



Energy harvesting bicycle computer

Katrin Bächli, Manuel König

23. Mai 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ausgangslage	5
1.2	Definition der Aufgabenstellung	6
1.3	Übersicht der Aufgabenblöcke	8
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Energy Harvesting	9
2.1.1	Energy Harvesting Methoden	10
2.1.2	Energy Harvesting über Bewegungsindktion	11
2.1.3	Unterschiede der Methoden	12
2.2	Energy Management	15
2.2.1	Kontrollierte Energiespeicherung	17
2.2.2	Regelung des optimalen Leistungsbezugs	19
2.2.3	Booster definiert Spannung	20
2.2.4	Energiezustand kennen und In- und Ausgänge schalten	21
2.3	Power Management	22
2.3.1	Einbauen von Schlaufmodi	24
2.3.2	Interrupt Driven Appliacation	24
2.3.3	Designed by a State Machine	26
2.4	Bluetooth Low Energy	26
3	Vorgehen	27
3.1	Inbetriebnahme des Modells der Machbarkeitsstudie	27
3.1.1	Kapazität für Harvesting-Schaltung verbessern	27
3.2	Layout Print	31
3.2.1	Das Schema (oder der Stromlaufplan)	31
3.2.2	Optimierung der Harvesterschaltung	32
3.2.3	Bauteildefinition	33
3.2.4	Das Layout	33
3.2.5	Energiekalkulation	34
3.3	Low Power Einstellungen Sensortag	36
3.3.1	VO: SimpleBroadcast	36

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	<i>3</i>
3.3.2 V1	37
3.3.3 V2	37
3.4 Applikationsentwicklung	37
3.5 Option 1	37
4 Resultate	39
4.1 Harvester	39
4.2 Energiemanagement	39
4.3 Powermanagement	39
4.4 Applikation	39
5 Diskussion	41
6 Verzeichnisse	43
6.1 Literatur	43
6.2 Glossar und Abkürzungen	43
6.3 Abbildungsverzeichnis	43
6.4 Tabellenverzeichnis	43
Anhang	
A Blockdiagramm EM8500	I
B Referenz Sensortag von Texas Instrument	III

Kapitel 1

Einleitung

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

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

1.1 Ausgangslage

Als Inspiration dienten Batteriebetriebene Fahrradcomputer zweier Hersteller:

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2 Definition der Aufgabenstellung

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

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

Aus den Themen entstand eine Aufgabenstellung mit folgenden Punkten:

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

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

Aus diesen Anforderungen entstand der im Anhang ?? abgelegte Projektplan.

1.3 Übersicht der Aufgabenblöcke

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

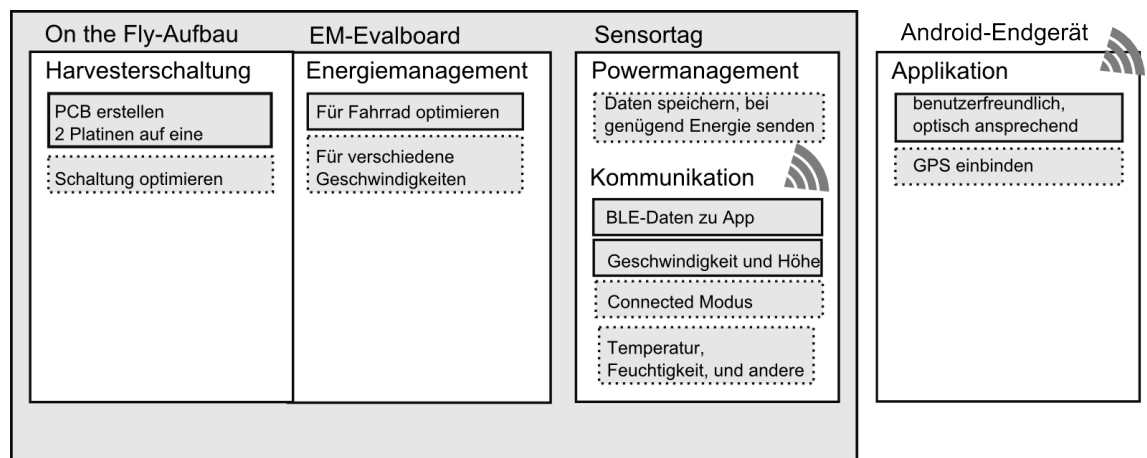


Abbildung 1.1: Arbeitsblöcke

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

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

Da die gewonnene Energie im μW -Bereich liegt, ist ein Sammeln der Energie notwendig, sodass Leistungen im mW -Bereich zur Verfügung stehen. Ansätze zur Umsetzung zum Sammeln und Weiterleiten von Energie werden im Unterkapitel 2.2 beschrieben.

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

Als letzte Stufe in der Umsetzung ist eine energiearme Kommunikation notwendig. Da bietet die Bluetooth Low Energie Technologie ideale Voraussetzungen. Das Protokoll und die Technologie werden im letzten Grundlagenteil 2.4 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.“<http://www.harvesting-energy.de/> (2016).

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

2.1.1 Energy Harvesting Methoden

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

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

Energy Harvesting mit einer Solarzelle

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

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

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

Energy Harvesting mit einem TEG

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

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

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

μ 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 ϕ . 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** ϕ senkrecht zur Fläche der Spule A kann das Integral durch eine Multiplikation ersetzt werden (siehe Formel).

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

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

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

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

Eine induzierte Spannung wird somit durch folgende vier Faktoren beeinflusst:

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

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

2.1.3 Unterschiede der Methoden

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

Gleichmässige Energie versus gepulster Energie

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

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

Konstanter Maximum Power Point zu dynamischem

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

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

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

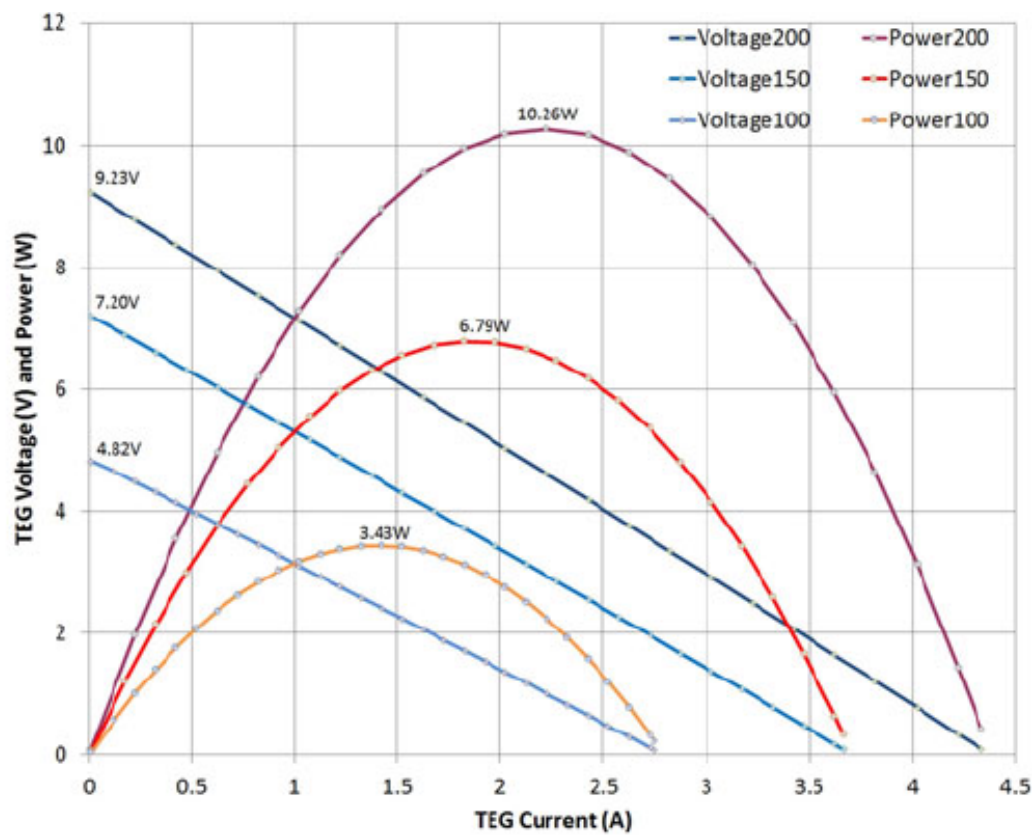


Abbildung 2.1: MPP TEG (Andrea Montecucco (2014))

