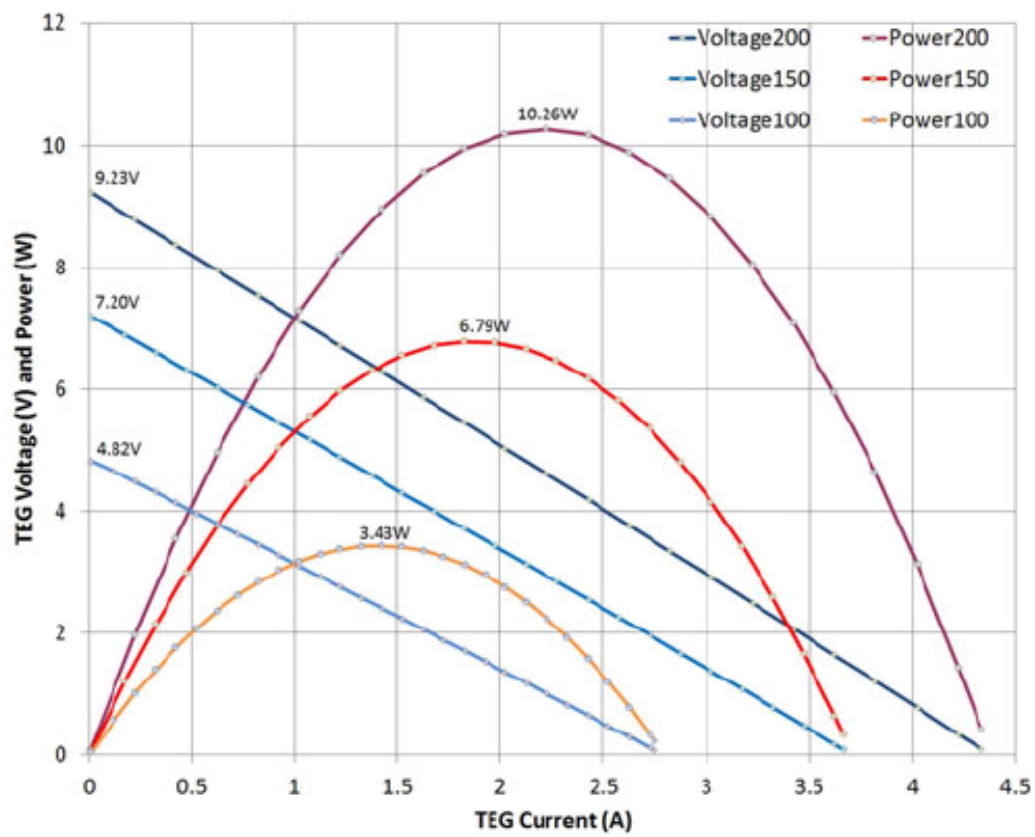


Abbildung 2.1: MPP TEG (Andrea Montecucco (2014))

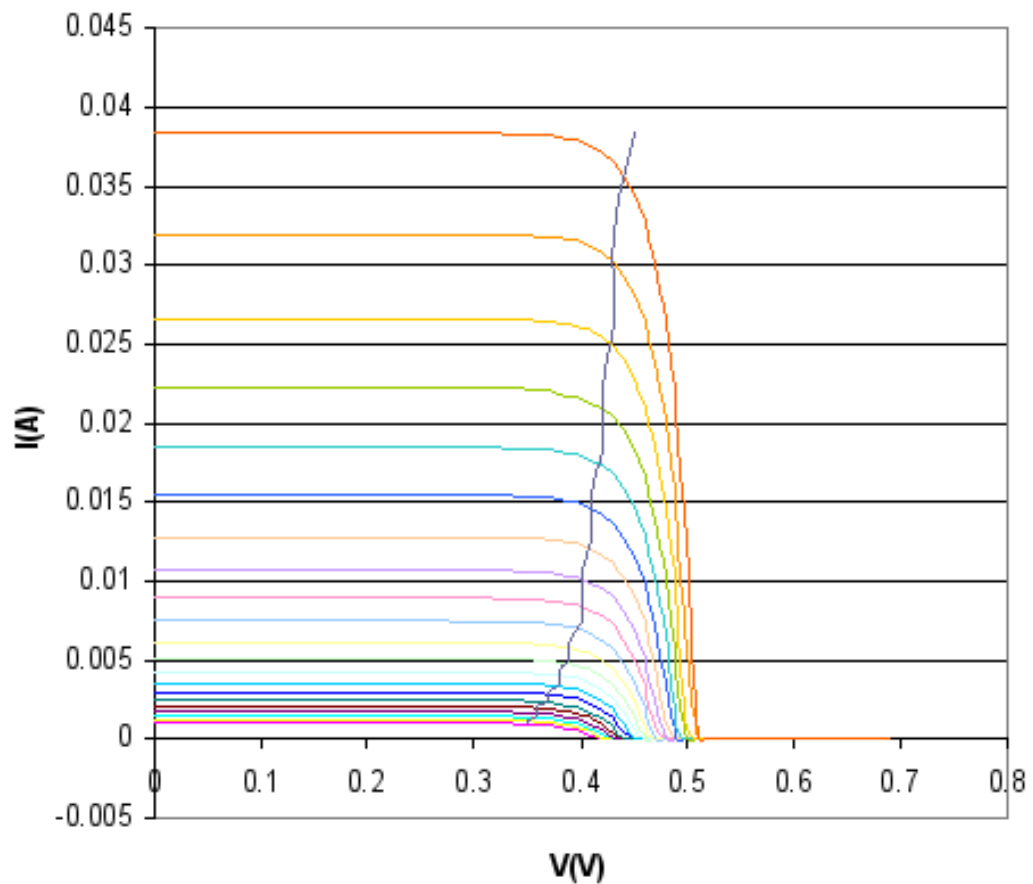


Abbildung 2.2: MPP Solarzelle

Graphik 2.1.3 zeigt, dass das Leistungsmaximum bei der Solarzelle unabhängig von der zur Verfügung stehenden Energie immer bei 80 % liegt.

Die Stelle des Leistungsmaximums wandert bei einer Spule und somit bei der Bewegungsinduktion auf der Skala.

Exemplarisch sind drei MPPT-Ratios einer Spule in der Graphik 2.3 abgebildet. In dieser Graphik zeigt sich der Einfluss des Abstands der Spule vom Magnetfeld auf die Stelle der maximalen Leistung. Diese Graphik wurde ausgewählt, weil beim Ausmessen des Harvesters der Abstand des Magneten als einer der Einflüsse festgestellt wurde.

Als interessanter für die Anwendung wurde der Einfluss der Geschwindigkeit, mit der der Magnet an der Spule vorbeizieht, genauer dokumentiert. Denn dieser Faktor ist durch den Nutzer direkt beeinflussbar (Graphik 2.5).

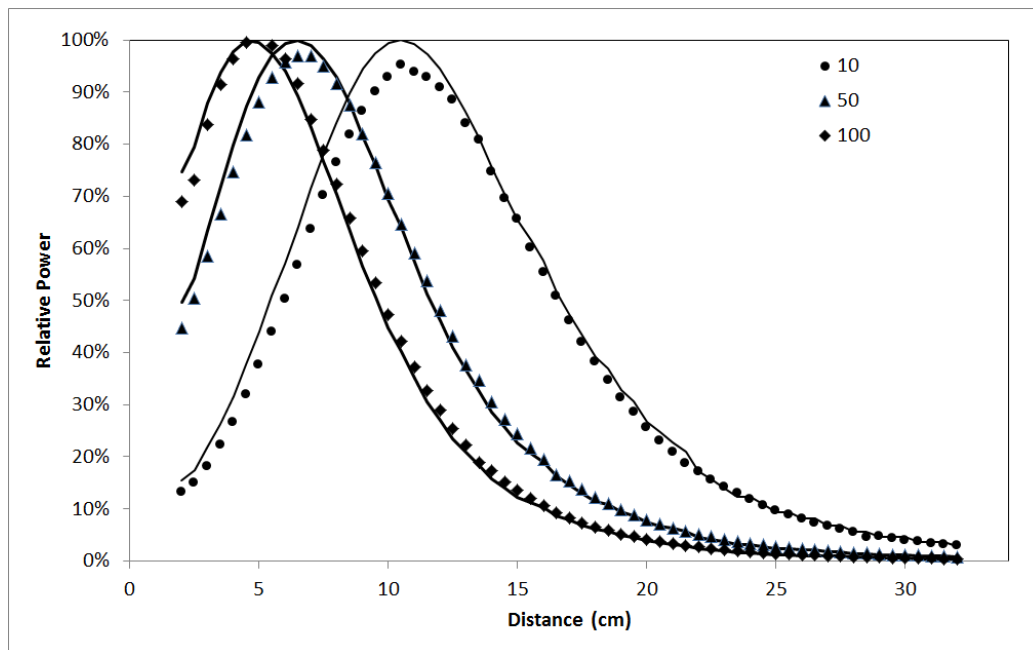


Abbildung 2.3: MPP Spule

Über alle Messungen hinweg lässt sich grob über die MPPT-Ratio des Bicycle Computers sagen, dass sie sich zwischen 40 - 80 % bewegt.

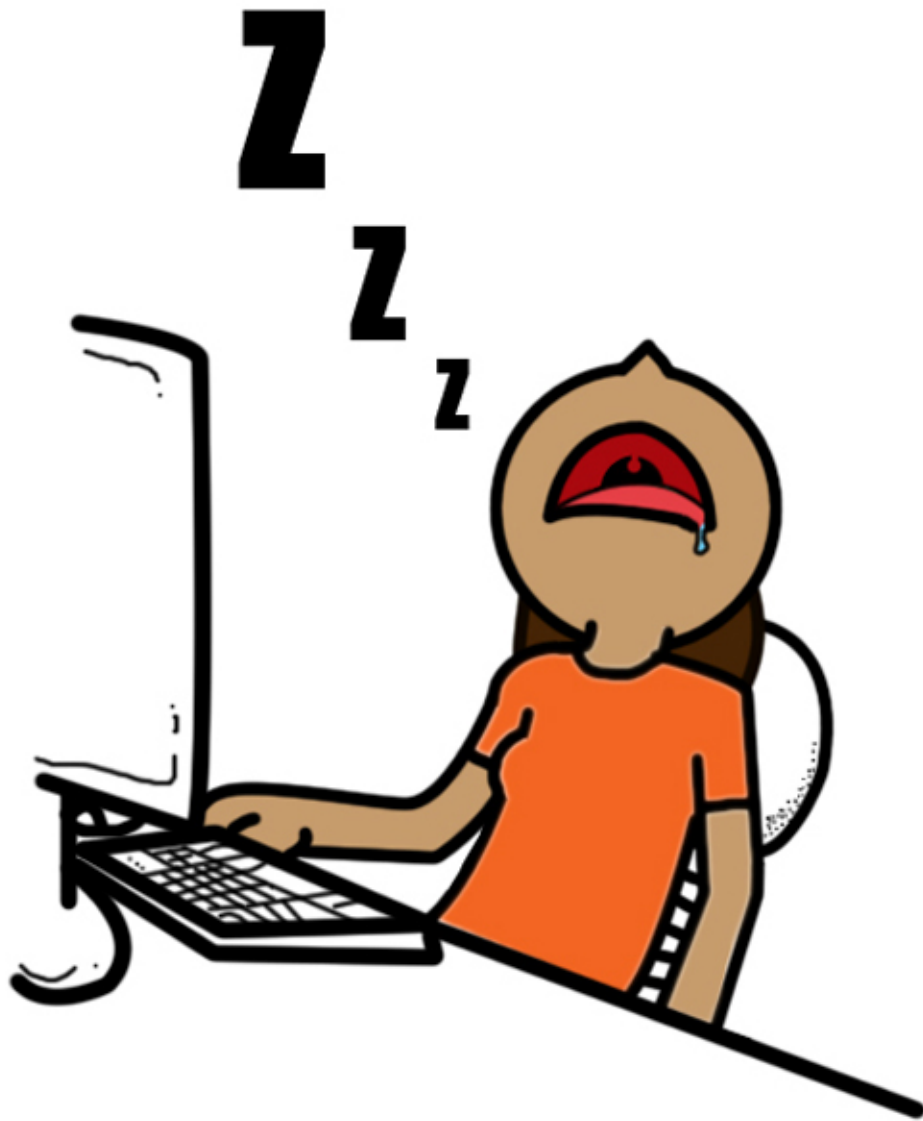
Manuel (2016)

## 2.2 Energy Management

Der Harvester des Bicycle Computer erntet eine gepulste Energie im  $\mu\text{W}$ -Bereich. Um diese für eine Applikation zu verwenden, müssen die geringen Energieportionen summiert werden. Sind Energiemengen im  $\text{mW}$ -Bereich verfügbar, kann die Energie kontrolliert freigegeben werden.

Energy Management bezeichnet das der Energie in Speichern, das Regeln des Inputs, damit die maximale Leistung aus der Quelle bezogen werden kann, das Aufwärtswandeln von Spannung oder Strom auf den geforderten Wert und die kontrollierte Freigabe.

