

Entwicklung und Optimierung von Low-Power Funksysteme (ZigBee / Bluetooth Low Energy BLE) mit Hilfe dynamischer Strommesstechnik

(Präsentiert an der ECC 2011, Winterthur, 30 August 2011)

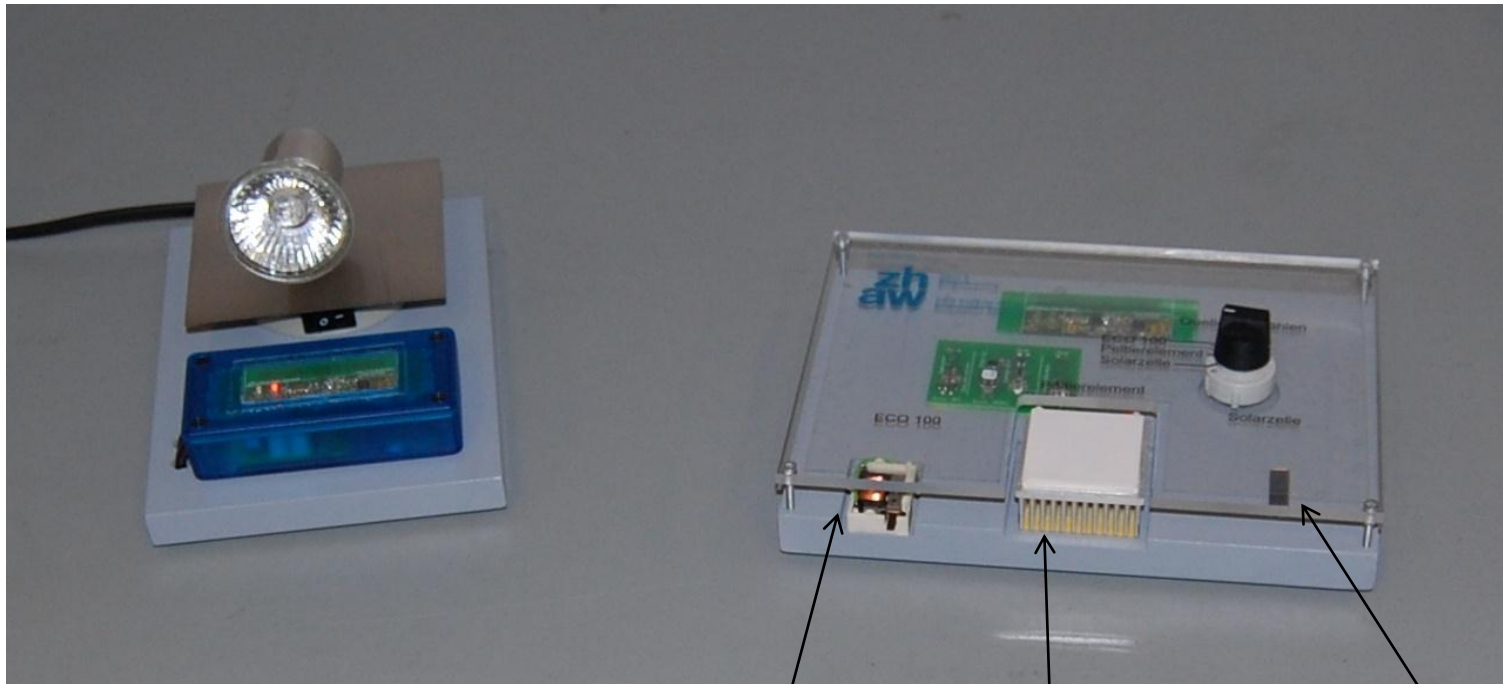
Abhilash Kizhakenath (BSc electronics)

Kontakt: ines@zhaw.ch

- Vorstellung InES, Wireless System Group
- Einführung und Motivation
- Instrumente für dynamische Strommessungen
- Beschreibung des Testobjekts
- Messungen mit verschiedenen Parametern
- Schlusswort
- Fragen

- Zeitsynchronisation mittels IEEE1588
 - Redundancy Protocols (MRP, PRP)
 - Audio/Video Bridge
 - FPGA Implementationen
 - Profinet (PINO, easyIRT, easyIO)
 - Ethernet Powerlink
 - Wireless System Group
 - WPAN, RFID (Passive Intelligent 32Bit MCU), UWB usw.
 - Energy Harvesting, Low-Power Applikationen
- <http://ines.zhaw.ch>

- Funksystem mit verschiedenen Energie Harvesting (EH)
 - Empfänger und Ansteuerung einer Lampe
 - Sender für ZigBee/ BLE und arbeitet mit verschiedenen Quellen

