

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	27. Mai 2016
-------	--------------

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ausgangslage	5
1.2	Definition der Aufgabenstellung	6
1.3	Übersicht der Aufgabenblöcke	7
2	Theoretische Grundlagen	9
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	11
	b. Konstanter Maximum Power Point zu dynamischem	12
2.2	Energy Management	13
2.2.1	Kontrollierte Energiespeicherung	14
2.2.2	Regelung des optimalen Leistungsbezugs	16
2.2.3	Booster definiert Spannung	16
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 Lesbarkeit	21
2.4	Bluetooth Low Energy	22
2.4.1	BLE im Vergleich zu Bluetooth	22
2.4.2	Advertising und Connected Mode	23
3	Vorgehen	25
3.1	Inbetriebnahme des Modells der Machbarkeitsstudie	25
3.1.1	Harvester-Schaltung	25
	a. Energy Management	26
	b. Power Management und Zusammenfassung der Arbeitsschritte	27
3.2	Layout Print	27

3.2.1	Das Schema (oder der Stromlaufplan)	27
3.2.2	Optimierung der Harvesterschaltung	28
	a. Optimierung der Spule	28
	b. Optimierung des Gleichrichters	29
	c. Optimierung des Limiter	29
	d. Optimierung des Ausgangskondensators	29
3.2.3	Bauteildefinition	29
3.2.4	Das Layout	30
	a. Positionierung	30
	b. Gestaltung der Leiterbahnen	30
	c. Ergebnis	30
3.3	Energy Management	30
3.3.1	Energiekalkulation	30
	a. MPP einstellen	31
3.4	Power Management	32
3.5	Applikationsentwicklung	32
4	Resultate	33
4.1	Harvesterschaltung	33
	4.1.1 Leistungskurve Harvester	33
	4.1.2 Harvesterausgang	34
	4.1.3 Wirkungsgrad der Schaltung	35
4.2	Energiemanagement	35
4.3	Powermanagement	36
4.4	Applikation	37
5	Diskussion	39
6	Verzeichnisse	41
6.1	Glossar und Abkürzungen	41
6.2	Abbildungsverzeichnis	42
6.3	Tabellenverzeichnis	43
Anhang		
A	Ausschreibung Bachelorarbeit	I
B	Blockdiagramm EM8500	III
C	Funktionsblöcke Sensortag von Texas Instrument	V

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" (?). 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.

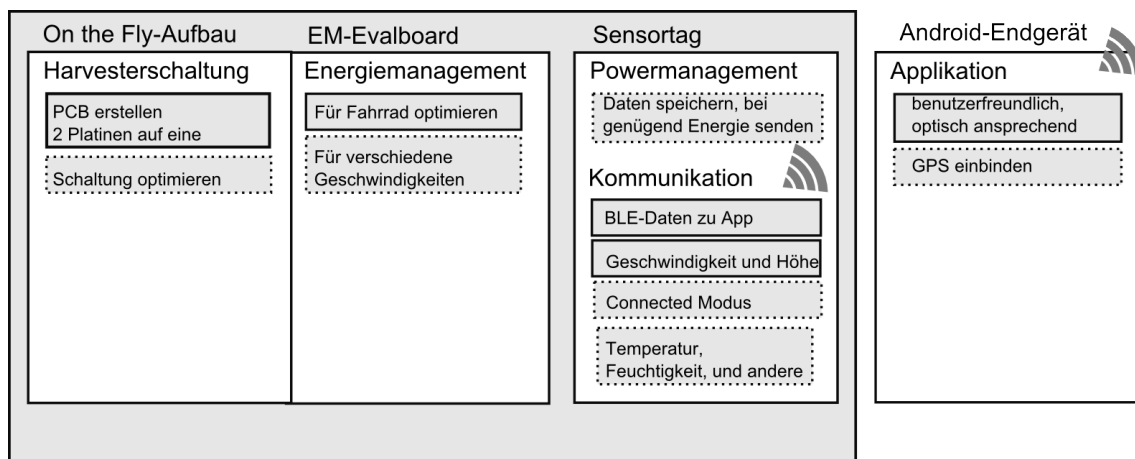


Abbildung 1.1: Arbeitsblöcke

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 μW -Bereich liegt, ist zuerst ein Sammeln der Energie notwendig, sodass Leistungen im mW -Bereich zur Verfügung stehen. Das nächste Unterkapitel 2.3 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.“[?] 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.

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 (?). Diese Harvestingmethode produziert ein Gleichstrom. Die Spannung am Ausgang ist konstant, da es sich um eine Stromquelle handelt. Grössen- 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: ?). Diese Harvestingmethode produziert eine Gleichspannung. Die produzierte Spannung ist vergleichsweise klein und bewegt sich im Bereich einiger 10 μV 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 ? 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).

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 μ 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 gewon-

nene 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 ?? zeigt, dieses unabhängige Verhalten.