In der Bachelorarbeit ist das Verwenden des Chip EM8500 vorgegeben. Als erstes wird das kontrollierte Energiespeichern anhand dieses Chips erklärt. Danach folgt die Umsetzung des Maximum Power Point Trackings



[www.kechap.deviantart.com](http://www.kechap.deviantart.com)

Abbildung 2.4: MPP Spule



(MPPT) und eine kurze Erklärung der Wirkung des Boosters auf das Energy Managments. Zuletzt wird auf das freischalten von Ausgängen eingegangen, da dies für das Verwenden der Energie die wesentliche Schnittstelle ist.

Das Datenblatt des EM8500 ist der CD beigelegt. Der EM8500 ist für Low Power Applikationen entwickelt.

### 2.2.1 Kontrollierte Energiespeicherung

Bei einer Low Power Harvesting Applikation ist wesentlich, dass vor der Verwendung der Energie, genug Energie gesammelt wurde. Umgesetzt wird dies, in dem die Freigabe der Energie an eine Applikation, VSUP, erst nach dem Erreichen eines gewissen Ladezustands erfolgt. Der Ladezustand des Primärkondensator ist mit VSTS in der Graphik??.

Im EM8500 wird dies folgendermassen umgesetzt (Graphik ??): Erreicht der Primärkondensator STS den Schwellwert  $v_{bat\_min\_low}$ , wird VSUP mit der eingestellten Spannung

Beim Energy Managment werden zwei Zustände unterschieden: Das kurzfristige Betreiben der Applikationen, in dem gerade genug Energie für das sichere Ausführen besteht und das langfristige sichere Betreiben der Applikation. Letzteres bedeutet, dass die Applikation auch bei einem Energiemangel weiterfunktioniert.

Dazu sind zwei unterschiedliche Speicherelemente konzipiert: Die Aufgabe des Short Time Storage-Kondensators (STS) ist, möglichst schnell genug Energie für das kurzfristige Betreiben der Applikation zur Verfügung zu stellen. Die Aufgabe des Long Time Storage-Kondensators (LTS) ist es, Reserveenergie aufzubauen. Diese überbrückt die Energieengpässe, wenn zu wenig Energie für das Betreiben der Applikation zur Verfügung steht.

Das Freigeben der Speisung der Applikation muss mindestens für die Initialisierung der Applikation reichen. Je nachdem wie viel Energie die Applikation braucht, fällt der Ladezustand (Spannung STS) wieder oder er kann sich erhöhen. (EM8500 ist gedacht, dass das Einschalten praktisch keine Energie braucht und die Energie weiter geladen wird.

(EMMicroelectronic (2015) p. 11.)

Damit Energieunterbrüche überbrückt werden können, dient ein zweiter Kondensator. LTS bedeutet Long Time Storage und bezeichnet den Kondensator, der für die langfristige Dauer der Applikation verantwortlich ist.

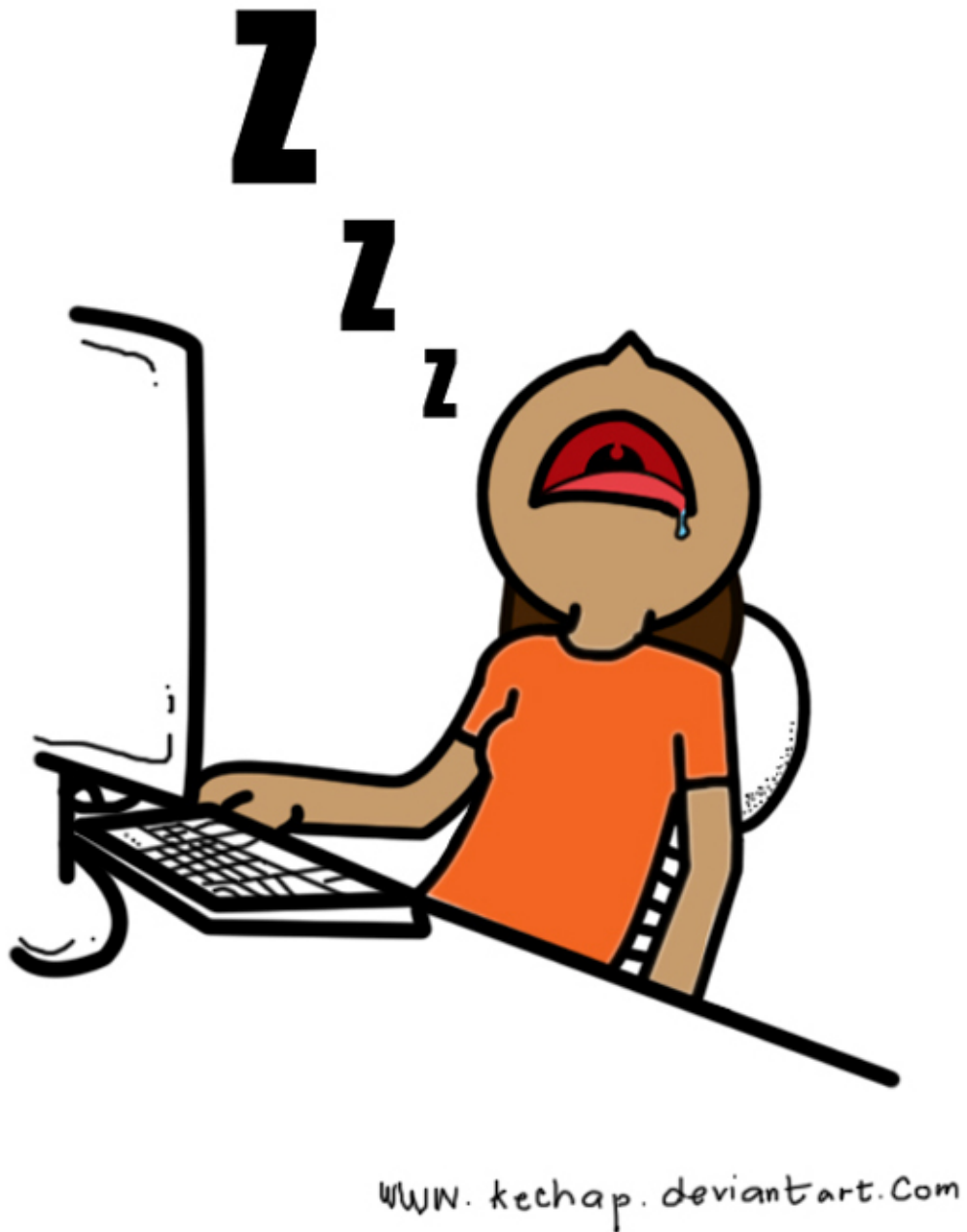
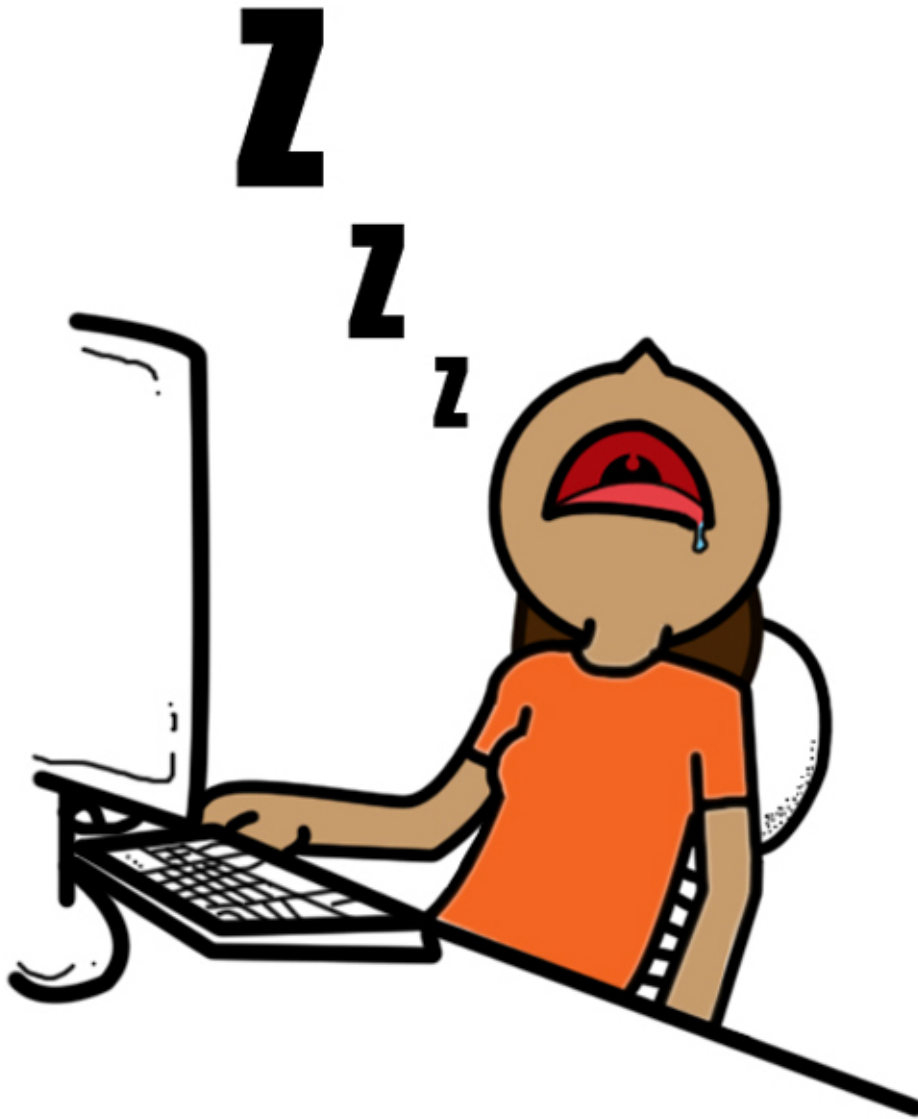
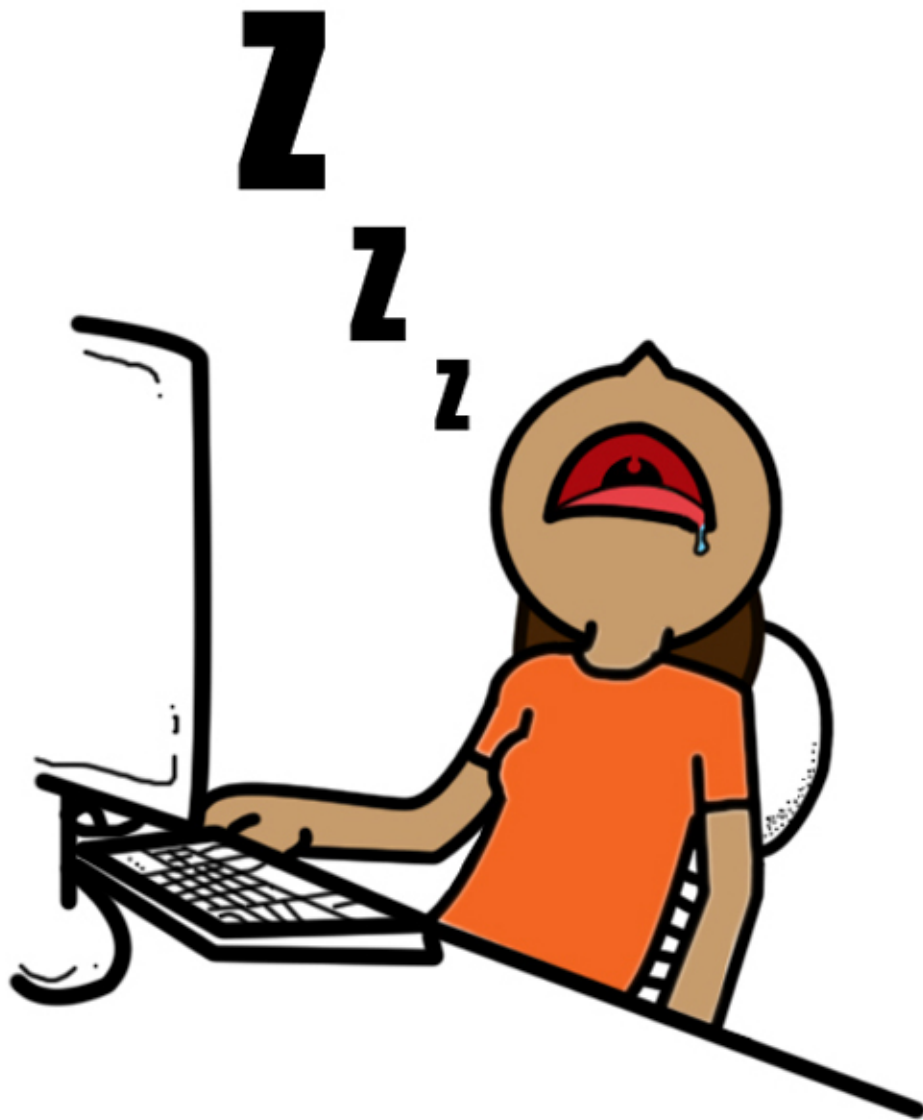


Abbildung 2.5: Grundprinzip Applikationsspeisung



[www.kechap.deviantart.com](http://www.kechap.deviantart.com)

Abbildung 2.6: Applikationsspeisung EM8500



[www.kechap.deviantart.com](http://www.kechap.deviantart.com)

Abbildung 2.7: Timing Kondensatoren laden EM8500 (EMMicroelectronic (2015) p. 11.)