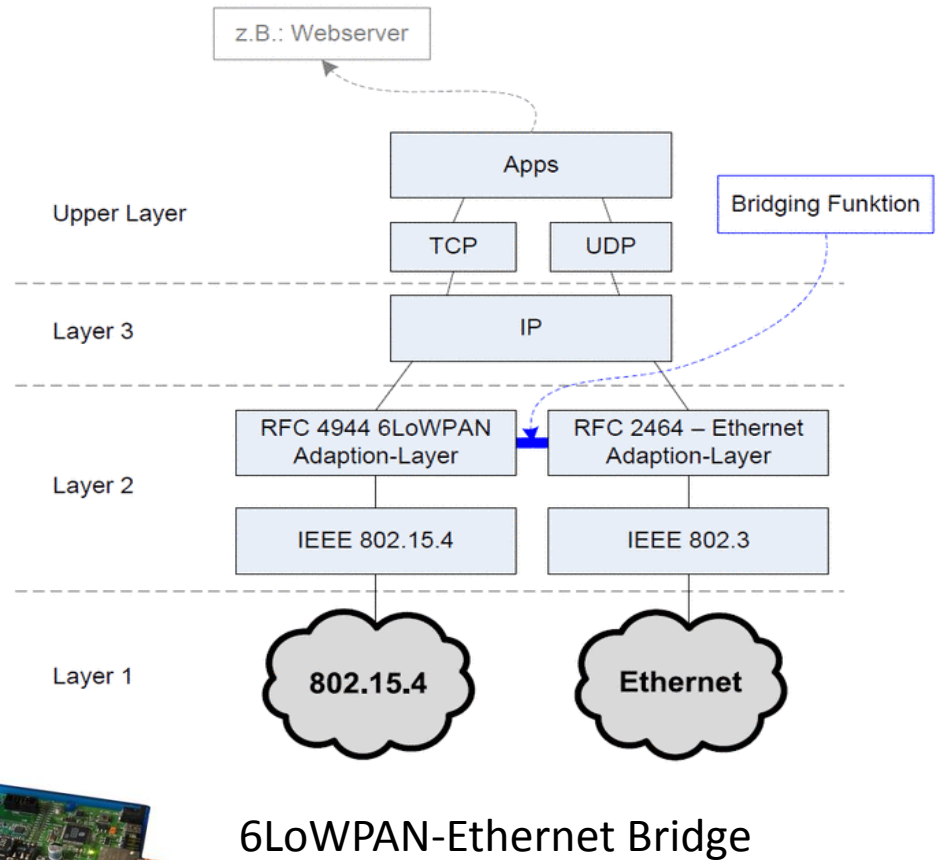
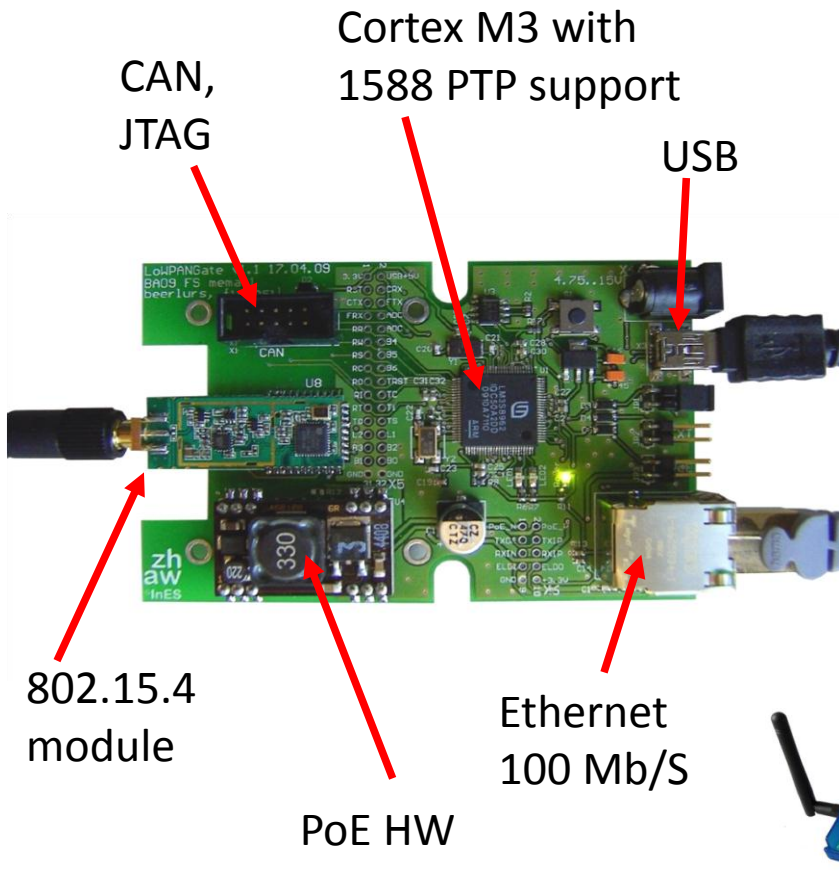


Electro-dynamic

Seebeck

Solar

- 6LoWPAN-Ethernet Bridge



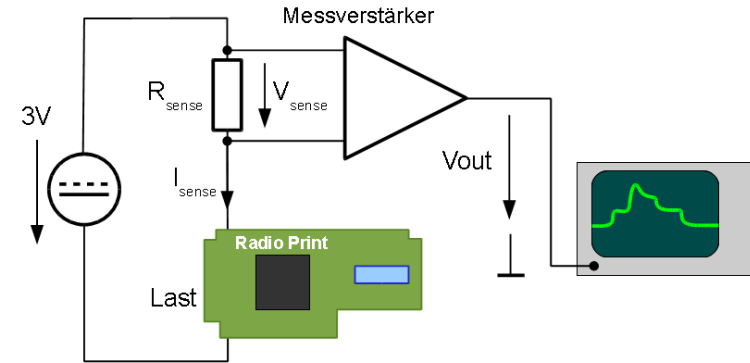
- Ein Ziel eines Low-Power Designs ist ein energieunabhängiger Betrieb für eine akzeptable Dauer.
 - Einsatz von Energy-Harvesting-Quellen (EH) für einen Wireless Node.
 - Falls EH nicht möglich ist, eine Batterie als Quelle einsetzen
 - Die Batterielebensdauer verbessern.
- Ein anderer Punkt für Low-Power Designs ist der Einsatz von sehr kleinen Batterien. Vor allem wenn der Platz für den Wireless Node sehr gering ist.
 - Hohe Strompeaks kann die Lebensdauer der Batterie verschlechtern.
- Aus diesen Gründen ist es wichtig den Verbrauch während der Design- und Testphasen aufzunehmen, um gefährliche Stromspitzen zu vermeiden.

- Datenblätter helfen nur bedingt bei der Analyse des dynamischen Verbrauchs.
- Viele Parameter über den Stromverbrauch sind nicht (oder können nicht) spezifiziert.
 - Chip-Hersteller spezifizieren meist vorteilhalber für sich
 - Wieviel Energie wird beim Power-On-Reset gebraucht?
 - Die Stromaufnahme bei einer gebrauchten Taktfrequenz?
- Bei den meisten Systemen, die aus verschiedenen ICs bestehen, wird die Optimierung anhand der Datenblätter gemacht.
 - Alle Parameter in einem Gerät einzukalkulieren ist schwierig und zeitaufwendig.
- Ein Gerät mit der Fähigkeit den Energieverbrauch in verschiedenen Betriebsarten aufzunehmen, wäre ein Vorteil (ein Bedarf) im Bereich der Energieoptimierung, Debugging, usw.

