

# Energy Harvesting Bicycle Computer



ZÜRCHER HOCHSCHULE  
FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

INSTITUTE OF EMBEDDED SYSTEMS

Autoren	Katrin Bächli, Manuel König
Hauptbetreuer	Prof. Dr. Marcel Meli
Nebenbetreuer	Dario Dündar

Datum	29. 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 . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Energy Harvesting . . . . .	9
2.1.1	Energy Harvesting Methoden . . . . .	9
	a. Energy Harvesting mit einer Solarzelle . . . . .	10
	b. Energy Harvesting mit einem TEG . . . . .	10
2.1.2	Energy Harvesting über Bewegungsindktion . . . . .	10
2.1.3	Unterschiede der Methoden . . . . .	11
	a. Gleichmässige Energie versus gepulster Energie . . . . .	12
	b. Konstanter Maximum Power Point zu dynamischem . . . . .	12
2.2	Energy Management . . . . .	14
2.2.1	Kontrollierte Energiespeicherung . . . . .	14
2.2.2	Regelung des optimalen Leistungsbezugs . . . . .	16
2.2.3	Booster definiert Spannung . . . . .	17
2.2.4	Energiezustand kennen und In- und Ausgänge schalten . . . . .	17
2.3	Power Management . . . . .	18
2.3.1	Einbauen von Schlaufmodi . . . . .	19
	a. Schlafen zwischen Ausführungen . . . . .	19
	b. Schlafen innerhalb einer Aktion . . . . .	20
2.3.2	Interrupt Driven Appliacation . . . . .	20
	a. Aufwachen durch interne Interrupts . . . . .	20
	b. Aufwachen durch externe Events . . . . .	21
2.3.3	State Machine für definierte Abläufe . . . . .	22
2.4	Bluetooth Low Energy . . . . .	22
2.4.1	BLE im Vergleich zu Bluetooth . . . . .	23
2.4.2	Advertising und Connected Mode . . . . .	23
2.4.3	BLE Pakete . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Vorgehen</b>	<b>25</b>
3.1	Inbetriebnahme Machbarkeitsstudie . . . . .	26
3.1.1	Funktionsblöcke . . . . .	26
3.1.2	Verhalten des Vorgängermodells . . . . .	27
3.1.3	Erste Optimierungsliste . . . . .	28

3.1.4	Vertiefung in auffälliges Verhalten des Harvestereingangs . . . .	28
3.2	Hardware entwickeln . . . . .	31
3.2.1	Das Schema (oder der Stromlaufplan) . . . . .	31
3.2.2	Optimierung der Harvesterschaltung . . . . .	32
a.	Optimierung der Spule . . . . .	32
b.	Optimierung des Gleichrichters . . . . .	32
c.	Optimierung des Limiter . . . . .	33
d.	Optimierung des Ausgangskondensators . . . . .	33
3.2.3	Bauteildefinition . . . . .	33
3.2.4	Das Layout . . . . .	33
a.	Positionierung . . . . .	33
b.	Gestaltung der Leiterbahnen . . . . .	34
c.	Ergebnis . . . . .	34
3.3	Inbetriebnahme des Prototypen . . . . .	34
3.3.1	Testen der Harvesterschaltung . . . . .	34
3.3.2	Ausmessen der Energie vor und nach dem Gleichrichter . . . . .	35
3.3.3	Energiemessungen nach dem EMBoard . . . . .	35
3.4	Energy Management . . . . .	35
3.4.1	Energiemessungen Sensortag . . . . .	35
3.4.2	Energiekalkulation . . . . .	35
a.	MPP einstellen . . . . .	36
3.5	Power Management . . . . .	36
3.6	Applikationsentwicklung . . . . .	36
3.6.1	Aufbau der App . . . . .	36
3.6.2	Implementierte Aktionen . . . . .	37
3.6.3	BLE Empfangen . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Resultate</b> . . . . .	<b>39</b>
4.1	Harvesterschaltung . . . . .	39
4.1.1	Leistungskurve Harvester . . . . .	39
4.1.2	Harvesterausgang . . . . .	40
4.1.3	Wirkungsgrad der Schaltung . . . . .	41
4.2	Energiemanagement . . . . .	41
4.3	Powermanagement . . . . .	42
4.4	Applikation . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Verzeichnisse</b> . . . . .	<b>47</b>
6.1	Literatur . . . . .	47
6.2	Glossar und Abkürzungen . . . . .	48
6.3	Abbildungsverzeichnis . . . . .	49
6.4	Tabellenverzeichnis . . . . .	50

## Anhang

### A Ausschreibung Bachelorarbeit

<b>B</b>	<b>Blockdiagramm EM8500</b>	<b>III</b>
<b>C</b>	<b>Funktionsblöcke Sensortag von Texas Instrument</b>	<b>V</b>

# 1

## Einleitung

In einer vernetzten Welt senden Geräte Daten über ihren Zustand oder der, ihrer Umgebung. Diese Technologie wird für ein Fahrradfahrer nutzbar gemacht. Sein Handy soll die aktuelle Geschwindigkeit, die Höhe über dem Meer, die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit während der Fahrt empfangen.

Diese Idee ist nicht neu. Erhältlich sind batteriebetriebene Modelle, die Daten auf einem Display anzeigen. Das Neue an dieser Arbeit ist, dass die Energie aus der Fahrradumdrehung geerntet wird und dass der User sein eigenes Handy für das Anzeigen der Daten nutzen kann.

### 1.1 Ausgangslage

Als Inspiration dienten zwei batteriebetriebene Modelle der Hersteller SIGMA SPORT und POLAR. 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.

Während der Arbeit wurden wir auf den Hersteller Reelight aufmerksam. Reelight gewinnt über Wirbelströme Energie und schafft es bei seinem Produkt City Supreme genügend Energie für eine LED-Lampe zu erzeugen. Da auf der Webseite keine Dokumentation des Funktionsprinzips erhältlich ist, ergaben eigene Untersuchungen, dass sich im Innern der Lampe etwas bewegt. Unserer Meinung nach ist dies ein Magnet, der so gelagert ist, dass er sich drehen kann. Der an der Felge vorbeiziehende Magnet erzeugt ein Wirbelstrom auf der Felge. Dieser wirkt auf den Magneten im Licht und der Magnet im Licht beginnt sich zu drehen. Befindet sich neben dem sich drehen-

den Magneten eine Spule, so wird genügend Spannung für das Betreiben einer LED induziert. Diese Harvesting-Methode beurteilen wir als sehr interessant und merkwürdig für eine zukünftige Arbeit. Bei dieser Bachelorarbeit war die Harvesting-Methode bereits vorgegeben, da sie auf einer vorangehenden Projektarbeit basiert.

Als Grundlage dient der Aufbau aus der Machbarkeitsstudie "Bicycle computer and sensoric powered with harvested energy" (Roman Schneider (2015)). In dieser Projektarbeit wurde der Beweis erbracht, dass durch Bewegungsinduktion genug Energie erzeugt werden kann, um die Geschwindigkeit des Fahrrads per Bluetooth Low Energy zu übermitteln. Der Aufbau funktioniert nach vorangehendem Laden der Kondensatoren zuverlässig bei 20 km/h. Das Ziel dieser Arbeit besteht aus einer verbesserten Energiegewinnung, einem besserem Verbrauchsmanagement und einer ansprechenden Applikation. Konkret soll ein attraktives Produkt ohne Aufladen der Kondensatoren für eine Geschwindigkeit bei 10 km/h entstehen. Diesen Prototypen wird in dieser Arbeit kurz Bicycle Computer genannt.

## 1.2 Definition der Aufgabenstellung

Durch die offizielle Ausschreibung der Bachelorarbeit an der ZHAW ist der Inhalt der Bachelorarbeit vorgegeben (siehe Anhang A.1). Das Ziel der Arbeit ist, aus dem Aufbau einer Machbarkeitsstudie einen Prototypen eines batterielosen Fahrradcomputers zu entwickeln. In den ersten Sitzungen zusammen mit Prof. Dr. Marcel Meli und Dario Dündar wurde die Aufgabenstellung auf folgende Punkte konkretisiert:

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 die 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 den definierten Anforderungen entstand der auf der CD abgelegte Projektplan.

### 1.3 Übersicht der Aufgabenblöcke

Um den Überblick der zu erledigenden Punkte zu behalten, werden die Aufgaben in Arbeitsblöcke (siehe Abbildung 1.3 ) geteilt. Die gepunkteten Blöcke sind optional, die voll umrandeten entsprechen dem Minimum. Die Projektplanung wurde 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.

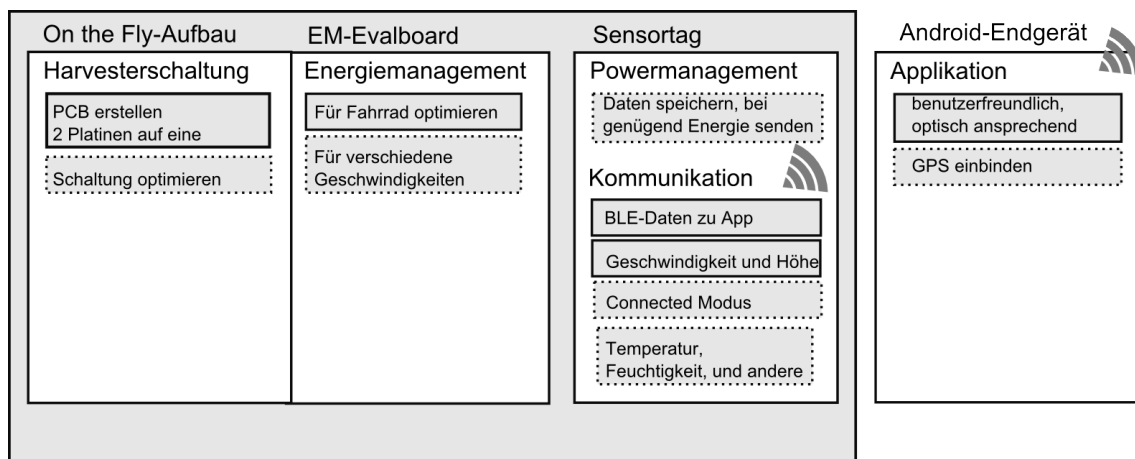


Abbildung 1.1: Arbeitsblöcke





## 2

# Theoretische Grundlagen

Der Bicycle Computer basiert auf Energy Harvesting. Was Energie ernten bedeutet und welche Art von Energy Harvesting in dieser Arbeit angewandt wird, wird im ersten Unterkapitel 2.1 beschrieben. Im folgenden Unterkapitel 2.2 geht es um Ansätze zum Sammeln und Weiterleiten von Energie. Da die in Unterkapitel 2.1 gewonnene Energie im  $\mu\text{W}$ -Bereich liegt, ist zuerst ein Sammeln der Energie notwendig, sodass Leistungen im  $\text{mW}$ -Bereich zur Verfügung stehen. Das nächste Unterkapitel 3.1.1 befasst sich mit dem notwendigen Power Management. Denn die Energie soll nicht sofort verbraucht werden. Power Management regelt, wie schnell und wie viel Energie aufs Mal verbraucht werden soll. 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 2.4 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.“ Schwager (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 EMMicroelectronic (2015) für die Energieoptimierung von Solarzellen oder von Thermogeneratoren spezialisiert ist, werden diese zwei Methoden vorgestellt.

### a. 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. Auf der einen Seite sammelt sich positive, auf der anderen Seite negative Ladung an. Werden diese verbunden, entsteht ein Strom (Solarstrom macht Schule). Diese Harvestingmethode produziert ein Gleichstrom. Die Spannung am Ausgang ist konstant, da es sich um eine Stromquelle handelt. Gröszen- und materialabhängig kann Energie im kW-Bereich gesammelt werden.