Dieser Kondensator wird möglichst bald parallel geladen. Dies ist der Fall, sobald der STS einen gewissen Überschuss besitzt. Also Spannungen aufweist, die deutlich höher sind, als die für das kurzfristige Betreiben der Applikation notwendig ist.

### 2.2.2 Regelung des optimalen Leistungsbezugs

Generell MPP beschreiben, nicht EM MPP Widerstandskurve als Graphik nehmen MPP ist wie Leistungsanpassung

Wichtigster Punkt in der Energieoptimierung ist das Maximum aus der produzierten Energie herauszuholen. Die maximale Leistung ergibt sich beim MaximumPowerPoints (MPP), dem Punkte, an denen am effizientesten Leistung bezogen werden kann. Das EVB versucht die Quelle stets in der Nähe dieses Optimums zu betreiben. Dies geschieht über eine Innenwiderstands-Regelung, sodass die Eingangsleistung möglichst dem MPP entspricht.

Zweite Aufgabe beim Energiemanagement ist eine konstante Eingangsspannungen zu erzwingen. Das System kontrolliert periodisch den aktuellen (unregulierten) Spannungswert der Harvestingquelle. Hat sich der Wert mehr als 37 mV gegenüber der zur Zeit aktuellen Regelspannung geändert, wird der neue Wert als Spannungsreferenz zum Regeln genommen. Die Abbildung 2.6 zeigt das Anpassen der Spannungslevel alle s. Die periodischen Kontrollmessungen alle 8 s verursachen kurze Spannungsspitzen. Diese entstehen bei der Kurzschlussmessung, für den aktuellen Stromwert.

Entsprechen die Konfigurationen auf dem EVB nicht dem Verhalten der Eingangsquelle, so entstehen keine konstanten Spannungswerte an der Harvestingquelle, was Abbildung 2.7 zeigt.

Dritter Punkt ist der Aufbau von Energiespeichern. Diese sollen so viel Energie speichern, wie eine gewisse Aktion braucht. Das Energiemanagement kennt für jede Aktion den Energieverbrauch und löst, bei genügend Speicherenergie eine Aktion laufen (siehe Berechnung der Kondensatoren).

MPP: - start bei 50 % (wir bei 40), und grobe Schritte (unten . direkt auf 60 %, dann 67 %).

Das Berechnen der Schwellwerte und der Kondensatoren detaillierter in Kapitel XXXXS.

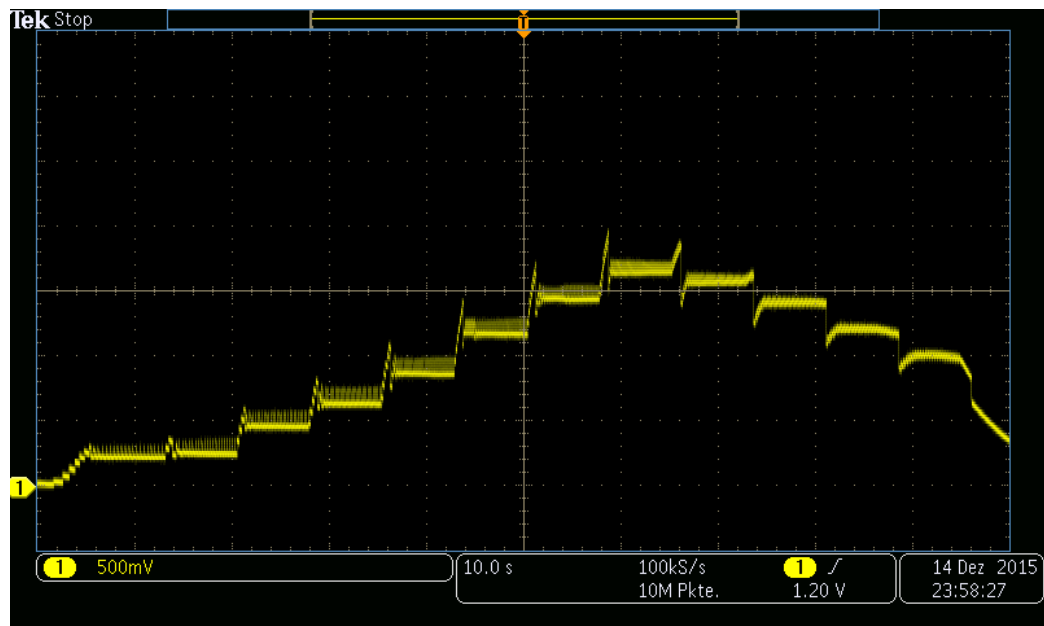


Abbildung 2.8: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

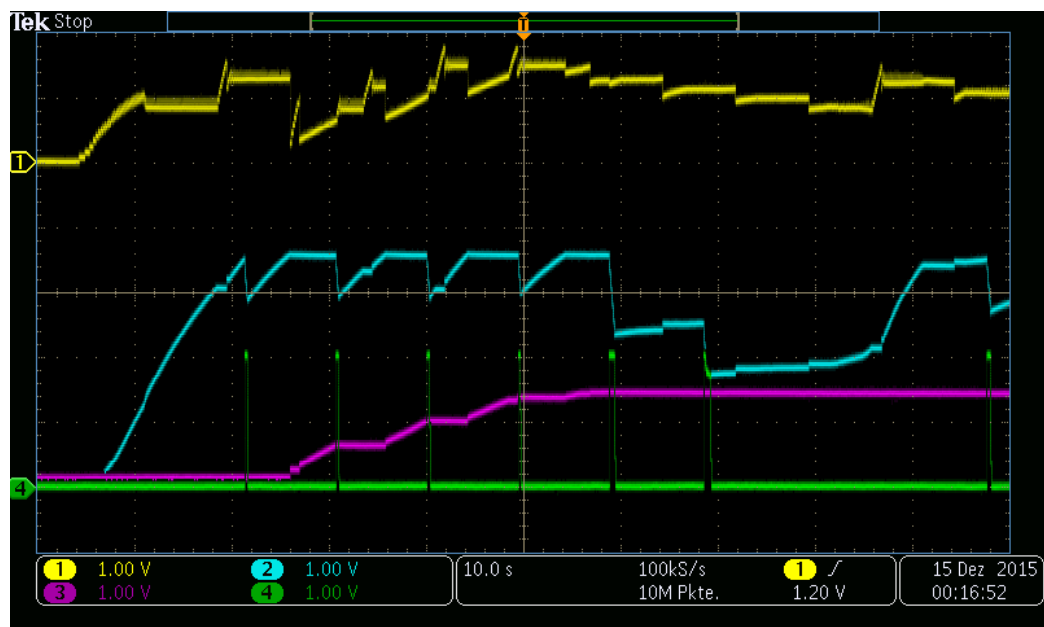


Abbildung 2.9: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

### 2.2.3 Booster

### 2.2.4 Energiezustand kennen und In- und Ausgänge schalten

## 2.3 Power Management

- Zeichnen des Init, sleep, Aufwachen

Zur Verwaltung der gegebenen Energie ist der Microcontroller gegeben. Es handelt sich um einen Cortex M3, der sich auf dem Sensortag von Texas Instruments befindet. Die zentralen Eigenschaften dieses Boards und die Funktionsblöcke befindet sich im Anhang C.

### 2.3.1 Fähigkeiten eines Low Power Microcontrollers

Low Power Microcontroller können Gebiete des Prozessors oder von Peripherieelementen temporär ausschalten. Das System befindet sich im Standby Modus. Nur die für die Applikation unabdingbaren Aktivitäten laufen mit niederstem Takt weiter. Über Interrupts können einzelne Bereich aufgeweckt werden, die ihre Aktionen ausführen und danach geht das System wieder in den Standby Modus.

Bild: Energie-Langzeitmessung BLE versenden Beschriften mit aktiv und standby modus

Zu den unabdingbaren Aktivitäten eines laufenden Microcontrollers gehört das Refreshen (Neuladen) der Register mit den Systemeinstellungen. Diese Refreshing-Peaks sieht man im Standby Modus.

## 2.4 Aufsetzen des Low Power Microcontrollers

(Die Low-Power Programmbeispiele von TI basieren auf RTOS, ebenso die Dokumentation zu Low Power Applikationen, was zu viel Energie verbraucht (korrekt, wie belegen?). )

Konfiguration der CPU (system.h, config.h) Einstellungen Active Mode: Sensoren, Wireless Processor, SPI-Kommunikation

Einstellungen sleep Mode: Abstellen

PowerDomain ausschalten Clk

GPIO Konfigurieren (gpio.h, board.h) Event anstelle von Interrupt Synchronisation timer, oder systick oder GPIO signal. Wake up

Aktivitäten aufsetzen

## **2.5 Bluetooth Low Energy**



# Kapitel 3

## Vorgehen

### 3.1 Inbetriebnahme des Modells der Machbarkeitsstudie

Mit der in der Projektarbeit entwickelten Harvesterschaltung kann per Bluetooth Smart auf dem Android-Endgerät die Geschwindigkeit ausgegeben werden. Bei der Inbetriebnahme zeigten sich folgende Grenzen im gegebenen Modell:

1. Zu hoher Kondensator vor Energiemanagementschaltung gefährdet deren Stabilität
2. Konfiguration auf Energiemanagementboard sind nicht auf Energieharvesterschaltung angepasst

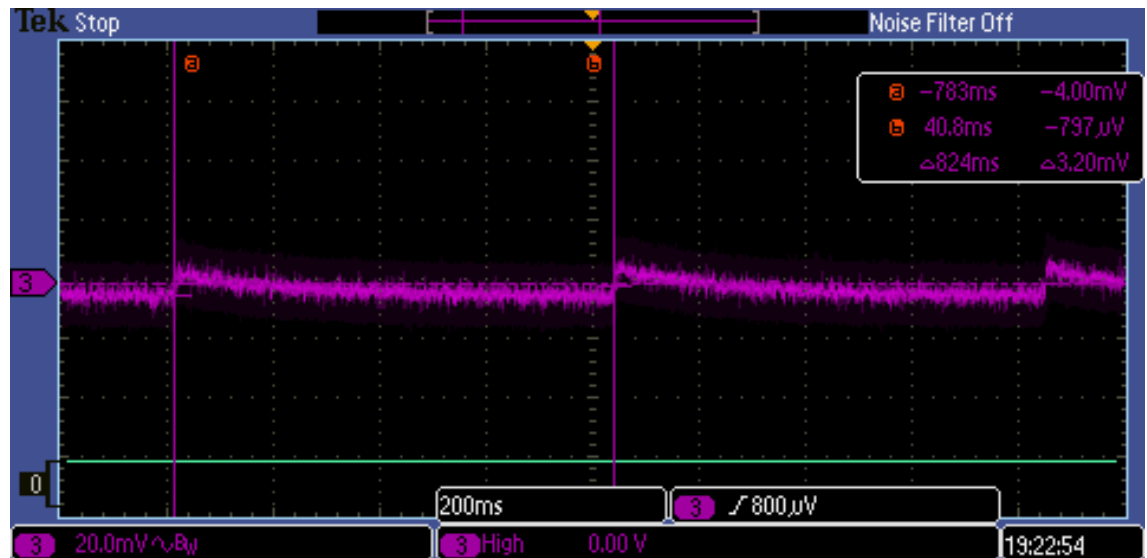
#### 3.1.1 Kapazität für Harvesting-Schaltung verbessern

In der Machbarkeitsstudie ist nach dem Gleichrichter ein Kondensator von  $470\ \mu\text{F}$  nachgeschaltet. Dieser glättet die Spannungspulse nach dem Gleichrichter zu einer DC-ähnlichen Spannung mit Rippeln.

Mit einem Kondensator von  $470\ \mu\text{F}$  wird die Ausgangsspannung der Harvesterspannung fast rippelfrei. Die Rippelspannung beträgt  $3.2\ \text{mV}$  (siehe Abbildung 3.1).

Gemäss Ives **XXXXXX** von EM Microelectronics sollten Kondensatoren der Harvesterschaltung im Bereich von  $4.7\ \mu\text{F}$  liegen, sodass die Energiemanagementschaltung ordnungsgemäss funktioniert.

Aus diesem Grund wird die Rippelspannung am Ausgang der Harvesterschaltung mit kleineren Kondensatoren gemessen. Das Messprotokoll befindet sich im Anhang.

Abbildung 3.1: Rippelspannung bei Glättung mit  $470 \mu\text{F}$  Kondensator

### Messaufbau

In der gegebenen Harvesterschaltung wird am Kondensator die Spannung mit einem Kathodenstrahloszilloskop (KO) gemessen. Ausgehend vom bestehenden Kondensator ( $470 \mu\text{F}$ ), werden danach Elektrolytkondensatoren (Elko) mit den Werten  $100 \mu\text{F}$ ,  $47 \mu\text{F}$  und  $10 \mu\text{F}$  gemessen.