- Folgende Eigenschaften sollte ein Messgerät für die Aufnahme von dynamischen Strömen aufweisen:
 - Minimale Störung am Testobjekt
 - Schnelle Reaktionszeit
 - Wireless Operationen werden in wenigen Mikrosekunden ausgeführt
 - Möglichkeit zwischen Nanoamper bis paar Milliampere zu messen
 - Speisespannung des Testobjekts kann zwischen 1V und den Standard 3.3V, 5V liegen
 - Synchronisierung mit der Mikrokontrollersoftware (Triggern auf Events)
 - Messung von der Spannung am Testobjekt
 - Keine Offset-Spannungen an den Sens-Pins

- Eigenes Gerät:

- Entwickelt mit verschiedenen ICs
 - High-Side-Current Mess-ICs
 - ICs von Maxim, Linear Technologies, usw.
- In Kombination mit einem Oszilloskop
 - Der gemessene Strom wird in Spannung im Scope angezeigt
- Sehr günstig
 - Der BOM ist < 50Fr.
 - Kann innerhalb eines Tages gebaut werden.
- Ermöglicht Messung in der Bandbreite von 200kHz (IC abhängig)
 - Natürlich auch abhängig vom Verstärkungsfaktor
- Nicht geeignet für Auto-Range Messungen
 - Verschiedene Geräte für verschiedene Messbereiche
- Minimal messbarer Strom liegt zwischen 100nA – 2uA (IC abhängig)
- Diese Lösung genügt, falls Genauigkeit und Auto-Messung nicht nötig sind.



- Hitex PowerScale mit ACM Probe
 - Nur wenige Merkmale sind hier aufgeführt. Für mehr Infos:
 - www.hitex.com/index.php?id=powerscale
 - Spezifikationen:
 - Sampling Rate 100 kHz
 - Strommessbereich: 200nA – 500mA
 - Verbunden mit Hitex-Debugger
 - ermöglicht den Stromverbrauch während dem Debuggen zu sehen
 - Software Power Analyser
 - Limitiert auf wenige Funktionen
 - ACM Probe hat einen Offset von 1V
 - Verunmöglicht Messungen mit Energy Harvesting Quellen
 - Umgänglicher Preis
 - Dieses Instrument war für einige Messungen zu langsam

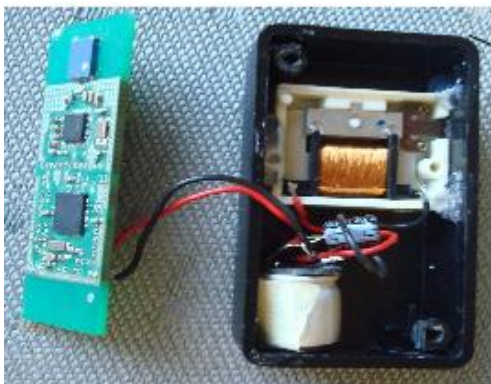


Instrumente für dynamische Strommessungen

- Agilent Power Analyzer tool (N6781A)
 - Besuchen Sie diese Seite für mehr Infos:
 - www.agilent.com/find/N6781
 - Übergangslose Verlauf des Messbereichs
 - Instrument ändert den Strombereich (die Ausgangsspannung wird stabil gehalten) neu patentierte Eigenschaft
 - Genauigkeit beim tiefsten Strommessbereich 10uA: 0.025% + 8nA
 - Sampling Rate bis zu 200kHz (5us)
 - Analysis Software kann die gebrauchte Energie berechnen (Joule)
 - Messungen können über externe Events getriggert werden
 - Ein paar weitere Eigenschaften, ist auch der Grund für den Preis:
 - Oszilloskop, Arbitrary Waveform Generator und Datalogger
 - Viele Messungen wurden mit diesem Instrument gemacht.
 - Zum Teil war auch dieses immer noch langsam.



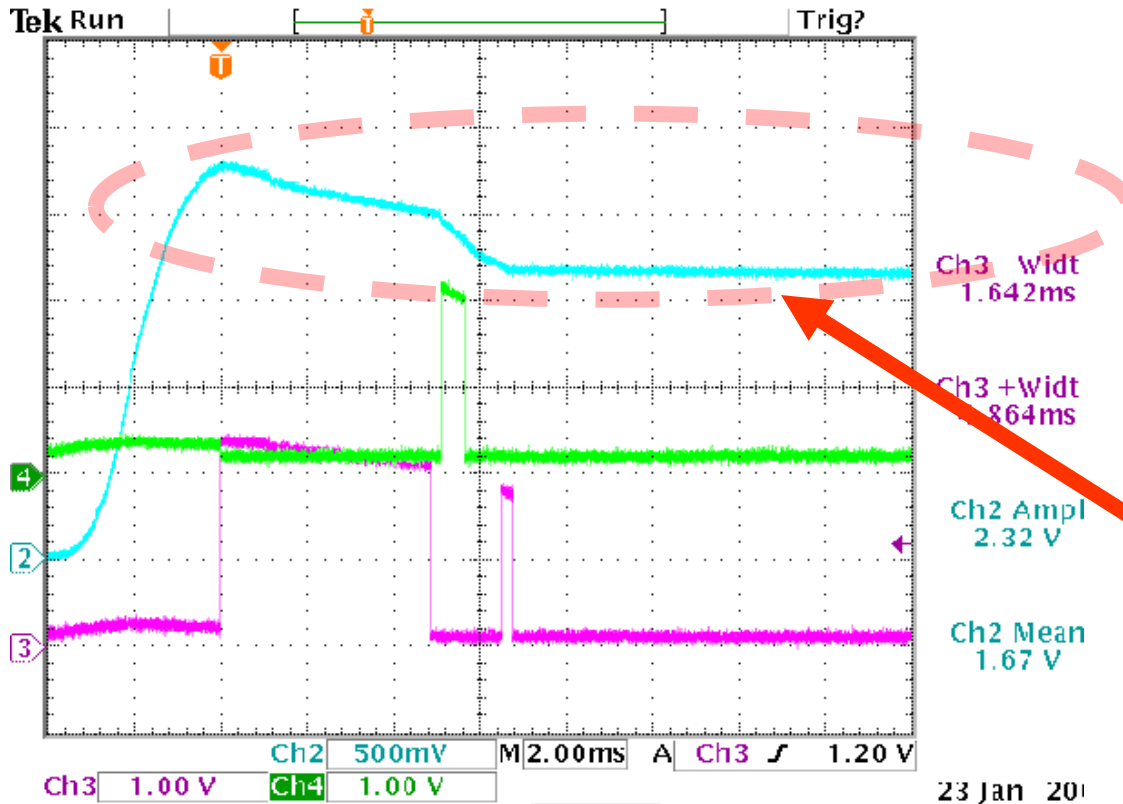
- Als Testobjekt wird ein Schalter analysiert, der mit der Energie eines Elektrodynamischen Harvester eine Lampe EIN/AUS schaltet
 - Beim Aktivieren des Schalters werden ZigBee kompatible Frames geschickt
 - Mehr als 30 Bytes werden gesendet. Der Schalter generiert ca. 200 Microjoules
 - In diesem Fall ist die Energieoptimierung sehr komplex, dabei ist die dynamische Strommessung eine grosse Hilfe.
 - Die Ergebnisse sind für viele Low-Power Systeme relevant.



