

Energy harvesting bicycle computer

Katrin Bächli, Manuel König

19. März 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ausgangslage	5
1.2	Aufgabenstellung	5
1.3	Übersicht der Arbeit oder Aufbau der Dokumentation	7
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Energy Harvesting mit Bewegungsinduktion	9
2.2	Energy Management für die gewonnene Energie	9
2.2.1	Regelung des optimalen Leistungsbezugs	9
2.3	Low Power Microcontroller von Texas Instruments	11
2.3.1	Fähigkeiten eines Low Power Microcontrollers	11
2.4	Aufsetzen des Low Power Microcontrollers	11
2.5	Bluetooth Low Energy	12
3	Vorgehen	13
3.1	Inbetriebnahme des Modells der Machbarkeitsstudie	13
3.2	Layout Print	16
3.2.1	Bauteiloptimierung	16
3.3	Energie Management	16
3.3.1	Energiekalkulation	16
3.4	Low Power Einstellungen Sensortag	18
3.4.1	VO: SimpleBroadcast	18
3.4.2	V1	19
3.4.3	V2	19
3.5	Applikationsentwicklung	19
3.6	Option 1	19
4	Verzeichnisse	21
4.1	Literatur	21
4.2	Glossar und Abkürzungen	21
4.3	Abbildungsverzeichnis	21

4.4 Tabellenverzeichnis	21
A Ausschreibung Bachelorarbeit	I
B Projektplanung	III
C Referenz Sensortag von Texas Instrument	V
C.1 Blockschema Sensortag	V
D Messprotokoll Energiegewinnung Harvester	VII
E Messprotokoll Energieverbrauch Sensortag	IX
F Messprotokoll Rippelspannung Ausgangskondensator Harvester-schaltung	XI

Kapitel 1

Einleitung

In der heutigen Zeit gibt es viele interessante Gadgets, die unterschiedlichste Daten liefern. Seien das Pulsmesser, Heizungsregler oder das Multimedia-system zu Hause, diese Technologien lassen sich auch für den Fahrradfahrer nutzen. Es gibt bereits sogenannte Fahrradcomputer, welche die Geschwindigkeit messen und über ein separates Display ausgeben, jedoch werden die meisten mit einer Batterie betrieben, deren Laufzeit begrenzt ist. Mit der Möglichkeit des Energy Harvesting wird die Batterie und deren begrenzte Laufzeit gänzlich ersetzt. Bluetooth Low Energy kann Daten mit sehr wenig Energie übertragen, damit können die Daten, wie Geschwindigkeit oder Höhenmeter, an ein Android-Endgerät übermittelt werden.

1.1 Ausgangslage

Stand der Technik: Geschwindigkeitsanzeige für Velofahrer aktuelle Beispiele beschreiben.

Zwei Nachteile: Batteriewechsel und zusätzliches Display. Ein Handy hat jeder. Deshalb diese zur Anzeige benutzen.

Vorarbeiten auf diesem Gebiet: Roman Scheider und Daniel Studer verfassten 2015 eine Projektarbeit am InES, in der sie die Machbarkeit eines Bicycle computer and sensoric powerd with energy nachwiesen Roman Schneider (2015). Die Punkte, die sich zu unser Arbeit unterscheiden benennen.

Nennen, was in dieser Arbeit **neu** erarbeitet wird. ...

1.2 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 abgefahrte 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 Arbeit oder Aufbau der Dokumentation

Graphisch (mit Kasten) darstellen ?

Am Anfang steht die Inbetriebnahme des Vorab-Exemplars. Dann: Energie-Verwendung optimieren. Daraus ergeben sich ... Dann der Print. Dann die Kommunikation ..

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Energy Harvesting mit Bewegungsinduktion

Erwähnen: HarvesterSchaltung ist durch Machbarkeitsstudie vorgegeben. Kurze Einführung die optimierte Schaltung.

2.2 Energy Management für die gewonnene Energie

In der Bachelorarbeit ist bei der Umsetzung des Energiemanagements der Chip EM8500 vorgegeben. Dieser IC ist von EM Microelectronics aus Marin (NE) entwickelt.

Energy Management bezeichnet das Regeln von Energiezuständen, damit ein Optimum an Leistung aus einer Quelle bezogen werden kann.

Zu diesem Chip ist das Evaluation-Board EMEVB8500 (im Text mit EVB abgekürzt) entwickelt, welches das Aufsetzen eines energieoptimierten Systems unterstützt.

2.2.1 Regelung des optimalen Leistungsbezugs

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.

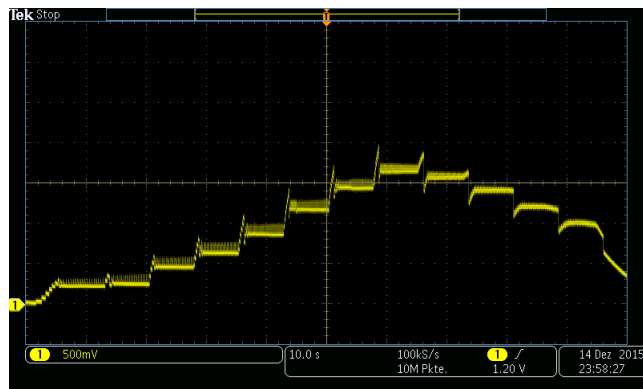


Abbildung 2.1: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

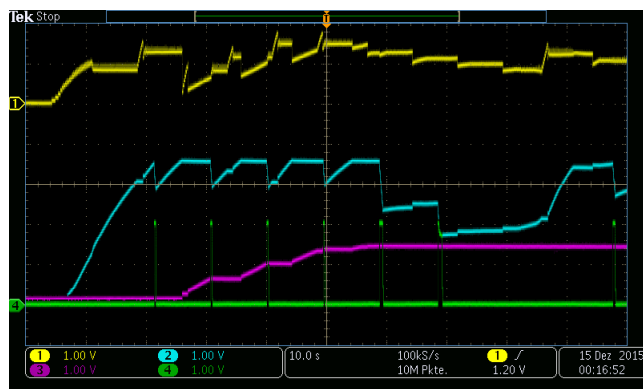


Abbildung 2.2: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

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 2.1 zeigt das Anpassen der Spannungslevel alle s. Die periodischen Kontrollmessungen alle 8 s verursachen kurze Spannungsspitzen. Diese entstehen bei der Kurzschlussmessung, für den akutellen Stromwert.

Entsprechen die Konfigurationen auf dem EVB nicht dem Verhalten der Eingangsquelle, so entstehen keine konstanten Spannungswerte an der Harvestingquelle, was Abbildung 2.2 zeigt.

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

2.3. LOW POWER MICROCONTROLLER VON TEXAS INSTRUMENTS¹¹

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

Energiestände kontrollieren

Sobald genügend Startenergie bereit steht, wacht der EM8500-Chips auf. Neben dem Setzen der Konfigurationen aus dem EPROM kontrolliert der Chip als erstes den aktuellen Speicherzustand der angeschlossenen Speicher.

Die Energiequelle wie auch die angeschlossenen Speicher haben eigene Pins, die ihren Zustand übermittelnEMMicroelectronic (2015), p.11.

Kommunikationsschema ?

2.3 Low Power Microcontroller von Texas Instruments

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 Syn-
chronisation timer, oder systick oder GPiO signal. Wake up

Aktivitäten aufsetzen

2.5 Bluetooth Low Energy

Kapitel 3

Vorgehen

Model der Machbarkeitsstudie ausmessen und Entwicklungspunkte definieren.