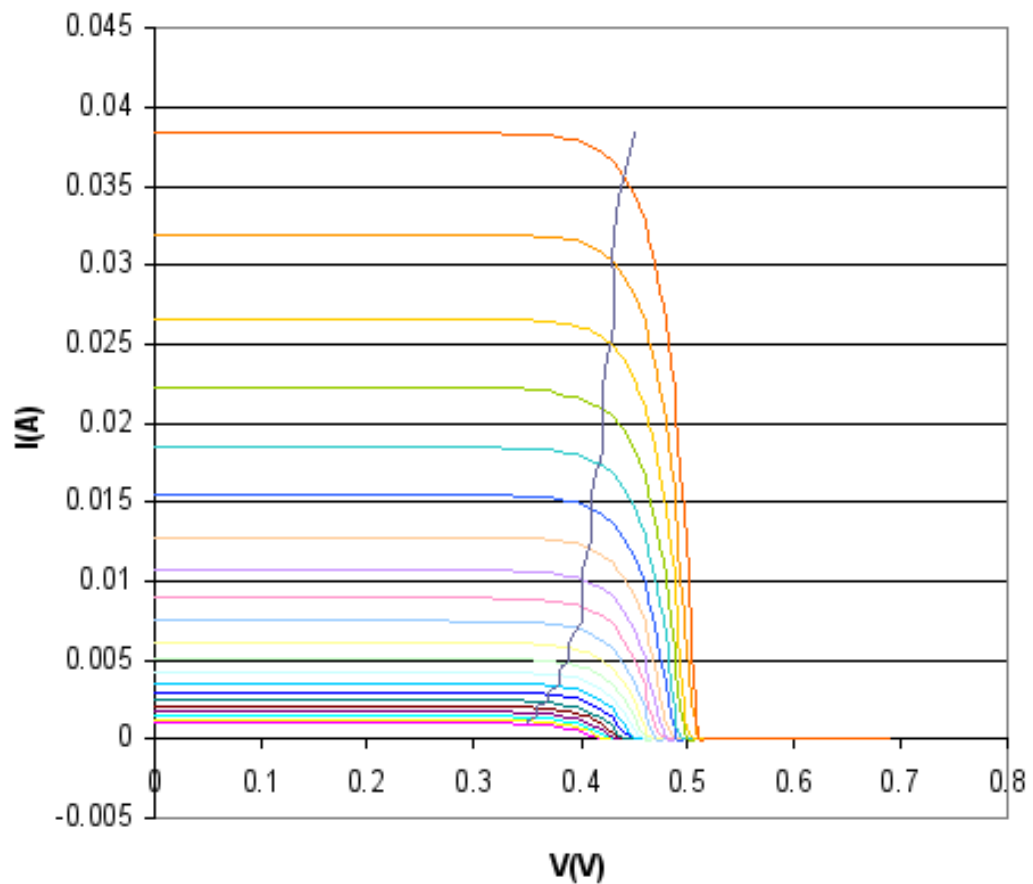


Abbildung 2.2: MPP Solarzelle

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

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

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

Als interessanter für die Anwendung wurde der Einfluss der Geschwindigkeit, mit der der Magnet an der Spule vorbeizieht, genauer dokumentiert. Denn dieser Faktor ist durch den Nutzer direkt beeinflussbar (Graphik 2.4).

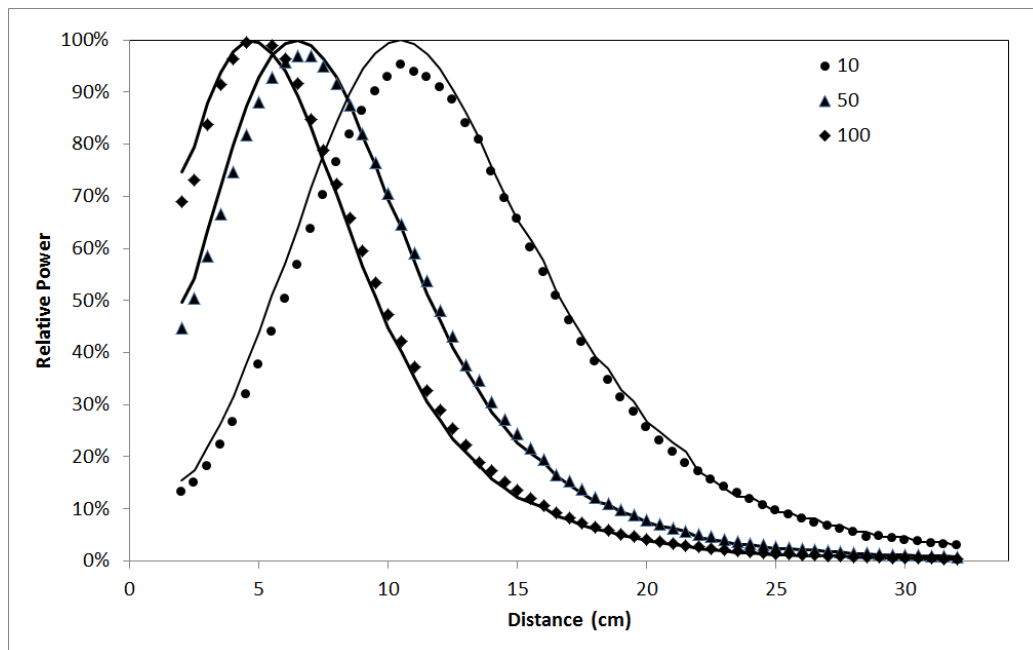


Abbildung 2.3: MPP Spule

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

Manuel (2016)

2.2 Energy Management

Der Harvester des Bicycle Computer erntet eine gepulste Energie im μW -Bereich. Um diese für eine Applikation zu verwenden, müssen die geringen Energieportionen summiert werden. Sind Energiemengen im 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