No Batteries, No maintenance

Testobjekt: Energie Anforderung

- Die Energie um zu senden und den nicht-flüchtigen Speicher zu aktualisieren muss garantiert sein.



Die meisten Komponenten funktionieren zwischen 1.8V und 3.6 Volt

⇒ Die Spannung muss hoch genug sein

Bei zu hoher Spannung verliert man zuviel Energie

Zu tief: der APS-Counter kann nicht aktualisiert werden

CH2: Energie vom Harvester mit MCU+ Transceiver als Last
CH3 & CH4 zeigen die Aktivitäten des MCU

- Im Moment werden die Frames (> 30 Bytes) mit +3dBm gesendet und im EEPROM wird der APS-Counter aktualisiert.
- Folgende Punkte werden analysiert (andere Zustände sind im Datenblatt enthalten):
 - Start-Up-Energie
 - EEPROM lesen/schreiben:
 - EEPROM schreiben braucht meistens viel Zeit und somit viel Energie. Die Zeitpunkt zum ausführen dieser Aktivität ist sehr wichtig.
 - Prozessor-Taktrate:
 - Mit der richtigen Taktrate kann verhindert werden, dass zuviel Energie beim warten auf ein Event verloren geht.
 - Bei Energy Harvesting muss die Leakage (IC und Energiespeicher) minimal gehalten werden, dass kann mit zu lange warten erhöht werden.

Testobjekt (Bluetooth Low Energy BLE)

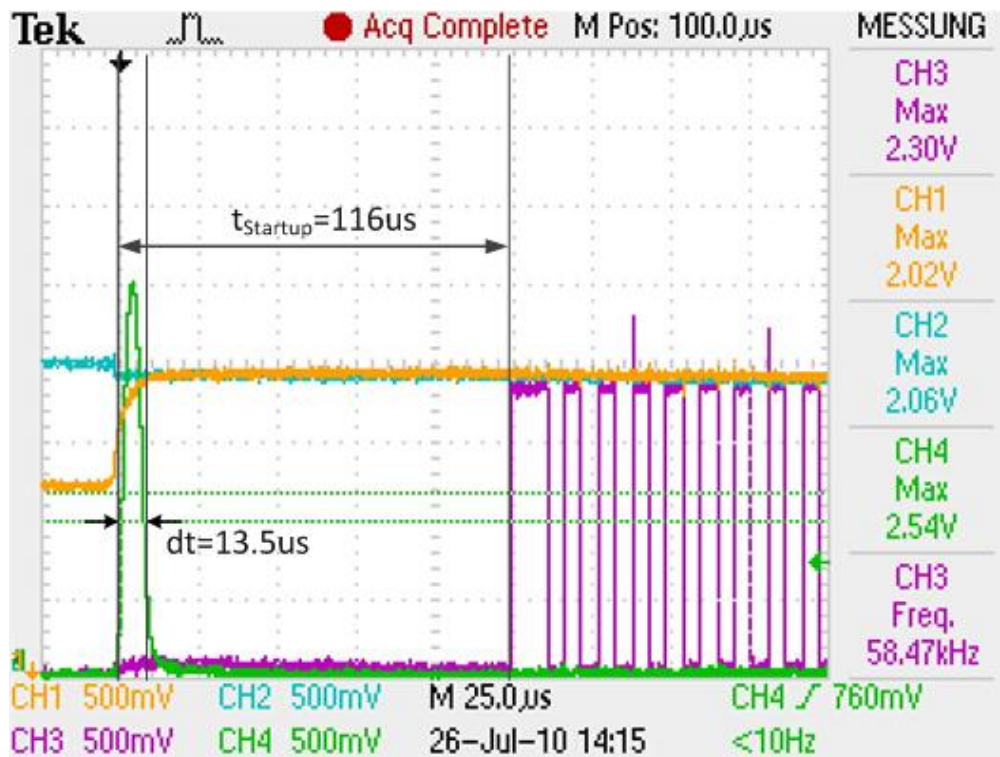
- CC2540 -Slave
 - Ist ein MCU mit integriertem BLE-Transceiver
- Energieberechnung beim Verbindungsaufbau



- Energieverbrauch bei Start-Up ist wichtig und man sollte dies soweit wie möglich reduzieren.
- Der Start-Up ist entscheidend bei Applikation die von 0 Volt starten:
 - Start-Up-Verbrauch ist in den meisten Datenblätter nicht erwähnt.
 - Die Power-On-Reset(POR) Verbrauch
 - Meistens nicht erwähnt im Datenblatt (undefiniertem Spannungsbereich 0.3V – 0.7V)
 - Könnte so hoch sein, dass das System nicht mehr starten kann.
 - In der Zeit zwischen POR und der ersten Instruktion verliert man wieder Energie:
 - Ein Delay-Zähler von MCU kann zu Wartezeit führen.
 - In dieser Zeit verliert man durch die Leakage des Energiespeichers und der Start-Up-Schaltung Energie, obwohl man keine Arbeit ausführt.

Beispiel: Optimierung der Start-Up-Sequenz

- Die Start-Up-Schaltung kann kurzzeitig eine hohe Stromaufnahme haben:
 - Der Strom ist kurzzeitig 25 mA hoch. Der MCU auf dem Bild braucht ca. $116\mu\text{s}$ bis er die erste Instruktion ausführt hat.
 - Der Peak in diesem Bild kann die Batterielebensdauer verkürzen.