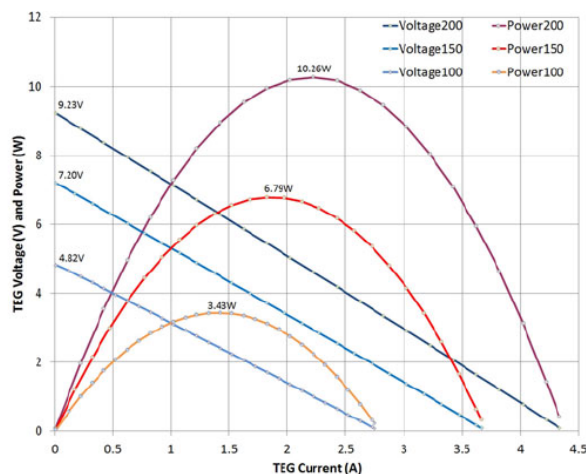


Abbildung 2.1: MPP TEG (?)

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 Bewegungsinduktion auf der Skala. Exemplarisch sind drei MPPT-Ratios einer Spule in der Abbildung ?? 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

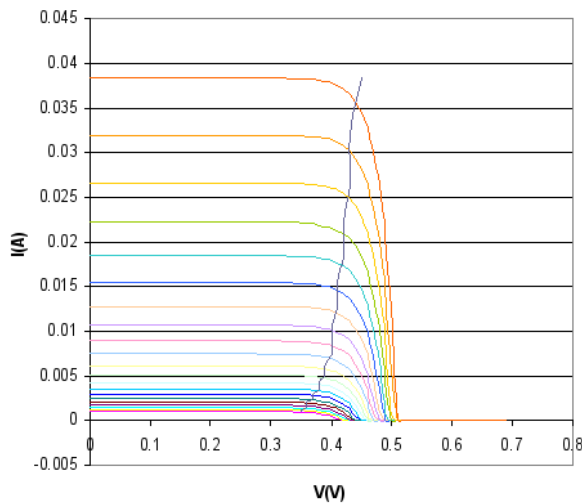


Abbildung 2.2: MPP Solarzelle (?)

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

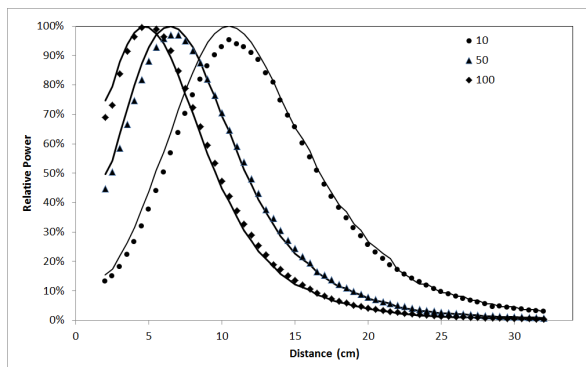


Abbildung 2.3: MPP Spule (?)

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 kon-

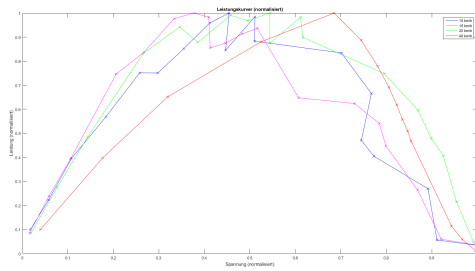


Abbildung 2.4: MPP Harvester (?)

trolliert 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 Primärkondensator ist mit VSTS in der Abbildung 2.5.

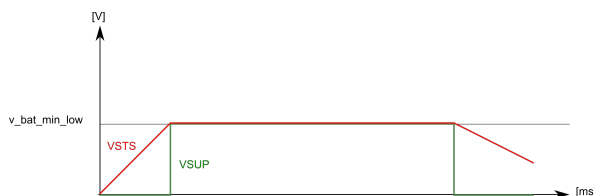


Abbildung 2.5: Grundprinzip Applikationsspeisung

Im EM8500 wird dies folgendermassen umgesetzt (Abbildung 2.6): Erreicht der Primärkondensator STS den Schwellwert $v_bat_min_low$, wird VSUP mit der eingestellten Spannung ge-

spiesen. Die Applikation sollte nicht alle Energie verbrauchen, sodass sich der Kondensator weiter lädt. VSUP folgt der Kondensatorspannung. 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 wird die Speisung der Applikation gestoppt.

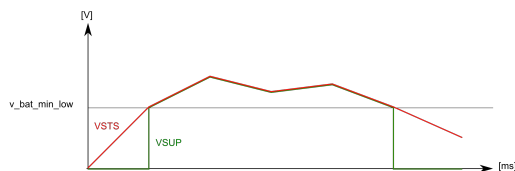


Abbildung 2.6: Applikationsspeisung EM8500

Der Primärkondensator 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-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_low` ist (siehe Abbildung 2.8).

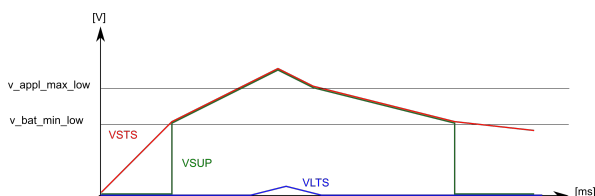


Abbildung 2.7: Sicheres Betreiben durch Long Term Storage-Kondensator

Im Datenblatt des EM8500 ? 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 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 (? 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.