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

Kapazität für Harvesting-Schaltung verbessern

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

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

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

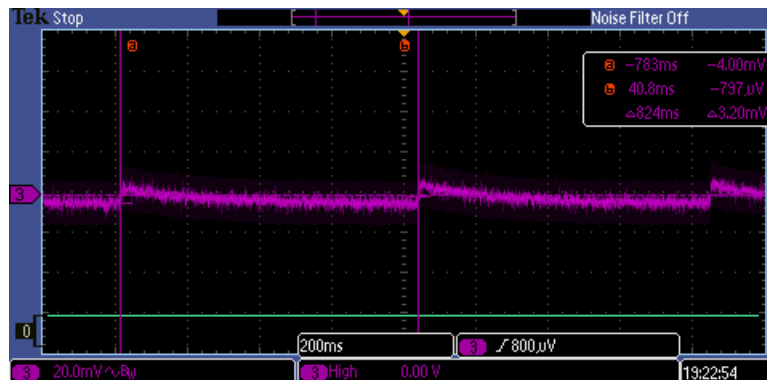


Abbildung 3.1: Rippelspannung bei Glättung mit 470 μF Kondensator

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

Messaufbau

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

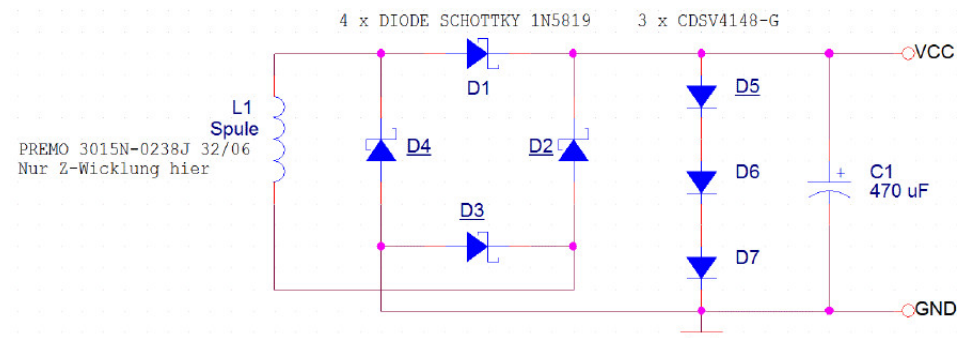


Abbildung 3.2: Messschaltung

Resultat

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

3.1. INBETRIEBNAHME DES MODELLS DER MACHBARKEITSSTUDIE15

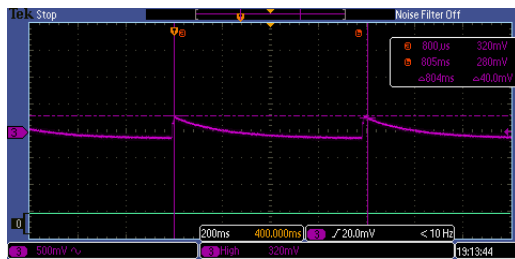


Abbildung 3.3: Rippelspannung mit 10 uF Kondensator

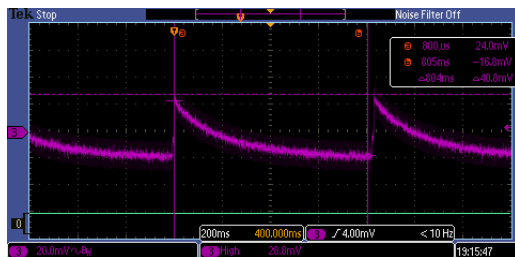


Abbildung 3.4: Rippelspannung mit 47 uFKondensator

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

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

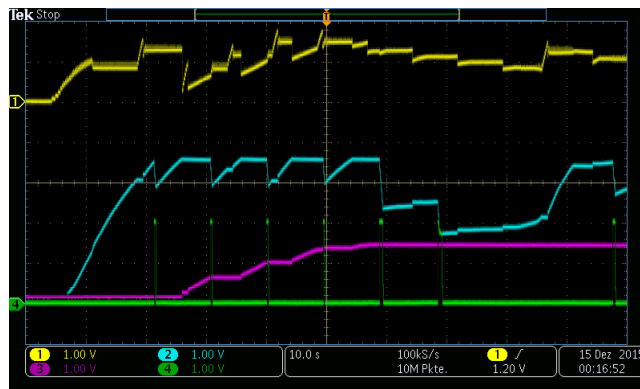


Abbildung 3.5: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

3.2 Layout Print

Die Spule ist gegeben.

3.2.1 Bauteiloptimierung

Der Glättungskondensator wird auf 47 uF geändert. Daneben führten nachfolgende Messung zu nachfolgender Bauteiloptimierungen.

Limiter mit weniger Leckstrom

Der Limiter in der Machbarkeitsstudie besteht aus 3 Dioden. Die verwendete Dioden haben, wie alle Halbleiterelemente, einen Leckstrom.

Leckstrom Dioden als Limiter

Leckstrom bei LDO

Gleichrichter für LowPower

3.3 Energie Management

3.3.1 Energiekalkulation

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 3.3.1 entnommen werden. Diese basiert auf dem Messprotokoll im Anhang D. 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 [μW]
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 [μJ]
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

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

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

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

$$t = 147s$$

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

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

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

$$t = 147s$$

3.4 Low Power Einstellungen Sensortag

Gearbeitet wird mit einem Cortex M3 von TI. Grundsätzlich basieren die Bsp. auf RTOS. Wenige für PowerManagement. Das Powermanagement bezieht sich auf RTOS Kernel.

3.4.1 VO: SimpleBroadcast

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 $I_{max} = 39$ mA

Einstellungen in config.h // GPIO to be used # define IO_A IOID_0
#define IO_B IOID_1 #define IO_C IOID_2 #define IO_D IOID_3 #define
IO_E IOID_4

// 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.

3.4.2 V1

3.4.3 V2

3.5 Applikationsentwicklung

3.6 Option 1

Kapitel 4

Verzeichnisse

4.1 Literatur

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

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 Energiemanagementsystem 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 Energiemanagement 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%