(CH4)Grüne: Strom durch MCU
(CH1)Orange: Spannung am MCU
(CH3)Violett: Pin am MCU

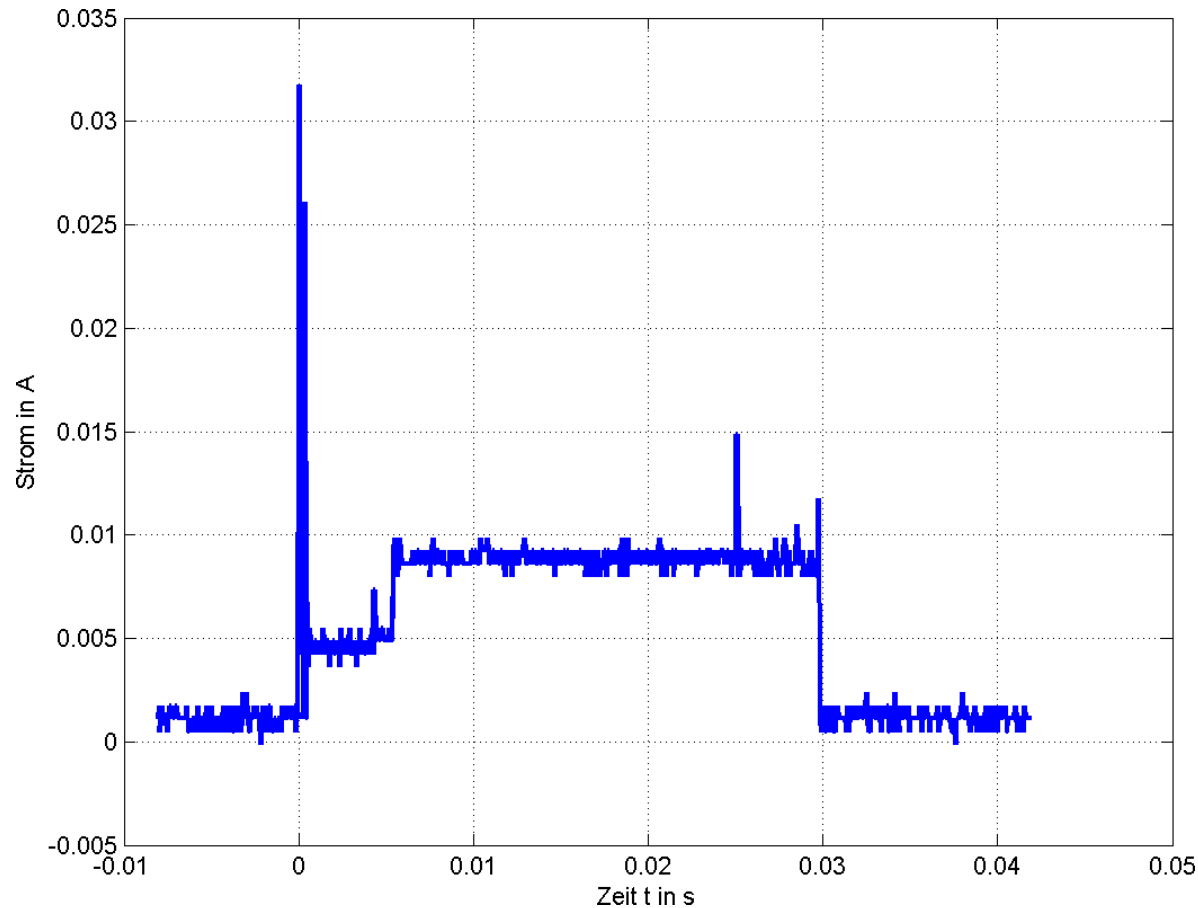
Ein Filter kann diesen Peak glätten.

Der Delay zwischen POR und erster Instruktion ist $116\mu\text{s}$.