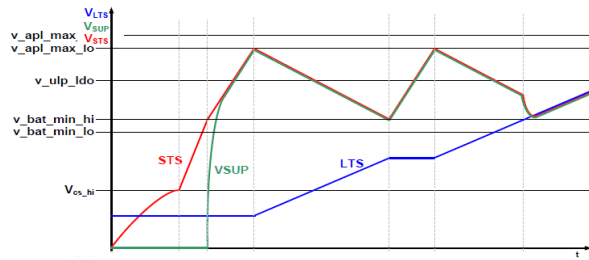


Abbildung 2.8: Konzept Hersteller (?)

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.

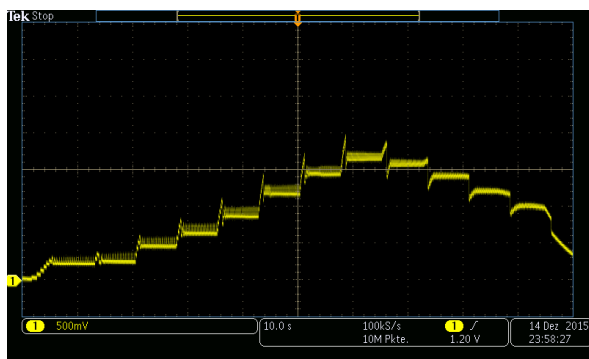


Abbildung 2.9: Leistungsmessung des Harvesters

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 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:

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

($E_{Applikation}$ 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:

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

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 Abbildung 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 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.

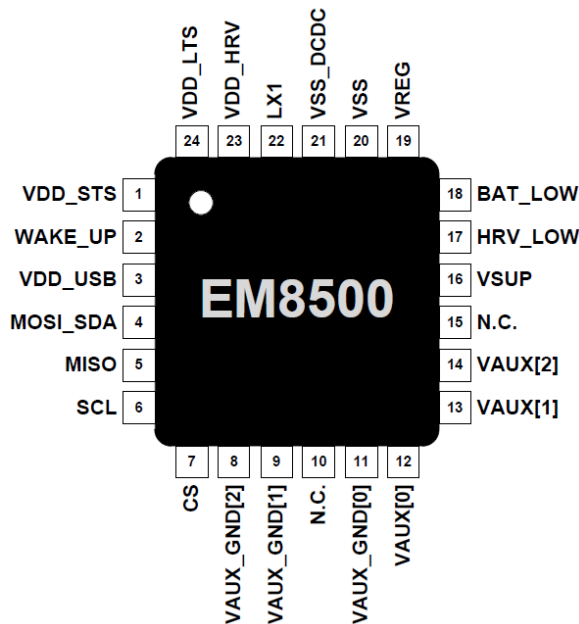


Abbildung 2.10: In- und Outputs EM8500 (?, p.11)

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 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.
- 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.

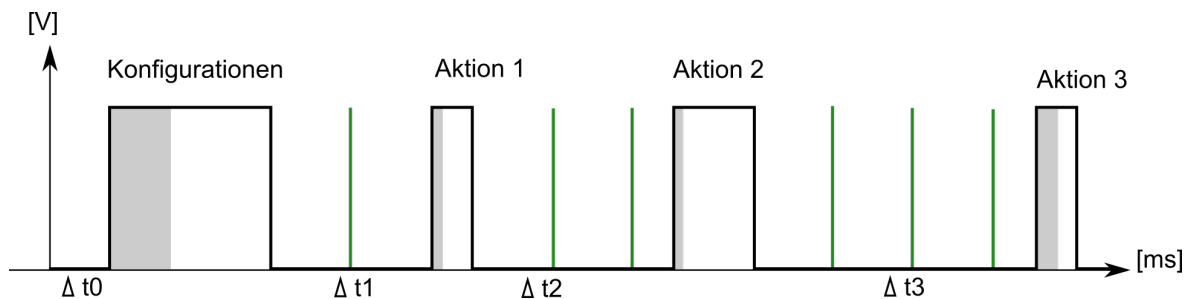


Abbildung 2.11: Schlafen zwischen Ausführungen

b. Schlafen innerhalb einer Aktion

Bei einer Applikation im μ - 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 eingeschalten und nach ausführen der Aktion wieder abgeschalten. Die Abbildung 2.12 zeigt dieses Prinzip mit UML dargestellt.