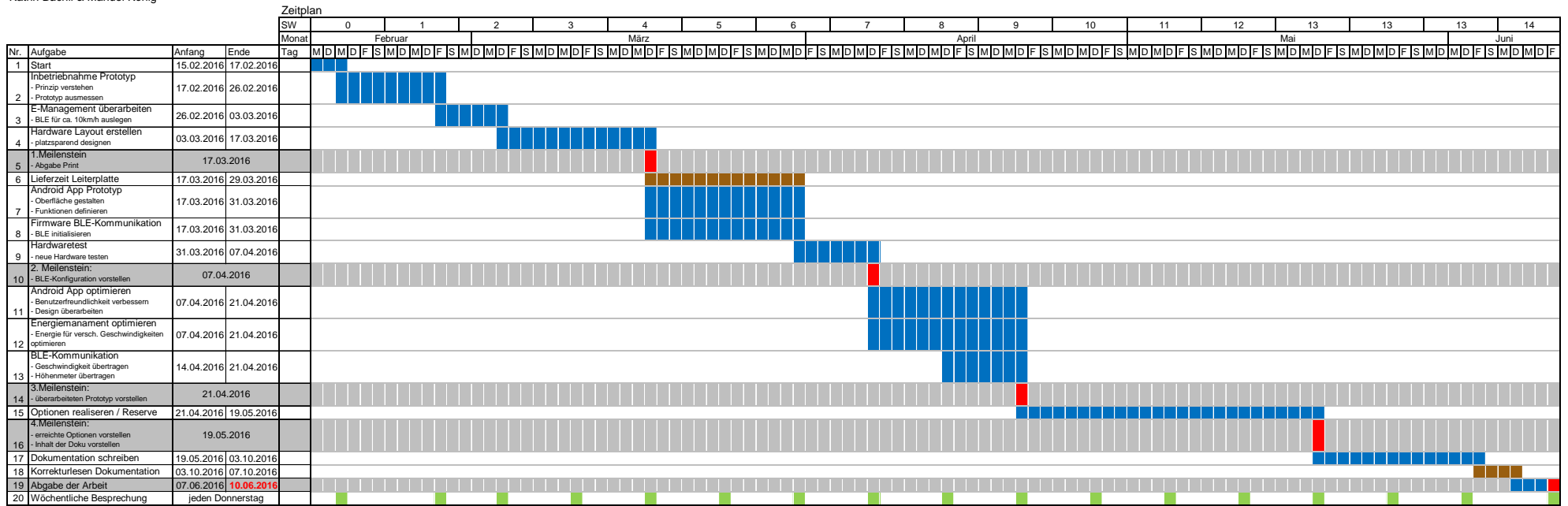
Anhang B

Projektplanung

Projektarbeit HS 2015

Energy harvesting powered bicycle computer

Katrin Bächli & Manuel König



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

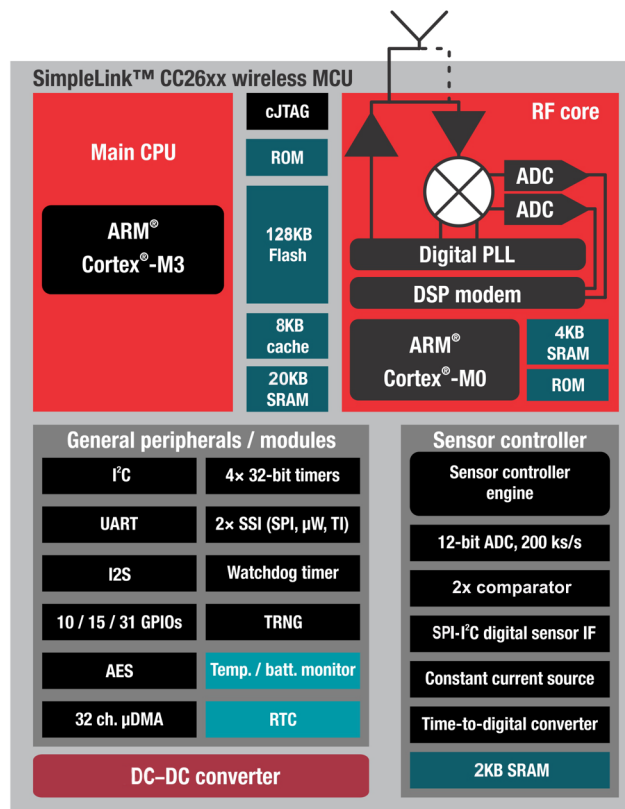


Abbildung C.1: Blockschema Sensortag

Anhang D

Messprotokoll

Energiegewinnung Harvester

Messung 2 Energiemessung Harvester

Autor: Manuel König

Messdatum: 28. Februar 2016

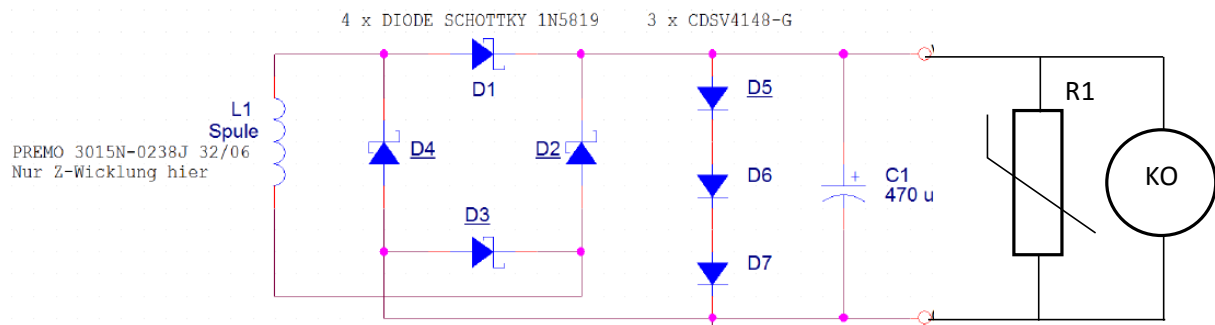
Zusammenfassung

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 Ω, 10 Ω, 100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ
- C1 ist ein Elko mit 47μF

Vorgehen

Um die Energiekennlinie und Widerstandskennlinie zu erfassen wird die Spannung über dem Widerstand R1 mit einem KO gemessen. Anschliessend kann, mit dem Widerstandswert 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

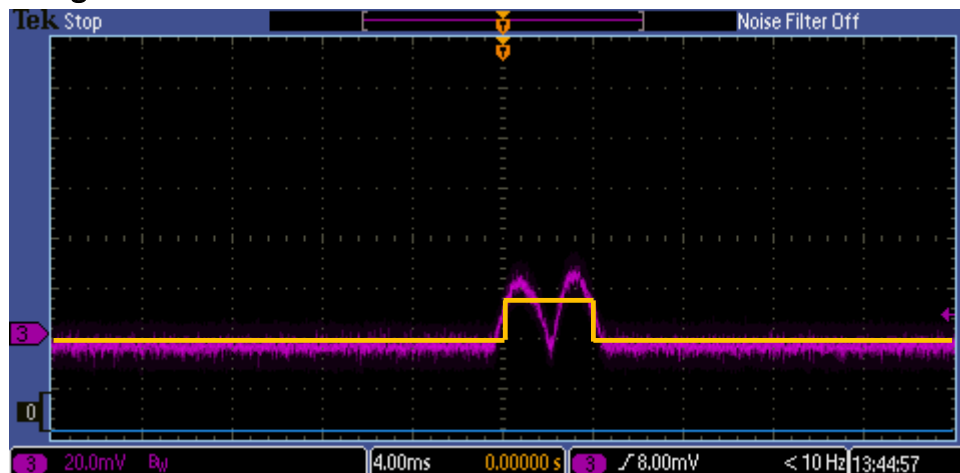


Abbildung 1: pink: Spannung über R1 mit 1 Ω, gelb: Annäherung

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

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

Die Leistung wird mit der quadrierten durchschnittlichen Spannung berechnet.

