

Kristronics GmbH

**Entwicklung einer Plattform für ein
energieautarkes, modulares,
drahtloses Sensorsystem**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt ge-
fördert unter dem AZ 30395 von der Deutschen
Bundesstiftung Umwelt

von

Ulrich Schmidt
Torsten Hagge
Alex Melamed
Bernd Molter

Februar 2015

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	30395	Referat	24	Fördersumme	59.000,- EUR
Antragstitel		Entwicklung einer Plattform für ein energieautarkes, modulares, drahtloses Sensorsystem			
Stichworte					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
9 Monate		01.05.2013		31.08.2014	
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger				Tel	
Kristronics GmbH				0461/7741616	
Gewerbegrund 5-9				Fax	
24955 Harrislee				0461/7741642	
				Projektleitung	
				Torsten Hagge	
				Bearbeiter	
				Ullrich Schmidt	
Kooperationspartner					

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Für die Anwendung zunächst im Logistik-Bereich sollte ein drahtloses Sensor-System entwickelt werden, das durch die Verwendung mehrerer Energy-Harvesting Quellen energieautark ist und das neben diversen Messwerten seine Position bestimmen kann und diese Daten über öffentliche Netze und das Internet der weiteren Auswertung zugänglich macht. Das System besteht aus den modularen Blöcken Energie-wandlung, Energiespeicherung, Energiemanagement, Ultra-Low-Power-Sensorik und -Datenübertragung. Durch den energieautarken Betrieb entfallen kostenintensive Wartungszyklen. Durch den Wegfall einer kostenintensiven Wartung und die Verwendung des GSM-Netzes zur Datenübertragung kann das System großflächig eingesetzt werden und deshalb große Beiträge zur ökologischen Optimierung von Logistikprozessen leisten.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Rahmen der Systemkonzeption wurden die Leistungsdichten verschiedener Energy-Harvesting Quellen betrachtet und zusammen mit Wirkungsgradberechnungen für Energiewandler und Speicher und den angenommenen Lastprofilen der erforderlichen Verbraucher in eine Simulation des Gesamtsystemes überführt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Entwicklung eines Demonstrators verwendet. Hierzu wurden konkrete Schaltungsbausteine für die Energiewandlung und Speicherung entwickelt. Weiterhin wurde ein Ultra-Low-Power Controller-Modul entwickelt, das die zeitliche Steuerung der Energiegewinnung, der Speicherung und der zyklischen Ausführung der Nutzfunktion (Erfassung und Übermittlung von Sensor-Daten per GSM-Modul) übernimmt. Zur Datenübertragung wurden aus den am Markt verfügbaren Modulen diejenigen mit dem geringsten Leistungsbedarf ermittelt. Neben der Hardware-Entwicklung erfolgte eine Software-Entwicklung zur Steuerung von Energiemanagement, Daten-Erfassung, -Aufbereitung und Datenübertragung über das öffentliche GSM-Netz. Nach der Simulation und der Entwicklung der Hardware und Software erfolgte ein Musterbau und die Inbetriebnahme und Erprobung des Demonstrators. Hierdurch wurden die Voraussetzungen geschaffen, in einer möglicherweise anschließenden Projektphase die allgemeine Anwendbarkeit im Feldversuch zu untermauern.

Ergebnisse und Diskussion

In der Arbeit wurde zunächst ein großer Wert auf die Gewinnung aussagefähiger Grundlage-Daten gelegt, damit diese als zuverlässige Basis für die spätere Auslegung konkreter Systeme im Feld dienen können. Zu diesem Zweck wurden die zu erwartenden Energiemengen aus den verschiedenen Energie-Quellen und die elektrischen Eigenschaften der jeweiligen Generatoren eingehend untersucht.

Auf der Basis eines virtuellen Lastprofils wurden dann die am besten geeigneten Funkmodule identifiziert. Anhand des dann abschätzbaren Energiebedarfes wurden die entsprechenden Speicher ausgewählt und dimensioniert, mit dem Ziel mindestens eine GPS-Positionsbestimmung mit anschließender Daten-Übertragung per GSM-Netz pro Tag zu realisieren.

Bei der Schaltungsentwicklung und Umsetzung in konkrete Hardware wurde darauf geachtet, eine universelle Plattform zu entwickeln, die in vielerlei Hinsicht auf den konkreten Anwendungsfall anpassbar ist. GSM-Module benötigen prinzipbedingt durch die Funkzellengröße und verwendete Funktechnik relativ viel Energie – sehr viel im Verhältnis zu typischen Energy-Harvesting Quellen und Energie-Speichern. Deshalb wurde die Hardware so ausgelegt, dass jede der 3 verwendeten Energiequellen mit ihrem lokalen Speicher in der Lage ist, die Energie für mindestens eine GSM-Übertragung pro Tag zu gewinnen und zu speichern, damit auch unter ungünstigen Umweltbedingungen eine gute tatsächliche Verfügbarkeit erreicht werden kann.

Es wurde ein extrem stromsparender Controller eingesetzt und auf diesem wurde ein zunächst sehr einfaches Software-Framework entwickelt, um die Funktion der Hardware nachzuweisen und zu zeigen, dass die Anforderungen an die Energiespeicherung und Datenübertragung per GSM-Netz durch den Demonstrator erfüllt werden.

Abbildung des Demonstratorboards:



Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die erreichten Ergebnisse bilden die Grundlage für eine spezielle, auf Energy-Harvesting ausgerichtete Marketingaktion und werden auf der Kristronics Website dargestellt. Eine weitere Präsentation der Ergebnisse durch Fachvorträge und auf Fachmessen ist für 2015 geplant.

Fazit

Es wurde eine universelle Plattform entwickelt, die es erlaubt, gleichzeitig aus 3 verschiedenen Umwelt-Energiequellen die jeweilige Energieform in elektrische Energie umzuwandeln und zu speichern.

Der Speicher wurde dabei so groß ausgelegt, dass es möglich ist, pro Tag mindestens eine Positionsbestimmung und Datenübertragung per GSM-Modul durchzuführen (den entsprechenden Energieeintrag vorausgesetzt). Durch die sorgfältige Grundlagenermittlung ist es nun möglich, konkrete Systeme für Zielapplikationen hinsichtlich der Mess- und Kommunikationsanforderungen und der sich durch die Umweltbedingungen bedingten zu erwartenden Gesamt-Energiebilanz auszulegen.

In dem ersten Software-Stand konnte die Funktion des Systems erfolgreich gezeigt werden, womit die prinzipielle Machbarkeit des Projektzieles: „Mindestens eine energieautarke Positionsbestimmung und Übertragung in das GSM-Netz pro Tag“ nachgewiesen wurde. Das System wurde dabei modular ausgelegt, so dass die Übertragung von Sensordaten über andere Funknetze möglich ist.

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	6
1. EINLEITUNG	7
2. SYSTEMBESCHREIBUNG	10
2.1 HARDWARE	10
2.1.1 <i>Anforderungen Funk-Module</i>	11
2.1.2 <i>Anforderungen CPU-Modul</i>	13
2.1.3 <i>Anforderungen Sensor-Modul</i>	14
2.1.4 <i>Anforderungen Energiespeicher</i>	15
2.1.5 <i>Anforderungen Energiesammel-Modul</i>	16
2.2 MODULAUSWAHL	18
2.2.1 <i>Auswahl Funk-Modul</i>	18
2.2.2 <i>Auswahl CPU-Modul</i>	20
2.2.3 <i>Auslegung Sensor-Modul</i>	20
2.2.4 <i>Auslegung Energiespeicher-Modul</i>	22
2.2.5 <i>Auslegung Energiesammel-Modul</i>	22
2.3 SCHALTUNGSENTWURF DER TRIPLE-H-PLATTFORM	39
2.3.1 <i>Die Funktion der Triple-H-Plattform</i>	42
2.4 SOFTWAREARCHITEKTUR	46
2.4.1 <i>System</i>	46
2.4.2 <i>Treiber</i>	46
2.4.3 <i>Komponenten</i>	47
2.4.4 <i>Applikation</i>	47
2.4.5 <i>Beispielhafte Implementierung</i>	49
3. FAZIT	50
LITERATURVERZEICHNIS	51
A 1. BEWERTUNGSMATRIX DER VERFÜGBAREN ZUR BENÖTIGTEN ENERGIE	58
A 2. MATLAB PROGRAMM ZUR BESTIMMUNG DES ENERGIEBEDARFES DES GSM-MODULS	60
A 3. MESSWERTE DER MESSUNGEN ZUM ENERGIESAMMEL-MODUL	62
A 4. 3D-MODELL DER TRIPLE-H-PLATTFORM	66