2.3.2 Interrupt Driven Appliacation

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

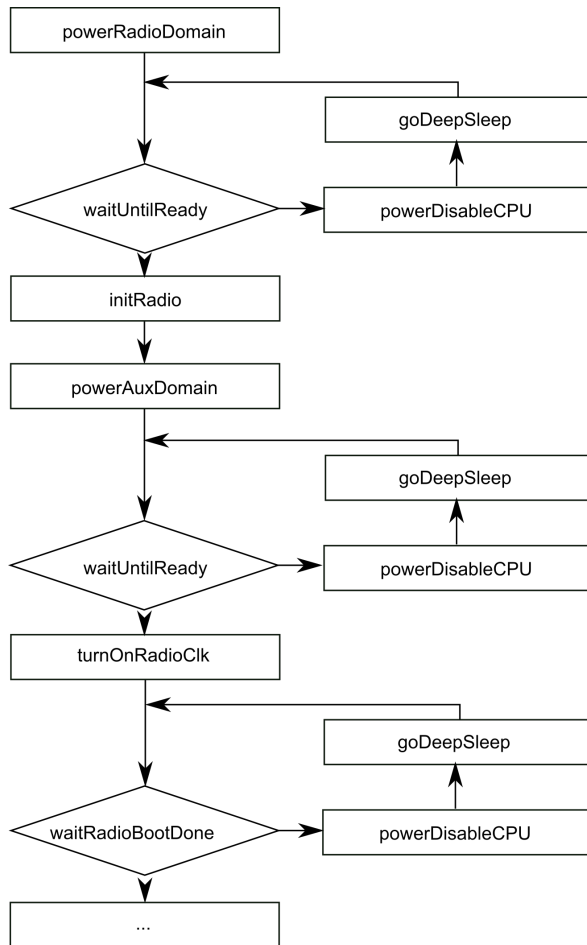


Abbildung 2.12: Schlafen innerhalb des Codes

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 Lesbarkeit

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 er-

sichtlich. Das Aufsetzen einer State Machine kann helfen. Die Abbildung 2.13 zeigt die Strukturierung von Interrupts und ihren Abhängigkeiten durch eine einfache State Machine.

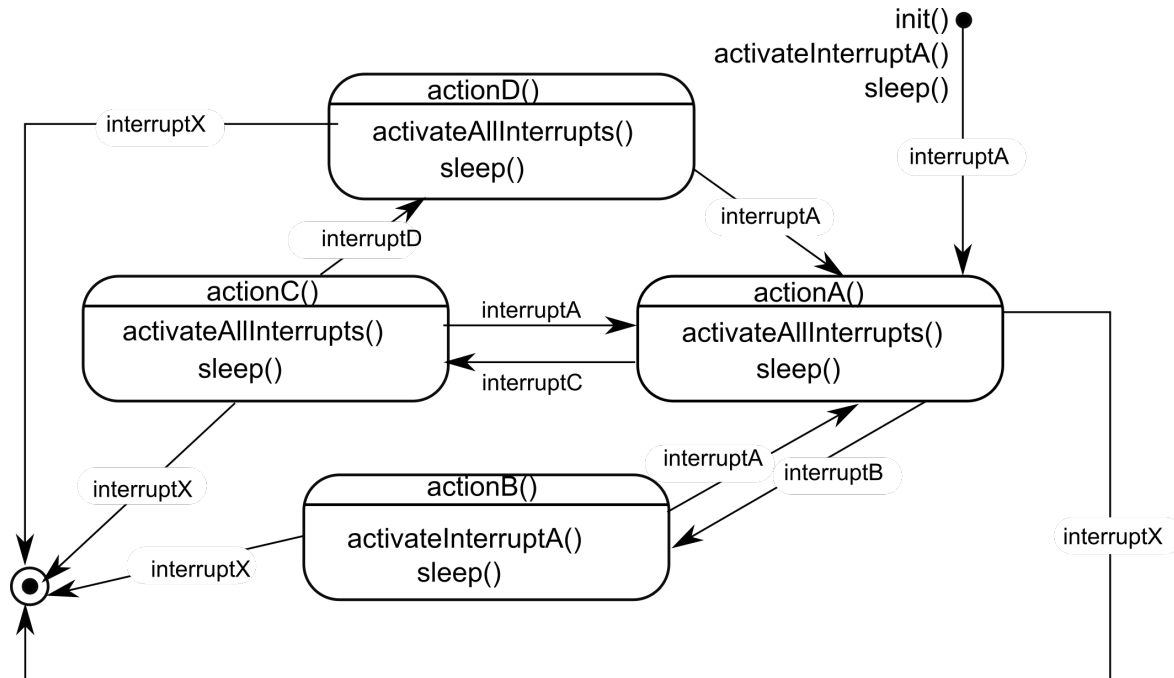


Abbildung 2.13: Struktur durch State Machine

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 (?, p. XX).

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. 40 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 (?, p. XX).

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. Die Verbindung ist bei den meisten Sensoranwendungen nicht notwendig, da die Daten einfach gesendet werden können und das empfangende Gerät entscheidet was mit den vorliegenden Daten gemacht wird. 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 (?, p. XX).

3

Vorgehen

Als erstes wird der Aufbau der vorangehenden Arbeit von Roman Schneider und Daniel Studer ? in Betrieb genommen 3.1 und geklärt, welche Funktionalitäten verbessert werden sollen und wie das Endprodukt auszusehen hat. Dies geschah in Absprache mit Prof. Dr. M. Meli und dem Resarch Assitenten Dario Düner vom Instiut of Embedded Systems (InES). Auf der CD finden sich die Sitzungsprotokolle über die getane Arbeit, die offenen Fragen und die Entscheidungen, in welche Richtung weiterentwickelt werden soll. Nach der ersten Klärung, entstanden untenstehende vier Arbeitsschritte. Jeder dieser Schritt wird in einem Unterkapitel beschrieben.