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

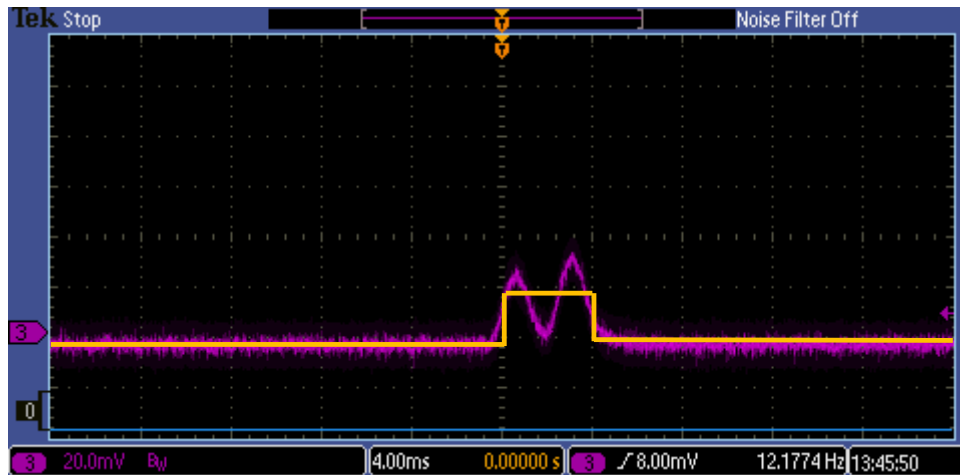


Abbildung 2: pink: Spannung über R1 mit 10 Ω , gelb: Annäherung

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

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

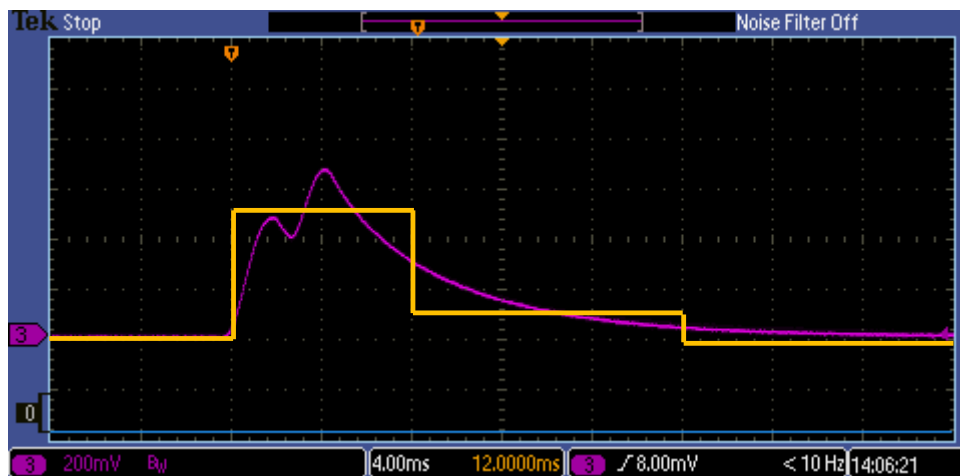


Abbildung 3: pink: Spannung über R1 mit 100 Ω , gelb: Annäherung

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

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

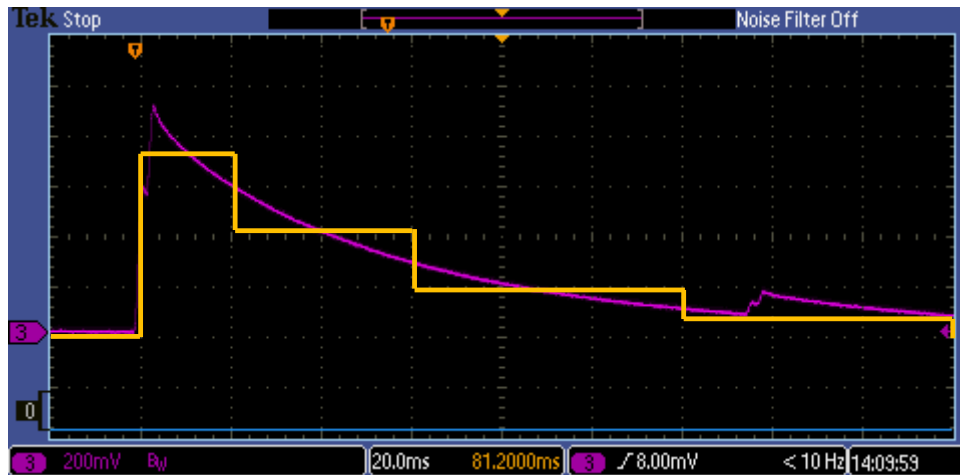


Abbildung 4: pink: Spannung über R1 mit 1 kΩ, gelb: Annäherung

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

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

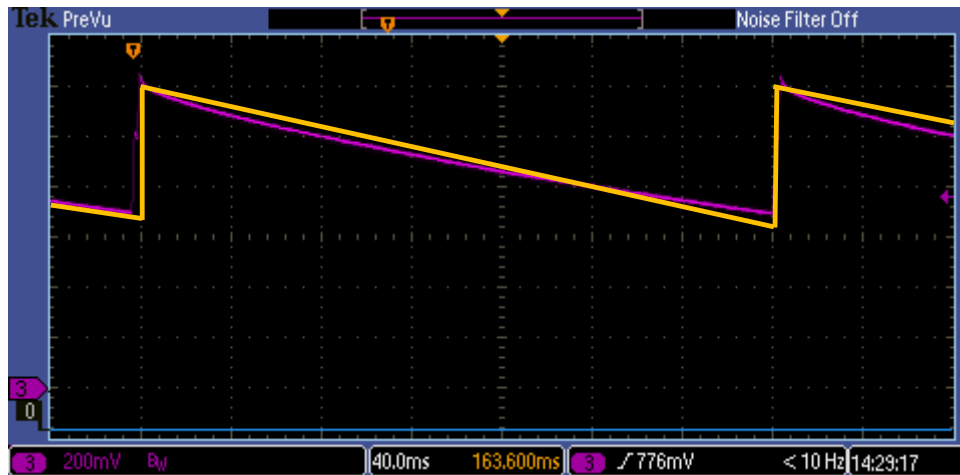


Abbildung 5: pink: Spannung über R1 mit 10 kΩ, gelb: Annäherung

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

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

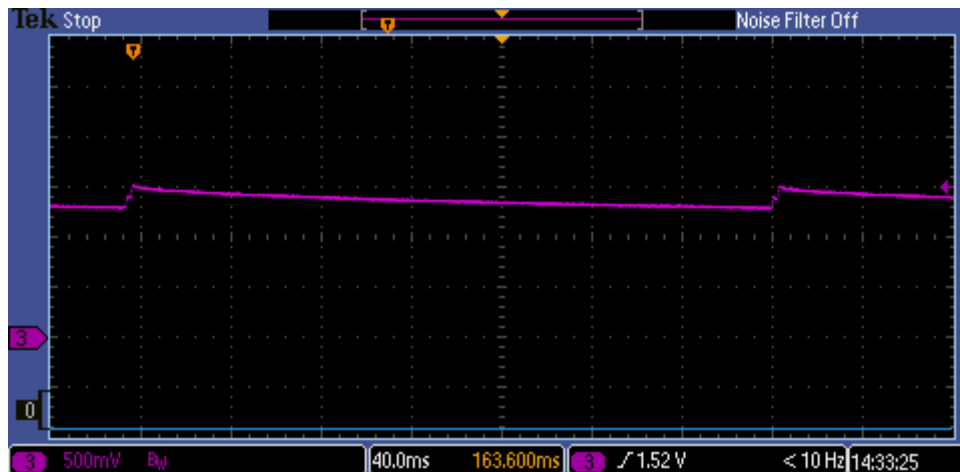


Abbildung 6: Spannung über R1 mit 100 kΩ

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

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

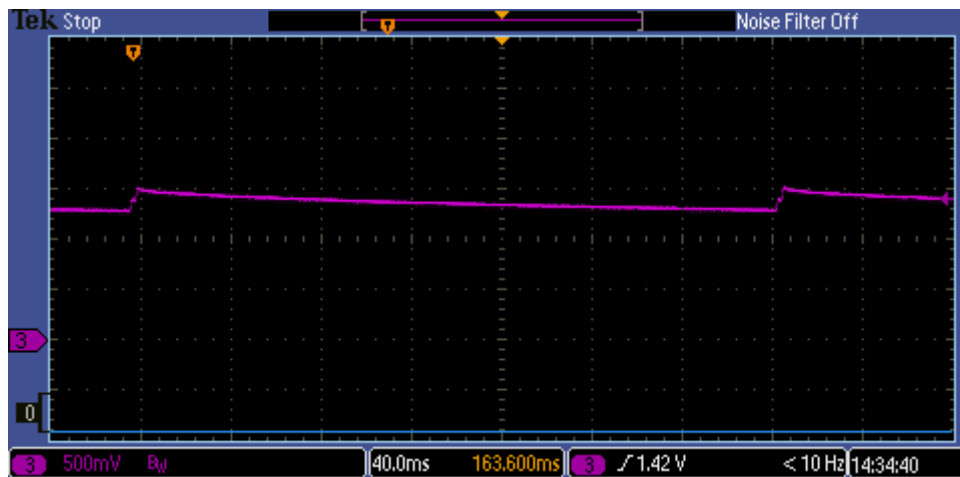


Abbildung 7: Ausgangsspannung Harvester ohne Last

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

Aus den berechneten Werten lässt sich folgende Grafik generieren.