### b. Energy Harvesting mit einem TEG

TEG steht für Thermoelectric Generator und bezeichnet eine Konstruktion, die aus einem Temperaturunterschied elektrische Spannung erzeugt. Erzeugt wird die Spannung am Ende zweier metallischer Leiter aus unterschiedlichem Material, die an einem Ende verbunden sind (aus: Wikipedia (2011)). Diese Harvestingmethode produziert eine Gleichspannung. Die produzierte Spannung ist vergleichsweise klein und bewegt sich im Bereich einiger 10  $\mu\text{V}$  pro 1°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).

Flussdichte  
oder Fluss?

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

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  $\mu$ 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.

### a. 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.

### b. 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 Abbildung angefügt. Das TEG hat unabhängig von der gewonnenen Energie und der Temperatur das Leistungsmaximum immer bei 50 %. Die Abbildung 2.1 zeigt, dieses unabhängige Verhalten.

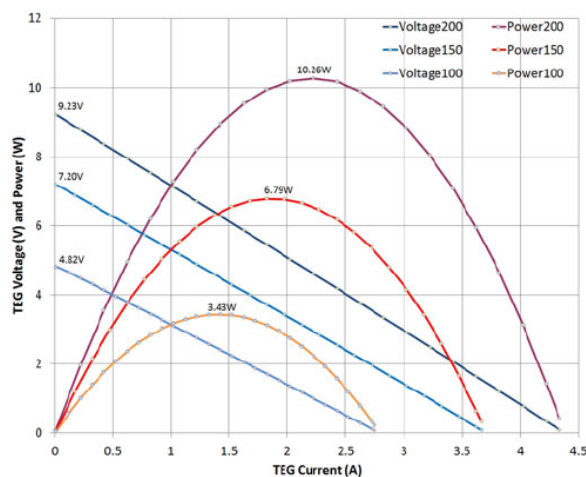


Abbildung 2.1: MPP TEG (Andrea Montecucco (2014))

Abbildung 2.2 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 Bewe-

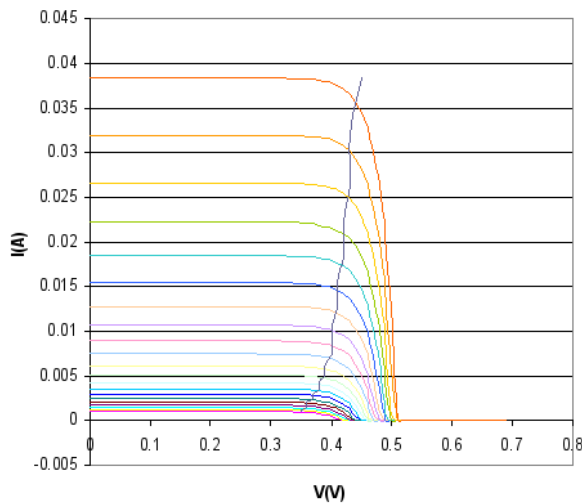


Abbildung 2.2: MPP Solarzelle (Wikipedia (2016))

gungsinduktion auf der Skala. Exemplarisch sind drei MPPT-Ratios einer Spule in der Abbildung 2.3 abgebildet. In dieser Abbildung zeigt sich der Einfluss des Abstands der Spule vom Magnetfeld auf die Stelle der maximalen Leistung. Diese Abbildung 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 (Abbildung 2.4). Über alle Messungen hinweg lässt sich grob über die MPPT-Ratio des Bicycle Computers sagen, dass sie sich zwischen 40 - 80 % bewegt.

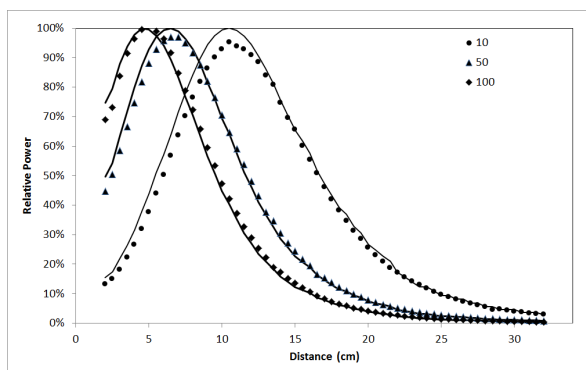


Abbildung 2.3: MPP Spule (Karthik Kadirvel (2016))

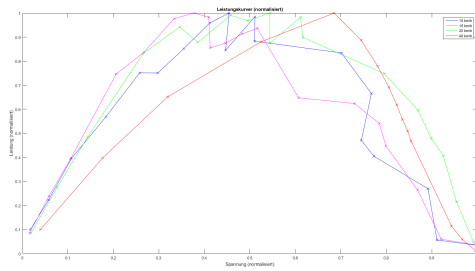


Abbildung 2.4: MPP Harvester (Koenig (2016))

## 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 (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 Primärspeichers ist mit VSTS in der Abbildung 2.5.

Im EM8500 wird dies folgendermassen umgesetzt (Abbildung 2.6): Erreicht der Primärspeichers STS den Schwellwert `v_bat_min_low`, wird VSUP mit der eingestellten Spannung gespiesen. Die Applikation sollte nicht alle Energie verbrauchen, sodass sich der Speicher weiter lädt. VSUP folgt der Speicherspannung. Verbraucht die Applikation viel Energie, fallen VSUP und VSTS parallel. Speiste der Harvester viel Energie, steigt bei beiden die Spannung an. Unterschreitet VSTS/VSUP den Schwellwert von `v_bat_min_low`, so

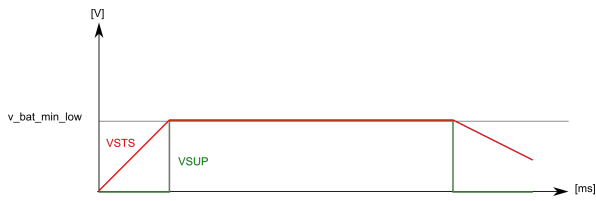


Abbildung 2.5: Grundprinzip Applikationsspeisung

wird die Speisung der Applikation gestoppt.

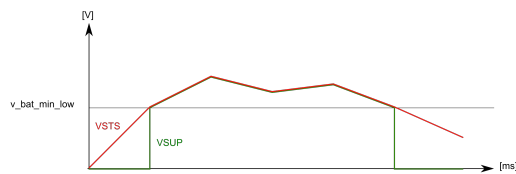


Abbildung 2.6: Applikationsspeisung EM8500

Der Primärspeicher STS ist für die kurzfristige Speisung der Applikation verantwortlich. So bedeutet STS Short Time Storage. Für das langfristige, sichere Ausführen braucht das System ein Long Term Storage (LTS). Seine Aufgabe ist, Reserveenergie aufzubauen. Diese überbrückt die Energieengpässe, wenn der Harvester zu wenig Energie liefert. VLTS wird geladen, wenn der Schwellwert bei  $v\_appl\_max\_low$  ist (siehe Abbildung 2.8).

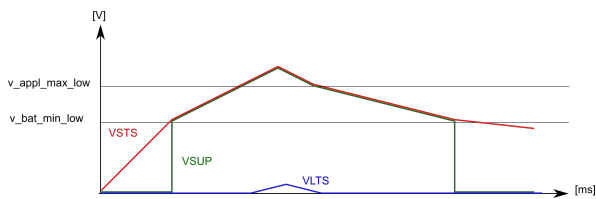


Abbildung 2.7: Sicheres Betreiben durch Long Term Storage

Im Datenblatt des EM8500 EMMicroelectronic (2015) sind weitere Feineinstellungen beschrieben und drei Application Notes helfen bei der Berechnung der Schwellwerte für ein sicheres betreiben. Die Dateien sind auf der CD abgelegt.

Grundsätzlich ist zur Berechnung der Speicher und den Schwellwerten zu sagen, dass der erste Schwellwert ( $v\_bat\_min\_lo$ ), bei dem die Speisung der Applikation beginnt, genug Energie für die Initialisierung der Applikation gesammelt haben muss. Zudem muss das Abschalten von VSUP vermieden werden. Denn ein Neustart braucht aufgrund der Initialisierung viel Energie und ist ein unnötiger Kraftakt in einem Low Power System.

In den Beispielkonfigurationen des Herstellers (EMMicroelectronic (2015) S. 5 - 8 ) sieht man, dass in deren Überlegungen VSUP nicht abgeschaltet wird. Der Hersteller geht davon aus, dass sogar bei dem Freischalten von VSUP die Spannung am STS nicht aufgrund der Last der Applikation fällt, sondern sich weiterhin auflädt.

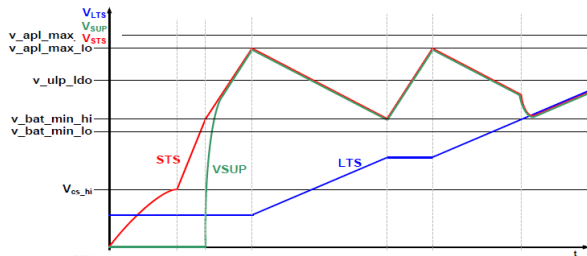


Abbildung 2.8: Konzept Hersteller (EMMicroelectronic (2015))

## 2.2.2 Regelung des optimalen Leistungsbezugs

Wichtigster Punkt in der Energieoptimierung ist, das Maximum aus der produzierten Energie weiterzuverwenden. Aus diesem Grund wird vor Inbetriebnahme eine Leistungskurve des Harvesters erstellt. Wie in Unterkapitel 2.1.3 beschrieben, unterscheidet sich der Maximum Power Point (MPP) unter den Harvestern stark.

EM8500 versucht die Quelle stets in der Nähe dieses Optimums zu betreiben. Dies geschieht über eine Innenwiderstand-Regelung, sodass die Eingangsleistung möglichst dem MPP entspricht. Wie schnell die aktuelle Leistung überprüft wird, ist einstellbar. Der EM8500 besitzt eine Auflösung von 37 mV. Die Abbildung 2.9 zeigt das periodische Messen des (unregulierten) Spannungswert des Harvesters. Da die Kurzschlussmessung für das Messen des Stromwerts eine Spannungsspitzen verursacht, sollte die Leistungsüberprüfung nicht zu oft geschehen. In der Abbildung 2.9 beträgt die Periode 8 s.

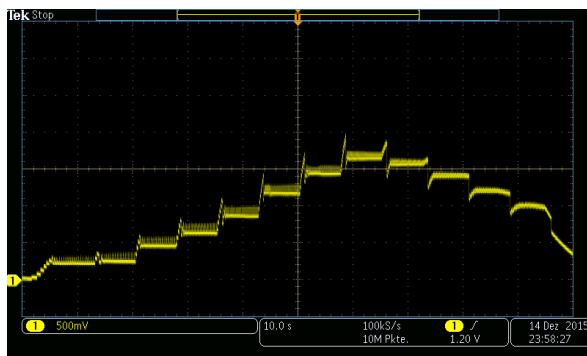


Abbildung 2.9: Leistungsmessung des Harvesters



### 2.2.3 Booster definiert Spannung

Direkt mit dem MPP-Kontroller ist der Booster (siehe Blockdiagramm im Anhang B). Die Aufgabe des Boosters ist es, das interne Spannungsniveau (VREG) zu heben. Der Booster arbeitet ab einer Eingangsspannungen von 0.3 V. Danach regelt er in Schritten von 0.3 V.

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

Da der Primätspeicher STS vom Boosterausgang gespeist wird, entspricht dessen Spannung dem des geregelten Boosterausgangs. Für die Berechnung der Speicher muss der Energieverbrauch der Applikation und die Ausgangsspannung des Boosters bekannt sein:

$$E_{Applikation} = C_{STS} \times \frac{1}{2} V_{Booster} \quad (2.5)$$

( $E_{Applikation}$  bezeichnet die minimale Energie, die die Applikation braucht, also mindestens die Initialisierung der Applikation.) Da aus dem Speicherwert in Farad und dessen Spannung der aktuell gespeicherte Energiezustand berechnet werden kann, lässt sich der Schwellwert für das Freischalten der Ausgangs VSUP zur Speisung der Applikation berechnen:

$$v_{bat\_min\_low} - V_{SUP} = \sqrt{\frac{2 \times E_{Applikation}}{C_{STS}}} \quad (2.6)$$

Der Grundpegel von  $V_{SUP}$  muss abgezogen werden, da sich der Speicher nicht auf 0 entlädt.