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Hardwaretopologie der Triple-H-Plattform	10
Abbildung 2: Strombedarf eines Aktivitätszyklus des GSM-Moduls	19
Abbildung 3: U/I-Kennlinie des TEG	24
Abbildung 4: P/ ΔT - Kennlinie des TEG.....	25
Abbildung 5: U/I-Kennlinie des TEG für verschiedene Temperaturdifferenzen	26
Abbildung 6: P/U-Kennlinie des TEG mit P_{\max}	26
Abbildung 7: U/I-Kennlinie des Synchrongenerators	29
Abbildung 8: P/N- Kennlinie des Synchrongenerators	29
Abbildung 9: U/I-Kennlinie des Synchrongenerators für verschiedene Drehzahlen.....	30
Abbildung 10: P/U-Kennlinie des Synchrongenerators mit P_{\max}	31

Abbildung 11: U/I-Kennlinie der Solarzelle	33
Abbildung 12: P/P _{Helligkeit} - Kennlinie der Solarzelle	34
Abbildung 13: U/I-Kennlinie des Solargenerators für verschiedene Beleuchtungsstärken	34
Abbildung 14: P/U-Kennlinie des Solargenerators mit P _{max}	35
Abbildung 15: Arbeitspunkte für die Generatoren	36
Abbildung 16: P _{max} / U Kennlinie der Generatoren	38
Abbildung 17: Detailliertes Bockschaltbild der Triple-H-Plattform	39
Abbildung 18: Foto der bestückten Leiterplatte in Komplettbestückung	40
Abbildung 19: Blockschaltung für die Triple-H-Plattform	41
Abbildung 20: 3D Modell der Triple-H-Plattform	66

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Versionstabelle	4
Tabelle 2: Abkürzungen und Definitionen	5
Tabelle 3: Messwerte des Energiebedarfs des GSM-Moduls	19
Tabelle 4: Variablen zur Auslegung und Bewertung des Funk-Moduls	19
Tabelle 5: P _{max} für ATE-127-3BSH-3	37
Tabelle 6: P _{max} für DB22M01	37
Tabelle 7: P _{max} für SZ 52mm x 52mm	38
Tabelle 8: Bewertungsmatrix der verfügbaren zur benötigten Energie	59
Tabelle 9: Messungen der Generatorkennlinie des TEG	63
Tabelle 10: Messungen der Generatorkennlinie des Synchrongenerators	64
Tabelle 11: Messungen der Generatorkennlinie der Solarzelle	65

Tabelle 1: Versionstabelle

Dokumententname	Version	Datum	Projektleiter	Bearbeiter	Bemerkungen
Abschlussbericht_Triple-H	1	09.12.2014	T.Hagge	U.Schmidt, B.Molter	
Abschlussbericht_Triple-H	2	09.02.2015	T.Hagge	B.Molter	Anhang gekürzt

Tabelle 2: Abkürzungen und Definitionen

Abkürzung	Langform	Bemerkungen
ADC	Analog digital Konverter	
BLDC	Brushless DC Motor	
BT	Bluetooth	IEEE802.15
C	Elektrische Kapazität, Einheit Farad [F]	
CAD	Computer Aided Design	
CTS	Clear to Send, Handshake Signal UART	
CPU	Central Processing Unit	
DC	Direct current	
EEPROM	Electrically erasable programmable read only memory	
EH	Energy Harvesting	
ELDC	Electric double layer capacitor	
EPD	Electrophoretic Display	
Flash Memory	Nicht flüchtiger Speicher	
FTP	File Transfer Protocol	
GPIO	General purpose Input/Output	
GPS	Global positioning System	
GND	Ground, Bezugspotential für die Spannungsversorgung	
GSM	Global System for mobile Communications	
I	Strom, Einheit: Ampere [A]	
IC	Integrated Circuit	
IC	Inter Integrated Circuit	
I/O	Input/Output	
JTAG	Joint Test Action Group	IEEE1149.1
LED	Light emitting Diode	
LDO	Low drop Out	
MEC	Micro Energy Cell	
MLCC	Multilayer ceramic capacitor	
MPPT	Maximum Power Point Tracking	
N	Drehzahl, Einheit: 1/Sekunde [1/s]	
P	Leistung, Einheit: Spannung x Strom [W]	
PWM	Pulsweiten Modulation	
Q	Wärmeenergie, Einheit: Joule [J]	
R	Elektrischer Widerstand, Einheit: Ohm [Ω]	
RAM	Random Access Memory	
RF	Radio Frequency	
RTC	Real Time Clock	
R _{th}	Wärmewiderstand, Einheit: Temperatur/Leistung [K/W]	
RTS	Request to Send, Handshake Signal UART	
Rx	Receive Data, Empfänger UART	
SMS	Short Message Service	
SPI	Serial Peripheral Interface	
T	Temperatur, Einheit: Kelvin [K]	
TEG	Thermoelektrischer Generator	
Tx	Transmit Data, Sender UART	
U	Spannung, Einheit: Volt [V]	
UART	Universal asynchronous Receiver Transmitter	
UDP	User Datagram Protocol	
USB	Universal serial Bus	
VCC	Versorgungsspannung	
WLAN	Wireless local area network	IEEE802.11

Zusammenfassung

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer modularen Energy-Harvesting (EH) Plattform, die elektrische Energie **gleichzeitig** aus **mehreren** Umwelt-Quellen (z.B. Licht, Temperaturdifferenz, mechanische Schwingungen) gewinnen kann und in geeigneter Weise zwischenspeichert, um so die regelmäßige Erfassung und drahtlose Weitergabe von Sensordaten zu ermöglichen, ohne die Baugruppe mit Akkumulatoren oder Batterien zu betreiben.

Die erste Applikation dieser Plattform sollte es ermöglichen, die geographische Position über das GPS-System zu bestimmen und diese Daten über ein GSM Funk-Modul mittels einer SMS an ein Zielgerät übermitteln.

Zu diesem Zweck wurde eine modulare Systemarchitektur entwickelt, die die einzelnen Domänen Energiesammlung, Energiewandlung, Energiespeicherung, Sensordatenerfassung, Systemsteuerung und drahtlose Datenübertragung über geeignete Schnittstellen so koppelt, dass ein Zuschnitt auf die Kundenbedürfnisse und eine strukturierte Weiterentwicklung ermöglicht werden.

Im Rahmen einer Voruntersuchung wurde zunächst der Markt an verfügbaren Modulen für die drahtlose Kommunikation, das CPU-Modul und die Leistungswandler gesichtet und die möglichen Bauteile wurden anhand der Herstellerangabe der Datenblätter auf ihre Eignung geprüft. Hierzu wurde eine Vergleichs-Tabelle erstellt, über die auf Basis eines simulierten Kommunikations-Zyklus der Energiebedarf der Bauteile abgeschätzt und verschiedene Technologien und Hersteller miteinander verglichen wurden. Weiterhin wurde für die Feststellung des Energiebedarfs und der Dimensionierung der Sammelvorrichtung und der Speicher eine Reihe von Messungen an verfügbaren Evaluationsboards der Hersteller durchgeführt.

Für das Design der Energie-Sammelvorrichtung wurden dann vier konkrete Energiequellen ausgewählt: Eine monokristalline Solarzelle (52mm*52mm), ein Peltierelement (40*40mm), ein Piezo-Element für mechanische Energie in Form von Vibration und ein Synchrongenerator für mechanisch rotatorische Energie. Die Abgabeleistung dreier der genannten Wandler wurde in einem Laboraufbau vermessen. Als Energiespeicher wurde eine Kondensatorbank aus Doppelschichtkondensatoren gewählt, die zurzeit den besten Kompromiss zwischen Energie-Inhalt und Selbstentladung darstellen.