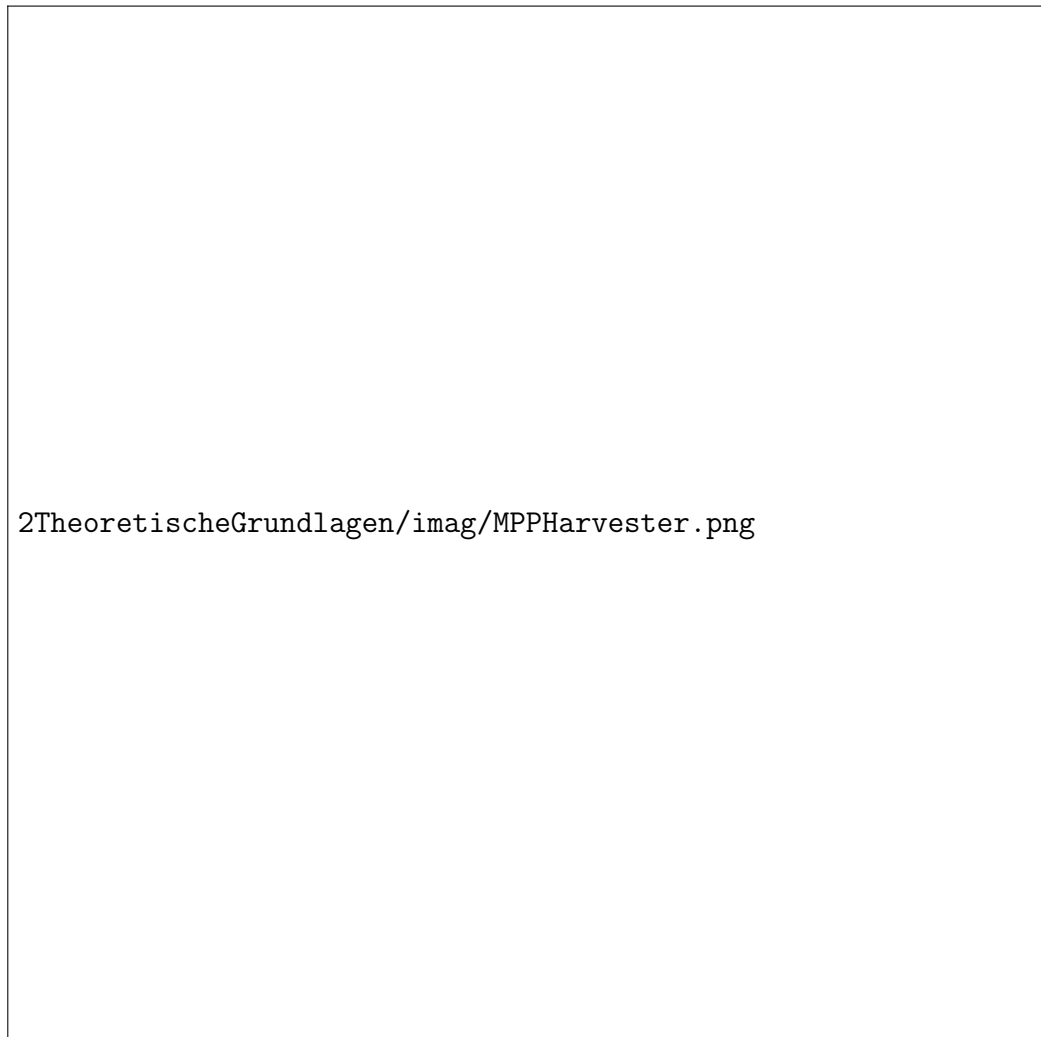


Abbildung 2.4: MPP Harvester

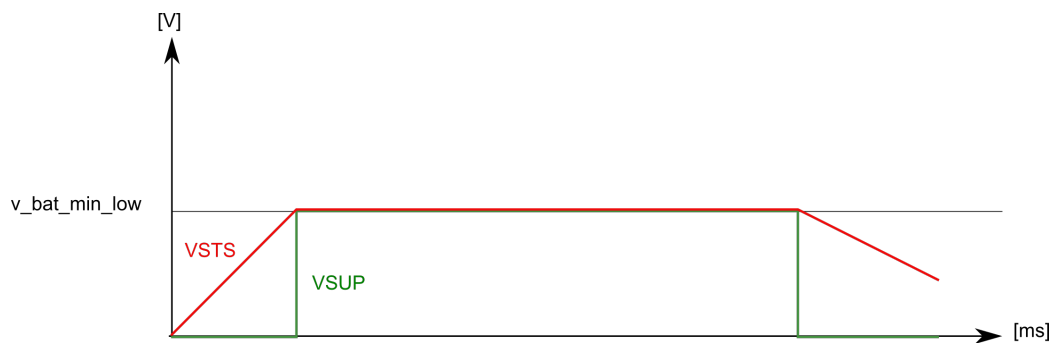


Abbildung 2.5: Grundprinzip Applikationsspeisung

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

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

2.2.1 Kontrollierte Energiespeicherung

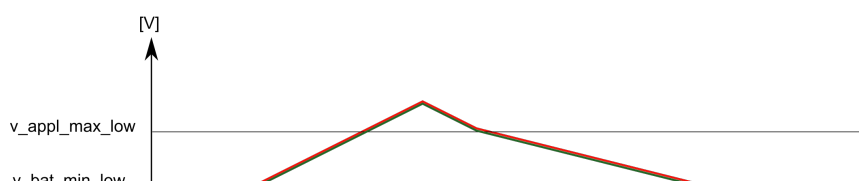
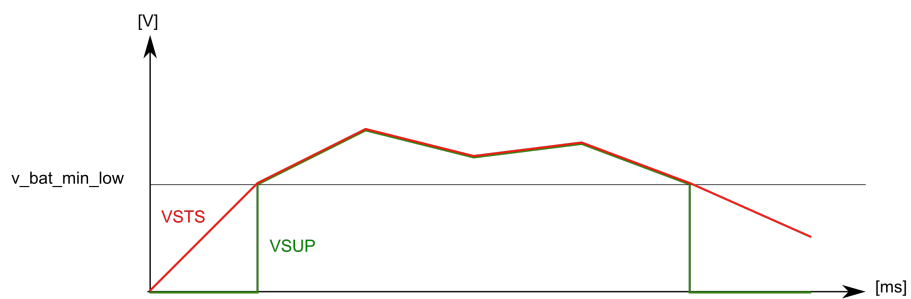
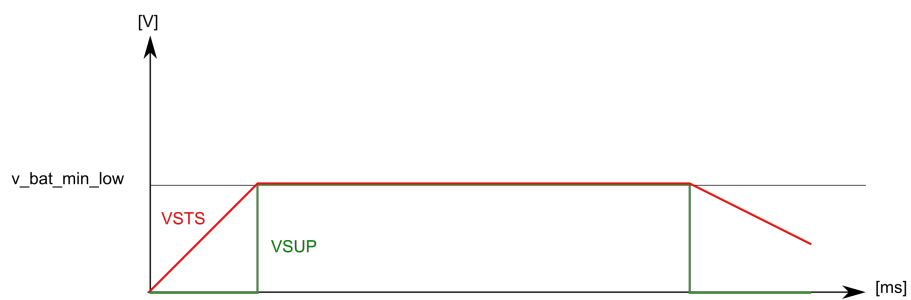
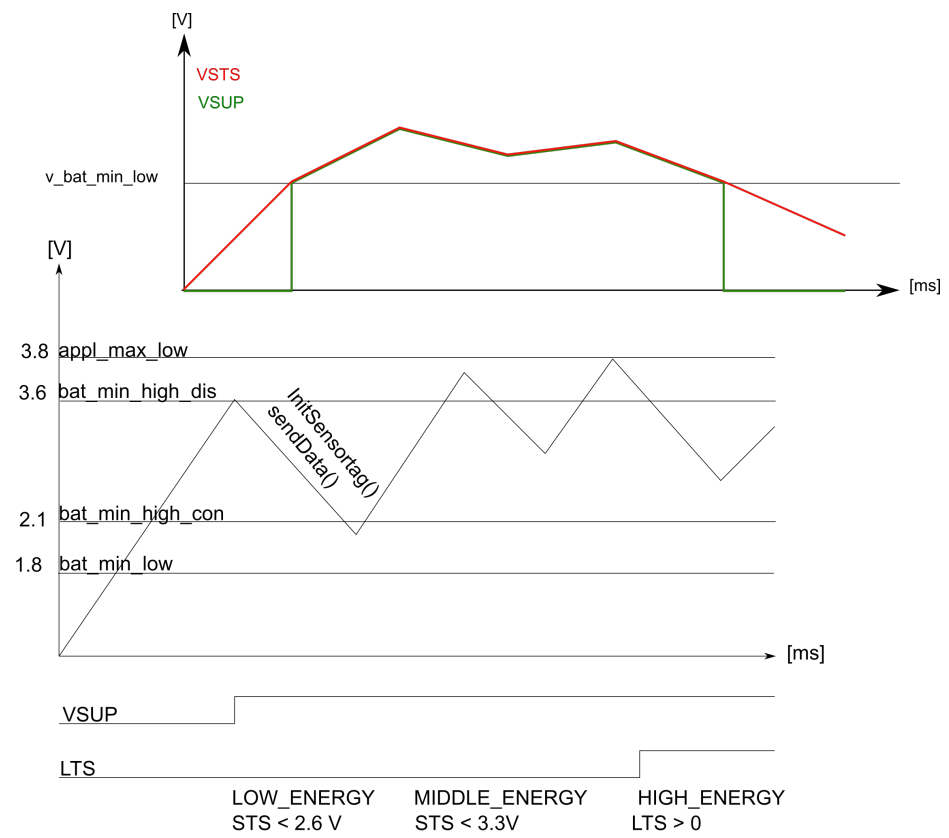
Bei einer Low Power Harvesting Applikation ist wesentlich, dass vor der Verwendung der Energie, genug Energie gesammelt wurde. Umgesetzt wird dies, in dem die Freigabe der Energie an eine Applikation, VSUP, erst nach dem Erreichen eines gewissen Ladezustands erfolgt. Der Ladezustand des Primärkondensator ist mit VSTS in der Graphik 2.5.