1. Print erstellen
2. Energy Management optimieren
3. Power Management im Sensortag optimieren
4. Entwickeln einer BLE-Applikation

3.1 Inbetriebnahme des Modells der Machbarkeitsstudie

3.1.1 Harvester-Schaltung

Text Manu

a. Energy Management

Die Inbetriebnahme bestätigt das beschriebene Verhalten der Machbarkeitsstudie ? S.36, das in der Abbildung 3.1 dargestellt ist:

- Ist der STS ($470\ \mu\text{F}$) geladen, genügt die geerntete Energie zum Versenden von 4 BLE-Paketen im Abstand von 10 s
- Das Nutzen der Energie (VSUP) funktioniert über den Sensortag-Timer zuverlässig
- LTS lädt sich, wird aber nicht verwendet
- Der Verlauf des geregelten Harvester-Eingangs ist teilweise chaotisch und mit abrupten Wechslern. 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.

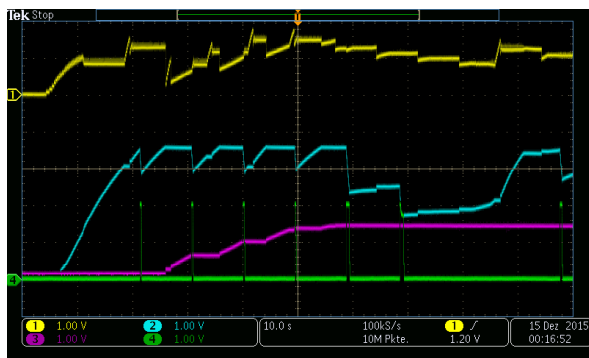


Abbildung 3.1: Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie

Legende zu Abbildung 3.1

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

Daraus ergab sich folgende konkrete Aufgaben zu den vier Arbeitsschritten: Ziel der Harvesterentwicklung ist, dass die geerntete Energie mehr als vier Pakete alle 10 s senden kann und die Wirkung eines kleineren Eingangskondensators soll geprüft werden.

Der Fokus der Energieoptimierung ist, dass die Kondensatoren nicht im Voraus geladen werden müssen und dass bei 10 km/h genügend Energie für das Versenden von BLE-Paketen besteht. Zudem sollen die eingestellten Schwellwerte überprüft werden, sodass LTS sich ebenfalls entlädt.

b. Power Management und Zusammenfassung der Arbeitsschritte

Das Power Management geht Hand in Hand mit dem Energy Management. Die Abbildung 3.1 zeigt, dass beim Modell der Machbarkeitsstudie das Nutzen der Energie über VSUP über den Sensortag-Timer zuverlässig funktioniert. Aus den Sitzungen ergab sich der Bedarf, dass bei schnellerem Fahren und höherer Leistung, das Senden der Pakete dem Energiebedarfs angepasst werden soll. Die fixe Wartezeit von 10 s soll der Geschwindigkeit angepasst werden. Zusammenfassend lassen sich nach der Inbetriebnahme folgende Aufgaben festhalten:

1. Harvesterschaltung optimieren
2. Auswirkung des zu hohen Kondensator vor Harvestereingang testen
3. Konfigurationen beim EM8500 überarbeiten
4. Power Management flexibler gestalten

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 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.
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. .

Hier Schluss
wort von
Messprotok
einfügen

c. Optimierung des Limiter

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

Hier Schluss
wort von
Messprotok
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 Harvestererschaltung zu hoch ist und der EM8500-Chip ebenfalls nicht mehr richtig regeln kann. .

Hier Schluss
wort von
Messprotok
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.

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 Energy Management

3.3.1 Energiekalkulation

Donners-
Abend

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 [μW]
10	74.4
20	unbekannt
40	unbekannt