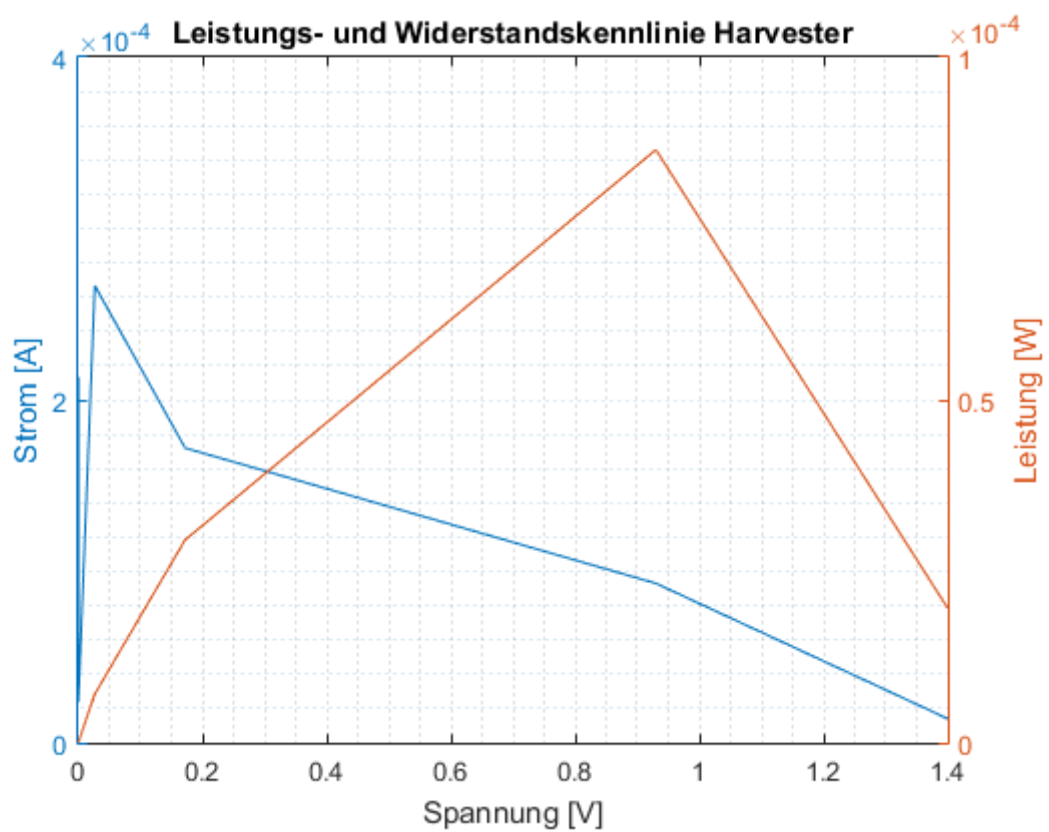


Abbildung 8: grobe Kennlinie

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

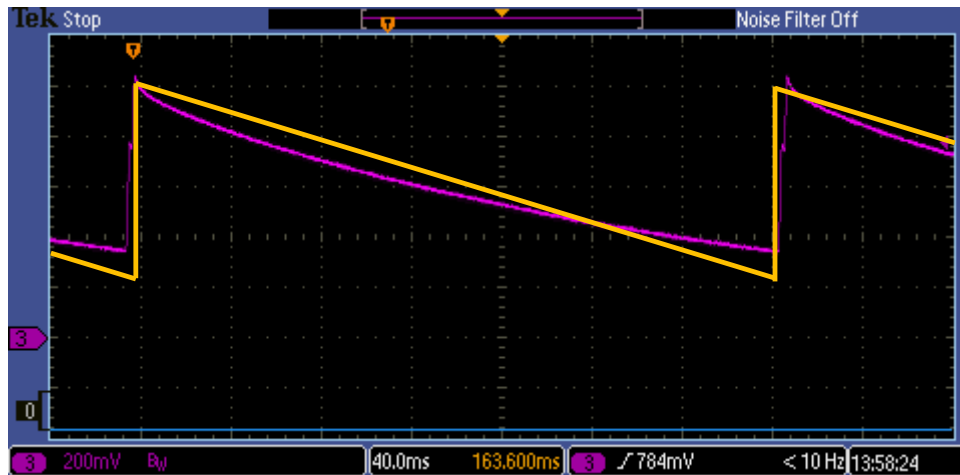


Abbildung 9: pink: Spannung über R1 mit 5 kΩ; gelb: Annäherung

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

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

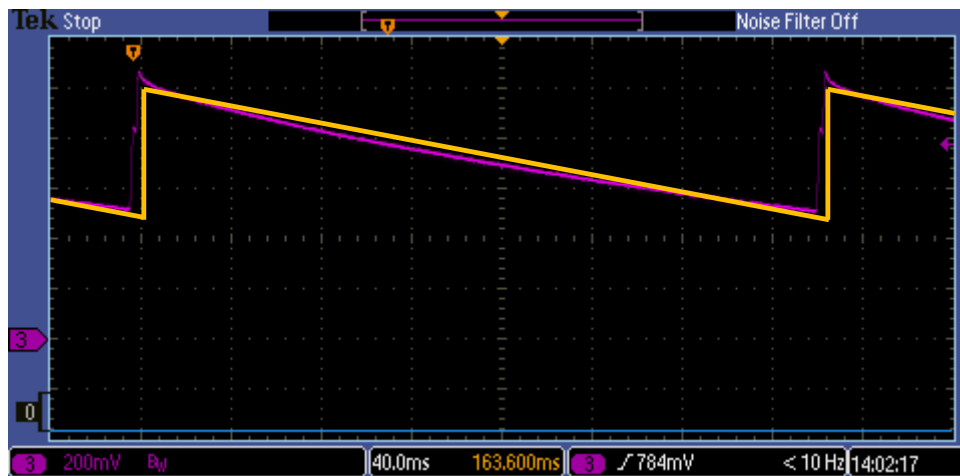


Abbildung 10: pink: Spannung über R1 mit 8 kΩ; gelb: Annäherung

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

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

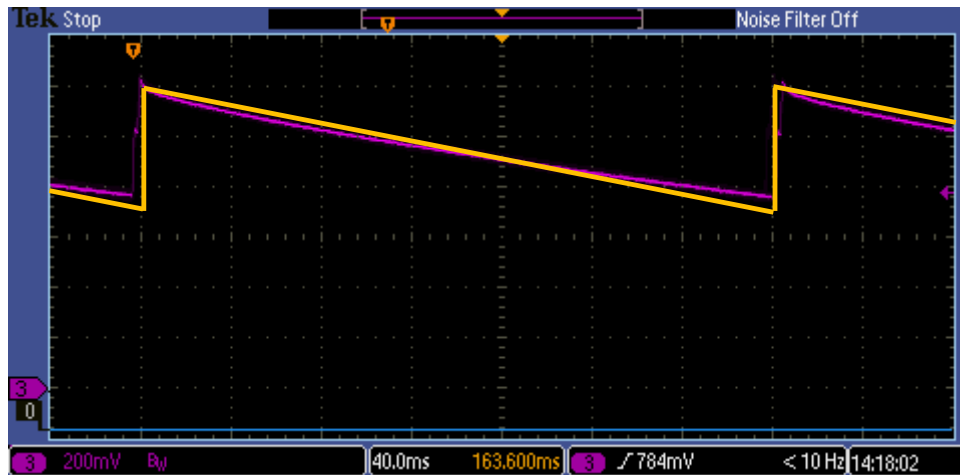


Abbildung 11: pink: Spannung über R1 mit 12 kΩ; gelb: Annäherung