Im EM8500 wird dies folgendermassen umgesetzt (Graphik 2.6): Erreicht der Primärkondensator STS den Schwellwert $v_{bat_min_low}$, wird $VSUP$ mit der eingestellten Spannung

Der Primärkondensator STS ist für die kurzfristige Speisung der Applikation verantwortlich. So bedeutet STS Short Time Storage. Für das lanfristige, sichere Ausführen braucht das System ein Long Term Storage-Kondensator (LTS). Seine Aufgabe ist, Reserveenergie aufzubauen. Diese überbrückt die Energieengpässe, wenn der Harvester zu wenig Energie liefert. VLTS wird geladen, wenn der Schwellwert bei $v_{appl_max_osist}$ (siehe Graphik 2.8).

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 Kondensatoren und den Schwellwerten zu sagen, dass der erste Schwellwert ($v_{bat_min_lo}$), bei dem die Speisung



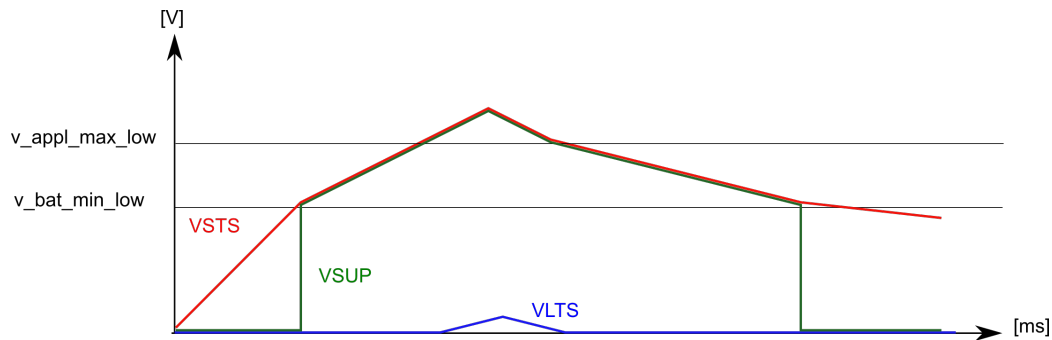


Abbildung 2.7: Sicheres Betreiben durch Long Term Storage-Kondensator

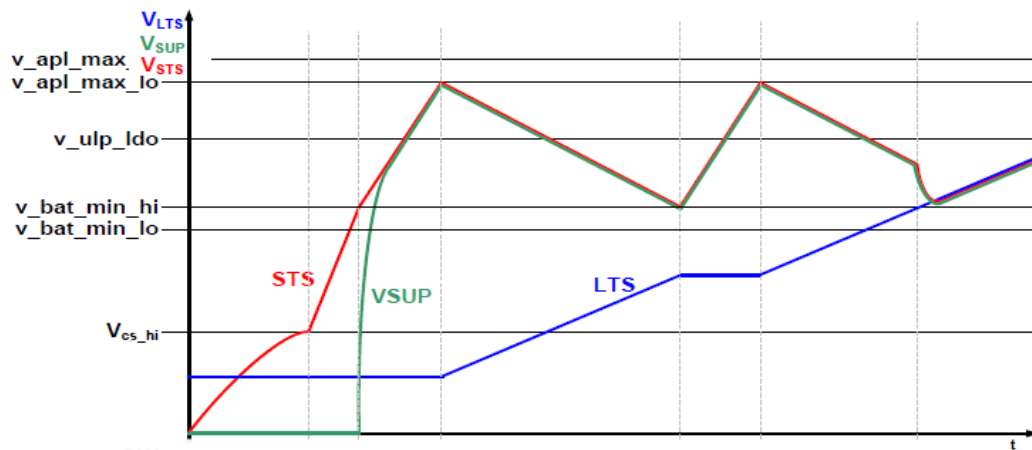


Abbildung 2.8: Konzept Hersteller

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.

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 Inbetrieb-

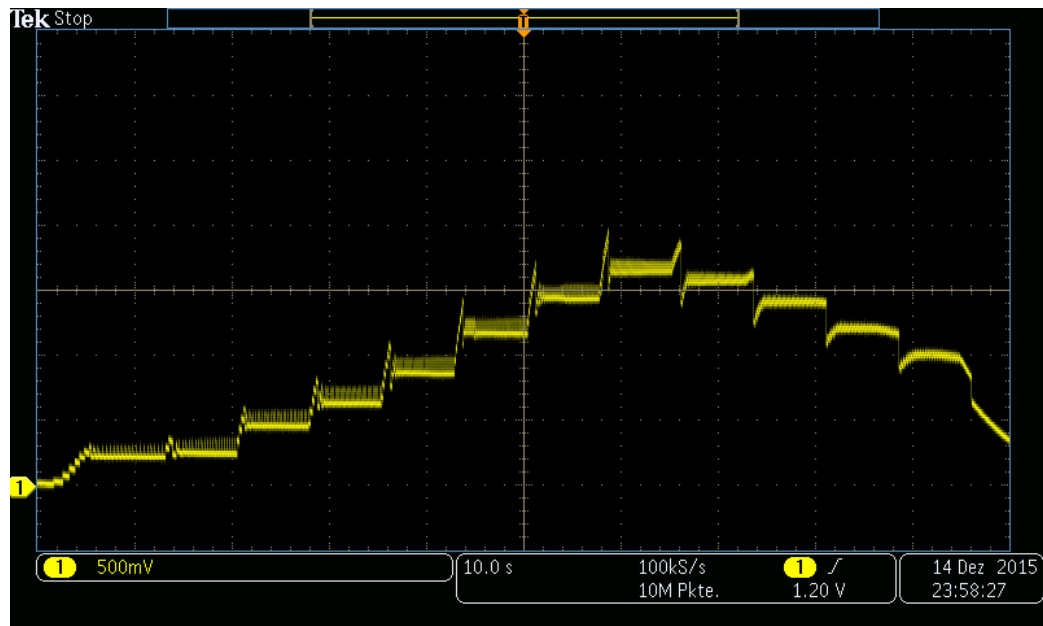


Abbildung 2.9: Leistungsmessung des Harvesters

nahme 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 Graphik 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 Graphik 2.9 beträgt die Periode 8 s.

2.2.3 Booster definiert Spannung

Direkt mit dem MPP-Kontroller ist der Booster (siehe Blockdiagramm im Anhang A). 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 Kondensatoren STS vom Boosterausgang gespeist wird, entspricht dessen Spannung dem des geregelten Boosterausgangs. Für die Berechnung des Kondensatoren muss der Energieverbrauch der Applikation und die Ausgangsspannung des Boosters bekannt sein:

$$E_{Applikation} = C_{STS} \times \frac{1}{2} V_{Booster}$$

($E_{Applikation}$ bezeichnet die minimale Energie, die die Applikation braucht, also mindestens die Initialisierung der Applikation.)