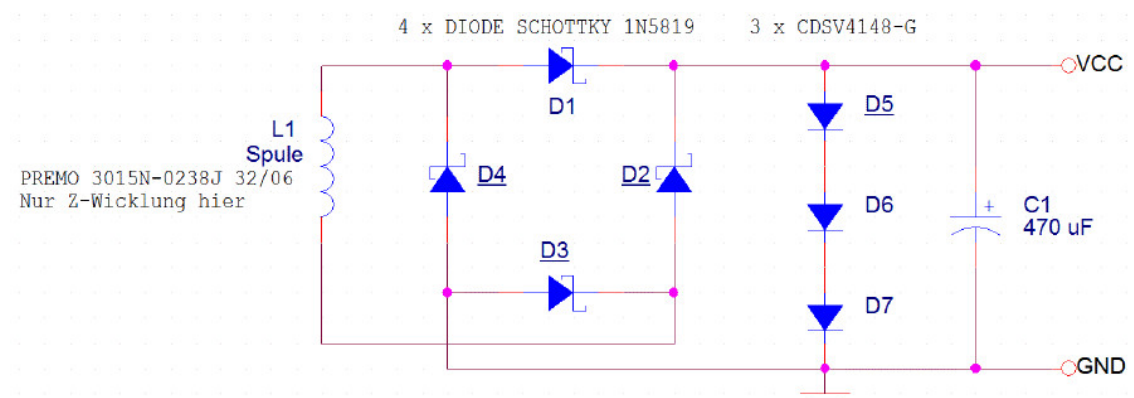


Abbildung 3.2: Messschaltung

### 3.1. INBETRIEBNAHME DES MODELLS DER MACHBARKEITSSTUDIE27

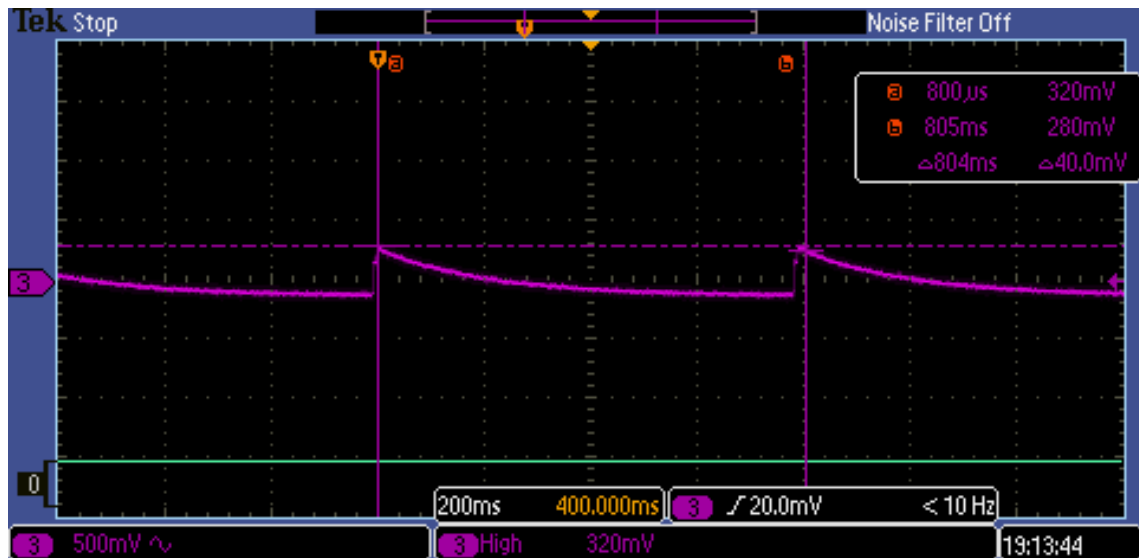


Abbildung 3.3: Rippelspannung mit 10 uF Kondensator

## Resultat

Die Rippelspannung erhöht sich wie erwartet.  $V_{pp}$  beträgt bei 100 uF **xx** mV, bei 47 uF 28.8 mV (siehe Abbildung 3.4) und bei 10 uF 320 mV (Abbildung 3.3).

## Messungen Energy Management Board

In der Projektarbeit findet sich auf S. 36 folgende Abbildung 3.5 zu den Spannungswerten des Modells der Machbarkeitsstudie.

Channel	Farbe	Beschreibung
CH1	gelb	Spannung von Harvesterquelle
CH2	blau	Spannung am STS-Kondensator
CH3	violet	Spannung am LTS-Kondensator
CH4	grün	Ausgangsspannung Energiemanagment

Auffällig sind zwei Spannungscurven: Die Spannung des Energieerzeugers. Die Spannungsregelung am Eingang der EMS funktioniert nicht korrekt. Zwischen zwei Regelperioden sollten konstante Spannungen eintreffen (siehe Erklärung in ref). Es zeigt sich, dass der LTS nicht geladen wird. Und es zeigt sich, dass das EM-Board nicht zu regulieren beginnt. Damit das Energiemanagement funktioniert, muss der Wert XXXX erreicht werden. Da

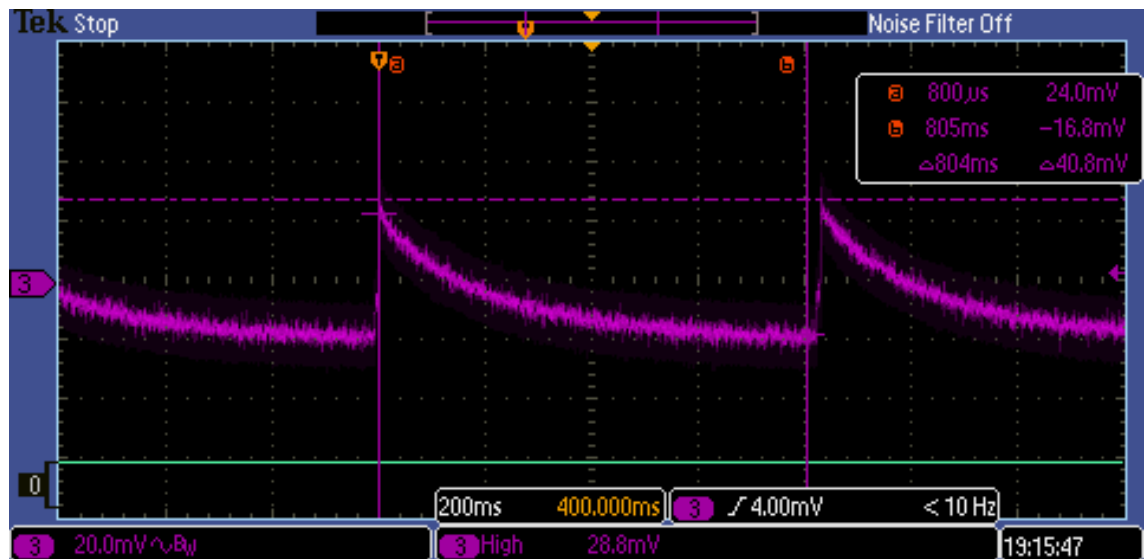
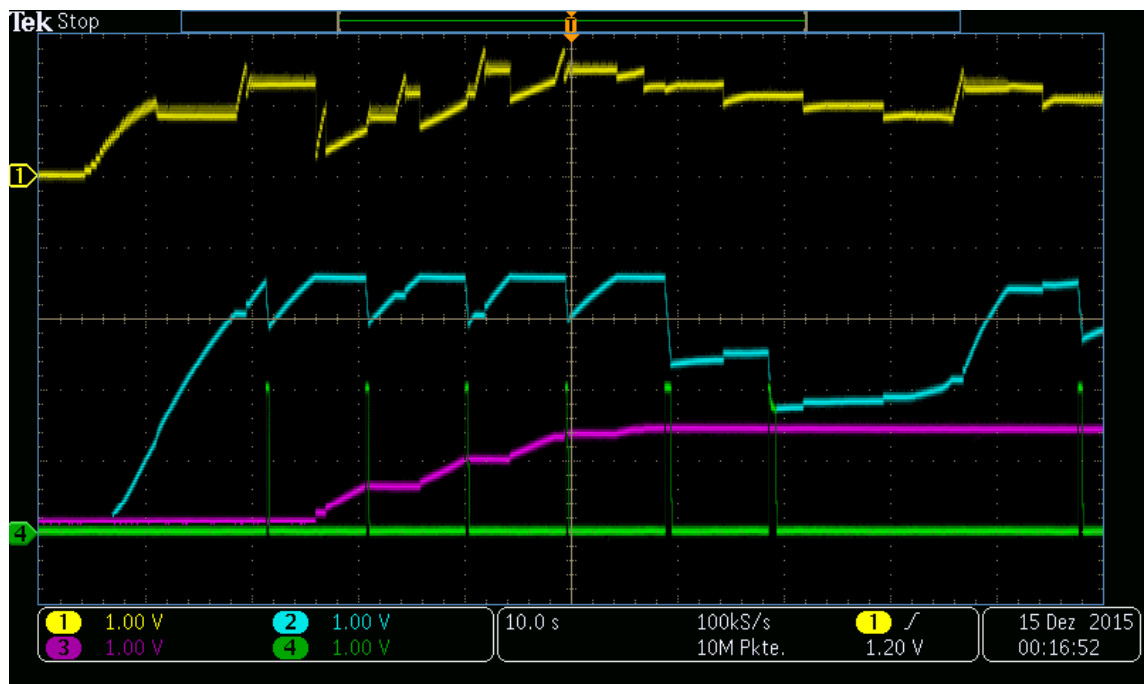
Abbildung 3.4: Rippelspannung mit 47  $\mu$ F Kondensator

Abbildung 3.5: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

dieser Wert nicht erreicht wird, passt die Energiemanagementschaltung den Innenwiderstand nicht auf.

Zum korrekten Einstellen des Energiemanagements braucht es eine MaximumPowerPointTracking-Ratio.

## 3.2 Layout Print

Ein wichtiger Punkt der Arbeit ist die Miniaturisierung der bestehenden Hardware, das heisst der Aufbau aus der Machbarkeitsstudie soll auf eine Leiterplatte gebracht werden. Die Leiterplatte hat einige Vorgaben, welche im besten Fall alle eingehalten werden sollen.

1. Die Leiterplatte soll nicht oder nur geringfügig grösser sein als das TI-SensorTag.
2. Alle Netze sollen mit Testpunkten ausgestattet werden.
3. Alle Anschlüsse vom TI-SensorTag sollen auf der Leiterplatte mit Testpunkten ausgestattet werden.
4. Alle Testpunkte vom TI-SensorTag sollen in einem Raster von 2.54 mm angeordnet werden, damit ein Stecker kontaktiert werden kann.

### 3.2.1 Das Schema (oder der Stromlaufplan)

Als erstes musste ein Schema, auch Stromlaufplan genannt, gezeichnet werden. Das Schema wurde Blockweise erfasst, als erstes wurde die Harvester-schaltung erfasst. Das Schema wurde aus der Machbarkeitsstudie entnommen. Die Funktionsweise der Harvesterschaltung kann wieder in mehrere Teile unterteilt werden.

1. Die Spule: Gewinnt Energie aus dem vorbei schnellenden Magneten.
2. Der Gleichrichter: Erzeugt positive Pulse aus der induzierten Spannung.
3. Der Limiter: Limitiert die Spannung auf eine fixe Spannung.
4. Der Ausgangskondensator: Glättet die positiven Pulse aus dem Gleichrichter.

Der nächste Block ist der EM8500-Chip mit seinen Stützkondensatoren. Das Schema wurde aus dem Datenblatt entnommen. Die Energiespeicher, welche in dieser Arbeit mittels Elektrolytkondensatoren dargestellt werden,

sind einige der wichtigsten Elemente. Die Speicherelemente werden nicht auf der Leiterplatte Platz finden, da die meisten Elektrolytkondensatoren zu hoch sind und der Platz zwischen den Leiterplatten sehr gering ist. Die Umlauferschaltung wird mit einem Reed-Switch ermöglicht. Der Reedswitch ist einer der kleinsten Blöcke im Schema. Der Block Interface enthält die Verbindung zum TI-SensorTag, ein Stecker realisiert dieses Interface. Der Stecker ist bereits vom TI-SensorTag vorgegeben, es handelt sich um einen Stecker, welcher sein eigenes Gegenstück darstellt.

### 3.2.2 Optimierung der Harvesterschaltung

- Ives: Der Glättungskondensator wird auf 47  $\mu\text{F}$  geändert. - Zu wenig Energie für 10 km/h

Nach dem Erfassen des Schemas wurde die Optimierung der Hardware angegangen. Die beste Optimierungsmöglichkeit und auch der kritischste Block ist die Harvesterschaltung, hier wird die Energie für die restliche Schaltung gewonnen. In mehreren Schritten wurden die einzelnen Teile der Schaltung analysiert und versucht zu optimieren.