Neben VSUP kann der EM8500 drei weitere Ausgänge freischalten: VAUX[0] bis VAUX[2] (siehe Abbildung 2.10). Vor allem aber kann per I2C oder SPI der aktuelle Spannungspegel der Regelung (VREG), die Speicher (VDD\_STS und VDD\_LTS) und des Harvestereingangs (VDD\_HRV) abgefragt werden. So kennt die Applikation jederzeit den aktuellen Energiezustand der gesammelten Energie.

EM8500 stellt zwei digitale Überwachungssignale zur Verfügung:

Der Ausgang HRV\_LOW ist auf logisch '0', wenn die Eingangsspannung vom Harvester grösser als 0.3 V ist. Fällt diese darunter, geht HRV\_LOW auf logisch '1'. Der Ausgang BAT\_LOW zeigt die Zeitdauer an, in der nur STS die Applikation speist:

- BAT\_LOW = '0'

Nicht genügend Energie zur Speisung der Applikation. VSUP ist ausgeschalten.

- BAT\_LOW = '1'  
Genügend Energie zur Speisung der Applikation.  
VSUP ist eingeschalten.
- BAT\_LOW = '0'  
Genügend Energie zur Speisung von LTS.  
VSUP ist eingeschalten.  
Der Zustand entspricht nicht mehr BAT\_LOW.

Mit den zwei digitalen Signalen kann der Energiezustand grob abgebildet werden.

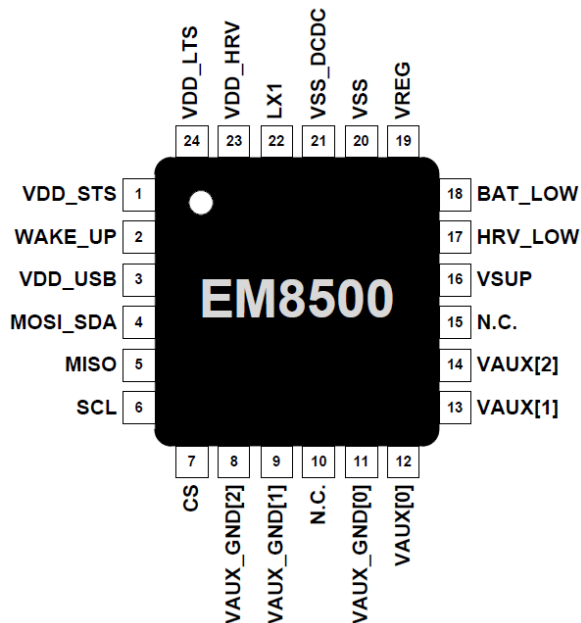


Abbildung 2.10: In- und Outputs EM8500 (EMMicroelectronic (2015), p.11)

## 2.3 Power Management

Die Aufgabe des EM8500-Chip ist es, Energie zu sammeln und kontrolliert frei zu geben. Die Aufgabe des nachfolgenden Mikrokontrollers ist es, die freigegebenen Energieportionen optimal zu verwenden. Das bedeutet, möglichst wenig Energie bei der Datenverarbeitung zu benötigen. Dies wird durch Abstellen aller unnötigen Mikrokontrollerelemente erreicht und einem zusätzlichen Schlafen während allen Warteprozessen.

In diesem Kapitel werden drei Konzepte zum Umsetzen eines Low Power Systems vorgestellt. Das Hauptthema ist das Schlafen zwischen allen Prozessen. Dies wird im ersten Unterkapitel beschrieben. Das Schlafen bedingt ein Aufwecken aufgrund von Ereignissen. Dadurch ergibt sich eine Interrupt Driven Applikation. Diese wird im zweiten Un-

terkapitel erklärt. Als letztes dient ein Design Aspekt: Durch das Einbauen einer State Machine über alle laufenden Interrupts, ist es nachfolgenden Entwicklerinnen und Entwicklern einfacher, den Code und die gegenseitigen Beeinflussungen zu verstehen. Dies wird im Unterkapitel beschrieben.

Vor der technischen Beschreibung der Konzepte in den drei Unterkapiteln wird kurz auf die verwendete Hardware eingegangen. In der Bachelorarbeit war als Mikrokontroller das Simple Link Sensortag von Texas Instrument vorgegeben. Der Grund für dieses Board ist, dass das Sensortag drei Anforderungen auf einem Board vereint:

- Ein Cortex M3 dient als Haupt-Mikrokontroller und ist aufgrund seiner hohen, und somit schnellen, Rechenleistung und seiner Low Power-Fähigkeiten für eine Harvester-Anwendung wie der Bicycle Computer geeignet.
- Auf dem Board ist ein zweiter Cortex M0 für die Wireless-Anbindung angeschlossen. Die Schnittstelle zum Low Power Datensenden ist bereits aufgesetzt. Neben Bluetooth Low Energy kann auch Zigbee verwendet werden.
- Auf dem Board sind 10 Sensoren angebunden.

Die Funktionsblöcke des Sensortags befinden sich im Anhang C.

### 2.3.1 Einbauen von Schlafmodi

(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 Bereiche aufgeweckt werden, die ihre Aktionen ausführen und danach geht das System wieder in den Standby Modus.)

Dass Prozessoren nach längerer Zeit ohne externen Input in den Schlafmodus gehen, ist Usus (Allgemeingut, bekannt). Bei einer Low Power Applikation geht der Prozessor jedoch nach kleinsten Ausführungsblöcken direkt wieder schlafen. So gehört zu jedem Aufwecken einer Peripherie, der Parallele Schlafmodus, bis dass die Peripherie gestartet ist. (Dies gilt auch für die Sensoren.) In diesem Unterkapitel werden zwei Umsetzungen des Sleep-Moduses konzeptionell erklärt.

#### a. Schlafen zwischen Ausführungen

Die Abbildung 2.11 zeigt das Grunprinzip. Das Programm besteht aus verschiedenen Aktionsblöcken. Diese dauern unterschiedlich lang und verbrauchen unterschiedlich viel Energie. Zwischen den Aktionen ist eine frei wählbare Wartezeit einbaubar ( $\Delta t_0 - t_3$ ). Die graue Markierung in jedem Aktionsblock sind die Initialisierungen vor jeder Aktion.

Während der Schlafenszeit sind alle Peripherien abgeschaltet und im Prozessor (hier als Bsp. Cortex M3) wird nur die Konfigurationen im Flash regelmässig "refreshed". (Zu den unabdingbaren Aktivitäten eines laufenden Microcontrollers gehört das Refreshen (Neuladen) der Register mit den Systemeinstellungen. Diese Refreshing-Peaks sieht man im Standby Modus.) Dies ist in der Abbildung 2.11 an den grünen Spannungsspitzen zu sehen. Ohne "refreshen" des Speichers, gehen die Konfigurationen verloren und vor jeder Aktion muss das System neu komplett initialisiert werden.

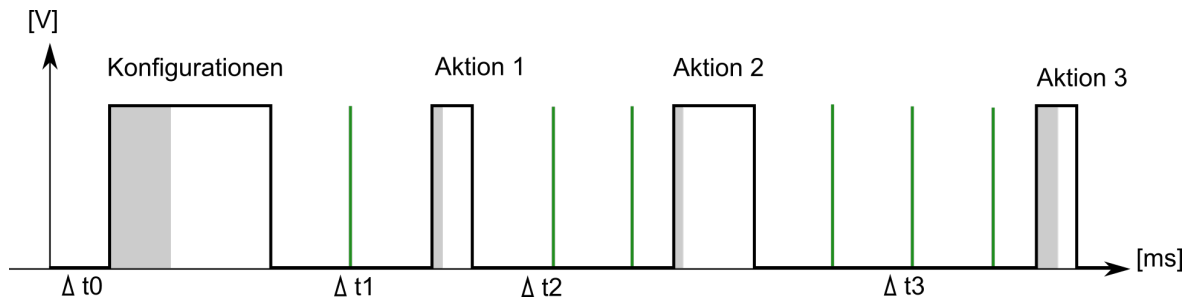


Abbildung 2.11: Schlafen zwischen Ausführungen

### b. Schlafen innerhalb einer Aktion

Bei einer Applikation im  $\mu$  - oder mW-Bereich wird bei jedem Warteprozess, wie z.B. die Zeit, die der Sensor zum Aufwachen braucht, in den Sleep-Mode gegangen. Innerhalb des Codes dominieren die Aufwach- und Abstell-Einstellungen. Für jede Aktion, wird nur die PowerDomain dieser Funktionalität eingeschaltet und nach ausführen der Aktion wieder abgeschaltet. Die Abbildung 2.12 zeigt dieses Prinzip mit UML dargestellt.

## 2.3.2 Interrupt Driven Appliacation

Zum Schlafen gehört auch ein Aufwachen. Dies ist ein nicht-triviales Problem, lässt sich mit Interrupts lösen. In diesem Unterkapitel werden zwei Konzepte einer Interrupt Driven Applikation erklärt: fixes Aufwachen aufgrund interner Interrupts und asynchrones Aufwachen aufgrund externer Events.

### a. Aufwachen durch interne Interrupts

Ein System kann intern seine Signale auswerten und aufgrund kombinatorischen Logik, dem Erreichen eines Schwellwertes oder dem Ablauf eines Timers aufwachen. Solche Wakeups sind fix und unabhängig von äusseren Einflüssen. Ein System mit internen

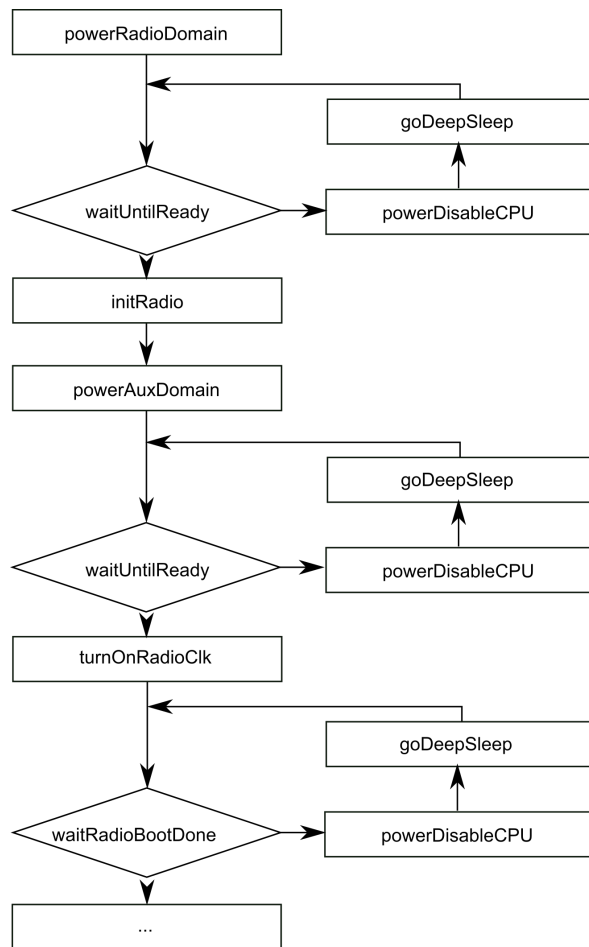


Abbildung 2.12: Schlafen innerhalb des Codes

Interrupts ist determinierbar. Das heisst, der Empfang interner Interrupts ist präzise (nur 1 malig und kein Pellen) und kann über Prioritäten gut geregelt werden.

## b. Aufwachen durch externe Events

Der Prozessor, oder Teile davon, können auch aufgrund äusserer Impulse aufwachen. Die Verarbeitung des Interrupts ist dieselbe, nur weiss man nicht, wann das Ereignis auftritt. Die Gefahr, dass zwei Interrupts zur selben Zeit eintreffen oder eine Quelle mehrere Interrupts sendet, ist gegeben. Das Löschen der eingegangenen Interrupts und das Prüfen, ob ein Event nicht zu oft verarbeitet wird, muss bewerkstelligt werden. Löst eine Quelle Interrupts über längere Zeit aus, kann dies das System absorbieren und schlimmstenfalls den Systemablauf aus dem Rhythmus bringen.