Da aus dem Kondensatorwert 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:

$$v_{bat_min_low} - V_{SUP} = \sqrt{\frac{2 \times E_{Applikation}}{C_{STS}}}$$

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

Neben VSUP kann der EM8500 drei weitere Ausgänge freischalten: VAUX[0] bis VAUX[2] (siehe Graphik 2.10). Vor allem aber kann per I2C oder SPI der aktuelle Spannungspegel der Regelung (VREG), der Kondensatoren (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 ausgeschaltet.
- 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.

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 Mikrokontroller-Bereiche 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 Unterkapitel 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.

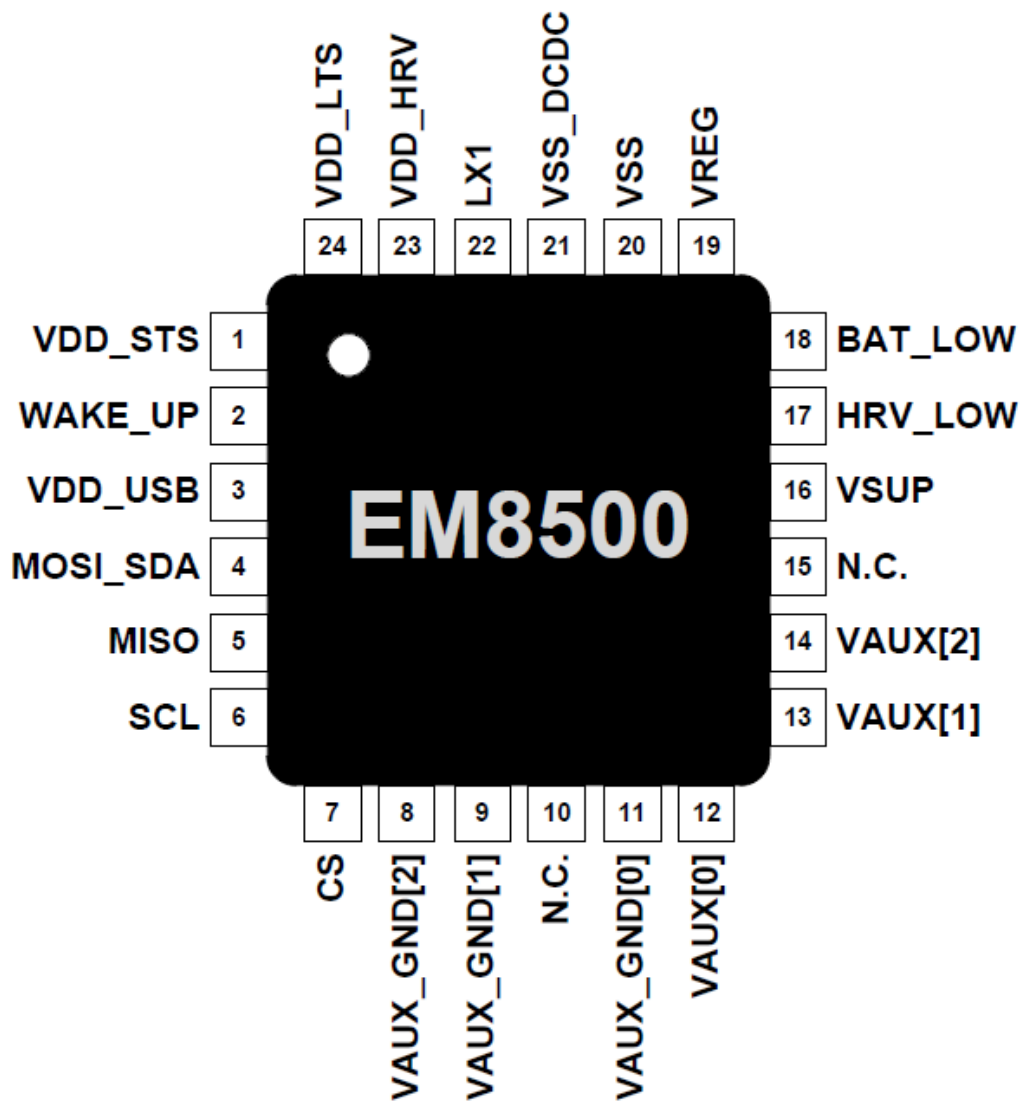


Abbildung 2.10: In- und Outputs EM8500 (EMMicroelectronic (2015), p.11)

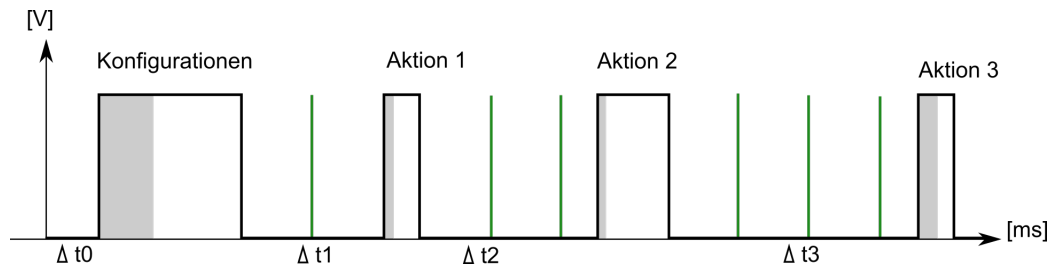


Abbildung 2.11: Schlafen zwischen Ausführungen

- 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 B.

2.3.1 Einbauen von Schlafmodi

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.

Schlafen zwischen Ausführungen

Die Graphik 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 ($t_0 - t_3$). Die graue Markierung in jedem Aktionsblock sind die Initialisierungen vor jeder Aktion.