#### Optimierung der Spule

Die Spule gewinnt die Energie aus dem vorbei schnellenden Magneten, hier kann die gewonnene Energie beeinflusst werden. Eine gute Spule kann mehr Energie aus dem bewegten Magneten gewinnen, wichtig ist die Induktivität  $L$  und die Fläche  $A$ , welche die Spule hat. Eine Vorgabe war dass die Spule von der Grösse nicht merklich verändert wird, ausser man würde eine kleinere Spule finden, welche mehr Energie gewinnt. Eine Spule mit ähnlicher Fläche bzw. Grösse wurde gefunden, welche eine höhere Induktivität besitzt. Die Spule von Würth Elektronik ist sehr vielversprechend, denn die gleiche Fläche mit höherer Induktivität bedeutet mehr Energiegewinn aus dem Magneten. Hier Schlusswort von Messprotokoll einfügen.

#### Optimierung des Gleichrichters

Der Gleichrichter aus dem Aufbau der Machbarkeitsstudie besteht aus vier Dioden vom Typ 1N5819, diese Dioden sind nicht für eine LowPower-Anwendung ausgelegt. Ausserdem könnte ein Gleichrichter gefunden werden, welcher in einem Gehäuse ausgeliefert wird. Wichtig ist dass der Leckstrom so gering wie möglich ist und die Schwellenspannung ebenfalls möglichst klein bleibt. Hier Schlusswort vom Messprotokoll einfügen.

### Optimierung des Limiter

Der Limiter ist eine Spannungbegrenzung, da die nachfolgende Schaltung nicht mit einer zu hohen Spannung betrieben werden darf. Dieser Schaltungsteil ist sehr kritisch, denn er darf nicht zu viel Energie verlieren, muss aber trotzdem die Spannung immer begrenzen. Die Spannung darf einen Pegel von 2 V nicht überschreiten, da ansonsten der EM-8500-Chip droht zerstört zu werden. Hier Schlusswort vom Messprotokoll einfügen.

### Optimierung des Ausgangskondensators

Der Ausgangskondensator muss möglichst niedrig gehalten werden, gemäss Aussage von Yves, da ansonsten der EM8500-Chip Mühe hat den Eingang zu regeln. Trotzdem darf der Ausgangskondensator nicht zu klein dimensioniert werden, da ansonsten die Rippelspannung am Ausgang der Harvesterschaltung zu hoch ist und der EM8500-Chip ebenfalls nicht mehr richtig regeln kann. Hier Schlusswort vom Messprotokoll einfügen.

### 3.2.3 Bauteildefinition

Nachdem das Schema gezeichnet wurde und die Schaltung optimiert wurde, mussten die Bauteile noch definiert werden. Es mussten die Footprints, sowie die Hersteller, Herstellerbezeichnungen, Lieferant und Lieferantenartikelnummer hinterlegt werden. Einige Footprints waren bereits in den Bibliotheken vorhanden, welche wir von Lukas erhalten haben. Fehlende Footprints wurden ergänzt, wie zum Beispiel der Footprint der Spule.

### 3.2.4 Das Layout

#### Positionierung

Die Positionierung der Bauteile auf der Leiterplatte ist sehr wichtig, da hier schon unnötige Leiterbahnen gespart werden können bzw. die Länge von gewissen Leiterbahnen können extrem verkürzt werden. Wichtig ist, dass die Stützkondensatoren bei dem EM8500-Chip so nah wie möglich am Chip platziert werden, damit die Spannungen am Chip so konstant gehalten werden können, wie nur möglich. Weiter sollte die Harvesterschaltung ebenfalls sehr eng beieinander platziert werden, um zu verhindern, dass durch lange Stromlaufwege bereits Leistung verloren geht. Problematisch ist, dass die Spule auf der unteren Seite der Leiterplatte platziert werden muss, somit wird die Schaltung ein auf zwei Layer aufgeteilt. Eine grosse Herausforderung ist die

Positionierung der Testpunkte, um das Interface zum TI-SensorTag zu realisieren. Dadurch wird ein grosser Platz für die korrekte Positionierung der Testpunkte eingenommen.

### Gestaltung der Leiterbahnen

Wann immer möglich wurden die Leiterbahnen, welche zu der Harvester-schaltung gehören, mit 20 Mil gezogen, um eine möglichst verlustfreie Leistungsübertragung zu gewährleisten. Alle anderen nicht leistungskritischen Leiterbahnen wurden mit einer Leiterbahnbreite von 10 Mil platziert, um nicht mehr Platz in Anspruch zu nehmen als nötig.

### Ergebnis

Das Ergebnis ist eine Leiterplatte, welche alle gewünschten Spezifikationen erfüllt und somit kann die Leiterplatte auch für ein Praktikum verwendet werden. Die Leiterplatte ist mit sehr vielen Testpunkten ausgestattet, sowie die Möglichkeit für Strommessungen.

### 3.2.5 Energiekalkulation

EHRV gesammelt,  $\epsilon$  = BLE-Senden Zeitkomponente Energie Harvester braucht länger, verbraucht schneller.

Die Energie der Quelle  $[E_{HRV}^-]$  muss ausreichen für das Versenden der Datenpakete über Bluetooth smart  $[E_{BLE}^-]$ .

$$E_{HRV}^- \geq E_{BLE}^-$$

Die durchschnittliche maximale Leistung der Quelle kann aus der Abbildung 3.2.5 entnommen werden. Diese basiert auf dem Messprotokoll im Anhang D.

MAN KÖNNTE. (GEHRÖT ZU OPTIONAL) Da die produzierte Energie von der Fahrgeschwindigkeit abhängt, wird das Energie-System in drei Zustände eingeteilt:

- tiefe Geschwindigkeit: 0 - 10 km/h
- mittlere Geschwindigkeit: 10 - 20 km/h
- hohe Geschwindigkeit: grösser als 20 km/h



**Leistungsabgabe Harvester-Schaltung**

Geschwindigkeit [km/h]	Maximale Leistung [ $\mu W$ ]
10	74.4
20	unbekannt
40	unbekannt

Der Energieverbrauch hängt von der Anzahl ausgelesener Daten ab. Wird nur die Geschwindigkeit übermittelt, ist der Verbrauch kleiner, als wenn zusätzlich die Temperatur und die Höhe mitgesendet werden.

**Energieverbrauch BLE-Pakete versenden**

Anzahl Inhalte	Energieverbrauch [ $\mu J$ ]
1	11000
2	unbekannt
3	unbekannt

(Für die Zuverlässigkeit der Datenübermittlung wird jeweils dasselbe Paket über drei Kanäle gesendet. Wenn hier „1 Inhalt versenden“ steht, meint dies, ein Paket über drei Kanäle senden.)

**Berechnung**

$$E_{HRV}^- = \bar{P} * t \geq E_{BLE}^-$$

$$P_{10km/h}^- * t = 11 * 10^{-3}$$

$$74.4 * 10^{-6} * t = 11 * 10^{-3}$$

$$t = 147s$$

$$E_{HRV}^- = \bar{P} * t \geq E_{BLE}^-$$

$$P_{10km/h}^- * t = 11 * 10^{-3}$$

$$74.4 * 10^{-6} * t = 11 * 10^{-3}$$

$$t = 147s$$

**EM BOARD KONZEPT**

Funktion generell beschreiben (im Anhang)

**Schwellwerte**

Ausrechnend der schwellwerte

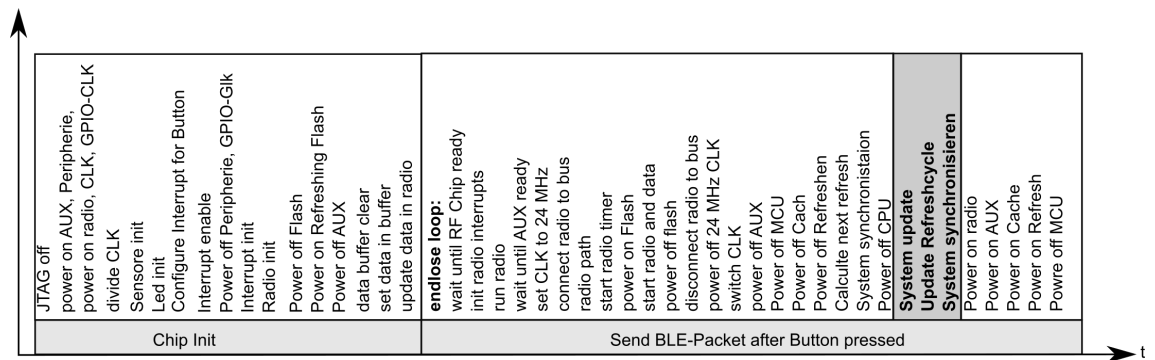


Abbildung 3.6: Prozessablauf V0

## Konfigurationen

### Konfigurationseinstellungen

## 3.3 Low Power Einstellungen Sensortag

Gearbeitet wird mit einem Cortex M3 von TI. Grundsätzlich basieren die Bsp. auf RTOS. Wenige für PowerManagement. Das Powermanagement ohne Betriebssystem. Wir verwenden dies, weil (gemäss Erfahrungswerte Praxis) mit Betriebssystem mehr Energie braucht).

### 3.3.1 VO: SimpleBroadcast

Ablaufdiagramm Senden - Was ist der Unterschied zum RTOS. - Was muss gemacht werden.

- Was überprüft werden musste, was gut ist.

Gestartet mit simpleBLE-Projekt von TI mit Einstellungen von Assistenten vom Ines.

- Configure ccfg.c to use internal LF RCOSC
- Configure WAKE INTERVAL
- Configure recharge period to 400ms if WAKE INTERVAL is larger than 400ms(ish)
- Configure IO's and set up advertisement payload

Allgemeine Einstellungen in der Konfigurationsdatei ccfg.c:  $V_{min} = 2.25$   
 $V_{Imax} = 39 \text{ mA}$

Da VSUP bei 1.8 V startet, ist zu überprüfen.

```
// RTC wakeup interval #define WAKE_INTERVAL_MS 1000 #define  
WAKE_INTERVAL_TICKS WAKE_INTERVAL_MS*65536 / 1000  
// Advertisement payload length in bytes #define ADVLEN 10  
Gehen in den Standby modus. Wird eingestellt über die Datei pwr_ctr.c  
/h
```

Dort stehen alle Handlungen, die das System macht, um in den Standby-Modus zu gelangen.

### **3.3.2 V1**

### **3.3.3 V2**

## **3.4 Applikationsentwicklung**

### **3.5 Option 1**



# Kapitel 4

## Verzeichnisse

### 4.1 Literatur

A. R. K. Andrea Montecucco. *Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators*. IEEE Transaction On Power Electronics, 2014.

EMMicroelectronic. *EM8500, Power Management Controller with energy harvesting interface*. Datasheet, 2015. V 1.0.

<http://www.harvesting-energy.de/>, März 2016.

K. Manuel. Leistungsmaximum harvester, 2016.

D. S. Roman Schneider. Bicycle computer and sensoric powered with harvested energy. Projektarbeit, ZHAW School of Engineering, 2015.

TI. *Sensortag, CC2650 Datasheet*. Guide, 2015.

### 4.2 Glossar und Abkürzungen

#### **Clock Domain**

Ein Bereich der Hardware, der mit demselben Takt läuft.

### 4.3 Abbildungsverzeichnis

### 4.4 Tabellenverzeichnis

**Anhang A**

**Ausschreibung Bachelorarbeit**

# Bachelorarbeit 2016 – FS: BA16\_mema\_1

## Titel

Energy harvesting powered bicycle computer

## Beschreibung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll ein batterieloses Geschwindigkeitsmessgerät für Fahrräder entwickelt werden. Das Messgerät wird an der Gabel des Fahrrades befestigt und misst die Anzahl Durchgänge eines an den Speichen befestigten Magnetes. Der Tachometer gewinnt die gesamte benötigte Energie aus den Magnetdurchläufen. Die gemessenen Daten werden per Bluetooth an einen Fahrradcomputer (in diesem Fall ein Mobiltelefon) gesendet.

Der Machbarkeitsbeweis wurde durch die vorangegangene Projektarbeit „Bicycle computer and sensoric powered with harvested energy“ (PA15\_mema\_1) bereits erbracht. Der hier entwickelte Fahrradcomputer wird sich durch ein intelligentes Energieverwaltungssystem vom Prototypen abheben. Dies bedeutet, der Fahrradcomputer soll wissen, wie viel Energie bereits gespeichert wurde und er soll prognostizieren, wie viel Energie in näherer Zukunft geerntet werden kann. Aufgrund dieser und möglicherweise weiteren Informationen berechnet der Fahrradcomputer den optimalen Zeitpunkt und Zeitabstand, um die gemessenen Geschwindigkeitsdaten zu versenden. Sobald genug Energie zur Verfügung steht, beginnt der Fahrradcomputer ausserdem Werte wie den Luftdruck (Höhe), die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit zu messen. Optional kann auch ein Bewegungssensor in Betrieb genommen werden.