### 2.3.3 State Machine für definierte Abläufe

Low Power Applikationen enthalten viele Interrupts. Jede grössere Tätigkeit braucht das Aktivieren mehrerer Schnittstellen, die alle aufgeweckt und aufeinander abgestimmt werden. Da die Codeausführung nicht sequentiell verläuft, sondern Ausführungen in den Interrupt-Handlern stehen, ist ein Überblick der Abhängigkeiten nicht einfach ersichtlich. Um unerwünschte Effekte zu vermeiden, kann eine State Machine implementiert werden. Diese stellt sicher, dass nur aufgrund von gewissen Signalen, ein Aktion ausgeführt wird. Alle anderen Effekte werden ignoriert. Die Abbildung 2.13 zeigt die definierte Abhängigkeiten durch eine State Machine.

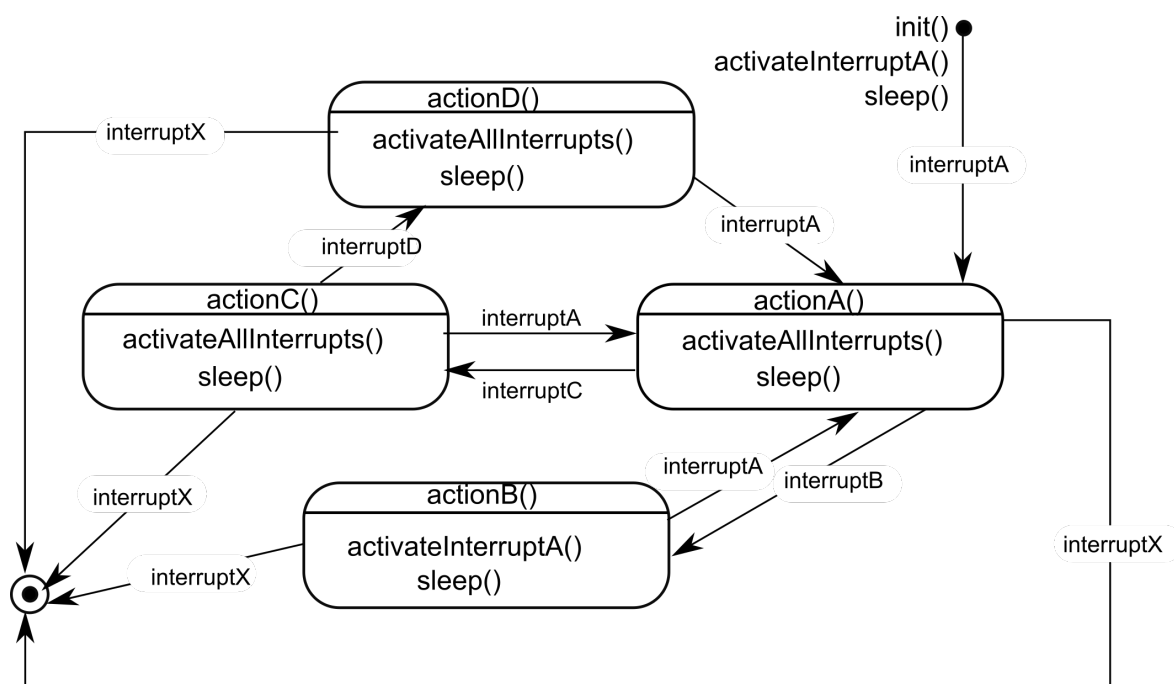


Abbildung 2.13: Struktur durch State Machine

## 2.4 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) bezeichnet eine Funktechnik, welche es ermöglicht, Daten zwischen Geräten auszutauschen. Der Vorteil von Bluetooth Low Energy ist der niedrigere Energieverbrauch im Gegensatz zum traditionellen Bluetooth. Das Bluetooth Low Energy Protokoll gehört zum Bluetooth Core Specification Version 4.0, wo auch das Classic Bluetooth Protokoll und das Bluetooth High Speed Protokoll enthalten sind. Die Bluetooth Core Specification Version 4.0 ist besser unter dem Namen Bluetooth Smart bekannt und wurde im Juli 2010 veröffentlicht (Electronics (2015)).

### 2.4.1 BLE im Vergleich zu Bluetooth

Bluetooth Low Energy verwendet das gleiche Frequenzband wie das traditionelle Bluetooth, jedoch sind nur 40 Kanäle à 2 MHz verfügbar, anstatt 79 Kanäle à 1 MHz beim traditionellen Bluetooth. Ausserdem verbraucht BLE, wie der Name bereits indiziert, weniger Energie als andere Übertragungsmedien. So sendet BLE mit maximal 10 mW, was einer Reichweite von ca. 10 Metern entspricht im Gegensatz zu Klasse 1 Bluetooth-Geräten, welche mit 100 mW eine Reichweite von rund 100 Metern erreichen. Ein der BLE-Technik ist, dass die Bauteile für eine BLE-Kommunikation relativ günstig sind und damit die Geräte ebenfalls günstiger hergestellt werden können (bluAir (2015), Abschnitt Bluetooth Range).

### 2.4.2 Advertising und Connected Mode

BLE wird vor allem für batterielose Sensoren verwendet, welche die Energie aus der Umwelt beziehen. Diese Sensoren arbeiten meist als Beacon, was bedeutet, dass sie Daten senden, ohne eine aktive Verbindung mit einem Gerät aufzubauen oder nur eine Verbindung auf Anfrage eingehen, diese jedoch nach kurzer Zeit wieder beenden. Dieser Modus nennt sich Advertising Mode, was vom Englischen advertisement stammt, es soll aussagen, dass der Beacon eine Werbung aussendet und diese nicht auf eine spezielle Person zugeschnitten ist, sondern an die breite Masse gesendet wird.

Eine aktive Verbindung ist bei den meisten Sensoranwendungen auch nicht notwendig, da die Daten einfach gesendet werden können und das empfangende Gerät entscheidet was mit den vorliegenden Daten gemacht wird, wenn das Gerät mehr Informationen benötigt kann eine Verbindung aufgebaut werden. Trotzdem kann mit BLE eine aktive Verbindung eingerichtet werden, jedoch verbraucht eine aktive Verbindung mehr Energie, da Daten gesendet und empfangen werden müssen. Das bedeutet der Sensor kann nicht in einen Standby- Modus gehen, in welchem weniger Energie verbraucht wird, da auf ankommende Daten gewartet wird (Argenox (2015)).

### 2.4.3 BLE Pakete

Der Aufbau eines BLE Pakets ist überschaubar. Als erstes wird ein Preamble, bestehend aus abwechselnden 1 und 0, womit der Empfänger sich auf die richtige Frequenz synchronisieren kann. Diese Preamble wird auf dafür verwendet die Verstärkung des Empfängers einzustellen, dies kann sehr wichtig sein bei Signale, welche von einer grösseren Distanz versendet werden, da eine falsche Verstärkung des Signals in Fehlern resultieren kann.

Anschliessend wird die Access Address verschickt, anhand dieser Adresse kann der Empfänger die Nachricht einem ganz bestimmten Sender zuordnen und somit entschei-

den, ob die Daten vom richtigen Sender kommen oder ob es eventuell nur Störungen waren, welche zufälligerweise eine Preamble dargestellt haben.

Der Header enthält Informationen zum Aufbau der Daten, welche folgen. Es gibt sieben verschiedene Arten von Aufbauten der Daten.

- ADV\_IND – general advertising indication
- ADV\_DIRECT\_IND – direct connection indication
- ADV\_NONCONN\_IND – nonconnectable indication
- ADV\_SCAN\_IND – scannable indication
- SCAN\_REQ – active scanning request
- SCAN\_RSP – active scanning response
- CONNECT\_REQ – connection request

Nachfolgen wird die Length eingereiht, welche Informationen über die Anzahl Bytes der Daten enthält. Es wird unterschieden zwischen der Länge eines Advertising Pakets und eines Data Pakets. Die Länge eines Advertising Pakets wird mit sechs Bits dargestellt, welche die Werte von 6 – 37 einnehmen können, wo ein Data Paket nur mit fünf Bits arbeitet, welche die Werte 0 – 31 einnehmen können.

Anschliessend werden die Nutzdaten übertragen, welche je nach gewählter Art, einen anderen Aufbau aufweisen. Es können zwischen 0 bis 296 Bits, also 0 bis 7 Bytes übertragen werden.

Abgeschlossen wird ein Paket mit dem CRC, welcher die Checksumme der Nachricht enthält. Die Checksumme wird über den Header, Length und die Nutzdaten gebildet (Heydon (2012), Kapitel 7.2).

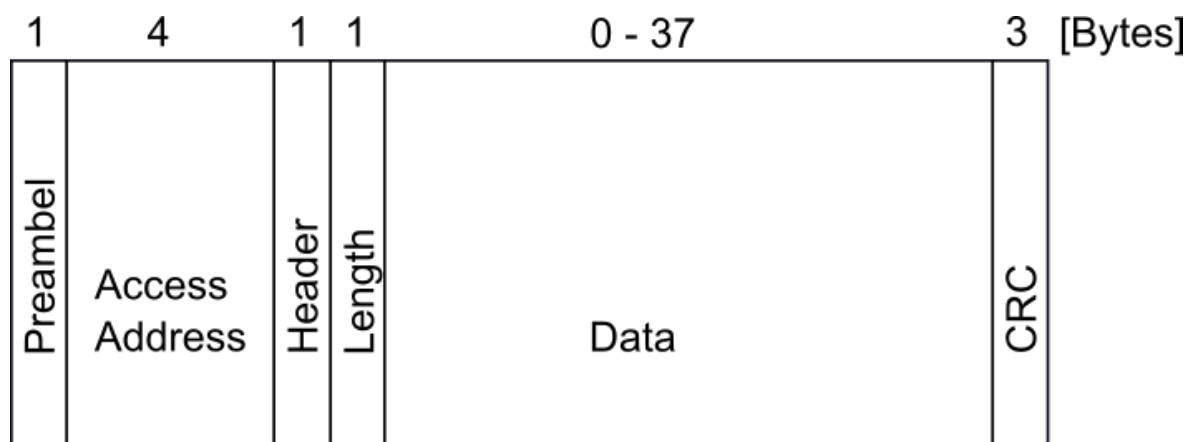


Abbildung 2.14: BLE Paketstruktur



# 3

## Vorgehen

Das Ziel ist die Entwicklung eines Prototypen aus dem bestehenden Modell der Projektarbeit von Roman Schneider (2015). Die Vorgehensschritte sind in der untenstehenden Auflistung abgebildet. Sie bilden die Struktur dieses Kapitels. Die Definition der konkreten Schritte geschah in Absprache mit Prof. Dr. M. Meli und dem Research Assistenten Dario Dünar vom Institut of Embedded Systems (InES). Auf der CD finden sich die Sitzungsprotokolle über den aktuellen Entwicklungsstand, die offenen Fragen und die Entscheidungen.

### Liste der Arbeitsschritte

1. Inbetriebnahme Machbarkeitsstudie
2. Hardware entwickeln
3. Inbetriebnahme Prototyp
4. Energy und Power Management
5. Entwickeln einer BLE-Applikation

Die sprachliche Unterscheidung von Energy - und Power Management entspricht der Unterscheidung zweier „Management-Teilen“ im Prototypen: Das Endprodukt regelt an zwei Stellen auf unterschiedliche Art die zur Verfügung stehende Energie. Der Begriff Energy Management wird in dieser Arbeit für das Sammeln und Weiterleiten von Energie über eine Hardwareimplementation gebraucht. Der Begriff Power Management wird für die Softwareimplementation gebraucht. Diese regelt, dass die zur Verfügung gestellte Energie nicht sofort verbraucht wird. Die sprachliche Trennung ist künstlich, denn in der Umsetzung spielen Hard- und Softwareregulierung Hand in Hand. Die sprachliche Unterscheidung dient der Lesbarkeit und bezeichnet keinen physikalischen Unterschied.