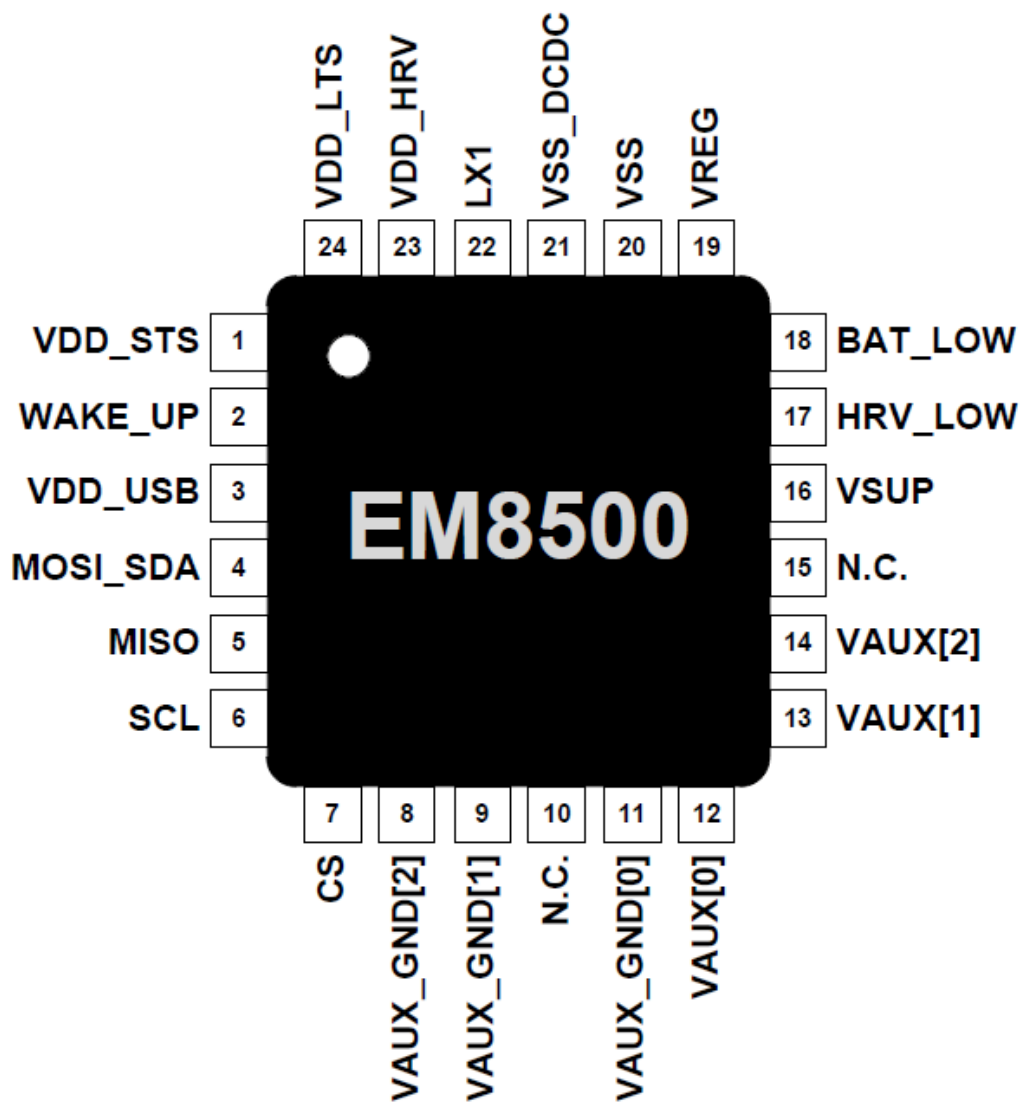


Abbildung 2.12: Schlafen innerhalb des Codes

Schlafen innerhalb einer Aktion

2.3.2 Interrupt Driven Appliacation

Das Schlafen der Applikation tönt gut. Doch wie wacht sie wieder auf? Dies ist ein nicht-triviales Problem, dass sich durch Interrupts lösen lässt.

In diesem Unterkapitel wird das Konzept der Interrupt Driven Applikation erklärt (wie auch ????)

2.3.3 Designed by a State Machine

2.4 Bluetooth Low Energy

Kapitel 3

Vorgehen

3.1 Inbetriebnahme des Modells der Machbarkeitsstudie

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

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

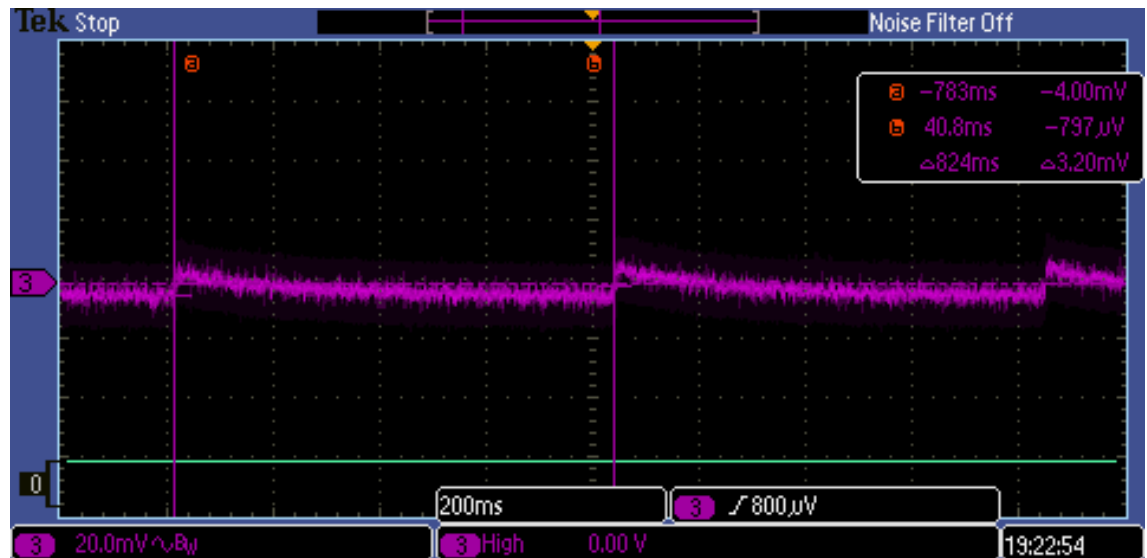
3.1.1 Kapazität für Harvesting-Schaltung verbessern

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

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

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

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

Abbildung 3.1: Rippelspannung bei Glättung mit 470 μF Kondensator

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.