Es wurde eine komplexe Hardware erstellt, die den Charakter eines „Evaluations-Boards“ hat und erlaubt, zahlreiche Kombinationen von Energiegewinnung, Energiespeicherung, Sensordatenverarbeitung und Funkübertragung zu erproben. Dazu wurde in Software das erforderliche Framework entwickelt. Als erste Applikation wurde die energieautarke Ermittlung der Position und Übertragung per GSM-SMS erfolgreich gezeigt.

Für die quantitative Bestimmung der Eignung sowohl für die konkrete Kundenapplikation als auch der Verfügbarkeit sind weiterführende Messungen unter verschiedenen Umweltbedingungen in Form eines Feldversuches notwendig. Die Triple-H-Plattform unterstützt zusätzlich die Möglichkeit einer Funkverbindung über IEEE802.11 (WLAN) und IEEE802.15.1 (Bluetooth), hier besteht auch noch eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten die einer weiteren Untersuchung würdig wären. Als Ergänzung zum GSM-Netz entstehen zurzeit weitere flächendeckende Netze, die eine drahtlose Kommunikation mit wesentlich weniger Energieaufwand erlauben und so einer wirtschaftlichen Anwendbarkeit der Plattform sehr entgegenkommen würden.

Das Projekt wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert.

1. Einleitung

Die zunehmende Verbreitung der mobilen Kommunikationstechnik ermöglicht zusätzlich zur Verbreitung individueller Kommunikation auch die Verbreitung der Übertragung anderer Daten. Die Erhebung und autonome Übertragung transportrelevanter Daten industrieller Logistik gewinnt damit eine zunehmende Bedeutung.

In diesem Bereich gibt es verschiedene Anwendungen, die z.B. die Transportdaten eines Wirtschaftsgutes erfassen und aufzeichnen. Auch gibt es bereits Anwendungen, die diese Daten über eine Funkverbindung übertragen können.

Die etablierten Funkübertragungsstandards sind entweder auf eine kurze Übertragungsdistanz ausgelegt und erfordern den nächsten Netzknoten in unmittelbarer Nähe (z.B. RFID, BT, WLAN) oder sie stützen sich auf öffentliche oder proprietäre Netze mit größerem Zellendurchmesser von 5-50 km (z.B. GSM).

Eine Übertragung von Daten über das öffentliche GSM-Netz hat dabei große Vorteile, insbesondere bei mobilen Teilnehmern und großer räumlicher Verteilung. Wenn im mobilen Teilnehmer kein Bordnetz zur Verfügung steht, werden diese vorhandenen Anwendungen heute üblicherweise noch mit Batterien oder Akkumulatoren versorgt. Bedingt durch die begrenzte Lebensdauer der verwendeten Versorgungstechnologie werden hierfür Wartungsintervalle von zwei bis vierundzwanzig Monaten notwendig.

Lässt sich die bisher verwendete Versorgungstechnik dadurch ersetzen, dass die benötigte Energie aus der Umwelt gesammelt wird, wird der Aufwand für den Ersatz und die Wartung drastisch reduziert.

Der Vorteil hierbei liegt nicht nur in der Einsparung der Batterien und Akkumulatoren sondern zusätzlich in der Vermeidung der für die Wartung notwendigen Logistik, d.h. Fahrt- und Lagerkosten und in der Verbreitung von dadurch erst ermöglichten Anwendungen, die Logistikprozesse optimieren können und dadurch in mehrfacher Weise die Umwelt schonen.

Die Verfahren zur Energiegewinnung aus der Umwelt werden als „Energy-Harvesting“ bezeichnet. Es gibt Energiesammler für verschiedene Energieformen, beispielhaft genannt seien hier Wärmeenergie, Solarenergie und mechanisch nutzbare Energie in Form von bewegten Massen. Die Verfügbarkeit einzelner Energieformen unterliegt starken Streuungen, daher ist die Zuverlässigkeit einer auf „Energy-Harvesting“ beruhenden Versorgung in eben diesem Maß unzuverlässig.

Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit sollen daher drei verschiedene Energiesammelverfahren gleichzeitig eingesetzt werden, um eine für die Datenübertragung mittels GSM erforderliche Energiemenge zu sammeln und einen Datentransfer auszuführen.

Mit dem potentiellen Ziel einer späteren Anwendung zur Überwachung z.B. eines Güterwagens wurde daher eine Plattform entwickelt, die wartungsfrei über einen längeren Zeitraum den geographischen Ort, an dem sich der Güterwagen befindet, feststellt und diese Position z.B. einmal täglich durch eine SMS Nachricht übermittelt.

Um eine möglichst hohe Verfügbarkeit zu erreichen, wurden dabei drei verschiedene Energieformen für das Energieversorgungsmodul berücksichtigt.

Diese sind:

- thermische Energie, die sich in einem Temperaturgefälle zweier Medien darstellt,
- Strahlungsenergie elektromagnetischer Wellen, hier wird nur das optische Fenster der elektromagnetischen Strahlung betrachtet, die sich in einem Helligkeitsunterschied an einer Grenzschicht darstellt,
- und mechanischer Energie, die sich durch die Bewegung eines bewegten Körpers gegenüber einem nichtbewegten Körper darstellt.

Die Verwendung von Strahlungsenergie elektromagnetischer Wellen im Bereich unterhalb des optischen Fensters, insbesondere Mikrowellen und Funk, wurde nicht untersucht, da der Bedarf der Triple-H-Plattform zu drastisch von der verfügbaren Energie abweicht, der Bereich oberhalb des optischen Fensters der elektromagnetischen Strahlung, kann ebenfalls nicht genutzt werden, da zum einen diese Bereich der Strahlung durch die Atmosphäre stark gedämpft ist und zum zweiten für dieses Spektrum keine Wandler verfügbar sind.

Für die Verwendung der thermischen Energie wird ein thermoelektrischer Generator nach dem Seebeck-Effekt eingesetzt.

Für die Verwendung der Strahlungsenergie wird ein photoelektrischer Generator nach dem Prinzip des inneren Photoeffekts eingesetzt.

Für die Verwendung der mechanischen Energie bestehen zwei mögliche Varianten:

- ein elektromechanischer Generator nach dem Prinzip des Piezo-Effekts,
- ein elektromechanischer Generator nach dem Induktionsgesetz.

Mit diesen Zielen und Voraussetzungen wurde ein Entwurf für die Systemarchitektur der Triple-H-Plattform mit den benötigten Modulen abgeleitet:

Die durch die Energieversorgungsmodule erzeugte elektrische Energie wird in einem Modul für die Energiespeicherung gesammelt. Da ein kontinuierlicher Betrieb der Plattform direkt aus der Energieversorgung nicht möglich ist, erfolgt die Versorgung für den diskontinuierlichen Betrieb aus dem *Energiespeichermodul*.

Für die Überprüfung der Verwendung der drei Energieformen wird eine Reihe von Sensoren benötigt, die in einem *Sensor-Modul* bereitgestellt werden. Weitere Messgrößen, die zur Beurteilung des Zustandes eines Güterwagens sinnvoll sein können, können ebenfalls von diesem Modul bereitgestellt werden.

Über ein *CPU-Modul* wird die Plattform gesteuert, hierzu gehört die Erfassung der Sensordaten, die Bestimmung der Verfügbarkeit der Energie, die durch die Energieversorgung bereitgestellt werden kann und die Steuerung des Funk-Moduls.

Da die Zielerreichung nicht zwingend die Verfügbarkeit der für den Betrieb der Plattform notwendigen Energie gewährleisten kann, ist es notwendig unterschiedliche Strategien für das Energiemanagement an Hand der Sensordaten zu ermitteln. Diese Aufgabe wird ebenfalls vom *CPU-Modul* ausgeführt.

Die Datenübertragung wird durch ein *Funk-Modul* ausgeführt, entsprechend der Anforderung wird hierfür ein GSM Funk-Modul mit GPS eingesetzt. Optional soll die Plattform aber auch die Möglichkeit unterstützen, die Datenübertragung durch ein Nahfunk-Modul auszuführen.