### 3.1 Inbetriebnahme Machbarkeitsstudie

Ziel der Inbetriebnahme des Aufbaus der vorangehenden Arbeit Roman Schneider (2015) ist es, zu definieren, welche Funktionalitäten verbessert werden sollen. Zur Orientierung werden im ersten Unterkapitel 3.1.1 die Funktionsblöcke und deren Aufgaben festgehalten. Danach wird das Verhalten der Vorgängermodells in Unterkapitel 3.1.2 ausgemessen. Aus der Analyse entsteht die in Unterkapitel 3.1.3 aufgelistete erste Optimierungsliste. Als letztes folgt eine Vertiefung in das auffällige Verhalten des Eingangssignals in Unterkapitel 3.1.4. Dieser Exkurs hat Ursache in der Begegnung mit Ives von EM MicroElectronic. Er entwickelte den in dieser Arbeit verwendete EM8500-Chip mit und wies uns auf den auffälligen Signalverlauf des Harvester-Eingangssignals (siehe Abbildung 3.2) hin. Dieses Signal wurde deshalb bei der Inbetriebnahme eigens getestet, was im letzten Unterkapitel dokumentiert ist.

#### 3.1.1 Funktionsblöcke

Der Bicycle Computer besteht aus vier Funktionsblöcken, die in der Abbildung 3.1 dargestellt sind. Der erste Funktionsblock ist der Harvester (siehe 1) in der Abbildung 3.1). Die Aufgaben des Harvesters ist es Energie zu Ernten und dem nächsten Funktionsblock ( Nummer 2) in der Abbildung 3.1 zur Verfügung zu stellen. Der zweite Funktionsblock wird als Energy Management-Teil in der Arbeit bezeichnet. Die Aufgabe des zweiten Blocks ist es, Energie zu Sammeln und kontrolliert an die Verbrauchsstelle freizuschalten. Detaillierte Informationen finden sich in den Theoretischen Grundlagen im Unterkapitel 2.2. Der dritte Funktionsblock ist der Ort, an dem die Energie verbraucht wird. In dieser Arbeit dient die Energie dem Betreiben von Sensoren und dem versenden derer Daten. Dies wird auf dem Sensortag (siehe Anhang C) umgesetzt. Der Grund dafür wird in der Einleitung des Kapitels dargelegt. Der letzte Funktionsblock bezeichnet das Ziel, das Erhalten von Sensordaten in einer Applikation.

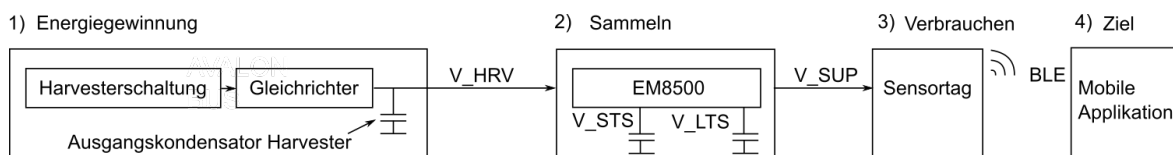


Abbildung 3.1: Funktionsblöcke Bicycle Computer

Den Funktionsblöcke sind Spannungsbezeichnungen sowie Kondensatoren beigelegt. Dies, weil bei der Beschreibung des Verhaltens des Vorgängermodells, diese Spannungslevel für die Funktionsbeurteilung wichtig werden. Die nachfolgende Legende beschreibt die Beschriftung näher.

Legende Abbildung 3.1

Bezeichnung	Beschreibung
V_HRV	Ausgangsspannung Harvesterquelle, Eingangsspannung Energy Management
V_STS	Spannung am STS-Kondensator (Primärspeicher)
V_LTS	Spannung am LTS-Kondensator (Sekundärspeicher)
V_SUP	Ausgangsspannung Energy Managment, Eingangsspannung Sensortag
BLE	Senden der Daten per Bluetooth Low Energy (siehe 2.4)

3.1.2 Verhalten des Vorgängermodells

Die Abbildung 3.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Energiestände unterschiedlicher Komponenten des Vorgängermodells. Kanal 1 (gelb) stellt die geerntete Energie des Harvesters dar. Diese Energie wird

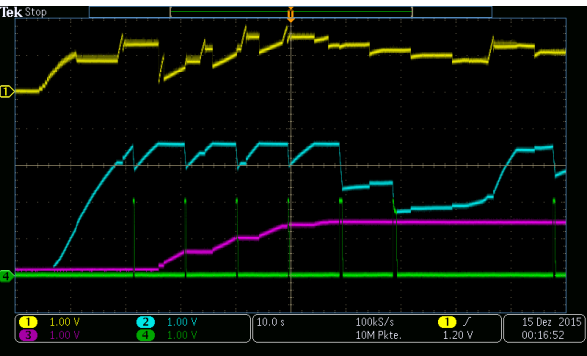


Abbildung 3.2: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

Legende zu Abbildung 3.2

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

Die Energieregulung des Vorgängermodells basiert auf einem hohen Schwellwert von 3.6 V beim Primärspeicher (STS), damit genug Energie für das versenden eines BLE-

Header Tab  
(Bezeichnung  
Beschreibung  
weg

Pakets entsteht (siehe Abbildung 3.2). Mit einer Speicherkapazität von  $470\ \mu\text{F}$  beträgt, braucht es rund 25 s, bis dass der Speicher den Schwellwert erreicht.

### 3.1.3 Erste Optimierungsliste

Für das Weiterentwickeln des Vorgängermodells fielen folgende zwei Punkte auf:

- Der Verlauf des Harvester-Eingangs wechselt abrupt.
- Für das Laden des Primärspeichers von  $470\ \mu\text{F}$  in 25 s benötigt es eine Geschwindigkeit von mehr als 60 km/h.

Bei der Verwendung der gesammelten Energie ergab die Inbetriebnahme zwei Verbesserungsvorschläge:

- Das zweite Speicherelement entlädt sich nicht. Dadurch kann seine Energie nicht
- Die Energie wird statisch nach einem fixen Zeitintervall von 10 s genutzt. Das Zeitintervall soll der Geschwindigkeit angepasst werden. verwendet werden.

### 3.1.4 Vertiefung in auffälliges Verhalten des Harvestereingangs

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.

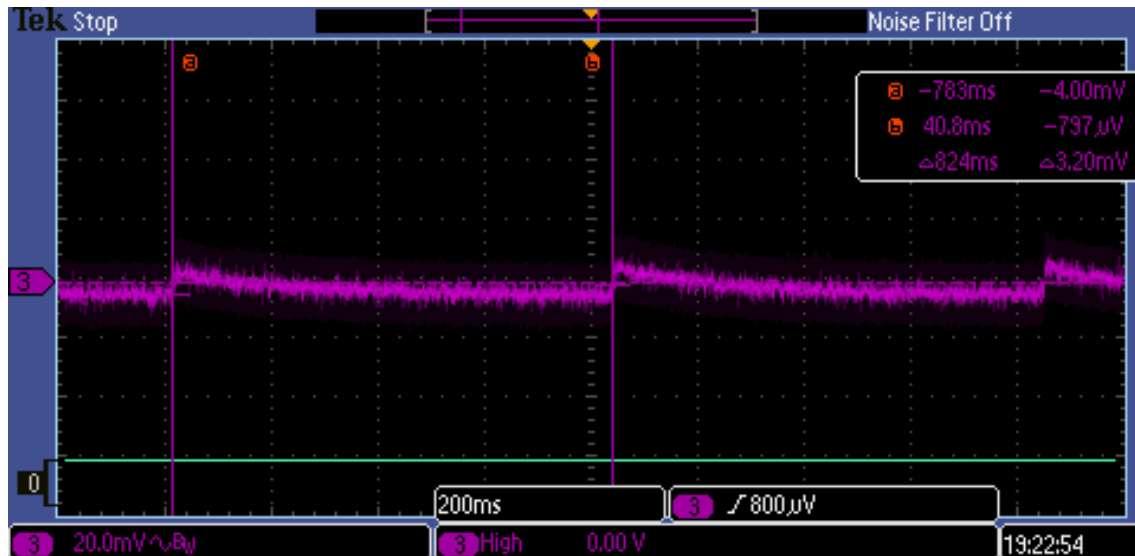
Mit einem Kondensator von  $470\ \mu\text{F}$  wird die Ausgangsspannung der Harvesterspannung fast rippelfrei. Die Rippelspannung beträgt 3.2 mV (siehe Abbildung 3.3).

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 Ausgangs der Harvesterschaltung 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

Abbildung 3.3: Rippelspannung bei Glättung mit 470  $\mu\text{F}$  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.