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

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

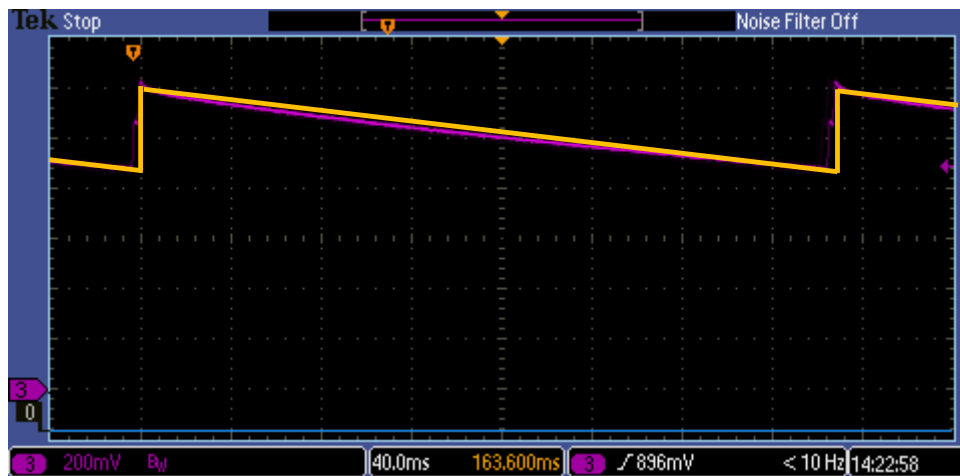


Abbildung 12: pink: Spannung über R1 mit 20 kΩ; gelb: Annäherung

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

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

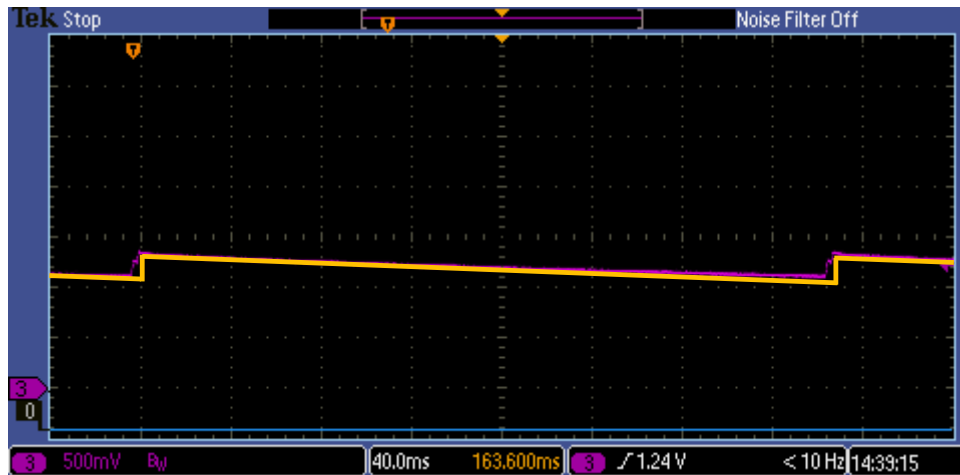


Abbildung 13: pink: Spannung über R1 mit 50 kΩ; gelb: Annäherung

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

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

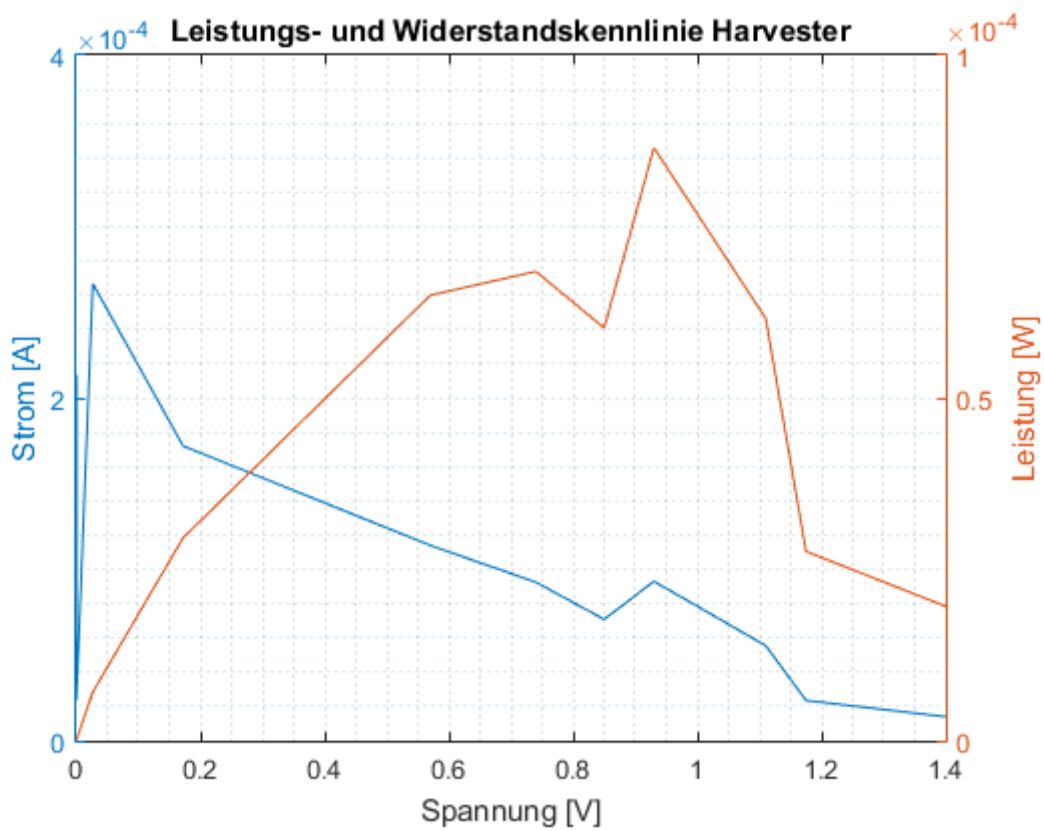


Abbildung 14: Leistungs- und Widerstandskennlinie (verfeinert)