Start-Up-Energie: $0.7\mu\text{J}$

Beispiel: Optimierung der Start-Up-Sequenz

- Start-Up und BLE-Stack laden

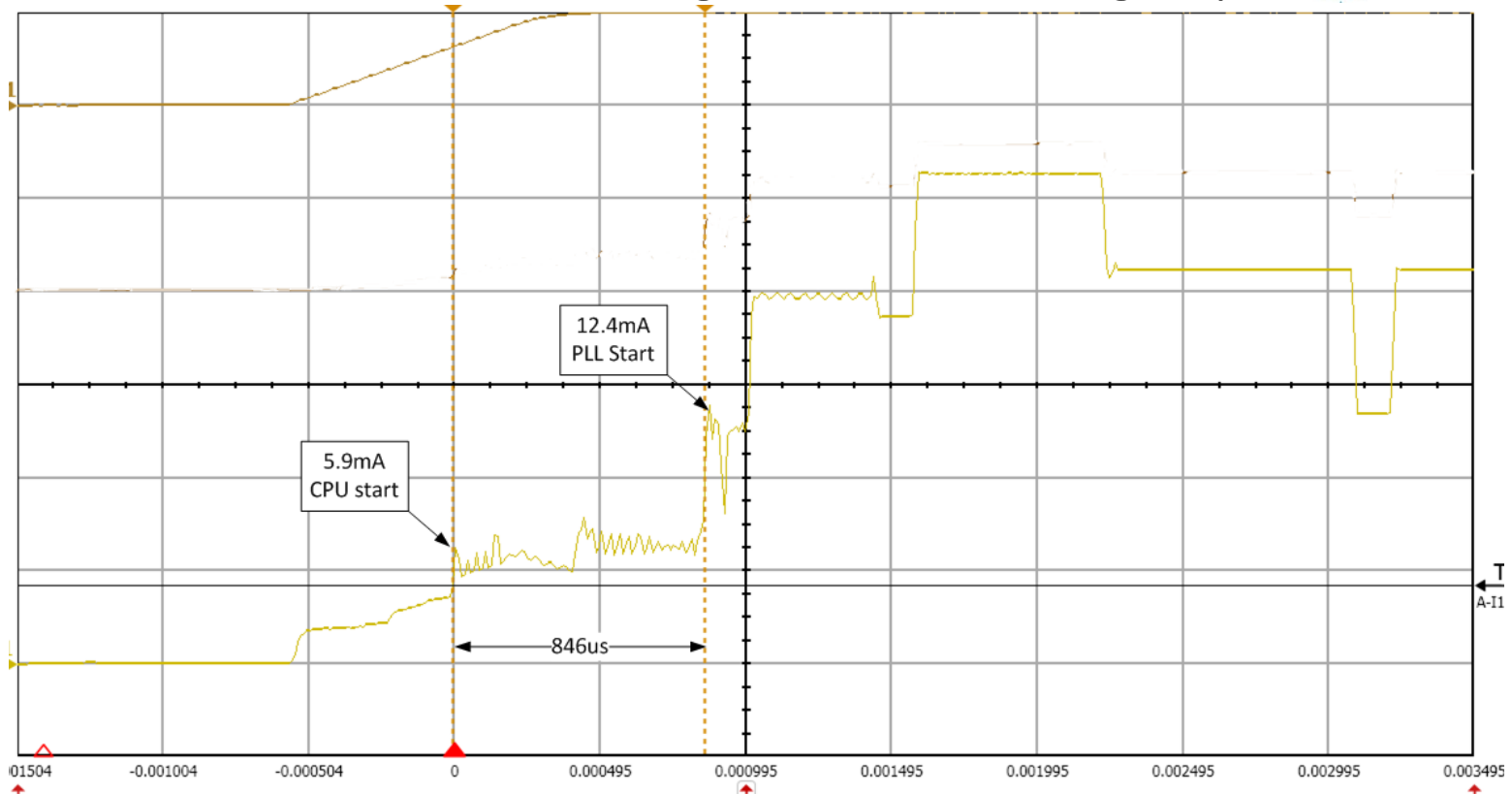


Betriebsspannung V_{cc}	3.0 V
Start-Up	5ms
BLE-Stack laden	25ms
Energieverbrauch	0.73mJ

Beispiel: Optimierung Taktfrequenz

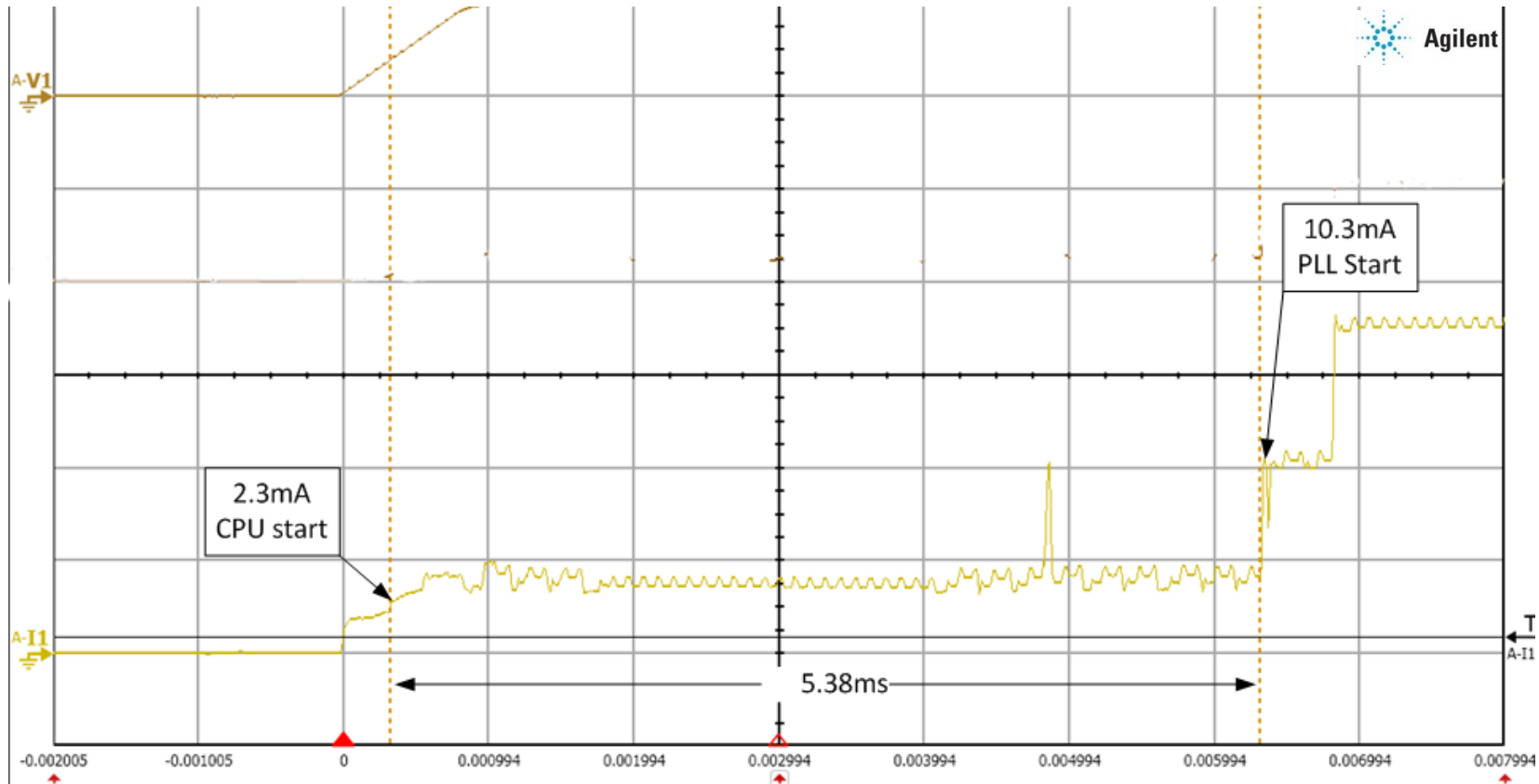
- Um den Energieunterschied bei verschiedenen Taktfrequenz zu erläutern, wurde die gleiche Hardware bei 1MHz und 8MHz betrieben.