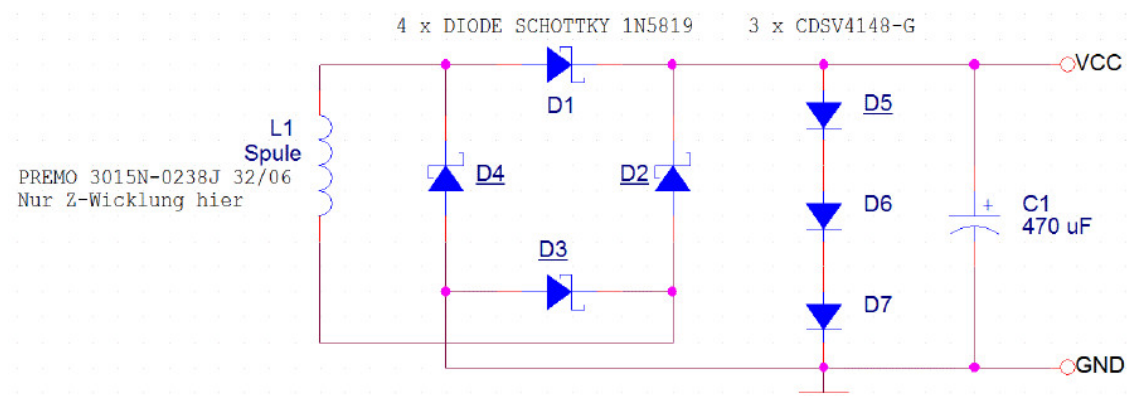


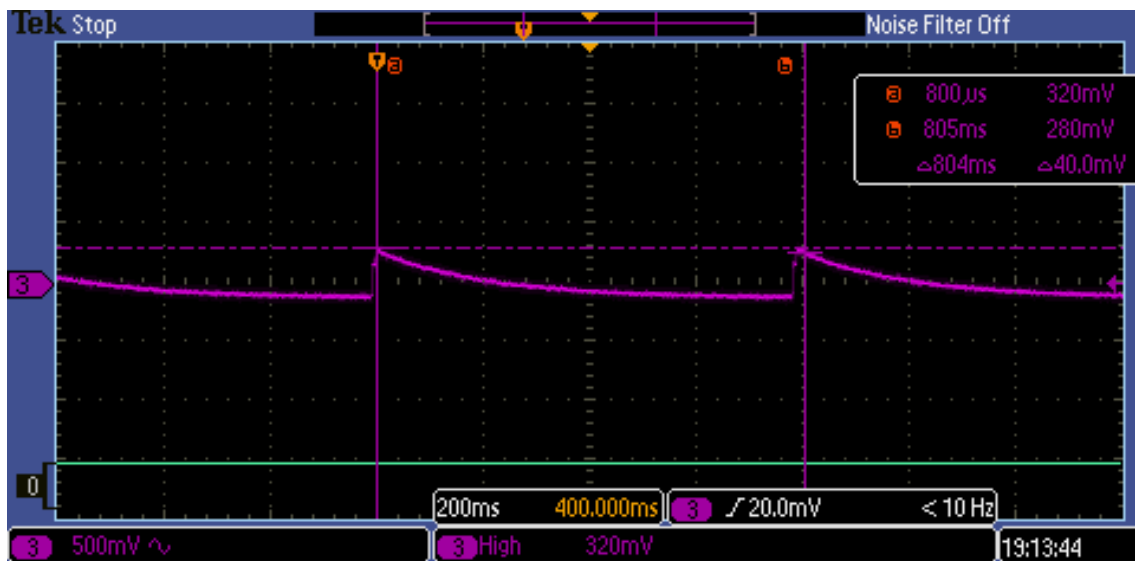
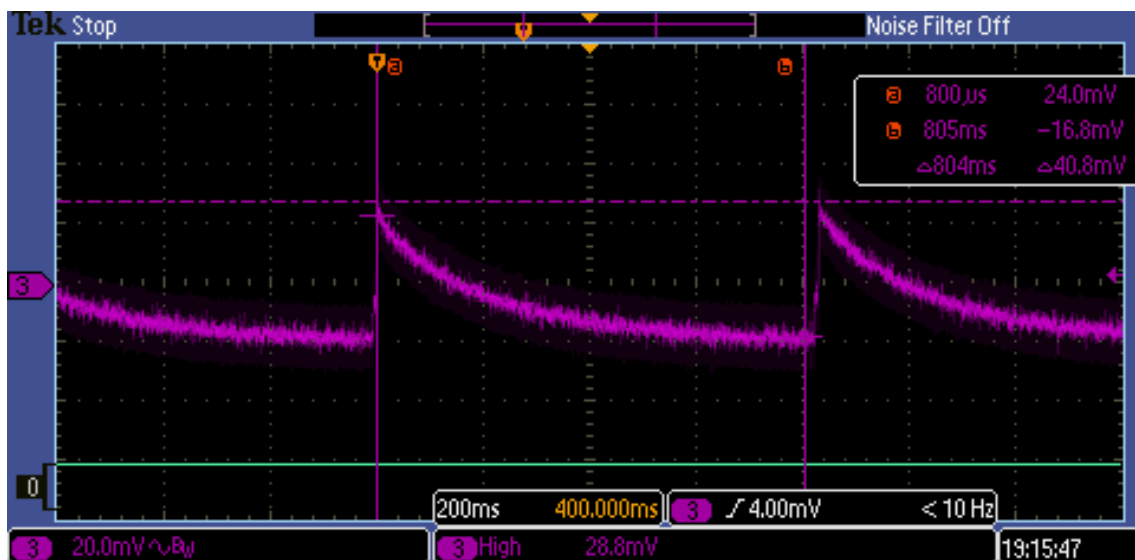
Abbildung 3.4: Messschaltung

## Resultat

Die Rippelspannung erhöht sich wie erwartet.  $V_{pp}$  beträgt bei 100  $\mu\text{F}$  xx mV, bei 47  $\mu\text{F}$  28.8 mV (siehe Abbildung 3.6) und bei 10  $\mu\text{F}$  320 mV (Abbildung 3.5).

Nach Rücksprache mit einem Entwickler des EM8500-Chips wird der zu hohe Kondensator vor dem Harvester-Eingang als Ursache vermutet. Laut Datenblatt sollte dieser 4.7  $\mu\text{F}$ , damit der Booster mit eingebautem MPPT ideal regeln kann.

Aus den Beobachtungen ergaben sich folgende Aufgaben für die Entwicklung des Pro-

Abbildung 3.5: Rippelspannung mit 10  $\mu$ F KondensatorAbbildung 3.6: Rippelspannung mit 47  $\mu$ F Kondensator

totypen:

1. Die Harvesterschaltung funktioniert nicht optimal. Die Auswirkung des zu hohen Kondensator vor Harvestereingang soll getestet werden
2. Die Schaltung soll für eine Geschwindigkeit von 10 km/h ausgelegt werden
3. Die Konfigurationen beim EM8500 sollen überarbeitet werden, sodass LTS genutzt wird
4. Das Senden der Pakete soll der Geschwindigkeit angepasst werden

Punkte 1 und 2 haben Auswirkung auf das Layout, Punkte 3 und 4 auf die

## 3.2 Hardware entwickeln

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 Harvesterschaltung 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.

Ziel der Entwicklung: B  
10 km/h fun  
tioniere, C  
Ausgang Ha  
vester verbe  
sern

Kapitel: Sch  
ma, Bauteil  
definition u  
Optimeirun  
Layout

Namensklär  
V HRV =  
VCC

Messprotoko  
umbenennen

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 Umlauferfassung 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

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.

#### a. 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.

#### b. 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.

r Schluss-  
t von  
sprotokoll  
tügen

r Schluss-  
t von  
sprotokoll  
tügen



### c. Optimierung des Limiter

Der Limiter ist eine Spannungsbegrenzung, 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 von Messprotokoll einfügen

### d. 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 von 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

### a. 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.

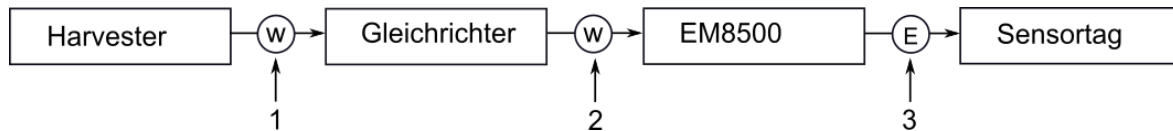


Abbildung 3.7: Messstellen am Prototypen

### b. Gestaltung der Leiterbahnen

Wann immer möglich wurden die Leiterbahnen, welche zu der Harvesterschaltung 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.

### c. 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.

Neues  
out

## 3.3 Inbetriebnahme des Prototypen

Testteil  
fällt. Ziel  
Kapitels:  
Ergiemes-  
g und Op-  
terung (da  
wenig Ener-  
. Konkret:  
Magnetete,  
llight, bes-  
Spule

Der entwickelte Prototyp wurde intensiv ausgemessen (siehe Messprotokolle XXXX.) Es werden 3 Messstellen unterschieden siehe Abbildung ???. In den folgenden Unterkapiteln werden die Resultate und die darauf folgenden Entwicklungsschritte kurz beschrieben:

### 3.3.1 Testen der Harvesterschaltung

- Zu wenig Energie - Zwei Magnete - stärkere Spule

### 3.3.2 Ausmessen der Energie vor und nach dem Gleichrichter

### 3.3.3 Energiemessungen nach dem EMBoard

## 3.4 Energy Management

Aufgabe des Energy Managements ist es,

### 3.4.1 Energiemessungen Sensortag

### 3.4.2 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 ?? entnommen werden. Diese basiert auf dem Messprotokoll im Anhang ??.

Da die produzierte Energie von der Fahrgeschwindigkeit abhängt, wird das Energiesystem in drei Zustände eingeteilt:

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

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

Tabelle 3.1: Leistungsabgabe Harvester-Schaltung

Probleme sein  
len weg: - L  
entladen, -  
kein fixes T

1 Messun-  
gen Sensor-  
tag (geht au  
zu Manu) 2  
Kalkulatin  
(mit Ziel LT  
entladen un  
10 km/h) 3  
Einstellung  
Chip mit Zi  
LTS, 10 km  
mit MPP 4  
Aufgrund v  
Messungen  
Codeoptimi  
rung

nach Donne  
tag Abend

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.

#### a. MPP einstellen

#### Berechnung

$$\begin{aligned}
 E_{HRV}^- &= \bar{P} * t \geq E_{BLE}^- \\
 P_{10km/h}^- * t &= 11 * 10^{-3} \\
 74.4 * 10^{-6} * t &= 11 * 10^{-3} \\
 t &= 147s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{HRV}^- &= \bar{P} * t \geq E_{BLE}^- \\
 P_{10km/h}^- * t &= 11 * 10^{-3} \\
 74.4 * 10^{-6} * t &= 11 * 10^{-3} \\
 t &= 147s
 \end{aligned}$$

### EM BOARD KONZEPT

#### Schwellwerte

#### Konfigurationen

## 3.5 Power Management

## 3.6 Applikationsentwicklung

Bitelstruktur: Mit Android Version xx.

Aufbau der App, BLE, App-Filtern, Settings, Ta-

### 3.6.1 Aufbau der App

Welche Aktion zu welchem Display gehört (Überblick Gesamtsystem)

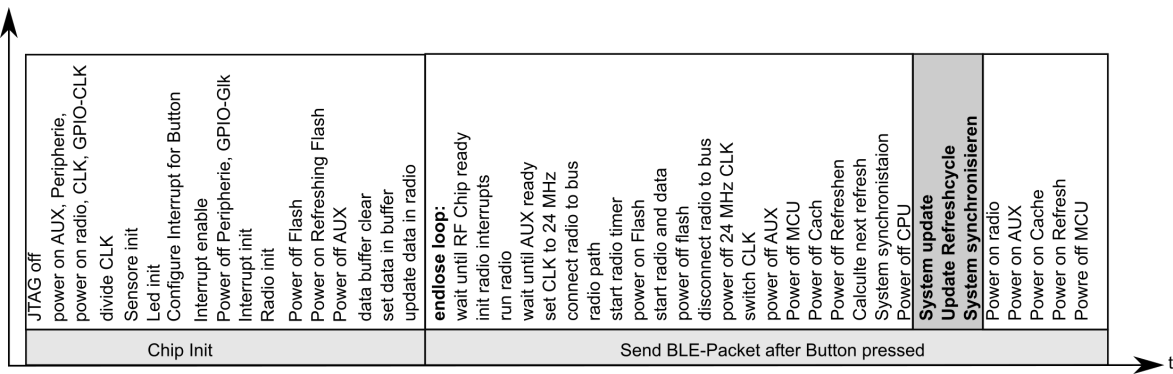


Abbildung 3.8: Prozessablauf V0

3.6.2 Implementierte Aktionen

Geräteauswahl Kalibrierung Geschwindigkeitsberechnung Sensordaten ausgeben (was mit welcher Genauigkeit)

3.6.3 BLE Empfangen

Aufbau des Datenpakets: LEN, UUID, ...



# 4

## Resultate

### 4.1 Harvesterschaltung

#### 4.1.1 Leistungskurve Harvester

Essentiell ist es zu wissen, wie viel Energie mit der Harvesterschaltung gewonnen werden kann. Dafür wurde die Leistungskurve des Harvesters aufgenommen. Die maximale Leistung hängt von der Geschwindigkeit ab, desto höher die Geschwindigkeit desto grösser die maximale Leistung. Bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h kann bereits eine Leistung von ca.  $25 \mu\text{W}$  generiert werden.

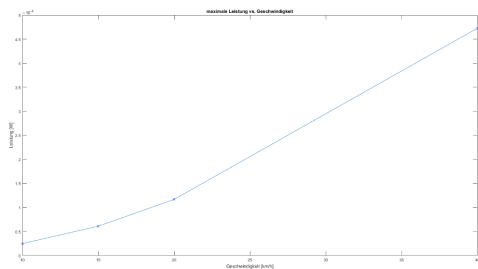


Abbildung 4.1: Maximale Leistung vs. Geschwindigkeit

Wichtig ist auch wo der MPP liegt, da der EM-Chip versucht am Eingang eine Leistungsanpassung zu erlangen, damit die maximale Leistung von der Harvesterquelle bezogen werden kann. Dieser MPP ist jedoch je nach Geschwindigkeit an einer anderen Stelle, d.h. der MPP hängt von der Geschwindigkeit ab und das Verhältnis von Open Loop Spannung zu der Spannung des MPP ändert sich. Dieses Verhältnis kann beim EM-Chip eingestellt werden, jedoch ist der wandernde MPP ein Problem, da ein fixes Verhältnis eingestellt werden muss.