Tabelle 3.1: Leistungsabgabe Harvester-Schaltung

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

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

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

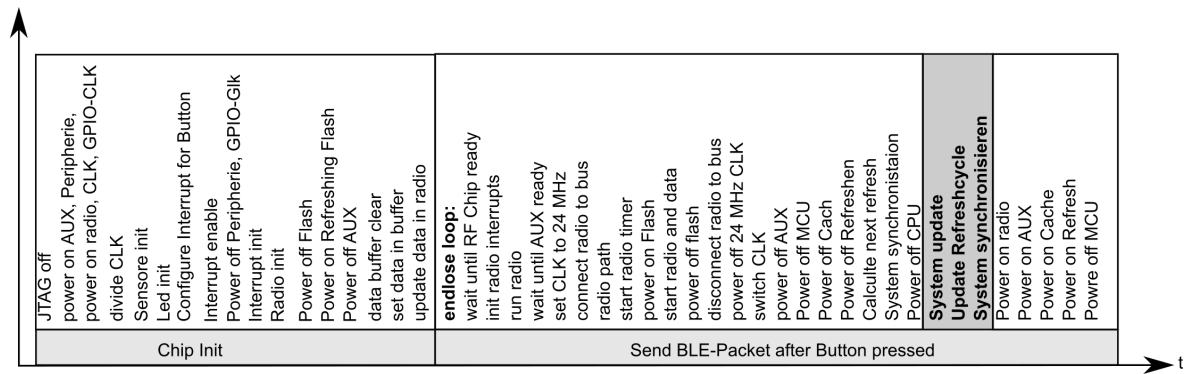


Abbildung 3.2: Prozessablauf V0

EM BOARD KONZEPT

Schwellwerte

Konfigurationen

3.4 Power Management

3.5 Applikationsentwicklung

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.

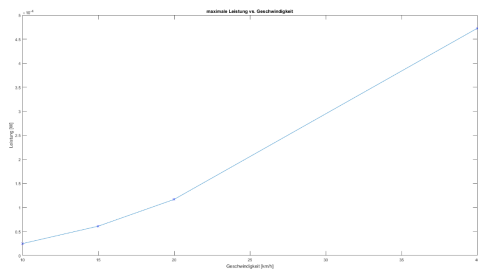


Abbildung 4.1: Maximale Leistung vs. Geschwindigkeit

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.

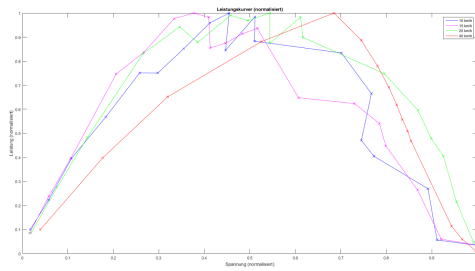


Abbildung 4.2: Leistungskurve (normalisiert)

4.1.2 Harvesteroutput

Die Spannung am Harvesteroutput 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.

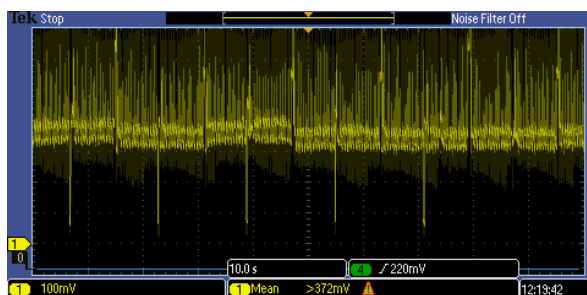


Abbildung 4.3: Spannung VCC bei 15 km/h

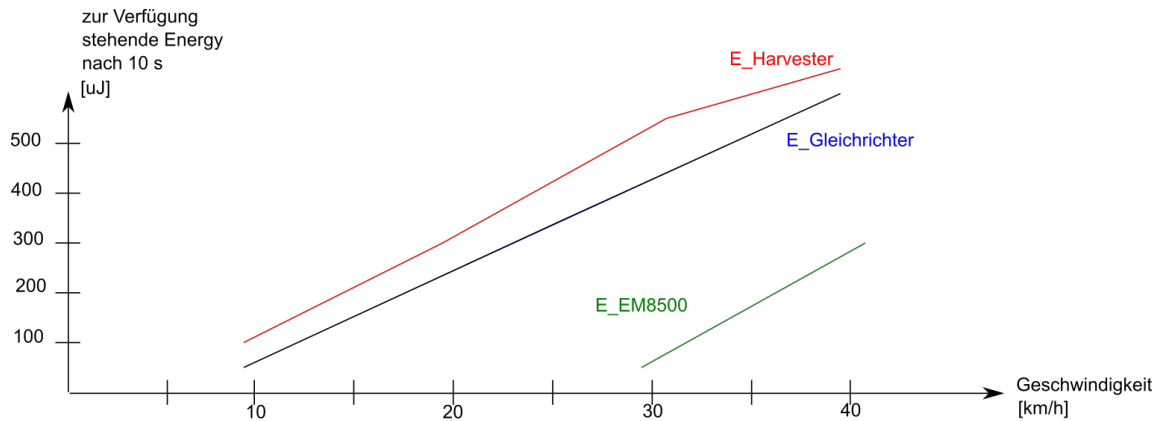


Abbildung 4.4: Energiegewinn Zusammengefasst nach Stelle in der Schaltung

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.

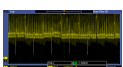


Abbildung 4.5: STS und LTS laden sich

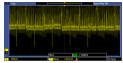


Abbildung 4.6: LTS liefert Energie für die Arbeitspakete

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.