- Bei 8MHz dauert die Initialisierung 0.8ms, und benötigt 15μJ  Agilent

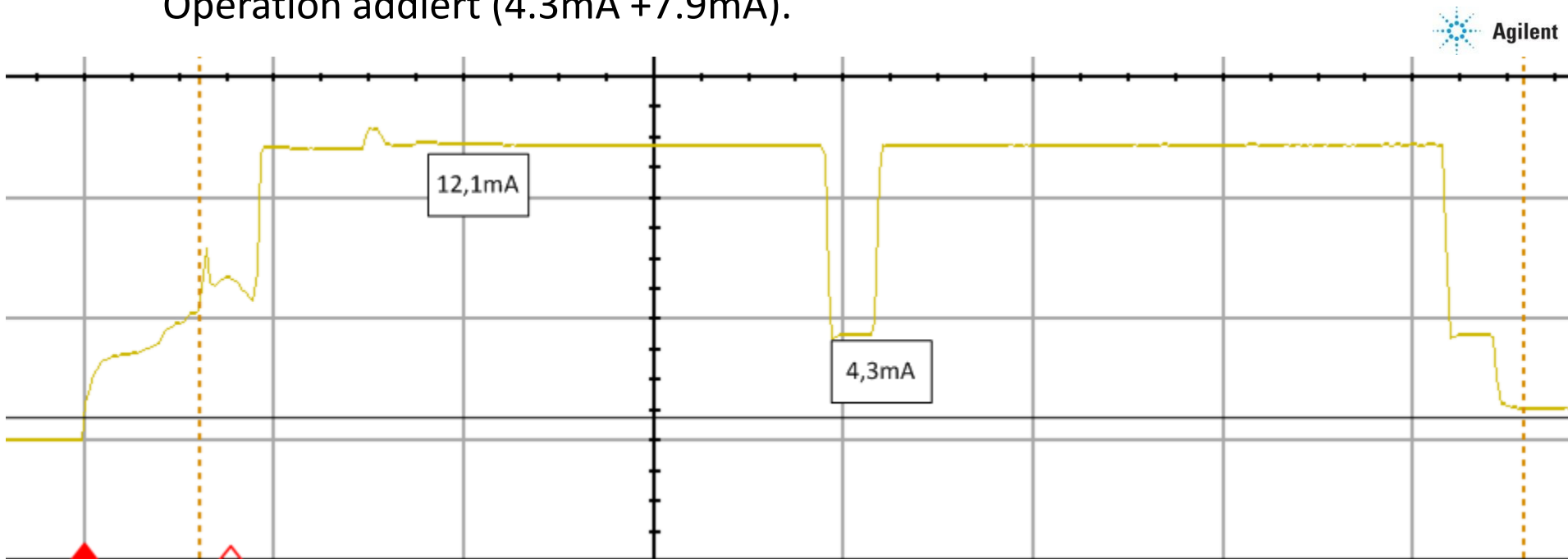


Beispiel: Optimierung Taktfrequenz

- Bei 1MHz dauert die Initialisierung mehr als 50ms und benötigt 70 μ J.
- Mit einer tieferen Taktfrequenz benötigt man 55 μ J mehr, für die gleich Initialisierung
- Der ZigBee-Switch hat mit einer Taktrate von 1MHz nicht funktioniert.

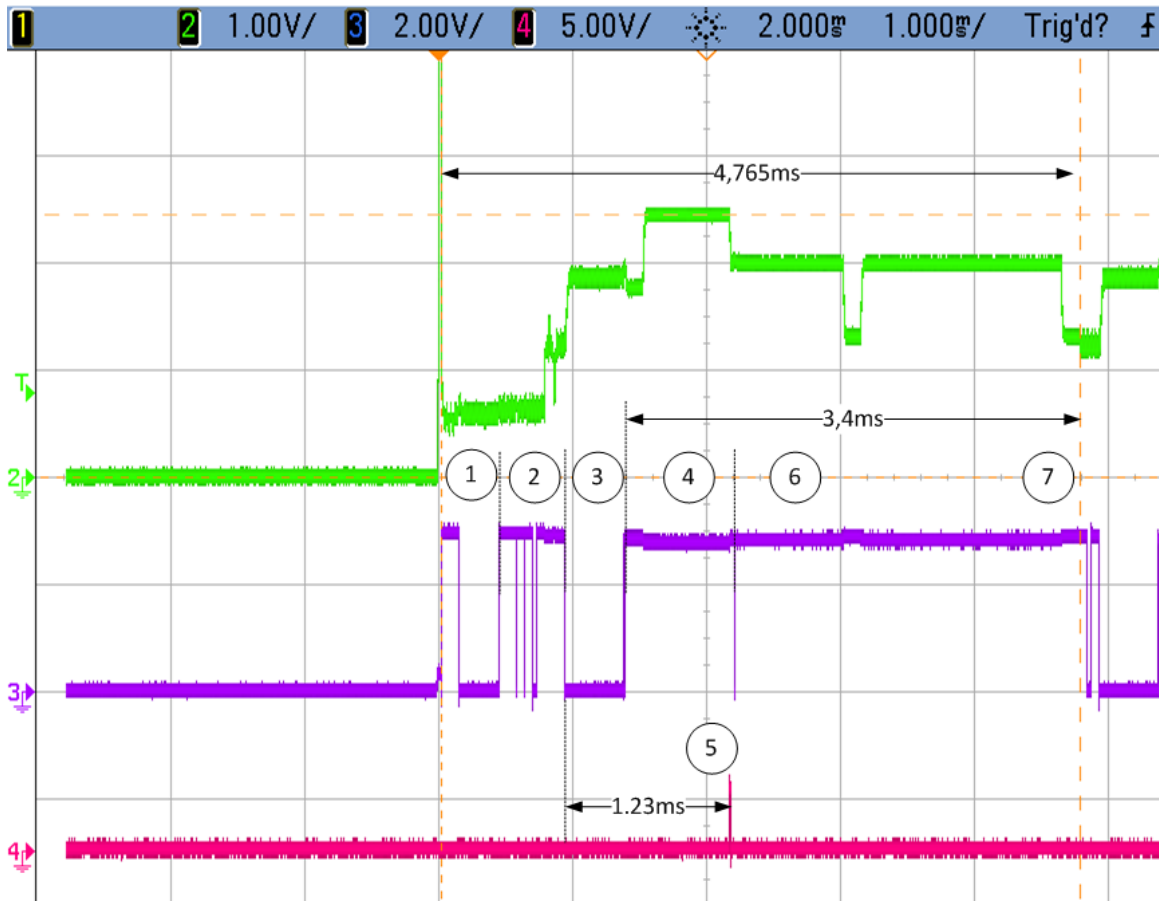


- Das Bild zeigt den Energieverbrauch bei EEPROM write.
 - Mit der Charakteristik des EEPROM Schreib-Zyklus, ist es möglich den APS-Counter an der richtigen Stelle zu aktualisieren, so dass die geharvestet Energie genügt.
 - Bei 2V, EEPROM Schreib-Operation (löschen und schreiben) braucht 3ms und ca. 100 μ J. Dabei ist die Energie des aktive CPU zum EEPROM Schreib-Operation addiert (4.3mA + 7.9mA).