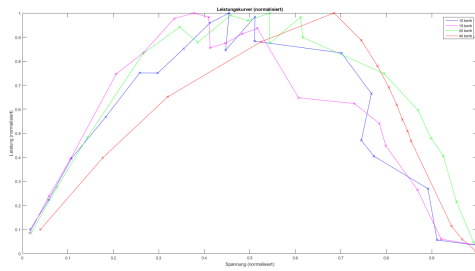


Abbildung 4.2: Leistungskurve (normalisiert)

### 4.1.2 Harvester Ausgang

Die Spannung am Harvester Ausgang bzw. am Eingang des EM-Chip ist sehr kritisch, da von dieser Spannung die gewonnene Energie abhängt. Das bedeutet, dass eine schwankende oder nicht ordentlich geregelte Spannung ein Problem für die Energiegewinnung darstellt. Der EM-Chip regelt den Eingang anhand der Messung der Open Loop Spannung auf ein voreingestelltes Level, was durch die Einstellung des MPPT-Ratio beeinflusst werden kann. Optimalerweise handelt es sich bei der Spannung am Eingang des EM-Chips um eine Gleichspannung, jedoch wird mit der verwendeten Harvesterquelle keine konstante Gleichspannung generiert, sondern eine Gleichspannung mit einem Rippel. Die Rippelspannung macht die Regelung sehr instabil und liefert teilweise falsche Open Loop Messresultate. Entscheidend ist die Kapazität vom Kondensator C2 am Ausgang des Harvesters. Eine hohe Kapazität des Kondensators resultiert in einer geringen Rippelspannung, jedoch nicht korrekten Open Loop Messungen, da sich der Kondensator langsam auflädt. Eine geringe Kapazität des Kondensators resultiert in einer grossen Rippelspannung, jedoch in besseren Open Loop Messungen, da sich der Kondensator schnell auflädt. Somit muss abgeschätzt werden, wie man den Kondensator dimensioniert. Eine Kapazität von  $100\ \mu\text{F}$  ist gemäss den Messresultaten des Messprotokolls «hier Link einfügen» ein guter Kompromiss. Die Open Loop Messungen des EM-Chips sind sicherlich nicht richtig, jedoch ist die geregelte Spannung VCC relativ stabil. Ebenfalls liegt die geregelte Spannung über  $0.3\ \text{V}$ , was die minimale Spannung zur Energiegewinnung ist. Natürlich ist die Spannung am Eingang des EM-Chips keine konstante Gleichspannung, jedoch fluktuiert die Spannung nicht zu stark, dass die Regelung nicht funktionieren würde.

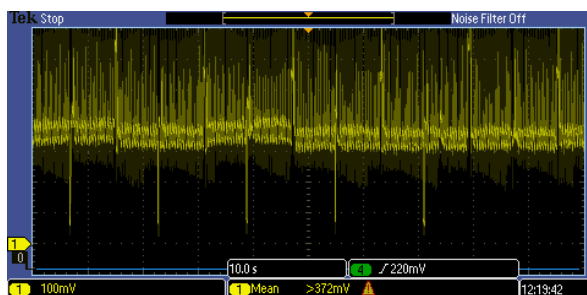


Abbildung 4.3: Spannung VCC bei 15 km/h



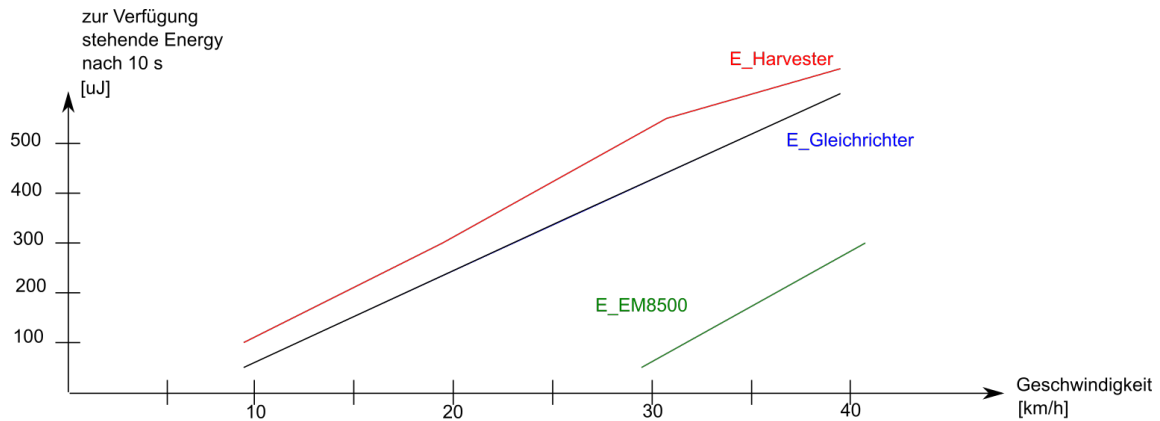


Abbildung 4.4: Energiegewinn Zusammengefasst nach Stelle in der Schaltung

### 4.1.3 Wirkungsgrad der Schaltung

In den Messprotokollen (xxxx) auf der CD sind diverse Energiemessungen dokumentiert. Die Abbildung ?? gibt einen Überblick, an welcher Stelle wie viel Energie vorhanden ist, bzw. zwischen welchen zwei Stellen wie viel Energie verloren ging.

Der Wirkungsgrad des EM8500 liegt bei 40 kmh bei xxx und bei 10 kmh bei unserer Schaltung bei xxxx.

## 4.2 Energiemanagement

Durch das korrekte Einstellen der Schwellwerte beim EM8500 (siehe Unterkapitel xxx) und die korrekten Ladewerte bei den Kondensatoren (siehe Unterkapitel xxx), ist es möglich, dass sich der LTS-Kondensator bei einer Geschwindigkeit von YYY km/h lädt (siehe Abbildung xxx). Zudem entlädt sich LTS, sobald das Sensortag am Arbeiten ist (siehe Abbildung yyyy). Beim Energiemanagement ist es somit gelungen, die Schwellwerte und Kondensatorengrößen so einzustellen, dass die Funktionalitäten des EM8500-Chips voll ausgenutzt werden können.

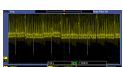


Abbildung 4.5: STS und LTS laden sich

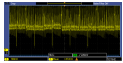


Abbildung 4.6: LTS liefert Energie für die Arbeitspakete

### 4.3 Powermanagement

Durch ein gutes Powermanagement (siehe Unterkapitel xxx) wurde es möglich, die energiestarken Aufgaben in Teilen zu erledigen. Die Abbildung xxxx zeigt, das Aufteilen der Arbeitsschritte: Zuerst folgt das Init, dann folgt das Auslesen eines Sensors, dann das Senden des Sensors. Die Aufgaben wurden aufgeteilt, weil alle drei Schritte in einem zu viel Energie verbraucht hätte, sodass VSUP zusammengebrochen wäre.

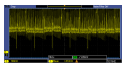


Abbildung 4.7: Drei Arbeitspakete bis zum Senden der Daten

Die Abbildung ?? zeigt den Energieverbrauch nach Verarbeitungsaufwand. Am wenigsten Energie benötigt das Berechnen der Geschwindigkeit über den RTC. Deutlich mehr Energie braucht das Auslesen der Sensor-Daten. Dies einerseits, weil die I2C-Kommunikation aufgebaut werden muss und weil die Sensoren eine gewisse Zeit brauchen, bis sie aktiv sind. Die unterschiedlich verbrauchten Energiemengen entsprechen exakt den unterschiedlichen Startzeiten der Sensoren.

wachzeit  
es Sensors  
sen

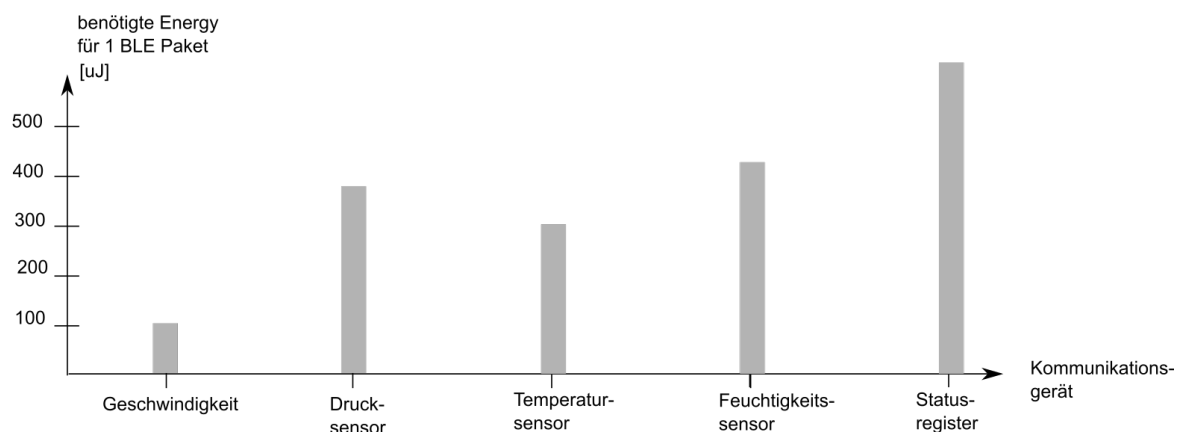


Abbildung 4.8: Energieverbrauch gemäss Verarbeitungsaufwand für CPU

Kombiniert man den Energieverbrauch mit der zur Verfügung stehenden Energie am

Ausgang nach dem EM8500-Chips, können (siehe Abbildung ??) folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. bla
2. bla
3. bla
4. bla

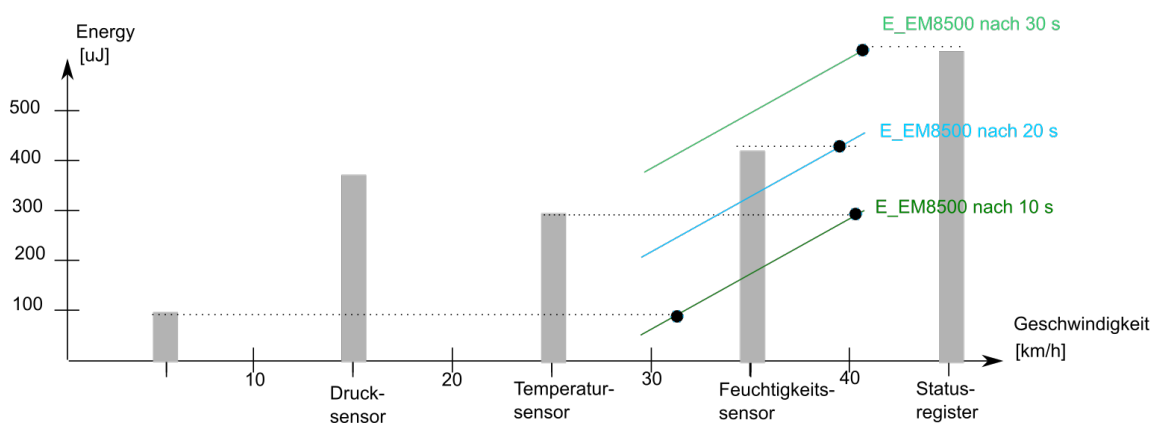


Abbildung 4.9: Energieverbrauch gemäss Verarbeitungsaufwand für CPU

## 4.4 Applikation

Bilder der App

Sniffer Screenshot

Beweis, dass Pakete ankommen

ev. Video zeiger (auf CD)



# 5

## Diskussion

Bespricht die erzielten Ergebnisse bezüglich ihrer Erwartbarkeit, Aussagekraft und Relevanz

Interpretation und Validierung der Resultate

Rückblick auf Aufgabenstellung, erreicht bzw. nicht erreicht

Legt dar, wie an die Resultate (konkret vom Industriepartner oder weiteren Forschungsarbeiten; allgemein) angeschlossen werden kann; legt dar, welche Chancen die Resultate bieten

Es ist machbar. Stellen zum Optimieren definieren

Reflexion Katrin:

EM8500 I2C geht nicht richtig. Kein RTOS bebrauchen Code von Ines chaotisch Super Unterstützung.

Reflexion Manu:

Dank:

Ives The.... Leiterplattenhersteller



# 6

## Verzeichnisse

### 6.1 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.

Argenox, Mai 2015. URL <http://www.argenox.com/bluetooth-low-energy-ble-v4-0-development/library/a-ble-advertising-primer/>.

bluAir. Bluetooth range, 2015. URL <http://www.bluaiir.pl/bluetooth-range>.