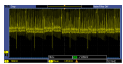


Abbildung 4.7: Drei Arbeitspakete bis zum Senden der Daten

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

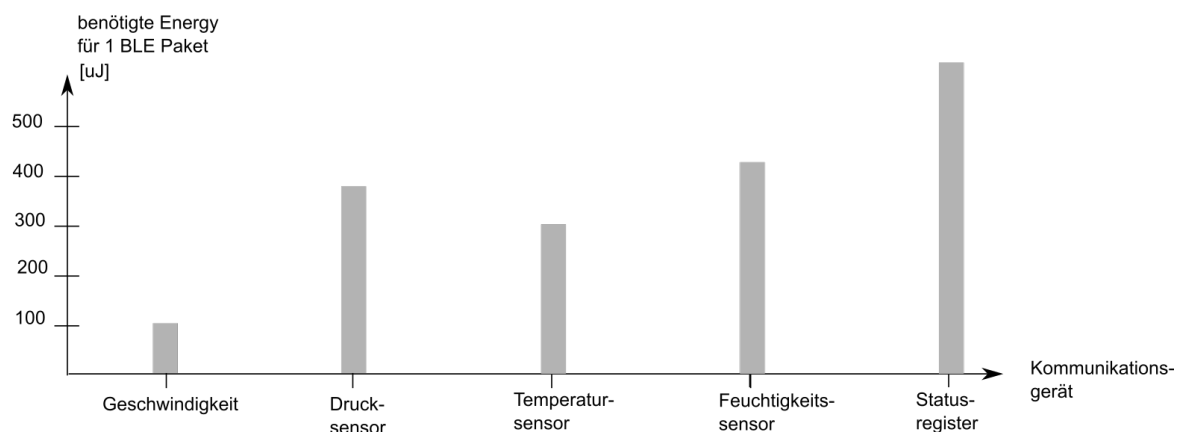


Abbildung 4.8: Energieverbrauch gemäss Verarbeitungsaufwand für CPU

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

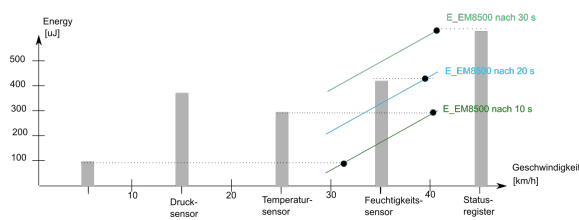


Abbildung 4.9: Energieverbrauch gemäss Verarbeitungsaufwand für CPU

4.4 Applikation

Bilder der App

Sniffer Screenshot

Beweis, dass Pakete ankommen

ev. Video zeiger (auf CD)

5

Diskussion

Es ist machbar. Ein Eout

Stellen zum Optimieren sind definierbar

Abbildung: Beides zusammen.

6

Verzeichnisse

6.1 Glossar und Abkürzungen

Clock Domain

Ein Bereich der Hardware, der mit demselben Takt läuft.

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 Zu-

stand 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.

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Arbeitsblöcke	7
Abbildung 2.1	MPP TEG (?)	12
Abbildung 2.2	MPP Solarzelle (?)	13
Abbildung 2.3	MPP Spule (?)	13
Abbildung 2.4	MPP Harvester (?)	14
Abbildung 2.5	Grundprinzip Applikationsspeisung	14
Abbildung 2.6	Applikationsspeisung EM8500	15
Abbildung 2.7	Sicheres Betreiben durch Long Term Storage-Kondensator	15
Abbildung 2.8	Konzept Hersteller (?)	16
Abbildung 2.9	Leistungsmessung des Harvesters	16
Abbildung 2.10	In- und Outputs EM8500 (?, 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 3.1	Spannungswerte Modell der Machbarkeitsstudie	26
Abbildung 3.2	Prozessablauf V0	32

Abbildung 4.1	Maximale Leistung vs. Geschwindigkeit	33
Abbildung 4.2	Leistungskurve (normalisiert)	34
Abbildung 4.3	Spannung VCC bei 15 km/h	34
Abbildung 4.4	Energiegewinn Zusammengefasst nach Stelle in der Schaltung	35
Abbildung 4.5	STS und LTS laden sich	35
Abbildung 4.6	LTS liefert Energie für die Arbeitspakete	35
Abbildung 4.7	Drei Arbeitspakete bis zum Senden der Daten	36
Abbildung 4.8	Energieverbrauch gemäss Verarbeitungsaufwand für CPU . .	36
Abbildung 4.9	Energieverbrauch gemäss Verarbeitungsaufwand für CPU . .	37
Abbildung A.1	Offizielle Ausschreibung der Arbeit	II
Abbildung B.1	Blockschema Sensortag	IV
Abbildung C.1	Blockschema Sensortag	V

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Leistungsabgabe Harvester-Schaltung	31
-------------	---	----