Für das Nahfunk-Modul ist im einfachsten Fall nur eine minimale Kommunikation notwendig und eine Ortsbestimmung nicht erforderlich, da der Ort des Nah Funk Empfängermoduls (z.B. ein WLAN Router) bekannt ist.

Für die Auslegung der einzelnen Module wurde zunächst eine Vergleichs-Tabelle erstellt, in der die Herstellerangaben für eine Reihe von Bauteilen für die einzelnen Module gelistet werden. Für die einzelnen Harvester Applikationen wurden dann die verfügbaren Energien berechnet. Aus den Daten für den Speicher, die Sensoren, die Recheneinheit und die Funk-Module wurde der erforderliche Energiebedarf bestimmt.

Über den Vergleich der Energieverfügbarkeit und des Energiebedarfs der möglichen Kombinationen von Harvestern, Speichern, Rechenwerken und Funk-Modulen haben wir eine Auswahl passender Bauteile ermittelt, für die ein hinreichendes Gleichgewicht zwischen verfügbarer und benötigter Energie gegeben ist. Ein weiteres Merkmal, das bei der Bauteilauswahl berücksichtigt wurde, war die Verfügbarkeit von Testschaltungen (Eva-Boards), mit denen Teilelemente der Plattform vorab geprüft werden können.

Die Dimensionierung der elektronischen Schaltung der einzelnen Module erfolgte dann über diese Testschaltungen und wo diese nicht verfügbar waren, wurde eine Simulation der Teilschaltung mittels Spice durchgeführt. Eine Simulation der vollständigen Triple-H-Plattform ist war einem vertretbaren Aufwand nicht möglich, da zum einen sehr kurze Zeitintervalle für die Wirkungsweise der Sensoren, des Rechenwerkes und der Funk-Module und zum anderen sehr lange Zeiträume für die Simulation der Energiesammler berücksichtigt werden müssten.

Die Schaltungsentwicklung und die die Erstellung des Leiterplattenlayouts erfolgte im Hause mit Hilfe des CAD-Systems „Altium-Designer“. Die zum Materialeinkauf erforderliche Stückliste wurde im SAP-System angelegt. Nachdem das Material und die Leiterplatte verfügbar waren, wurde die Leiterplatte auf einer hauseigenen SMD-Bestücklinie gefertigt. Danach erfolgte die HW-Inbetriebnahme und erste funktionale Tests und dann die Hardware-Software-Integration mit der ersten Test-Applikation.

Im vorliegenden Dokument wird die entwickelte Plattform für ein energieautarkes, modulares, drahtloses Sensorsystem detailliert beschrieben. Die Plattform wird über eine entsprechende Software gesteuert, um über drei verschiedene „Energie-Harvester“ Energie sammeln und je nach Energieeintrag mindestens einmal täglich die geographische Position bestimmen und diese über GSM als SMS-Nachricht versenden.

Die erfolgreiche Durchführung dieser Operation wurde anhand des Prototypen gezeigt.

Die Plattform ist optional dafür ausgelegt, die Funkübertragung auch über andere Funkwege zu erreichen. Außerdem können noch weitere physikalische Messwerte wie z.B. Beschleunigung und Orientierung gewonnen werden. Zusätzlich wird die Messung der durch die Harvester gesammelten Energie ermöglicht. Diese in der Hardware optional bereits vorgesehenen erweiterten Funktionen werden zurzeit noch nicht durch entsprechende SW-Module unterstützt. In einem zukünftigen Projekt könnten daher auch Langzeituntersuchungen zur automatischen quantitativen Bestimmung der Verfügbarkeit durchgeführt werden.

2. Systembeschreibung

Die Plattform für ein energieautarkes, modulares, drahtloses Sensorsystem ist in die zwei Teilbereiche Hardware und Software gegliedert.

Für den Betrieb der Plattform wird zunächst die Hardware benötigt. Da die von der Plattform auszuführenden Funktionen eine flexible Reaktion auf die Verfügbarkeit der Versorgung erfordern, die nicht zum Zeitpunkt der Entwicklung festgelegt werden können, ist es notwendig in die Plattform eine Software zu integrieren, die genau diese Flexibilität gewährleistet.

Eine der möglichen Funktionen der Plattform ist die Übertragung der Nutzdaten in das öffentliche GSM-Netz. Die Nutzdaten sollen mittels einer SMS Nachricht übertragen werden.

Für die Entwicklung der Hardware und der Software wurde zunächst ein Laborsystem mit Prototypen Boards der einzelnen Module erstellt, mit dem die notwendigen Messungen für die Realisierung der Triple-H-Plattform durchgeführt wurden.

2.1 Hardware

Die Hardware gliedert sich in die Module Funkübertragung, Recheneinheit, Sensorik, Energiespeicher und Energiegewinnung.

Für die Kommunikation unter den Modulen ist ein serieller Bus vorgesehen. Die Energieversorgung des CPU-Moduls, des RF-Moduls und des Sensor-Moduls erfolgt aus dem Energiespeichermodul. Das Energiespeicher-Modul wird aus den Teilmodulen für die Energieversorgung gespeist.

Abbildung 1 zeigt die Topologie der Plattform.

Da die Verfügbarkeit der Energie zum Betrieb der Plattform nicht ständig gegeben ist, müssen alle verwendeten Bauteile auf einen niedrigen Energieverbrauch ausgelegt sein. Auch der elektrische Entwurf muss darauf ausgelegt sein, keine unnötigen Verluste zu verursachen. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die fünf Module der Sensor Plattform.

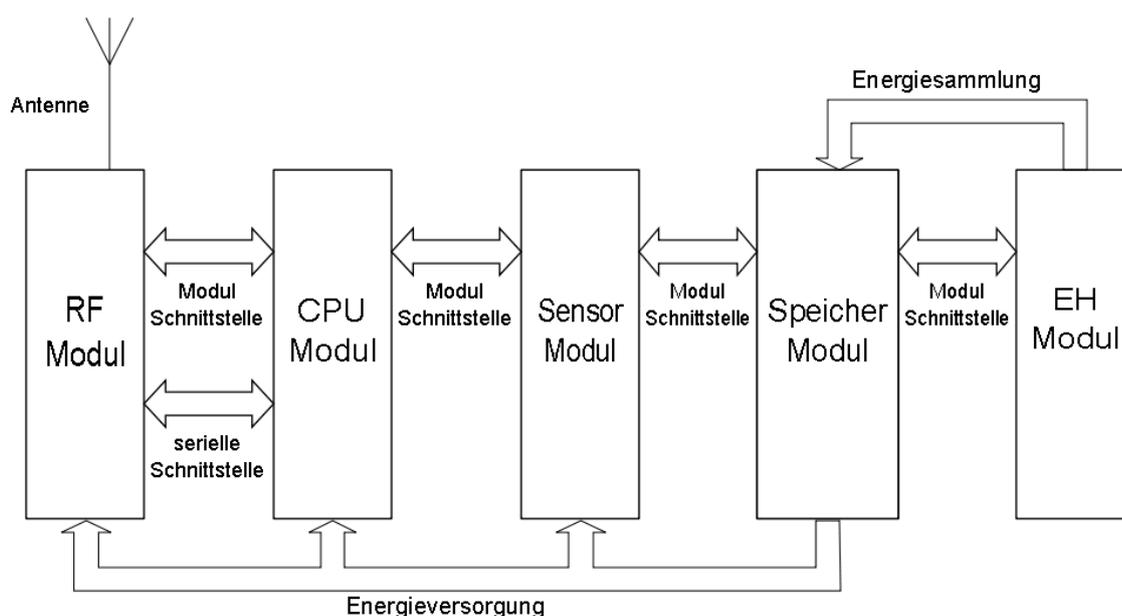


Abbildung 1: Hardwaretopologie der Triple-H-Plattform

2.1.1 Anforderungen Funk-Module

Für das Funk-Modul sollten drei verschiedene Technologien wahlweise eingesetzt werden können.