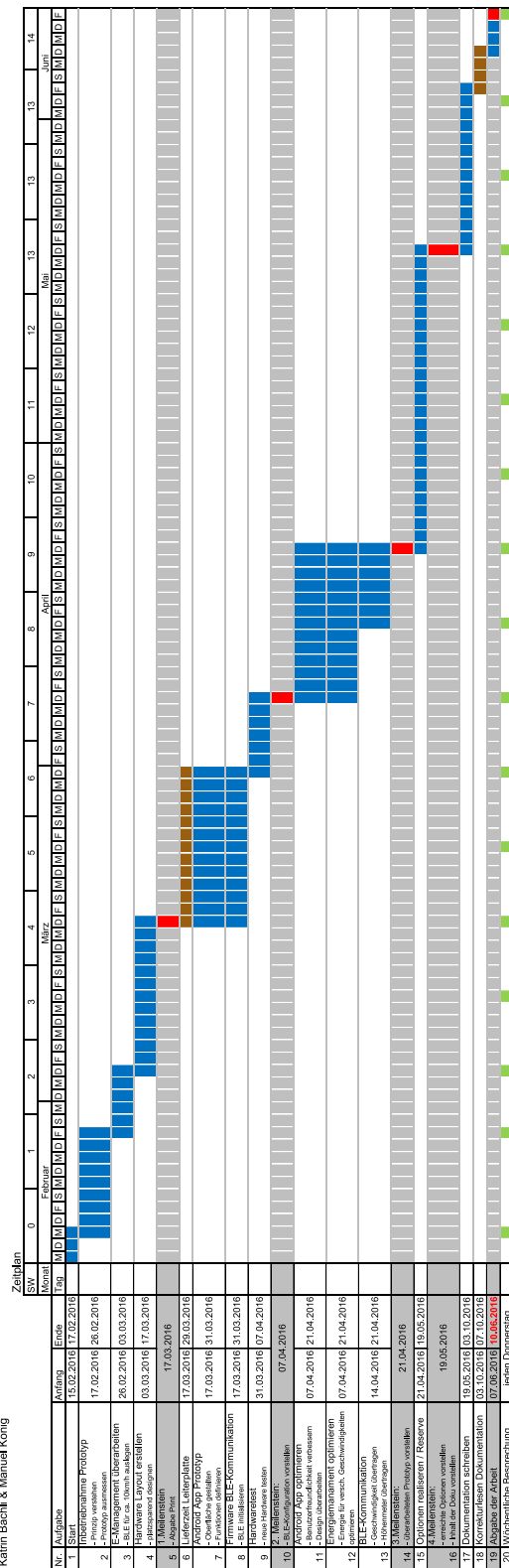
Es soll ausserdem eine Smartphone App entwickelt werden, welche die gemessenen Geschwindigkeitsdaten, Sensordaten und aktuelle Werte der Energieverwaltung empfängt sowie darstellt. Optional kann ein Kommunikationskanal vom Smartphone zum Fahrradcomputer implementiert werden, um Parameter wie Radumfang oder Sicherheitseinstellungen auszutauschen. Selbstverständlich müsste der Fahrradcomputer auch dann noch ohne Batterie auskommen.

Firmware:	40%
Hardware:	30%
App:	30%

Anhang B

Projektplanung





# Anhang C

## Referenz Sensortag von Texas Instrument

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sind nicht Microcontroller für Low Power Anwendungen zu evaluieren. Das Sensortag von Texas Instrument ist vorgegeben und beinhaltet für die Entwicklung des Bicycle Computer bereits mehrere Eigenschaften auf einem Borad vereint:

- Bestückt mit 10 Sensoren
- Bestückt mit einem zweiten Cortex für die Wireless-Anbindung. Dadurch leichtes Wechseln der Kommunikationsart von Bluetooth smart auf z.B. Zigbee.
- Hohe Rechenleistung

### C.1 Blockschema Sensortag

TI (2015)S.3

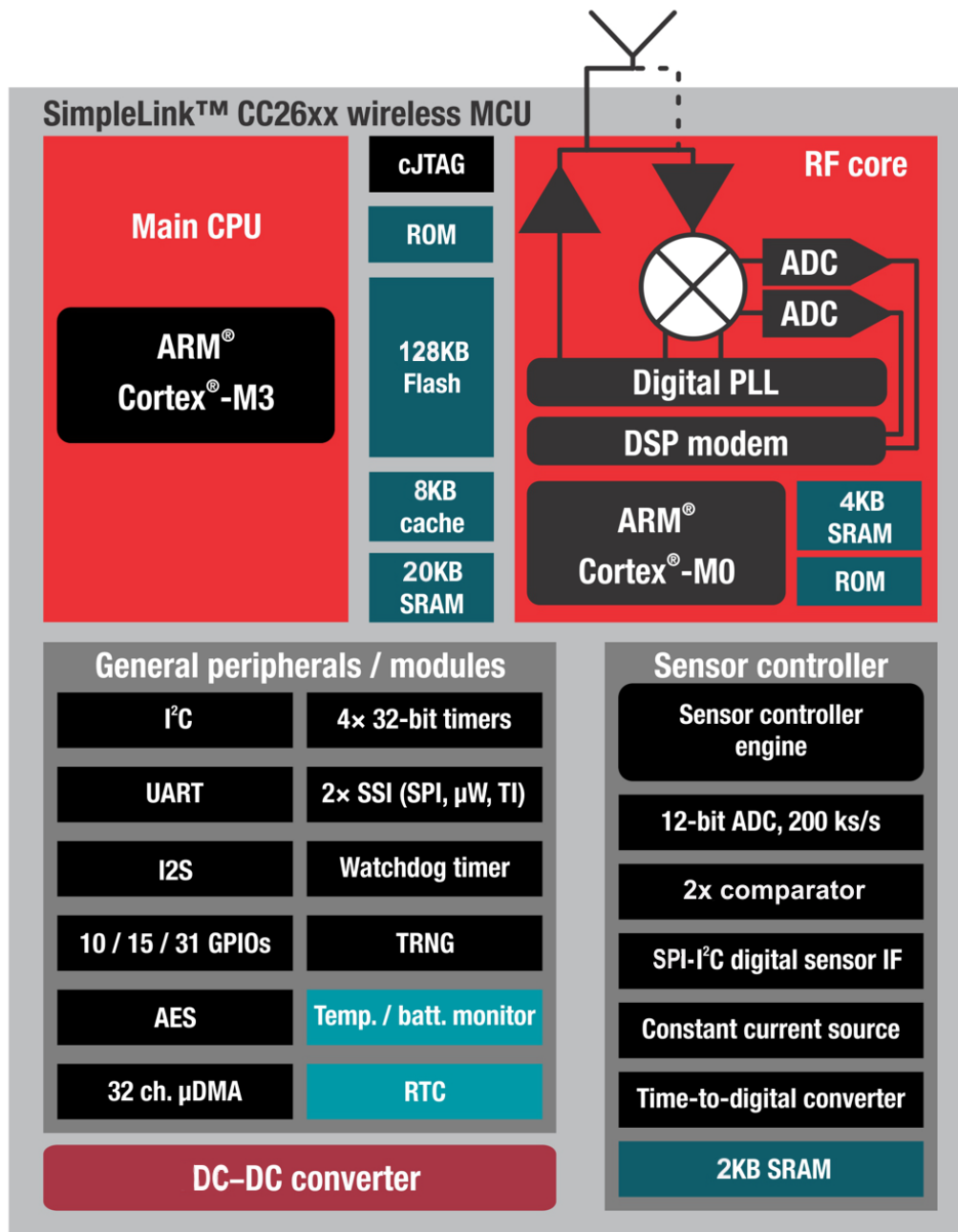


Abbildung C.1: Blockscheema Sensortag

# Anhang D

## Messprotokoll

## Energiegewinnung Harvester

## **Messung 2 Energiemessung Harvester**

Autor: Manuel König

Messdatum: 28. Februar 2016

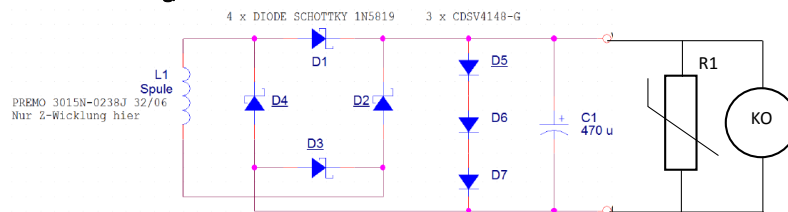
### **Zusammenfassung**

Die Leistungs- und Stromkennlinie von einer Harvesterschaltung wurden ermittelt, um die MPPT-  
Ratio auf dem EM8500-Evaluationboard zu ermitteln. Die Kennlinie musste in mehreren  
Durchgängen immer weiter verfeinert werden. Die maximale Leistung wird bei einer Spannung von  
0.93 V erreicht, was 66.43% von der maximalen Spannung von 1.4 V entspricht.

## 1 Aufgabenstellung

Die Energiekennlinie und Widerstandskennlinie von der Harvesterschaltung soll ermittelt werden.

## 2 Messschaltung/Messverfahren



### Bemerkungen

- Für R1 werden folgende Widerstandswerte eingesetzt: 1  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$
- C1 ist ein Elko mit 47  $\mu$ F

### Vorgehen

Um die Energiekennlinie und Widerstandskennlinie zu erfassen wird die Spannung über dem Widerstand R1 mit einem KO gemessen. Anschliessend kann, mit dem Widerstandwert und der Spannung die Leistung, und der Strom berechnet werden. Die Geschwindigkeit wird auf ca. 12km/h gesetzt, dass bedeutet alle 0.3 s wird in der Spule durch den Magneten eine Spannung erzeugt.

## 3 Ergebnis

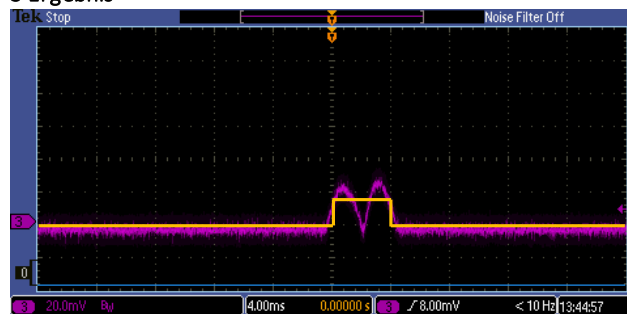


Abbildung 1: pink: Spannung über R1 mit 1  $\Omega$ , gelb: Annäherung

Der Rechteckpuls wird auf die gesamte Periode aufgeteilt, um die durchschnittliche Spannung während einer ganzen Periode von 0.3s zu bestimmen.

$$I \approx \frac{U_{\text{ampl}} * t_{\text{on}}}{T} * \frac{1}{R} = \frac{16 \text{ mV} * 4 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} * \frac{1}{1 \Omega} = 213.33 \mu\text{A}$$

Die Leistung wird mit der quadrierten durchschnittlichen Spannung berechnet.

$$P \approx \left( \frac{U_{\text{ampl}} * t_{\text{on}}}{T} \right)^2 * \frac{1}{R} = \left( \frac{16 \text{ mV} * 4 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} \right)^2 * \frac{1}{1 \Omega} = 46 \text{ nW}$$

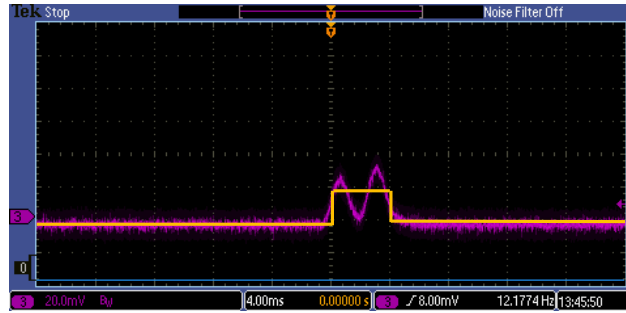


Abbildung 2: pink: Spannung über R1 mit 10  $\Omega$ , gelb: Annäherung

$$I \approx \frac{U_{\text{ampl}} * t_{\text{on}}}{T} * 1/R = \frac{18 \text{ mV} * 4 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} * 1/10 \Omega = 24 \mu\text{A}$$

$$P \approx \left( \frac{U_{\text{ampl}} * t_{\text{on}}}{T} \right)^2 * 1/R = \left( \frac{18 \text{ mV} * 4 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} \right)^2 * 1/10 \Omega = 6 \text{ nW}$$