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

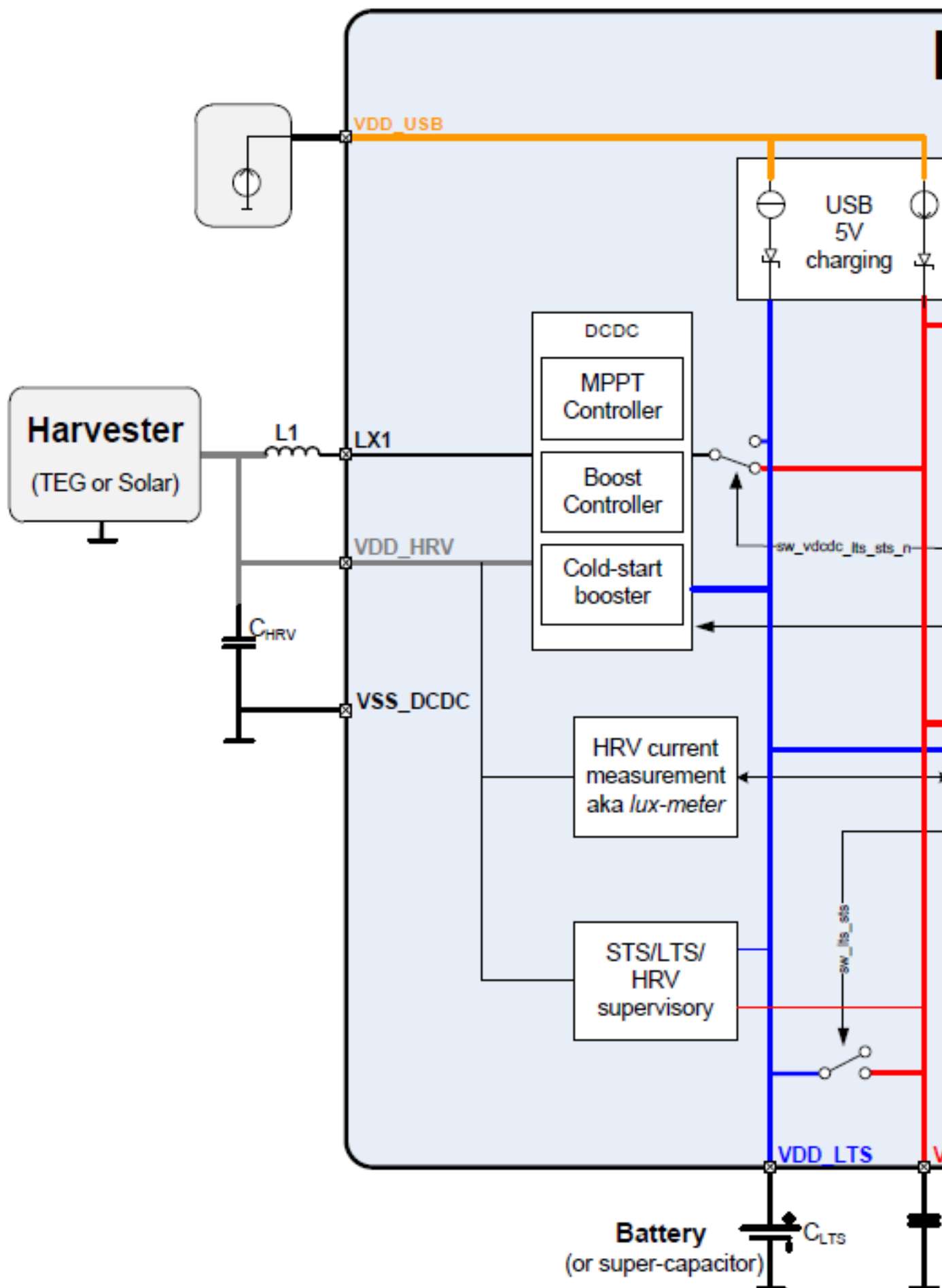


Abbildung B.1: Blockschema Sensortag

Anhang C

Funktionsblöcke Sensortag von Texas Instrument

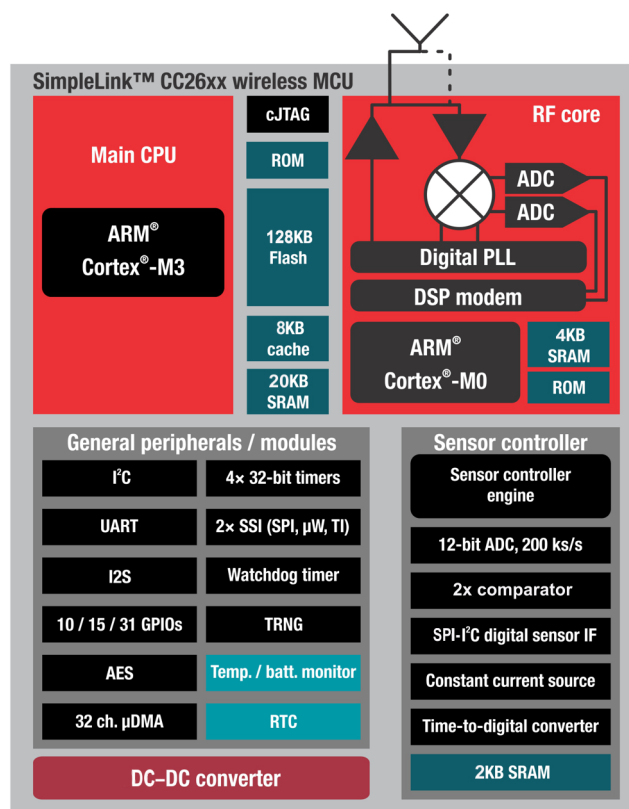


Abbildung C.1: Blockschema Sensortag

?S.3