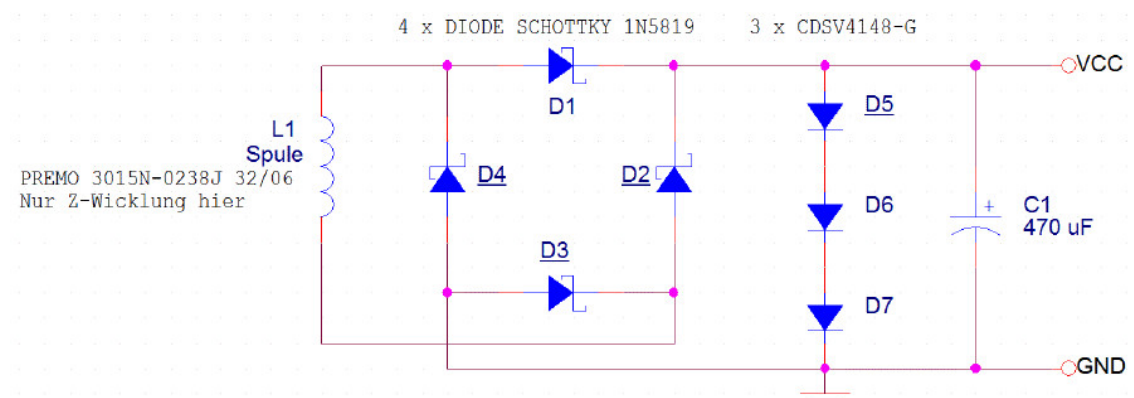


Abbildung 3.2: Messschaltung

3.1. INBETRIEBNAHME DES MODELLS DER MACHBARKEITSSTUDIE29

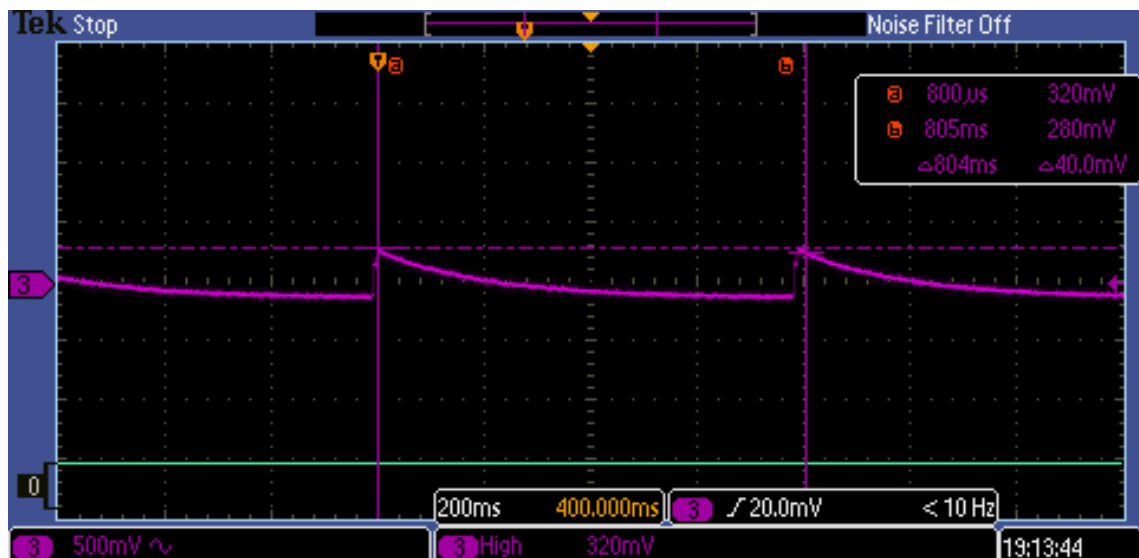


Abbildung 3.3: Rippelspannung mit 10 uF Kondensator

Resultat

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

Messungen Energy Management Board

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

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

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

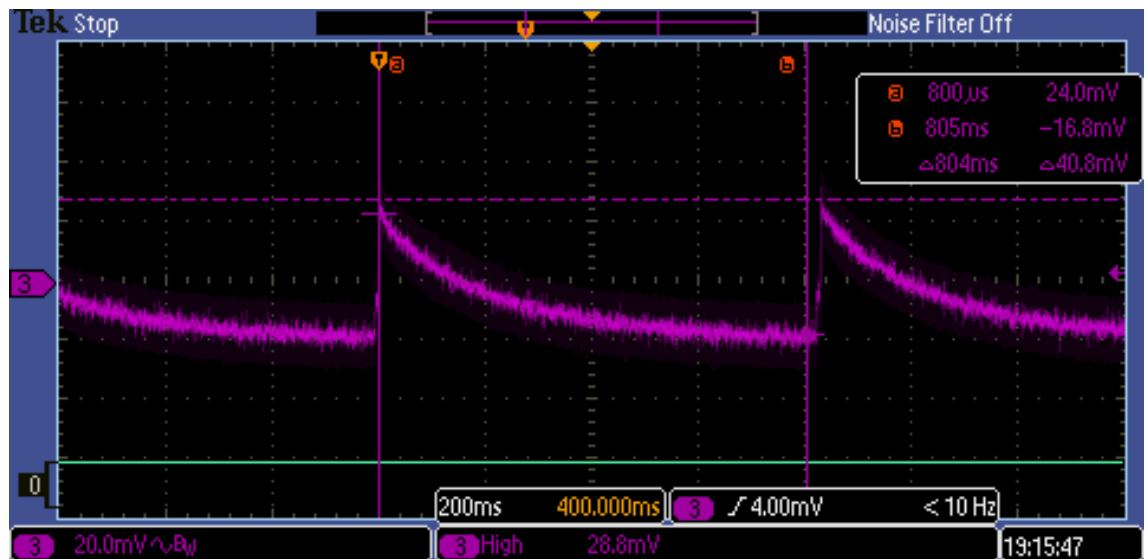
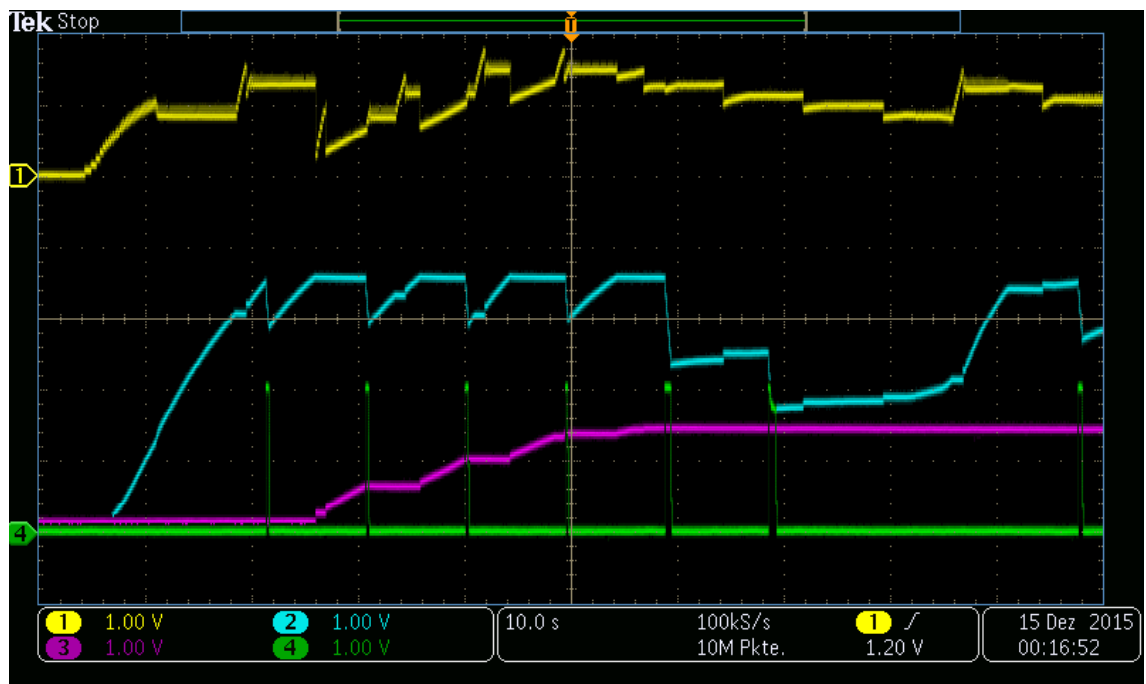
Abbildung 3.4: Ripplespannung mit 47 μ F Kondensator

Abbildung 3.5: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

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

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

3.2 Layout Print

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

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

3.2.1 Das Schema (oder der Stromlaufplan)

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

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

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

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

3.2.2 Optimierung der Harvesterschaltung

- Ives: Der Glättungskondensator wird auf 47 μF geändert. - Zu wenig Energie für 10 km/h

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

Optimierung der Spule

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

Optimierung des Gleichrichters

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

Optimierung des Limiter

Der Limiter ist eine 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 vom Messprotokoll einfügen.

Optimierung des Ausgangskondensators

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

3.2.3 Bauteildefinition

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

3.2.4 Das Layout

Positionierung

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

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

Gestaltung der Leiterbahnen

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

Ergebnis

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

3.2.5 Energiekalkulation

EHRV gesammelt, ϵ = BLE-Senden Zeitkomponente Energie Harvester braucht länger, verbraucht schneller.

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

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

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

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

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

Leistungsabgabe Harvester-Schaltung

Geschwindigkeit [km/h]	Maximale Leistung [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.

MPP einstellen

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

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

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

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

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

$$t = 147s$$

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

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

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

$$t = 147s$$

EM BOARD KONZEPT

Funktion generell beschreiben (im Anhang)

Schwellwerte

Ausrechnend der schwellwerte

Konfigurationen

Konfigurationseinstellungen

3.3 Low Power Einstellungen Sensortag

Problem: So gehört zu jedem Aufwecken einer Peripherie, der Parallele Schlafmodus, bis dass die Peripherie gestartet ist. (Dies gilt auch für die Sensoren.)
Zu lange warten: braucht Energie.

Sleep konkret: Power Banks abschalten: Power Domains zeigen

Schwierigkeit Interrupt and Events !!

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

3.3.1 VO: SimpleBroadcast

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

- Was überprüft werden musste, was gut ist.