1. Ein Funk-Modul für den GSM Betrieb
2. Ein Funk-Modul für den WLAN Betrieb
3. Ein Funk-Modul für den Bluetooth Betrieb

Das Funk-Modul für den GSM Betrieb unterstützt eine Verbindung zum Internet und kann eine Datenübertragung über große Strecken über das öffentliche Mobilfunknetz durchführen. Das Funk-Modul unterstützt außerdem den Versand von SMS Nachrichten zur Übertragung der Nutzdaten.

Das Funk-Modul für den WLAN Betrieb erfordert ein lokales Funknetz ohne die Nutzung des öffentlichen Mobilfunknetzes. Eine Verbindung zum Internet kann jedoch immer dann erreicht werden, wenn das lokale Netz eine Verbindung zum Internet bereitstellt.

Das Funk-Modul für den Bluetooth Betrieb ist nur für den Nahfunkbereich geeignet, eine Verbindung zum Internet ist nur über den Empfänger möglich.

2.1.1.1 Anforderungen GSM-Modul

Aus den Anforderungen an die Triple-H-Plattform können eine Reihe von Anforderungen an das Funk-Modul abgeleitet werden.

Die Aufgabe des Funk-Moduls gliedert sich damit in zwei Teile:

- Datenübertragung
- Ortsbestimmung

Die Datenübertragung soll durch eine SMS Nachricht zum Empfänger durchgeführt werden und mindestens ein Nutz Datum übertragen. Über die GPS Funktion soll eine Ortsbestimmung durchgeführt werden.

Minimierung des Verbrauchs

- Das Funk-Modul muss abschaltbar sein, Energie darf nur im Nutzungsfall benötigt werden
- Das Funk-Modul muss verschiedene Funkbänder bedienen können, dies dient der Untersuchung des Energieverbrauchs auf verschiedenen Bändern
- Die GPS Funktion muss abschaltbar sein, Energie darf nur im Nutzungsfall benötigt werden
- Das Funk-Modul erkennt die „Güte“ der Funkverbindung und skaliert die Funkleistung, dies betrifft die Absenkung des Energieverbrauchs
- Das Funk-Modul muss steuerbar sein in Bezug auf die Anzahl der erfolglosen Verbindungsversuche, sinnloser Energieverbrauch muss vermieden werden

Schnittstellen

Gefordert sind wenigstens eine serielle Verbindung über einen UART und eine weitere serielle Schnittstelle wie z.B. I²C oder SPI, eventuell weitere I/O's.

Anwendung

Das Funk-Modul ist nicht dauerhaft aktiv, sondern wird nur für den minimal notwendigen Zeitraum in einem 24 Stunden Zyklus betrieben. In einem Zyklus müssen die Funktion der Ortbestimmung und die Datenübertragung erfolgen. Die beiden Funktionen können zu unterschiedlichen Zeiten ausgeführt werden. Die Steuerung der Betriebsdauer erfolgt durch das CPU-Modul.

Bestimmung des Energiebedarfs für das GSM-Modul

Der Energiebedarf des GSM-Moduls wurde aus den Herstellerangaben und einem abgeschätzten Betriebsprofil in einer Excel-Tabelle für verschiedene Funk-Module berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden in einer Vergleichstabelle zusammengefasst. Die Messungen zum Energiebedarf für die Gewinnung der GPS-Position und der Datenübertragung wurden zu einer Messung zusammengefasst und an der Testschaltung des gewählten Moduls ausgeführt. Die Messwerte geben nur den Energiebedarf für einen Ort und ein Datum an. Diese Messwerte können zeitlich stark schwanken, da nur eine Einzelmessung durchgeführt wurde. Messungen an verschiedenen Orten können ebenfalls stark schwanken. Die durchgeführte Einzelmessung besitzt damit keinen repräsentativen Charakter.

2.1.1.2 Anforderungen WLAN-Modul

Aus den Anforderungen an die Triple-H-Plattform können auch für diese Variante eine Reihe von Anforderungen an das WLAN-Funk-Modul abgeleitet werden. Die Aufgabe des Funk-Moduls gliedert sich auch hier in zwei Teile, ebenso wie in Abschnitt 2.1.1.1 in die Datenübertragung und die Ortsbestimmung.

Zielfunktion des Funk-Moduls für WLAN Betrieb

Die Ortsbestimmung muss über die Position des WLAN Routers ermittelt werden. Damit verlagert sich der Aufwand für die Ortsbestimmung von der Triple-H-Plattform zum Empfänger. Im einfachsten Fall ist nur ein Anmeldeversuch des Funk-Moduls ins WLAN notwendig. Bei Verwendung eines externen GPS Moduls erweitert sich die Datenübertragung.

Für die Übertragung zusätzlicher Nutzdaten muss eine vollständige Verbindung zum WLAN Router aufgebaut werden. Die Nutzdaten werden dann über FTP oder UDP an den Router übertragen. Die Ortsdaten sind dann Bestandteil der Nutzdaten.

Minimierung der benötigten Energie

- Das Funk-Modul muss abschaltbar sein, Energie darf nur im Nutzungsfall benötigt werden
- Das Funk-Modul muss verschiedene Funkbänder bedienen können, dies dient der Untersuchung des Energieverbrauchs auf verschiedenen Bändern
- Das Funk-Modul erkennt die „Güte“ der Funkverbindung und skaliert die Funkleistung, dies dient der Absenkung des Energieverbrauchs
- Das Funk-Modul muss steuerbar sein in Bezug auf die Anzahl der erfolglosen Verbindungsversuche, sinnloser Energieverbrauch muss vermieden werden

Schnittstellen

Gefordert sind auch hier mindestens eine serielle Verbindung über einen UART und eine weitere serielle Schnittstelle wie z.B. I²C oder SPI, eventuell weitere I/O's.

Anwendung

Das WLAN-Funk-Modul ist nicht dauerhaft aktiv, sondern wird nur für den minimal notwendigen Zeitraum in einem 24 Stunden Zyklus betrieben. In einem Zyklus müssen die Funktion

der Ortbestimmung und die Datenübertragung erfolgen. Die beiden Funktionen können zu unterschiedlichen Zeiten ausgeführt werden. Die Steuerung der Betriebsdauer erfolgt durch das CPU-Modul.

Bestimmung des Energiebedarfs für das WLAN-Modul

Der Energiebedarf des WLAN-Moduls wurde aus den Herstellerangaben und einem abgeschätzten Betriebsprofil in einer Excel-Tabelle für verschiedene Funk-Module berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden in einer Bewertungsmatrix zusammengefasst.

Eine konkrete Messung des Energieverbrauches wurde noch nicht durchgeführt, da das WLAN-Modul zwar in der Triple-H-Plattform implementiert ist, jedoch noch nicht von der Software unterstützt wird.

2.1.1.3 Anforderungen an das Bluetooth-Modul

Die technischen Anforderungen an das Bluetooth-Modul entsprechen denen an das WLAN-Modul.

Auch hier wurde der Energiebedarf aus den Herstellerangaben und einem abgeschätzten Betriebsprofil berechnet und die Ergebnisse in einer Vergleichstabelle zusammengefasst.

Die konkrete Messung des Energieverbrauches konnte ebenfalls noch nicht durchgeführt werden, da das Bluetooth-Modul noch nicht von der Software unterstützt wird.

2.1.2 Anforderungen CPU-Modul

Das CPU-Modul beinhaltet das Rechenwerk für die Triple-H-Plattform. Zusätzlich soll das CPU-Modul ein Display steuern, das das zuletzt ermittelte Nutzdatum darstellt.

Aus den Anforderungen an die Triple-H-Plattform können eine Reihe von Anforderungen an das CPU-Modul abgeleitet werden.

Die Aufgabe des CPU-Moduls gliedert sich damit wie folgt:

- Steuerung des Funk-Moduls
- Steuerung der Energiesammelvorrichtung
- Steuerung der Sensoren der Plattform
- Steuerung der Versorgungsspannungen
- Steuerung des Anzeigeelements
- Die eigentliche Nutzapplikation, hier Bestimmung der Position und Datenübertragung

Zielfunktion des CPU-Moduls

Das CPU-Modul steuert die Funkübertragung. Da das Funk-Modul den Aufbau der Funkverbindung und die Übertragung der Daten weitgehend eigenständig durchführt, beschränkt sich die Aufgabe des CPU-Moduls auf die Steuerung der Aktivitätsdauer des Funk-Moduls und die Übertragung der Daten an das Funk-Modul sowie die Darstellung der Daten auf einem Display.