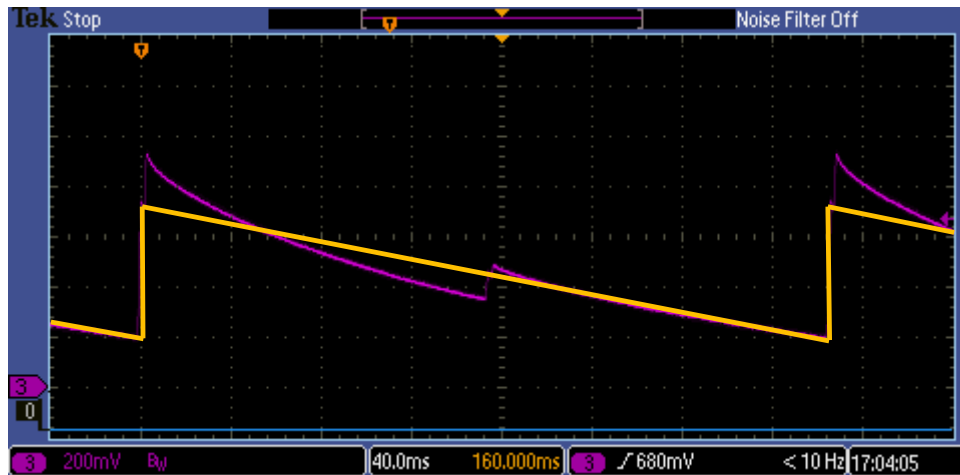


Abbildung 15: pink: Spannung über R1 mit 3kΩ; gelb: Annäherung

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

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

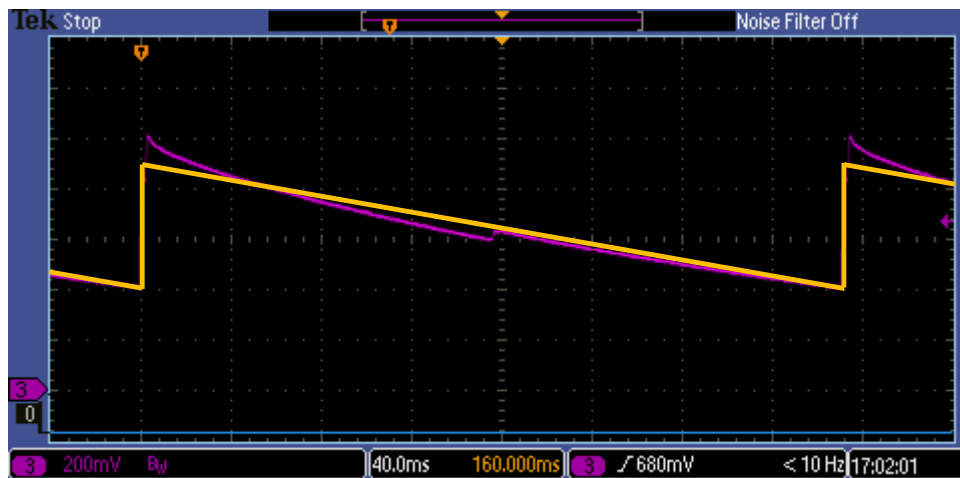


Abbildung 16: pink: Spannung über R1 mit 6 kΩ; gelb: Annäherung

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

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

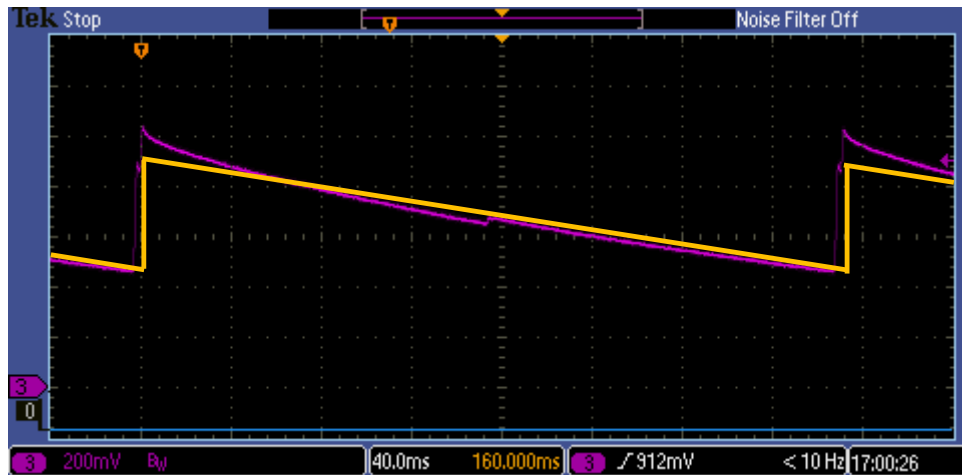


Abbildung 17: pink: Spannung über R1 mit 7 kΩ; gelb: Annäherung

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

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

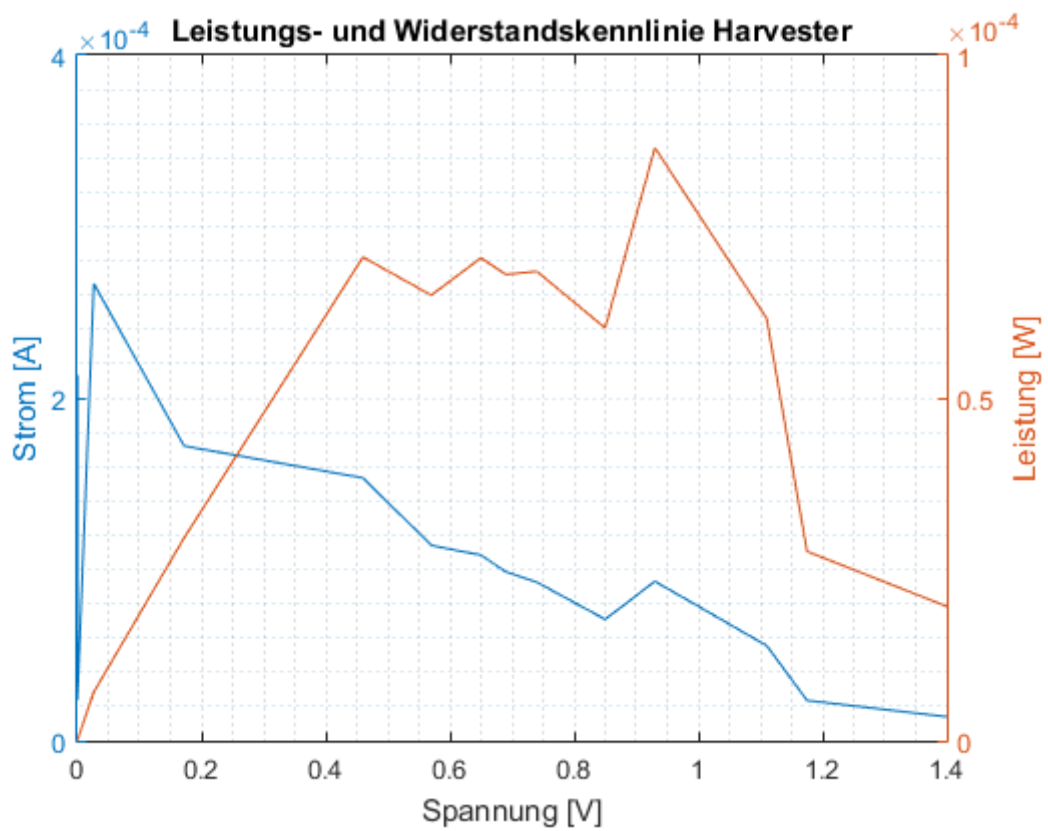


Abbildung 18: Leistungs- und Widerstandskennlinie

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

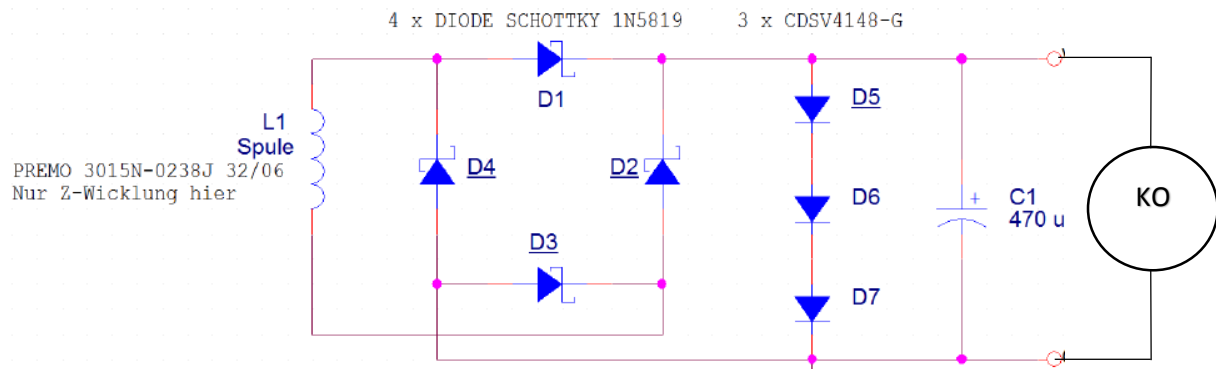
Zusammenfassung

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. 40m V_{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 µF, 47 µF, 100 µF, 470 µF.