F. Electronics. Bluetooth core specification version 4.0, Mai 2015. URL <https://www.youtube.com/watch?v=AIHpSCYOQNI>.

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

R. Heydon. *Bluetooth Low Energy, The Developer's Handbook*. Prentice Hall, 2012.

B. L.-S.-C. Karthik Kadirvel, Mai 2016. URL [http://www.electronicproducts.com/Power\\_Products/Batteries\\_and\\_Fuel\\_Cells/Energy\\_harvesting\\_from\\_an\\_ambient\\_electric\\_field.aspx](http://www.electronicproducts.com/Power_Products/Batteries_and_Fuel_Cells/Energy_harvesting_from_an_ambient_electric_field.aspx).

M. Koenig. Messprotokoll harvester, 2016.

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

J. Schwager, 2016. URL <http://www.harvesting-energy.de/>.

Solarstrom macht Schule, 2011. URL <http://sms.ckw.ch/content/ckwsms/de/startseite/mittelstufe/solaranlage-erklaert.html>.

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

Wikipedia. Thermoelement, 2011. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelement>.

Wikipedia, Mai 2016. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum\\_power\\_point\\_tracking](https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking).

## 6.2 Glossar und Abkürzungen

### **Clock Domain**

Ein Bereich der Hardware, der mit demselben Takt läuft.

### **InES**

Ist der Institutsname eines Instituts der ZHAW. InES steht für Institut of Embedded Systems.

### **Power Domain**

Basiert auf der Fähigkeit eines Prozessor Speisungsgebiete zur Verfügung zu stellen. Der Prozessor teilt seine Funktionalitäten in Gebiete ein, die separat ein- und ausgeschaltet werden können.

### **MPP**

Maximum Power Point (MPP) bezeichnet in einer Leistungskurve den höchsten Punkt, also das Leistungsmaximum.

### **MPPT**

Versucht ein System, einen Input stets auf das Leistungsmaximum zu regeln, spricht man von Maximum Power Point Tracking. Tracking steht für Einfangen.

### **MPPT-Ratio**

Bezeichnet die Auswertung des MPP auf Spannungsachse. Liegt das Leistungsmaximum beim Kurzschluss, so ist die MPPT-Ratio bei 0 %, liegt sie bei Leerlauf, dann liegt die MPPT-Ratio bei 100 %. Üblicherweise liegt die MPPT-Ratio dazwischen.

### **RTC**

Der Real Time Clock kann im Cortex M3 bei ausgeschaltener CPU weiterlaufen.

### **State Machine**

Heisst korrekt Finite State Machine und bezeichnet eine Konzept, bei dem aufgrund einer Kombination von Eingangssignalen, sich das System in einem bestimmten Zustand befindet. In jedem Zustand sind nur gewisse Inputs zulässig, ansonsten verbleibt das System in diesem Zustand. Folgt ein korrekter Input, wechselt das System in den entsprechenden Zustand.



**UML**

Die Unified Modeling Language (UML) ist ein Quasistandard, wie Prozesse abgebildet werden können. Die Sprache definiert Formen, aufgrund deren man weiss, ob es sich um eine Initialisierung, eine Entscheidung oder um eine Verarbeitung, etc. handelt.

**6.3 Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1.1	Arbeitsblöcke . . . . .	7
Abbildung 2.1	MPP TEG (Andrea Montecucco (2014)) . . . . .	12
Abbildung 2.2	MPP Solarzelle (Wikipedia (2016)) . . . . .	13
Abbildung 2.3	MPP Spule (Karthik Kadirvel (2016)) . . . . .	13
Abbildung 2.4	MPP Harvester (Koenig (2016)) . . . . .	14
Abbildung 2.5	Grundprinzip Applikationsspeisung . . . . .	15
Abbildung 2.6	Applikationsspeisung EM8500 . . . . .	15
Abbildung 2.7	Sicheres Betreiben durch Long Term Storage . . . . .	15
Abbildung 2.8	Konzept Hersteller (EMMicroelectronic (2015)) . . . . .	16
Abbildung 2.9	Leistungsmessung des Harvesters . . . . .	16
Abbildung 2.10	In- und Outputs EM8500 (EMMicroelectronic (2015), p.11) . . . . .	18
Abbildung 2.11	Schlafen zwischen Ausführungen . . . . .	20
Abbildung 2.12	Schlafen innerhalb des Codes . . . . .	21
Abbildung 2.13	Struktur durch State Machine . . . . .	22
Abbildung 2.14	BLE Paketstruktur . . . . .	24
Abbildung 3.1	Funktionsblöcke Bicycle Computer . . . . .	26
Abbildung 3.2	Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie . . . . .	27
Abbildung 3.3	Rippelspannung bei Glättung mit 470 $\mu$ F Kondensator . . . . .	29

Abbildung 3.4	Messschaltung . . . . .	29
Abbildung 3.5	Rippelspannung mit 10 uF Kondensator . . . . .	30
Abbildung 3.6	Rippelspannung mit 47 uFKondensator . . . . .	30
Abbildung 3.7	Messstellen am Prototypen . . . . .	34
Abbildung 3.8	Prozessablauf V0 . . . . .	37
Abbildung 4.1	Maximale Leistung vs. Geschwindigkeit . . . . .	39
Abbildung 4.2	Leistungskurve (normalisiert) . . . . .	40
Abbildung 4.3	Spannung VCC bei 15 km/h . . . . .	40
Abbildung 4.4	Energiegewinn Zusammengefasst nach Stelle in der Schaltung	41
Abbildung 4.5	STS und LTS laden sich . . . . .	41
Abbildung 4.6	LTS liefert Energie für die Arbeitspakete . . . . .	42
Abbildung 4.7	Drei Arbeitspakete bis zum Senden der Daten . . . . .	42
Abbildung 4.8	Energieverbrauch gemäss Verarbeitungsaufwand für CPU . .	42
Abbildung 4.9	Energieverbrauch gemäss Verarbeitungsaufwand für CPU . .	43
Abbildung A.1	Offizielle Ausschreibung der Arbeit . . . . .	II
Abbildung B.1	Blockschema Sensortag . . . . .	IV
Abbildung C.1	Blockschema Sensortag . . . . .	V

## 6.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Leistungsabgabe Harvester-Schaltung . . . . .	35
-------------	---	----

**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 empfangt 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

## Blockdiagramm EM8500

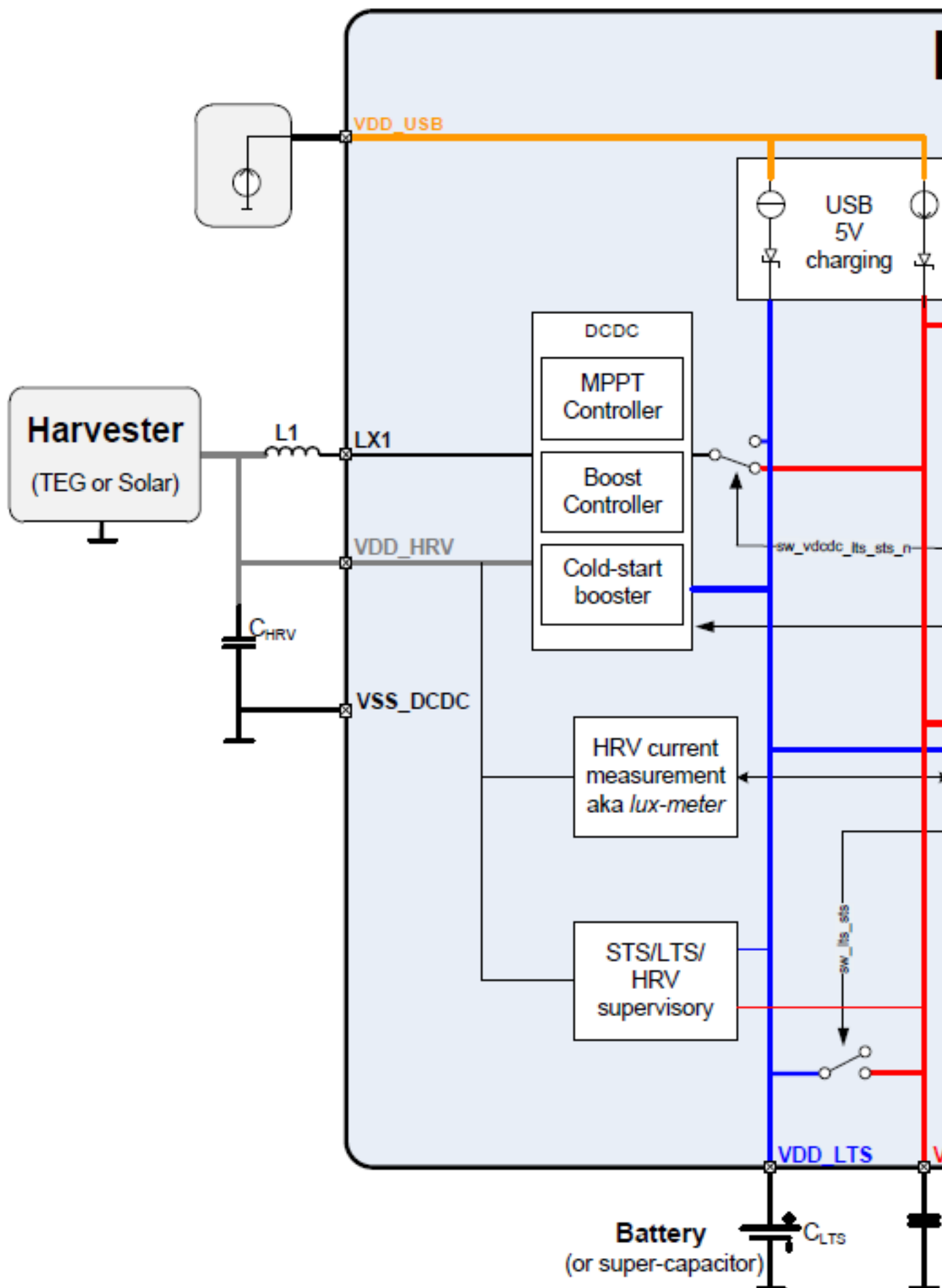


Abbildung B.1: Blockschema Sensortag

# Anhang C

## Funktionsblöcke Sensortag von Texas Instrument

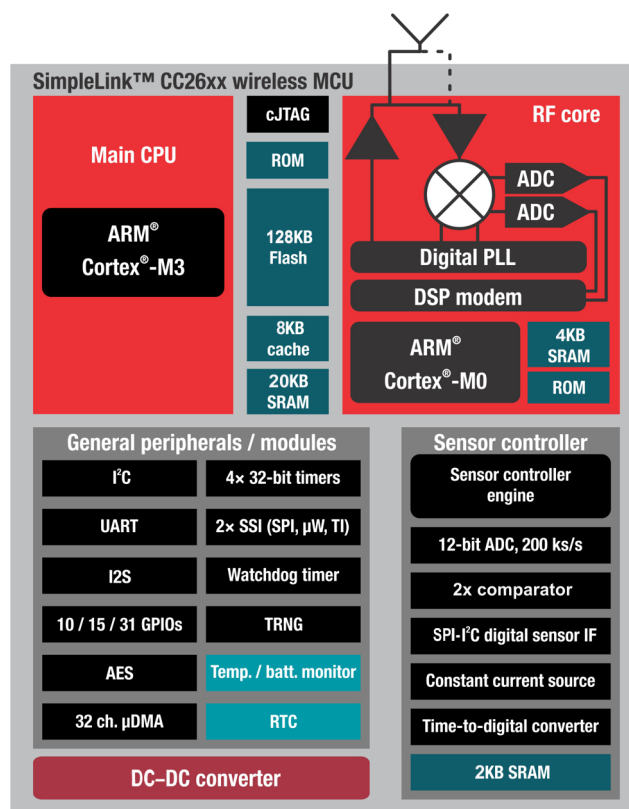


Abbildung C.1: Blockschema Sensortag

TI (2015)S.3