Die Aktivität des Sensor-Moduls wird ebenfalls über das CPU-Modul gesteuert. Aus der Steuerung des Sensor-Moduls entsteht die Aufgabe der Nutzdatengewinnung und Verwaltung.

Das CPU-Modul muss außerdem das Energieversorgungsmodul steuern und den Energiespeicher überwachen.

Hieraus ergeben sich schon einige Anforderungen an den Prozessor:

- Der Prozessor sollte für einen niedrigen Energieverbrauch ausgelegt sein.
- RAM und Flash Speicher sollten ebenfalls durch den Prozessor bereitgestellt werden.
- Der Prozessor muss wenigstens die Modulschnittstelle z.B. I²C oder SPI und eine serielle Schnittstelle über einen UART unterstützen.
- Der Prozessor sollte über eine Echtzeituhr verfügen, wenn diese Funktion nicht durch ein anderes Modul bereitgestellt wird.

Minimierung der benötigten Energie

- Das CPU-Modul muss verschiedene Aktivitätsmodi beherrschen, es dürfen nur die Funktionen aktiviert werden, die benötigt werden.
- Das CPU-Modul muss auch im voll aktiven Zustand nur wenig Energie benötigen.
- Der Prozessor muss sich selbst durch die verschiedenen Aktivitätsmodi steuern.
- Die Echtzeituhr muss besonders wenig Energie benötigen

Schnittstellen

Gefordert sind wenigstens eine serielle Verbindung über einen UART und eine weitere serielle Schnittstelle wie z.B. I²C oder SPI, eventuell weitere I/O's.

Anwendung

Das CPU-Modul ist nicht dauerhaft aktiv, sondern wird nur für den minimal notwendigen Zeitraum in einem 24 Stunden Zyklus betrieben. Die einzelnen Funktionen können zu unterschiedlichen Zeiten ausgeführt werden. Zusätzlich muss über die Bestimmung der verfügbaren Energie das Aktivitätsfenster der Triple-H-Plattform gesteuert werden.

Bestimmung des Energiespeicherbedarfs für das CPU-Modul

Der Energiebedarf des CPU-Moduls wurde aus den Herstellerangaben und einem geschätzten Betriebsprofil in einer Excel-Tabelle für verschiedene Module berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden in der besagten Bewertungsmatrix zusammengefasst.

2.1.3 Anforderungen Sensor-Modul

Das Sensor-Modul beinhaltet die Sensoren für die Gewinnung der Nutzdaten und für die Steuerung der Aktivität der Triple-H-Plattform.

Aus den Anforderungen an die Triple-H-Plattform können eine Reihe von Anforderungen an das Sensor-Modul abgeleitet werden:

Zielfunktion des Sensor-Moduls

Die Zielfunktion des Sensor-Moduls ist die Messung der Nutzdaten und die Bereitstellung der Betriebsdaten, die zur Steuerung der Triple-H-Plattform benötigt werden.

Nutzdaten sind:

- Beschleunigungswerte, für die Bestimmung des Bewegungsprofils im Nahbereich.
- Temperaturwerte der Umgebungstemperatur der Triple-H-Plattform.
- Ortsdaten der Triple-H-Plattform mit GPS Funktion.

Dies erfordert wenigstens einen dreiachsigen Beschleunigungssensor, einen Temperatursensor und ein GPS Modul.

Betriebsdaten sind: Die verfügbare Energie, ermittelt über den Ladungszustand des Energiespeichers und den aktuellen Ladungszufluss durch die Energiesammler und die benötigte Energie, ermittelt über die Entladung des Energiespeichers während der vorherigen Aktivitätszyklen oder aus einer festen Vorgabe.

Dies erfordert die Messung des Ladungsflusses jedes einzelnen EH Moduls, und die Messung der aus dem Speichermodul entnommenen Ladung.

Minimierung der benötigten Energie

- Die Sensoren müssen abschaltbar sein
- Die Sensoren müssen auf einen niedrigen Energiebedarf ausgelegt sein

Schnittstellen

Gefordert ist eine serielle Schnittstelle wie z.B. I²C oder SPI, eventuell weitere I/O's.

Anwendung

Für die Gewinnung der Nutzdaten werden die Sensoren für die Temperatur die Beschleunigung und das GPS Modul nicht dauerhaft aktiviert, sondern nur solange es für die Durchführung einer Messung in einem 24 Stundenzyklus notwendig ist. Für die Gewinnung der Betriebsdaten werden für jeden Energiespeicher ein Sensor für die Ermittlung der zufließenden und ein Sensor für die Ermittlung der abfließenden Ladung verwendet. Diese Messungen erfolgen kontinuierlich und werden nur bei Unterschreitung einer minimalen Ladung abgeschaltet.

Bestimmung des Energiebedarfs für das Sensor-Modul

Der Energiebedarf des Sensor-Moduls wurde aus den Herstellerangaben und dem abgeschätzten Betriebsprofil in einer Excel-Tabelle für verschiedene Module berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden ebenfalls in der Bewertungsmatrix zusammengefasst.

2.1.4 Anforderungen Energiespeicher

Das Energiespeichermodul beinhaltet die für den Betrieb der Triple-H-Plattform notwendigen Energiespeicher. Aus den Anforderungen an die Triple-H-Plattform können eine Reihe von Anforderungen an das Energiespeichermodul abgeleitet werden.

Da für die Triple-H-Plattform drei unterschiedliche Energiesammler gleichzeitig eingesetzt werden sollen, bestehen für das Energiespeichermodul unterschiedliche Konfigurationsmöglichkeiten.

- Jeder Energiesammler erhält eine eigene Energiespeichereinheit, die Energiespeichereinheiten werden einzeln belastet und bei Bedarf umgeschaltet
- Alle Energiesammler bedienen eine Energiespeichereinheit, diese versorgt die Triple-H-Plattform

Zielfunktion des Energiespeicher-Moduls

Zielfunktion des Energiespeichermoduls ist die Energiespeicherung der von den Energiesammlern gesammelten Energie und die Bereitstellung der Energie für einen Aktivitätszyklus der Triple-H-Plattform. Für das Energiespeicher-Modul stehen verschiedene Technologien zur Verfügung. Akkumulatoren auf der Basis von Blei, Nickel/Cadmium, Nickel/Metallhydrid und Lithium/Ion mit flüssigen Elektrolyten sind wegen der geringen Lebensdauer nicht geeignet. Es verbleiben dann noch ELDC's, MLCC's und Lithium/Ion Akkumulatoren mit festem Elektrolyten (MEC's).

Minimierung der Verluste

- Der Energiespeicher muss eine geringe Selbstentladung aufweisen
- Der Arbeitsspannungsbereich muss an den Arbeitsspannungsbereich der Verbraucher angepasst sein
- Der Energiespeicher muss einen guten Wirkungsgrad für die Aufladung haben
- Der Energiespeicher muss einen guten Wirkungsgrad für die Entladung haben

Schnittstellen

Für den Energiespeicher ist keine Schnittstelle außer den Sensoren und den Versorgungsverbindungen von den Energiesammlern und zu den Verbrauchern vorgesehen.

Anwendung

Es werden drei lokale Energiespeicher eingesetzt, für jedes Energiesammel-Modul jeweils einer. Jeder Energiespeicher wird für den Energiebedarf der Triple-H-Plattform dimensioniert. Da drei Energiesammel-Module gleichzeitig eingesetzt werden, erhält man eine dreifache Redundanz bezüglich der Verfügbarkeit oder der Betriebsdauer der Triple-H-Plattform. Die Energiespeicher sind einzeln zuschaltbar. Die Energiespeicher werden kontinuierlich nach Verfügbarkeit der Energiesammler geladen. Die Umschaltung der Last erfolgt durch das CPU-Modul in Abhängigkeit der Ladung und des Ladungszufluss der einzelnen Energiespeicher. Über einen unteren Grenzwert für die Spannung an den Energiespeichern wird die Entladung der Energiespeicher vollständig deaktiviert.