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

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

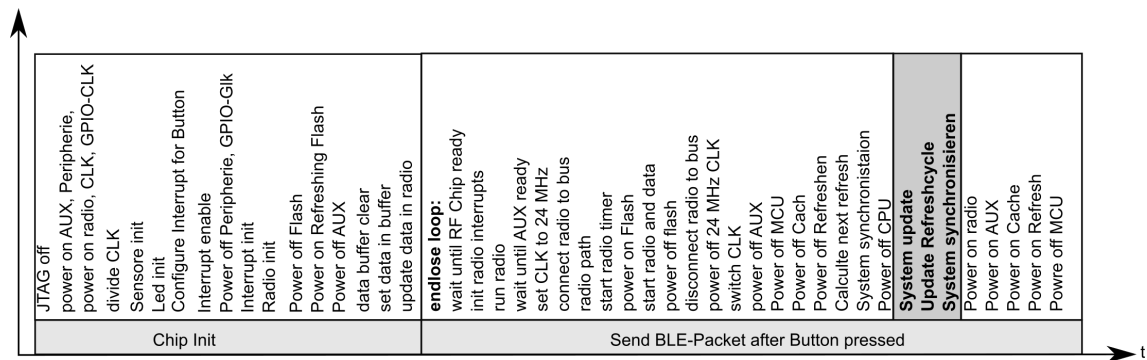


Abbildung 3.6: Prozessablauf V0

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

Da VSUP bei 1.8 V startet, ist zu überprüfen.

```
// RTC wakeup interval #define WAKE_INTERVAL_MS 1000 #define
WAKE_INTERVAL_TICKS WAKE_INTERVAL_MS*65536 / 1000
```

```
// Advertisment payload length in bytes #define ADVLEN 10
```

Gehen in den Standby modus. Wird eingestellt über die Datei pwr_ctr.c
 /h

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

3.3.2 V1

3.3.3 V2

3.4 Applikationsentwicklung

3.5 Option 1

Kapitel 4

Resultate

4.1 Harvester

4.2 Energiemanagement

4.3 Powermanagement

4.4 Applikation

Kapitel 5

Diskussion

Kapitel 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.

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

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

K. Manuel. Leistungsmaximum harvester, 2016.

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

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

6.2 Glossar und Abkürzungen

Clock Domain

Ein Bereich der Hardware, der mit demselben Takt läuft.

6.3 Abbildungsverzeichnis

6.4 Tabellenverzeichnis

Anhang A

Blockdiagramm EM8500

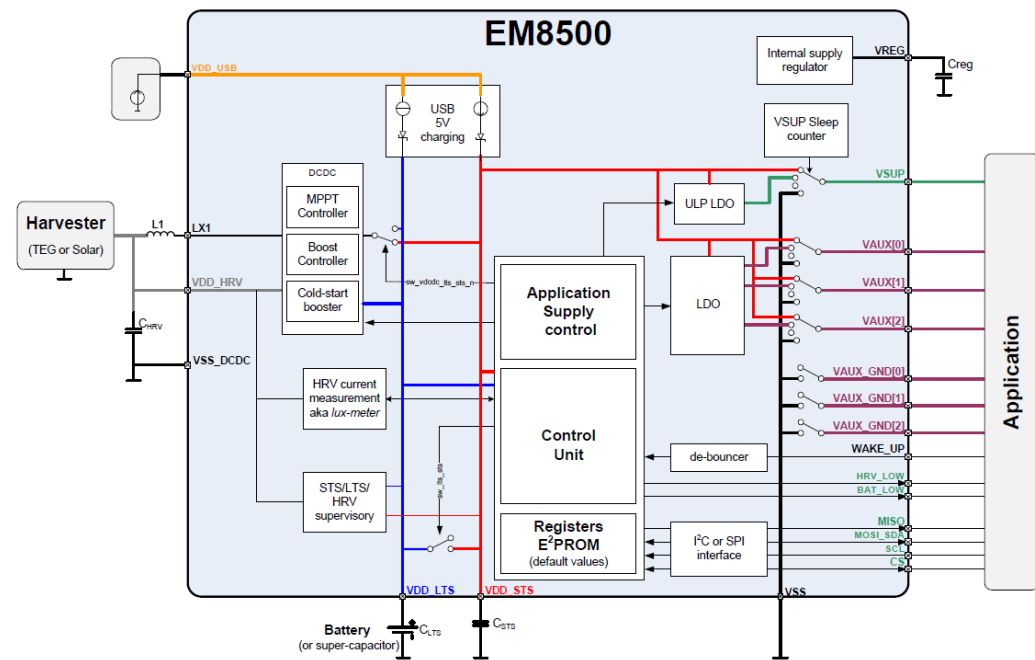


Abbildung A.1: Blockschema Sensortag

Anhang B

Referenz Sensortag von Texas Instrument

TI (2015)S.3

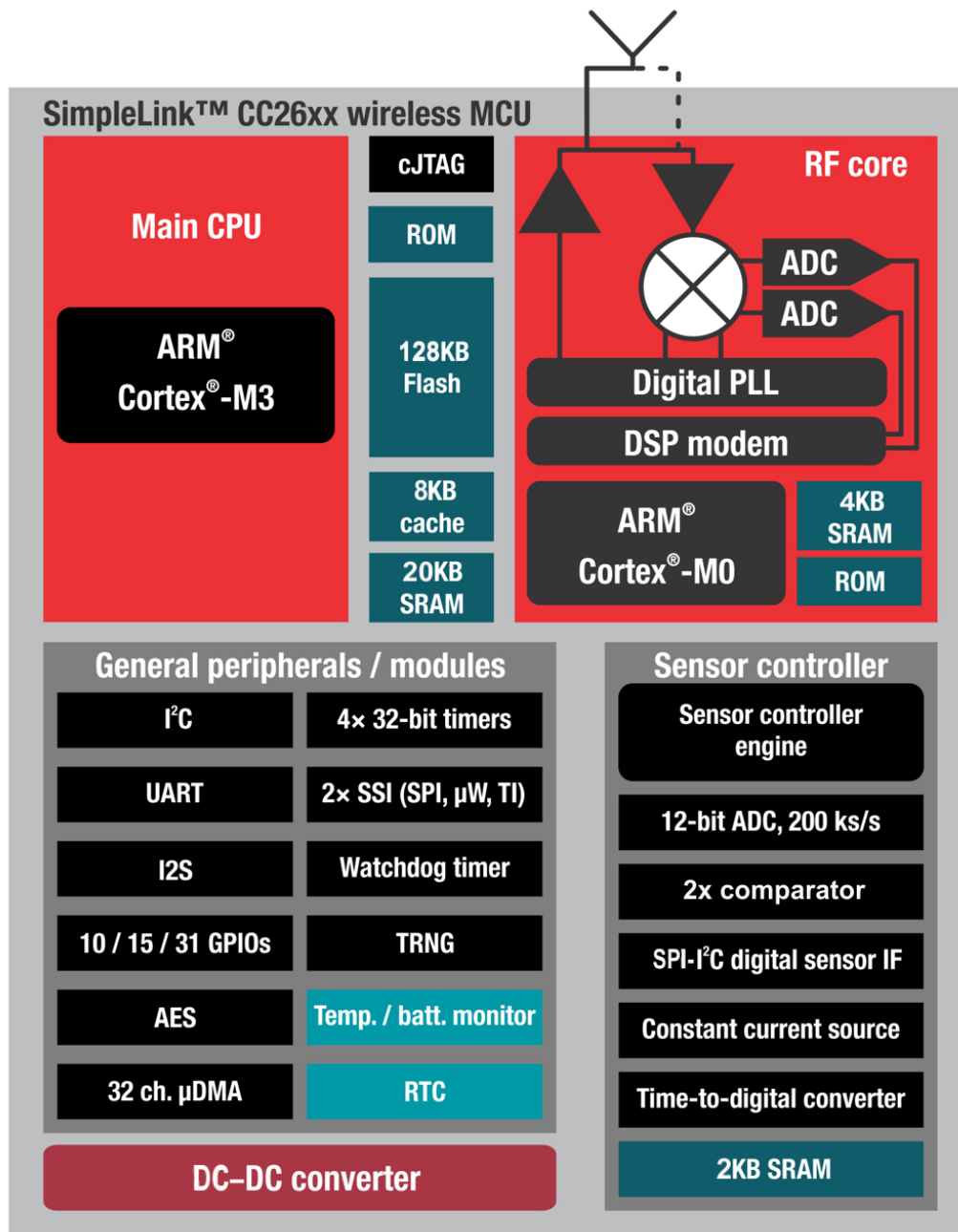


Abbildung B.1: Blockscheema Sensortag