Vorgehen

Zuerst wird der Messaufbau mit dem 470 µF 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 470µF Elko beträgt ca. 10mV_{pp}.

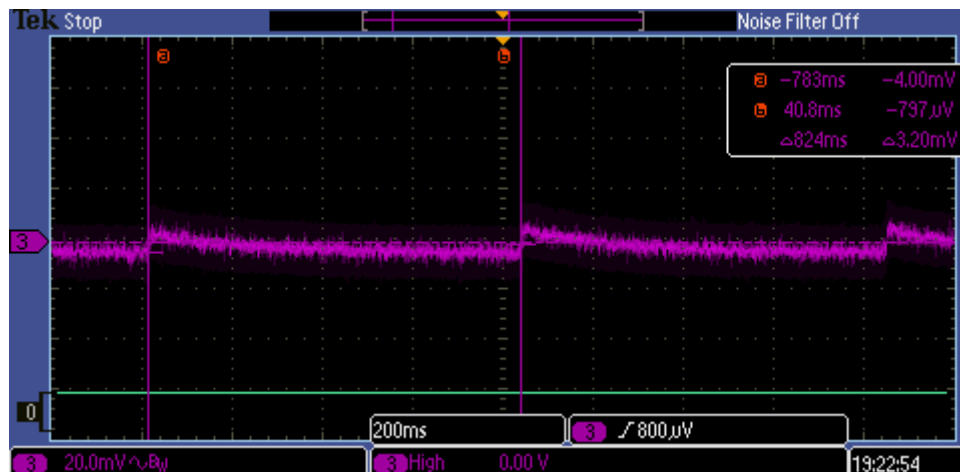


Abbildung 1: Messung mit 470µF Elko

Der Ripple bei einem $100\mu\text{F}$ Elko beträgt ca. 20mV_{pp} .

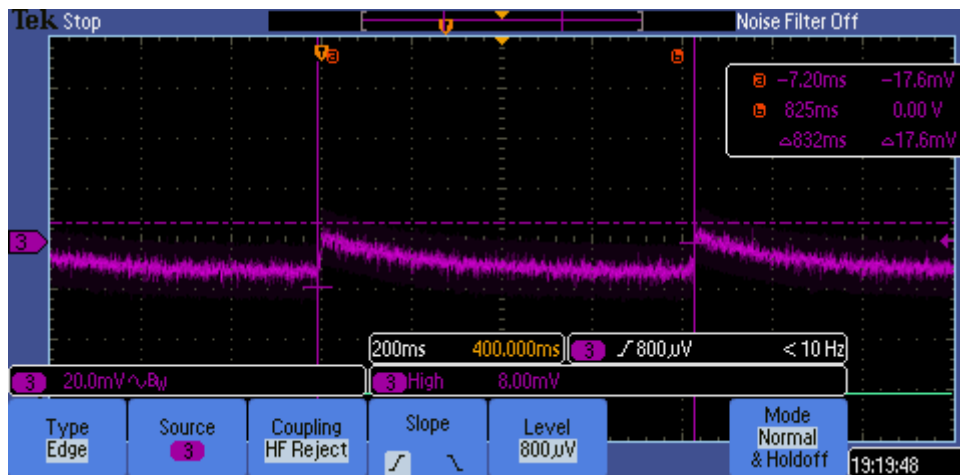


Abbildung 2: Messung mit $100\mu\text{F}$ Elko

Der Ripple bei einem $47\mu\text{F}$ Elko beträgt ca. 40mV_{pp} .

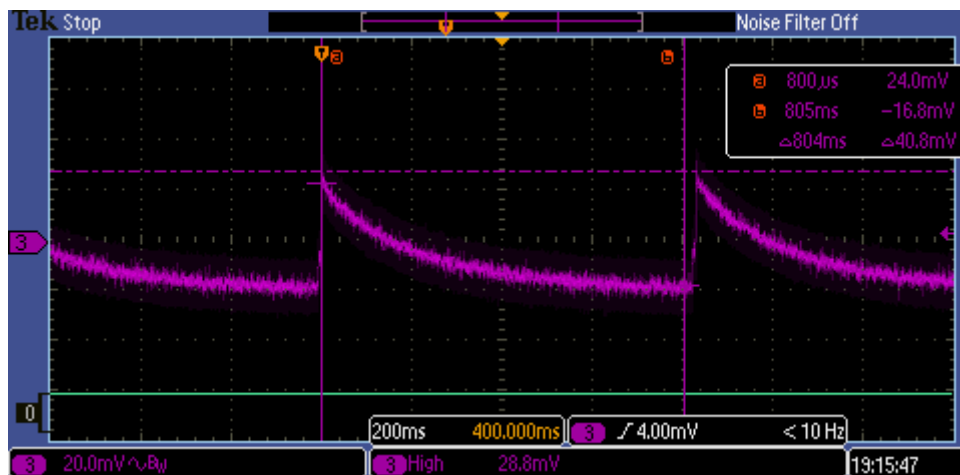


Abbildung 3: Messung mit $47\mu\text{F}$ Elko

Der Ripple mit einem $10\mu\text{F}$ Elko beträgt ca. 500mV_{pp} .

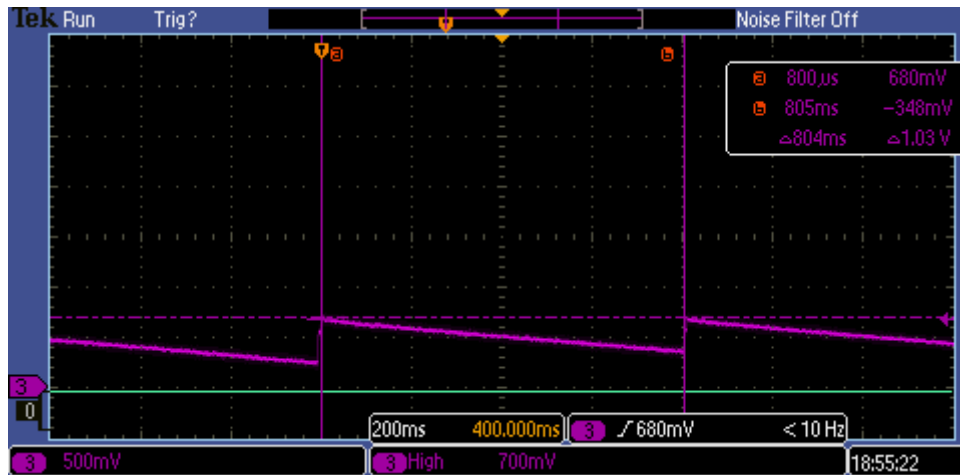


Abbildung 4: Messung mit 10µF Elko

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