Bestimmung des Speichers für das Energiespeicher Modul

Der Speicher des Energiespeicher-Moduls wurde aus den Herstellerangaben und dem abgeschätzten Betriebsprofil in einer Excel-Tabelle für verschiedene Module berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden in der Bewertungsmatrix zusammengefasst.

2.1.5 Anforderungen Energiesammel-Modul

Das Energiesammel-Modul beinhaltet die Generatoren für die Erzeugung der von der Triple-H-Plattform benötigten Energie aus in der Umgebung der Triple-H-Plattform vorhandener freier Energie.

Aus den Anforderungen an die Triple-H-Plattform können eine Reihe von Anforderungen an das Energiesammel-Modul abgeleitet werden.

- Das Energiesammel-Modul soll mindestens einmal täglich einen Aktivitätszyklus zusätzlich der geforderten Minimalaktivität der Triple-H-Plattform versorgen
- Das Energiesammel-Modul soll drei verschiedene Energieformen verwenden, um die Verfügbarkeit zu erhöhen

Zielfunktion des Energiesammel-Moduls

Zielfunktion des Energiesammel-Moduls ist die Bereitstellung der Energie für den Betrieb der Triple-H-Plattform. Das Energiesammel-Modul soll elektrische Energie über einen thermoelektrischen und einen elektromechanischen und einen photoelektrischen Generator erzeugen. Der elektromechanische Generator kann als piezoelektrischer oder elektromagnetischer Generator ausgelegt sein. Jeder der Generatoren muss so ausgelegt sein, dass bei Verfügbarkeit entsprechender freier Energie, die Versorgung der Triple-H-Plattform gewährleistet ist.

Photoelektrischer Generator

Der photoelektrische Generator erzeugt aus dem einfallenden Licht eine elektrische Energie. Der Generator besteht aus ein oder mehreren Solarzellen und einer elektronischen Schaltung,

die die von den Zellen erzeugte elektrische Spannung und den elektrischen Strom an den Energiespeicher überträgt. Es ist ein minimaler Lichteinfall notwendig um den Generator wirksam werden zu lassen.

Thermoelektrischer Generator

Der thermoelektrische Generator erzeugt aus dem Temperaturunterschied zweier Medien eine elektrische Energie. Der Generator besteht aus ein oder mehreren Peltierelementen und einer elektronischen Schaltung, die die elektrische Spannung und den elektrischen Strom der Elemente an den Energiespeicher überträgt. Die Energie ist proportional zur Temperaturdifferenz und der Fläche der verwendeten Peltierelemente. Es ist eine minimale Temperaturdifferenz erforderlich um den Generator wirksam werden zu lassen.

Elektromagnetischer Generator

Der elektromagnetische Generator erzeugt aus einer rotierenden oder linearen mechanischen Bewegung eine elektrische Energie. Der Generator kann als Wechsellipol oder Synchrongenerator für rotierende Einspeisung oder als Tauchspule für lineare Einspeisung ausgeführt sein. Die vom Generator erzeugte elektrische Energie wird über eine elektronische Schaltung an den Energiespeicher übertragen. Es ist eine minimale Geschwindigkeit der rotierenden oder linearen Bewegung notwendig um den Generator wirksam werden zu lassen.

Piezoelektrischer Generator

Der piezoelektrische Generator erzeugt aus einer mechanischen Schwingung eine elektrische Energie. Der Generator besteht aus einem piezoelektrisch aktiven Element und einer elektronischen Schaltung, die die elektrische Spannung und den elektrischen Strom des Elementes an den Energiespeicher überträgt. Es ist eine minimale mechanische Anregung erforderlich um den Generator wirksam werden zu lassen.

Minimierung der Verluste

- Möglichst niedriger Einsatzpunkt für den Generator
- MPPT-Regelung durch die elektronische Steuerung
- Geringer Eigenverbrauch
- Anpassung der Ausgangsspannung an die benötigte Spannung der Verbraucher

Schnittstellen

Für die Energiesammel-Module sind keine Schnittstellen außer denen der Sensoren, der Steuerungselektronik und den Versorgungsverbindungen von den Energiesammlern und zum Energiespeicher vorgesehen.

Anwendung

Drei der in Abschnitt 0 genannten Generatoren werden verwendet. Die Generatoren werden kontinuierlich betrieben, eine Abschaltung erfolgt wenn alle Energiespeichereinheiten vollständig geladen sind oder keine freie Energie verfügbar ist.

Bestimmung der bereitgestellten Energie der Generatoren

Die verfügbare Energie der Generatoren wurde aus den Herstellerangaben und dem abgeschätzten Betriebsprofil in der bereits erwähnten Excel-Tabelle für verschiedene Module berechnet und dort werden auch die Ergebnisse dieser Berechnung zusammengefasst.

An den Generatoren wurden im Labor praktische Messungen der erzeugten Leistungen durchgeführt. Für den piezoelektrischen Generator konnte dies nicht durchgeführt werden, da sich eine mechanisch sinnvolle Anregungsquelle nicht im gegebenen Zeitrahmen realisieren ließ. Der piezoelektrische Generator so ist zwar in der Triple-H-Plattform implementiert, eine Mes-

sung der damit zu gewinnenden Energie kann jedoch erst in einer realen Anwendung bestimmt werden.

2.2 Modulauswahl

Auf Basis der ermittelten Daten, des zugrundegelegten Anwendungsprofiles und der durchgeführten Messungen wurden die Bauteile verschiedener Hersteller für die einzelnen Module verglichen. Daraus ergab sich die nachfolgende Auswahl an potentiell sinnvoll einsetzbaren Funk-Modulen.

2.2.1 Auswahl Funk-Modul

Konkrete Messungen wurden am GSM-Modul durchgeführt, da dieses als erstes zur Anwendung kommen sollte. Das WLAN und das Bluetooth-Modul wurden anhand der Datenblatt-Lage ausgewählt.

Für die Funkverbindung wurden für die Auslegung die nachfolgenden Funk-Module verglichen:

1. GSM, GE864-GPS, Telit Wireless Solutions, EVK2 Entwicklerboard (CS1139B + CS1439B)¹
2. GSM, Leon G100, ublox, EVKG20 Entwicklerboard²
3. GSM, SIM908, SIMCom Wireless Solutions³
4. WLAN, RS9110-N-11-28-04, Redpine Signals Inc.⁴
5. WLAN, Roving Network, RN171, Roving Network Inc., RN-171-EK Entwicklerboard⁵
6. Bluetooth, Roving Network, RN42, Roving Network Inc. RN-42-EK Entwicklerboard⁶

Messung des Energieverbrauchs des GSM-Moduls

Die Messung des Energieverbrauchs des GSM-Moduls erfolgte an einer Prototypen Schaltung des GE864-GPS Moduls. Über die Entwicklungsumgebung der Schaltung wurden eine Positionsbestimmung und die Versendung einer SMS mit den Positionsdaten an ein Mobiltelefon ausgeführt. Gemessen wurde der aufgenommene Strom für die Dauer eines Aktivitätszyklus des Moduls. Die Messung wurde mit einem Oszilloskop vom Typ MSO4054 und einer Stromzange vom Typ TCP0030 der Firma Tektronix ausgeführt.

Da die Messreihe⁷ mit einer zeitlichen Auflösung von 20µs für die Dauer mehrerer Sekunden durchgeführt werden muss, wurden die Werte für den Energieverbrauch über ein Matlab-Programm⁸ berechnet. **Abbildung 2** zeigt die Messwerte des Stroms für die Dauer eines Aktivitätszyklus.