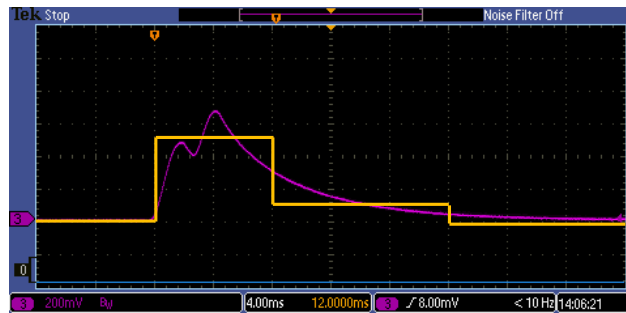


Abbildung 3: pink: Spannung über R1 mit 100  $\Omega$ , gelb: Annäherung

$$I \approx \left( \frac{U_1 * t_{\text{on}}}{T} + \frac{U_2 * t_{\text{on}}}{T} \right) * 1/R = \left( \frac{520 \text{ mV} * 8 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} + \frac{320 \text{ mV} * 12 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} \right) * 1/100 \Omega = 266.66 \mu\text{A}$$

$$P \approx \left( \frac{U_1 * t_{\text{on}}}{T} + \frac{U_2 * t_{\text{on}}}{T} \right)^2 * 1/R = \left( \frac{520 \text{ mV} * 8 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} + \frac{320 \text{ mV} * 12 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} \right)^2 * 1/100 \Omega = 7.11 \mu\text{W}$$

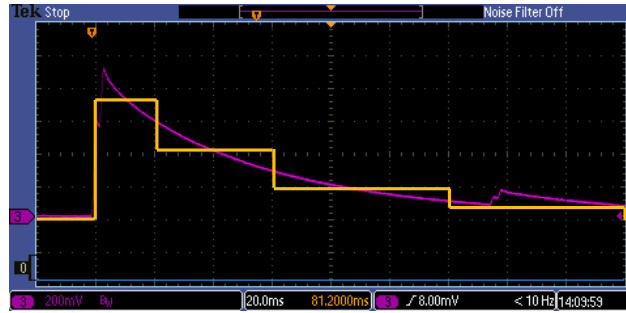


Abbildung 4: pink: Spannung über R1 mit 1 kΩ, gelb: Annäherung

$$\begin{aligned}
 I &\approx \left( \frac{U_1 * t_{on}}{T} + \frac{U_2 * t_{on}}{T} + \frac{U_3 * t_{on}}{T} + \frac{U_4 * t_{on}}{T} \right) * 1/R \\
 &= \left( \frac{740 \text{ mV} * 20 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} + \frac{440 \text{ mV} * 40 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} + \frac{200 \text{ mV} * 60 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} + \frac{120 \text{ mV} * 60 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} \right) \\
 &\quad * 1/1 \text{ k}\Omega = 172 \text{ }\mu\text{A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &\approx \left( \frac{U_1 * t_{on}}{T} + \frac{U_2 * t_{on}}{T} + \frac{U_3 * t_{on}}{T} + \frac{U_4 * t_{on}}{T} \right)^2 * 1/R \\
 &= \left( \frac{740 \text{ mV} * 20 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} + \frac{440 \text{ mV} * 40 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} + \frac{200 \text{ mV} * 60 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} + \frac{120 \text{ mV} * 60 \text{ ms}}{300 \text{ ms}} \right)^2 \\
 &\quad * 1/1 \text{ k}\Omega = 29.584 \text{ }\mu\text{W}
 \end{aligned}$$



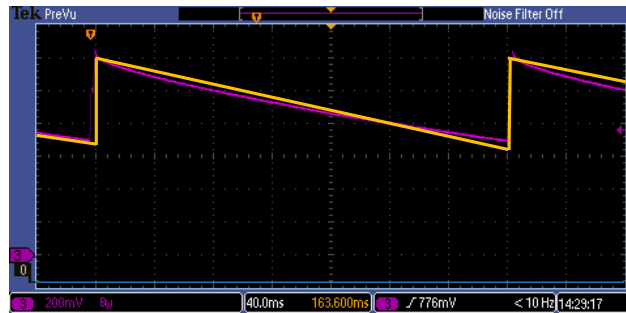


Abbildung 5: pink: Spannung über R1 mit 10 kΩ, gelb: Annäherung

$$I \approx (\Delta U/2 + U_{min}) \cdot 1/R = (540 \text{ mV}/2 + 660 \text{ mV}) \cdot 1/10 \text{ k}\Omega = 93 \text{ }\mu\text{A}$$

$$P \approx (\Delta U/2 + U_{min})^2 \cdot 1/R = (540 \text{ mV}/2 + 660 \text{ mV})^2 \cdot 1/10 \text{ k}\Omega = 86.49 \text{ }\mu\text{W}$$

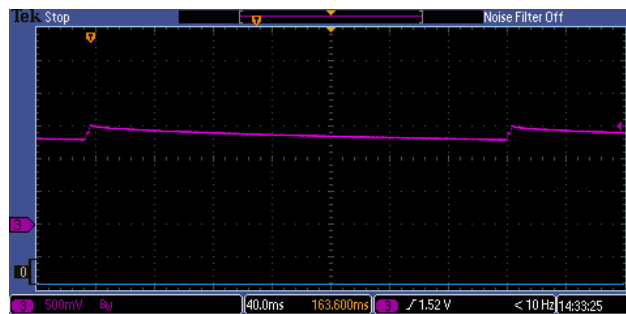


Abbildung 6: Spannung über R1 mit 100 kΩ

$$I = \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{0.2 \text{ V}/2 + 1.3 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 14 \text{ }\mu\text{A}$$

$$P = \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(0.2 \text{ V}/2 + 1.3 \text{ V})^2}{100 \text{ k}\Omega} = 19.6 \text{ }\mu\text{W}$$

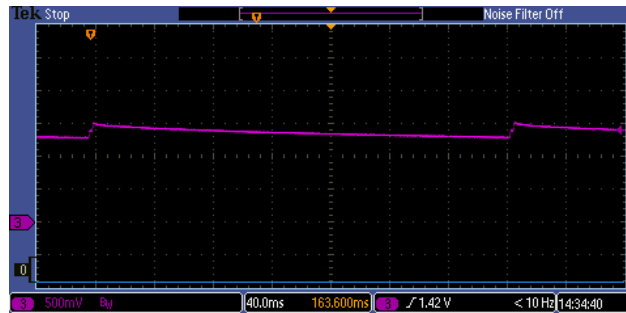


Abbildung 7: Ausgangsspannung Harvester ohne Last

Der Strom bei unbelastetem Ausgang ist null, dementsprechend ist die Leistung ebenfalls null.

Aus den berechneten Werten lässt sich folgende Grafik generieren.

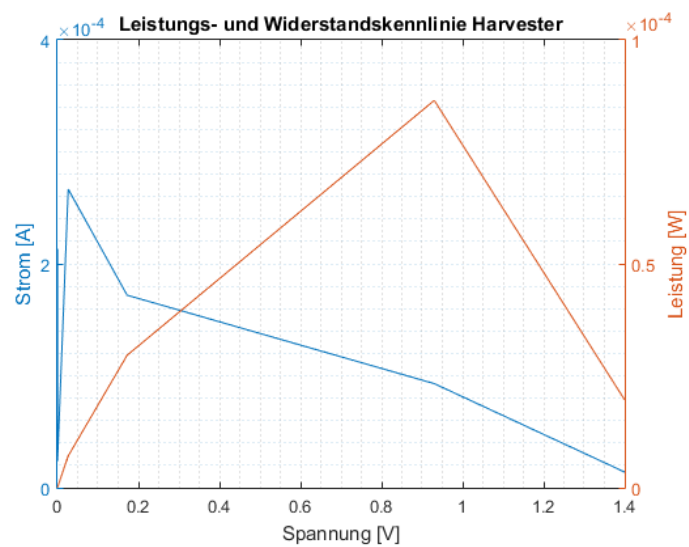


Abbildung 8: grobe Kennlinie

Aus der Kennlinie geht hervor, dass die Genauigkeit noch nicht genügt. Es müssen weitere Messungen gemacht werden im Bereich der maximalen Leistung.

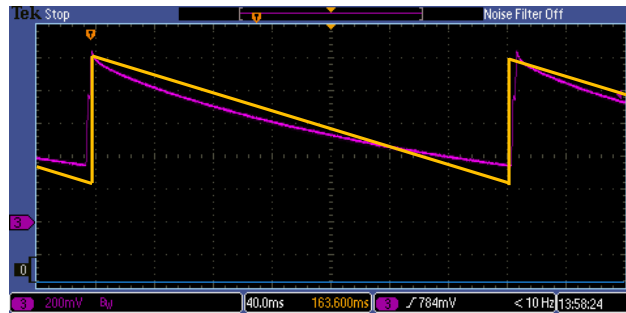


Abbildung 9: pink: Spannung über R1 mit 5 kΩ; gelb: Annäherung

$$I \approx \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{660 \text{ mV}/2 + 240 \text{ mV}}{5 \text{ k}\Omega} = 114 \text{ }\mu\text{A}$$

$$P \approx \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(660 \text{ mV}/2 + 240 \text{ mV})^2}{5 \text{ k}\Omega} = 64.98 \text{ }\mu\text{W}$$

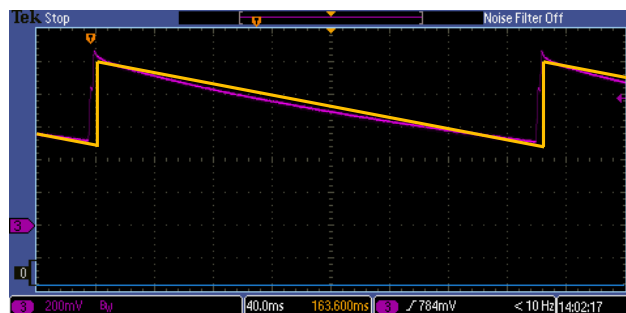


Abbildung 10: pink: Spannung über R1 mit 8 kΩ; gelb: Annäherung

$$I \approx \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{520 \text{ mV}/2 + 480 \text{ mV}}{8 \text{ k}\Omega} = 92.5 \text{ }\mu\text{A}$$

$$P \approx \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(520 \text{ mV}/2 + 480 \text{ mV})^2}{8 \text{ k}\Omega} = 68.45 \text{ }\mu\text{W}$$

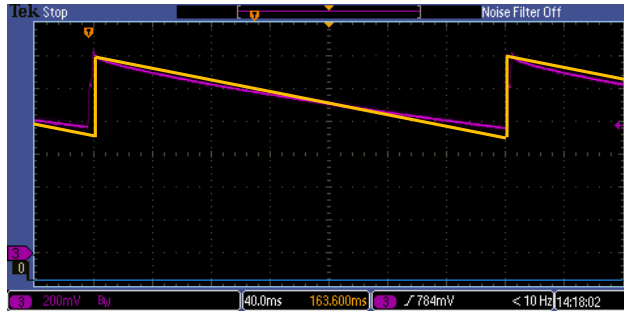


Abbildung 11: pink: Spannung über R1 mit 12 kΩ; gelb: Annäherung

$$I = \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{300 \text{ mV}/2 + 700 \text{ mV}}{12 \text{ k}\Omega} = 70.83 \mu\text{A}$$

$$P = \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(480 \text{ mV}/2 + 720 \text{ mV})^2}{12 \text{ k}\Omega} = 60.208 \mu\text{W}$$

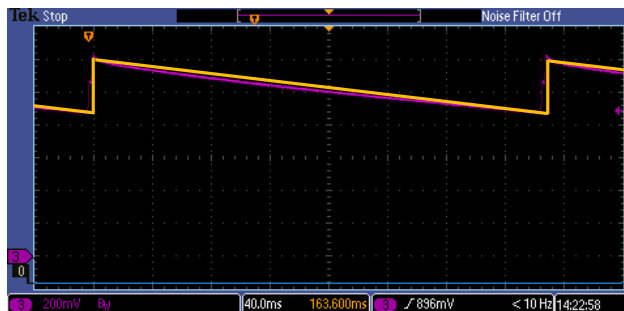


Abbildung 12: pink: Spannung über R1 mit 20 kΩ; gelb: Annäherung

$$I \approx \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{380 \text{ mV}/2 + 920 \text{ mV}}{20 \text{ k}\Omega} = 55.5 \mu\text{A}$$

$$P \approx \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(380 \text{ mV}/2 + 920 \text{ mV})^2}{5 \text{ k}\Omega} = 61.605 \mu\text{W}$$

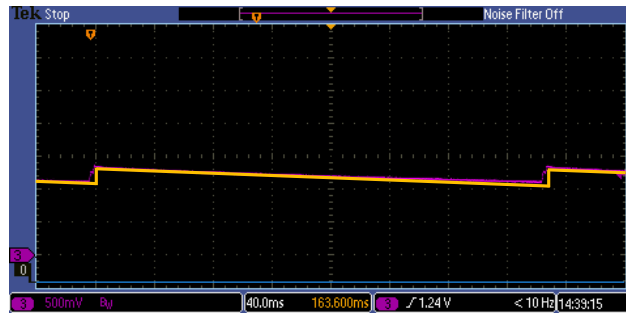


Abbildung 13: pink: Spannung über R1 mit 50 kΩ; gelb: Annäherung

$$I \approx \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{250 \text{ mV}/2 + 1050 \text{ mV}}{50 \text{ k}\Omega} = 23.5 \mu\text{A}$$

$$P \approx \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(0.2 \text{ V}/2 + 1.1 \text{ V})^2}{50 \text{ k}\Omega} = 27.613 \mu\text{W}$$