Beispiel: Radio, MCU und EEPROM

- Das Systemverhalten mit allen aktiven Energieverbrauchern (MCU, Radio und EEPROM)
 - MCU bei 8MHz und Speisespannung 3V, braucht es $160\mu\text{W}$ und 5ms



Ch2 Grüne: Verbraucherstrom
Ch3 Violett: Port Pin
CH4 Rosa: Interrupt vom Radio

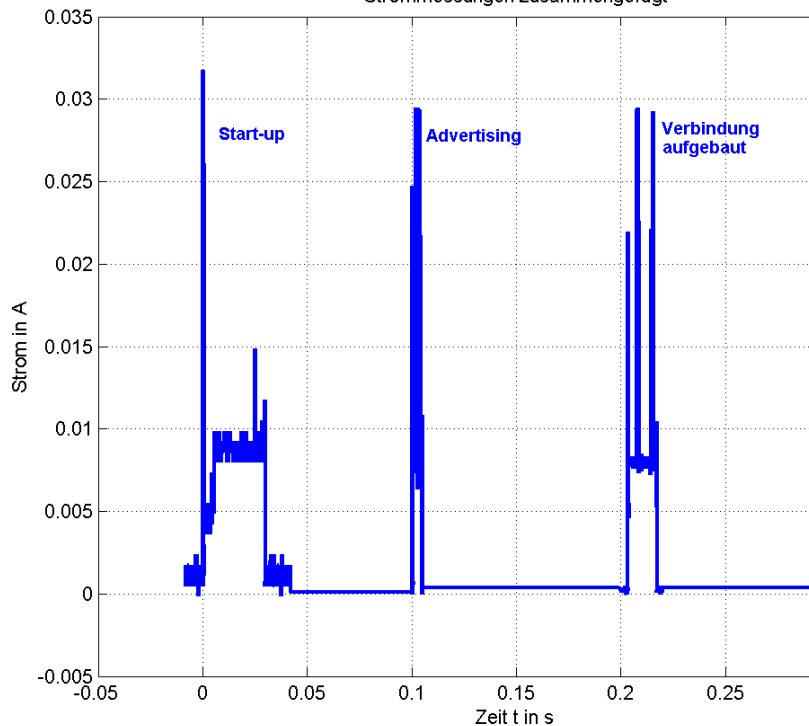
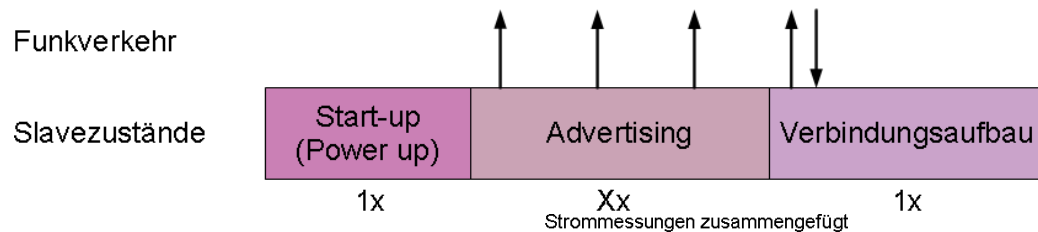
1. SPI init & Radio reset
2. Radio init, EEPROM read, PLL ON
3. CCA
4. TX Start & EEPROM write
5. IRQ -Radio (senden fertig)
6. Nur EEPROM write Operation
7. EEPROM write Operation fertig

- Aufnahme vom Strom und Spannung mit Hitex-Tool
 - Die Energiequelle ist der elektrodynamische Harvester. Die Spannung ändert sich deshalb, um so wichtiger ist die Operationen an den richtigen Zeitpunkten durchzuführen



Beispiel: Verbindungsaufbau BLE

- Mit der Analyse vom Energieverbrauch bei Verbindungsaufbau kann man die Lebensdauer der Batterie bestimmen.



Betriebsspannung V_{cc}	3.0V
Start-Up Energie	0.73mJ
Advertising Energie	0.20mJ
Verbindungsaufbau Energie	0.39mJ
Total	1.32mJ

- Das dynamischem Strommessverfahren ermöglicht uns:
 - Optimierung eines laufenden Systems => längere Batterielebensdauer
 - Verhalten von Komponenten (MCU, Radio usw.) im System zu analysieren
 - Falls das System nicht mehr läuft, ist einfach auffindbar wo die Energie verloren geht
 - Kürzere Entwicklungszeit
 - Die Bestätigung, dass das System richtig funktioniert!
- Ohne diese Messinstrumente ist die Entwicklung mit Energy Harvesting als Quelle schwierig.
- Ein paar Messinstrumente sind auf dem Market, jedoch sind sie nicht exakt für diese Anwendungen gedacht. Wir sind zuversichtlich, dass sich diese in den kommenden Jahren verbessern.

- Dank geht an:
 - Agilent, für die Benutzung des Messinstruments
 - Hitex, für die Benutzung des Messinstruments
- Für mehr Information:
 - Abhilash Kizhakenath, Bsc in El.
 - Prof. Dr. Marcel Meli, Head of Wireless Systems Group
- Zürich Hochschule für angewandte Wissenschaft (ZHAW)
Institute of Embedded Systems (InES)
Technikumstr. 9
CH-8401 Winterthur
Phone: +41 58 934 7681

???