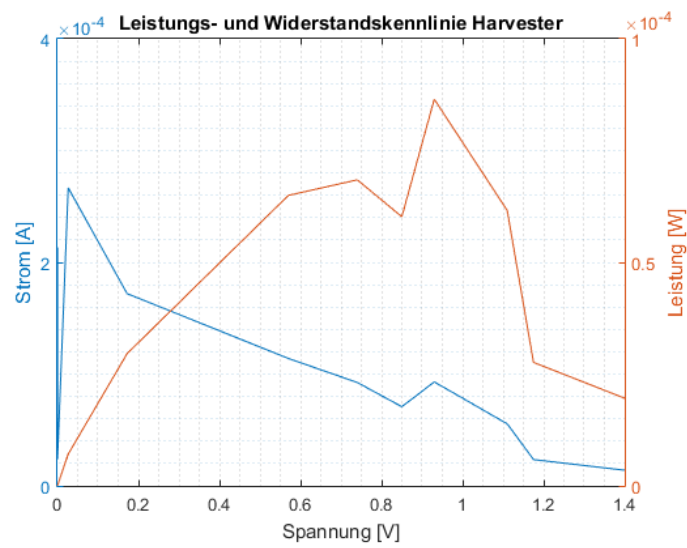


Abbildung 14: Leistungs- und Widerstandskennlinie (verfeinert)

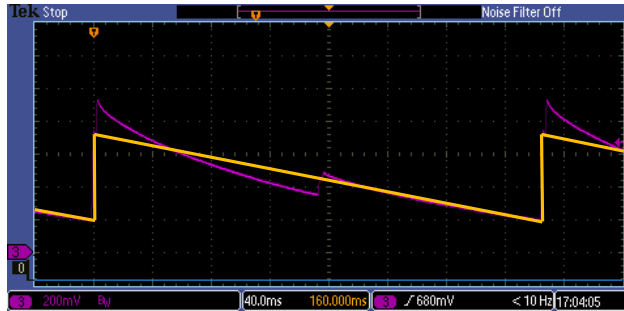


Abbildung 15: pink: Spannung über R1 mit 3kΩ; gelb: Annäherung

$$I \approx \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{520 \text{ mV}/2 + 200 \text{ mV}}{3 \text{ k}\Omega} = 153.33 \text{ }\mu\text{A}$$

$$P \approx \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(680 \text{ mV}/2 + 200 \text{ mV})^2}{3 \text{ k}\Omega} = 70.533 \text{ }\mu\text{W}$$



Abbildung 16: pink: Spannung über R1 mit 6 kΩ; gelb: Annäherung

$$I \approx \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{500 \text{ mV}/2 + 400 \text{ mV}}{6 \text{ k}\Omega} = 108.33 \text{ }\mu\text{A}$$

$$P \approx \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(500 \text{ mV}/2 + 400 \text{ mV})^2}{6 \text{ k}\Omega} = 70.417 \text{ }\mu\text{W}$$

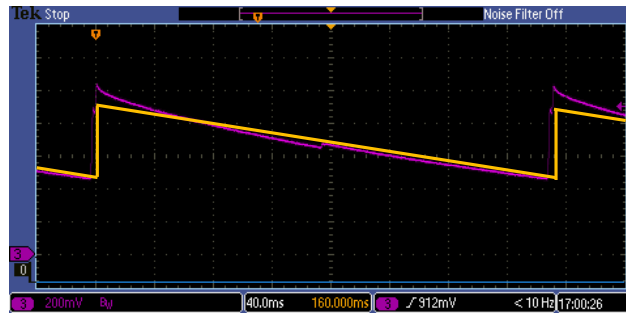


Abbildung 17: pink: Spannung über R1 mit 7 kΩ; gelb: Annäherung

$$I = \frac{\Delta U/2 + U_{min}}{R} = \frac{460 \text{ mV}/2 + 460 \text{ mV}}{7 \text{ k}\Omega} = 98.571 \mu\text{A}$$

$$P = \frac{(\Delta U/2 + U_{min})^2}{R} = \frac{(680 \text{ mV}/2 + 200 \text{ mV})^2}{3 \text{ k}\Omega} = 68.014 \mu\text{W}$$

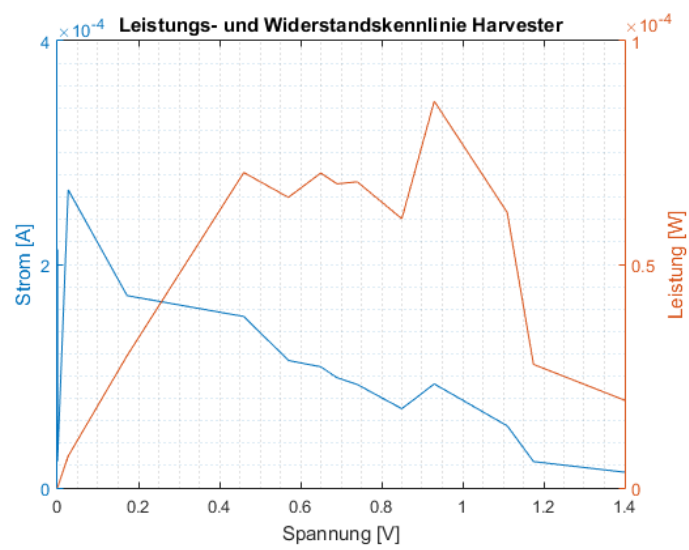


Abbildung 18: Leistungs- und Widerstandskennlinie

#### 4 Schlusswort

Zur Ermittlung des MPPT-Ratio musste die Leistungskennlinie aufgenommen werden. Die maximale Leistung tritt bei der Spannung 0.93 V auf, die durchschnittliche Spannung vom unbelasteten Harvester liegt bei ca. 1.4 V, daraus lässt sich das Verhältnis ausrechnen. Das Verhältnis, welches auf dem EM-Board eingestellt werden sollte, beträgt also 66.43%.

#### 5 Inventar

KO:	Tektronix MSO2024; Serie-Nr. C012115
Multimeter:	Extech Instruments True RMS Multimeter 430; Serie-Nr. 150400038
Widerstand:	1 $\Omega \pm 1\%$ 10 $\Omega \pm 1\%$
Potentiometer:	Vishay 534-11104, 100 k $\Omega \pm 5\%$



*XXANHANG D. MESSPROTOKOLL ENERGIEGEWINNUNG HARVESTER*

# Anhang E

## Messprotokoll

## Energieverbrauch Sensortag

*XXIIANHANG E. MESSPROTOKOLL ENERGIEVERBRAUCH SENSORTAG*

## Anhang F

Messprotokoll Rippelspannung  
Ausgangskondensator  
Harvesterschaltung

## **Versuch 1 Harvester Ausgang Kondensator**

Autor: Manuel König

Messdatum: 26. Februar 2016

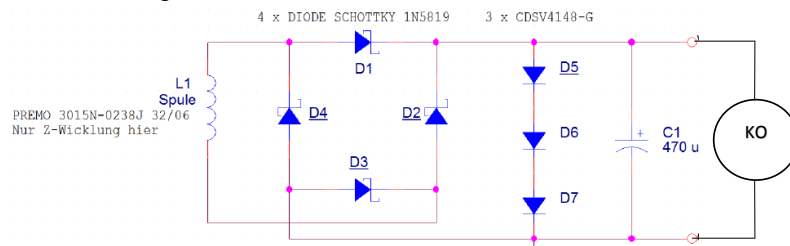
### **Zusammenfassung**

Es wurde die Rippelspannung am Ausgang der Harvesterschaltung vom Aufbau der Machbarkeitsstudie mit verschiedenen Elektrolytkondensatoren ausgemessen. Die Empfehlung von Yves von EM Microelectronic besagt, dass die Kapazität am Ausgang der Harvesterschaltung möglichst klein gehalten werden soll, da die nachfolgende Energiemanagementschaltung sonst nicht mit Sicherheit ordnungsgemäss funktioniert. Die Messung ergeben, dass eine Kapazität von  $47\text{ }\mu\text{F}$  eine Rippelspannung von ca.  $40\text{m V}_{\text{pp}}$  ergibt, was annehmbar ist. Die Rippelspannung bei kleineren Kapazitäten ist ca. 10mal grösser.

## 1 Aufgabenstellung

Messung der Ausgangsspannung an der gegebenen Harvesterschaltung mit verschiedenen Elkos. Es soll untersucht werden, wie gross der Rippel bei unterschiedlichen Kapazitäten wird.

## 2 Messschaltung/Messverfahren



### Bemerkungen

- Der Elko C1 wird mit folgenden Werten bestückt: 10  $\mu\text{F}$ , 47  $\mu\text{F}$ , 100  $\mu\text{F}$ , 470  $\mu\text{F}$ .

### Vorgehen

Zuerst wird der Messaufbau mit dem 470  $\mu\text{F}$  Elko ausgemessen, dem Wert, der in der Machbarkeitsstudie verwendet wird. D. Für die Messung wird das Fahrrad auf ca. 5 km/h beschleunigt. Die genaue Geschwindigkeit kann anhand der Pulse der Messung bestimmt werden, bei den nachfolgenden Messung wird versucht die Geschwindigkeit so gut wie möglich beizubehalten.

## 3 Ergebnis

Der Rippel bei einem 470  $\mu\text{F}$  Elko beträgt ca. 10 mV<sub>pp</sub>.

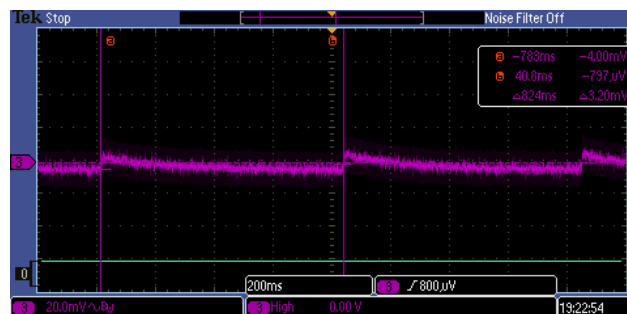
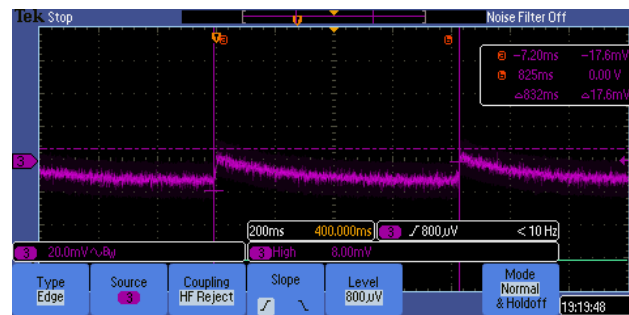
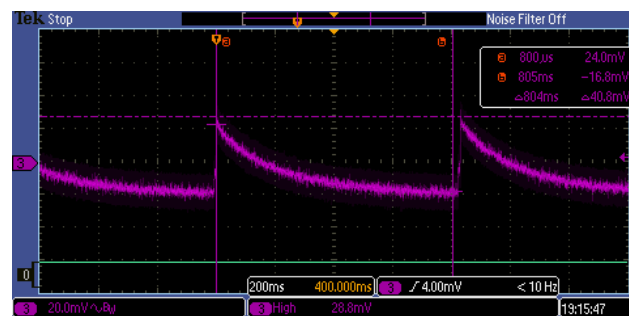


Abbildung 1: Messung mit 470  $\mu\text{F}$  Elko

Der Rippel bei einem 100 $\mu$ F Elko betragt ca. 20mV<sub>pp</sub>.



Der Rippel bei einem 47 $\mu$ F Elko betragt ca. 40mV<sub>pp</sub>.



Der Rippel mit einem 10 $\mu$ F Elko betragt ca. 500mV<sub>pp</sub>.

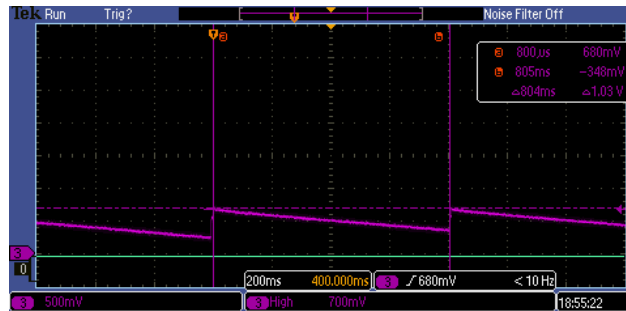


Abbildung 4: Messung mit 10µF Elko

#### 4 Schlusswort

Der Rippel ist bei 10 µF am grössten, ab 47µF ist der Rippel annehmbar. Aufgrund der Empfehlung von Yves von EM Microelectronic, dass ein Elko mit möglichst kleiner Kapazität eingesetzt werden soll, wird der Elko mit 47µF zukünftig eingesetzt.

#### 5 Inventar

- Aufbau aus der Machbarkeitsstudie
- Elko: 10µF 50V
- Elko: 47µF 63V
- Elko: 100µF 63V
- Elko: 470µF 25V
- KO: Tektronix MSO 2024; Serie-Nr. C012115