¹ [Tel131], [Tel11], [Tel13]

² [ubl12], [ubl13]

³ [SIM13], [SIM131]

⁴ [Red12]

⁵ [Mic14], [Mic121], [Mic13]

⁶ [Mic10], [Mic122]

⁷ ISendSms3SignalData.txt, © 2014 Kristronics GmbH, Gewerbegrund 7, 24955 Harrislee

⁸ Anhang A 2

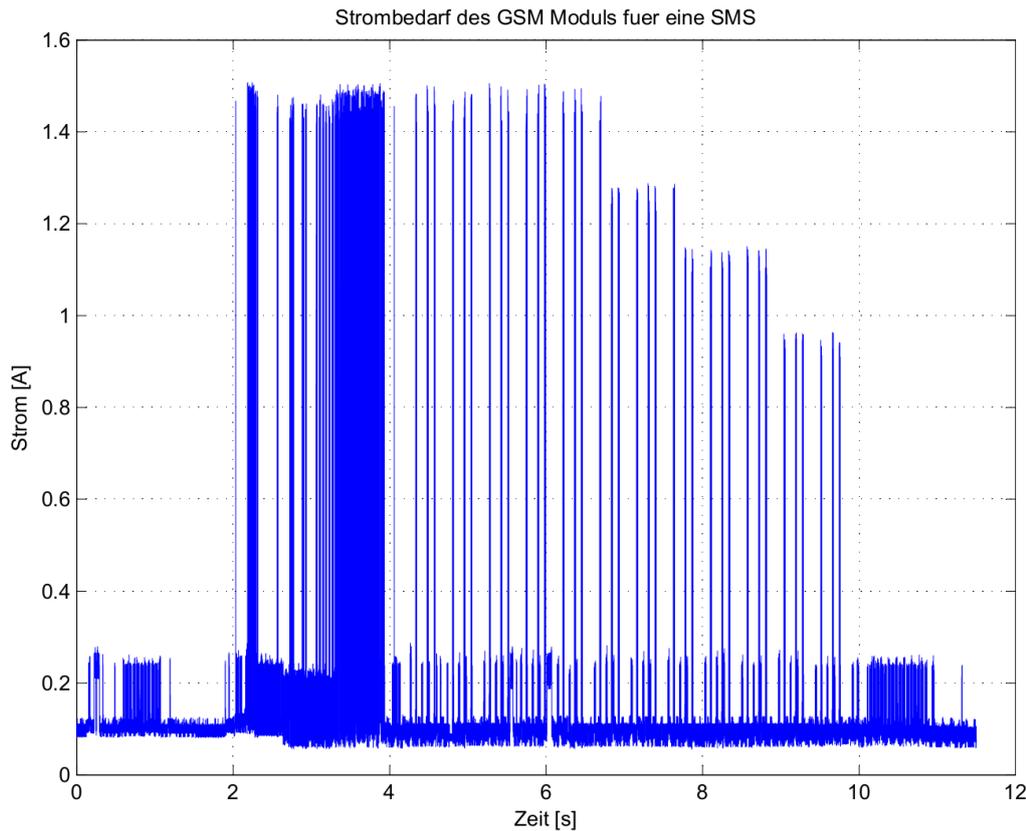


Abbildung 2: Strombedarf eines Aktivitätszyklus des GSM-Moduls

Dateiname	I_SendSms3SignalData.txt	
Messdauer	11.50	[s]
Auflösung	0.000020	[s]
Spannung	3.60	[V]
Spitzenstrom	1.50	[A]
Stromminimum	0.056	[A]
Strommittel	0.134	[A]
Ladung	1.547	[As]
Energie	5.569	[J]
Spitzenleistung	5.427	[W]
Leistungsmittel	0.484	[W]

Tabelle 3: Messwerte des Energiebedarfs des GSM-Moduls

Auslegung und Bewertung des Funk-Moduls

Zur quantitativen Bewertung wurden die in der nachfolgenden Tabelle genannten Variablen verwendet. Dazu wurde ein virtuelles Betriebsprofil zugrunde gelegt, anhand dessen die Energiebedarfe der Module mittels einer Bewertungstabelle vergleichbar gemacht wurden. Der Gesamt-Energiebedarfs ergibt sich dabei aus der minimal benötigten Energie für $E_{GPS} + E_{GSM}$.

Funk-Modul	Energie für Ortsbestimmung	Dauer der Ortsbestimmung	Energie für Datenübertragung	Dauer der Datenübertragung	Kommentar
GSM	E_{GPS}	T_{GPS_on}	E_{GSM}	T_{GSM_on}	
WLAN	E_{GPS}	T_{GPS_on}	E_{WLAN}	T_{WLAN_on}	
Bluetooth	E_{GPS}	T_{GPS_on}	E_{BT}	T_{BT_on}	

Tabelle 4: Variablen zur Auslegung und Bewertung des Funk-Moduls

Die nachfolgend genannten Bauteile wurden für die Triple-H-Plattform gewählt:

Für das GSM- Funk-Modul GE864-GPS erhält man aus der Bewertungstabelle auf der Basis des angenommenen Betriebszyklus eine Schätzung für einen Energiebedarf von etwa 80J.

Der große Unterschied zum praktisch gemessenen Wert Messung von 5,6J resultiert aus dem angenommenen Betriebsprofil mit einer Betriebsdauer von 60s und einer maximale Sendeleistung und den tatsächlich beim Versuch vorliegenden Sende- und Empfangs-Bedingungen.

Für das gewählte WLAN- Funk-Modul RN171 erhält man eine entsprechende Schätzung für den Energiebedarf von 28J.

Für die Bluetooth-Module liegen die benötigten Energien um Größenordnungen niedriger, so dass diese im Licht der benötigten Energie für eine GSM-Übertragung nicht genauer betrachtet wurden.

2.2.2 Auswahl CPU-Modul

Mikroprozessoren mit sehr geringem Energiebedarf und steuerbaren Standby-Betriebsarten sind bei verschiedenen Herstellern verfügbar.

Für das CPU-Modul wurden für die Auslegung die nachfolgenden Ultra-Low-Power Prozessoren verglichen:

1. Arm Cortex, Energy Micro, EFM32GG990F1024, Energy Micro AS, EFM32GG-STK3700 Entwicklerboard⁹
2. Renesas, RL78G13, Renesas Electronics, YR0K50100LS000BE Entwicklerboard¹⁰
3. Arm Cortex, STM32L100, ST Microelectronics, 32L100CDISCOVERY Entwicklerboard¹¹
4. TI, MSP430FR5868IRGZ, Texas Instruments, MSP-FET430U48C Entwicklerboard¹²

Auslegung und Bewertung des CPU-Moduls

Zur Auslegung und Bewertung des CPU-Moduls wurde sein *Energiebedarf* E_{CPU} über die sich aus den *Betriebsmodi* 1 bis 8 ergebende *Einschaltzeit* $T_{\text{CPU}_{\text{on}}}$ verwendet.

Die Auswahl ergab das CPU-Modul MSP430FR5868IRGZ, für das man aufgrund des hinterlegten virtuellen Betriebsprofiles eine Schätzung für den Energiebedarf von 0,5J erhält.

Dieser auf einer F-RAM Technologie basierende Prozessor hat den Vorteil, dass die RAM-Daten nichtflüchtig im Speicher erhalten bleiben, wenn der Prozessor abgeschaltet ist und keinen Strom verbraucht. So kann sehr schnell zwischen den aktiven- und Standby-Phasen gewechselt werden, was sich günstig auf die Energiebilanz auswirkt.

2.2.3 Auslegung Sensor-Modul

Zur optionalen Ermittlung verschiedenster Messwerte werden auf der Plattform verschiedene Sensortypen vorgehalten. Für jeden Messwert wird ein dedizierter Sensor benötigt.

⁹ [Ene134] , [Ene10]

¹⁰ [Ren13] , [Ren]

¹¹ [STM131]

¹² [Tex12] , [Tex133] , [Tex132]

Für das Sensor-Modul werden für die Auslegung die nachfolgenden Sensoren bewertet:

1. Temperatursensor, TI, TMP103 ¹³
2. Temperatursensor, TI, TMP006 ¹⁴
3. Beschleunigungssensor, STM, LIS3DH ¹⁵
4. Ladungszähler, LT, LTC2942-1, Linear Technology Inc ¹⁶.

In einer Vergleichstabelle wurden die Ruhe- und Betriebsströme der Sensoren mit dem geplanten Betriebsprofil belegt. Auf der Plattform wurden alle sinnvoll einsetzbaren Sensoren mit integriert, um möglichst viel praktische Erfahrung mit dem Demonstrator gewinnen zu können. Der Energiebedarf für den Betrieb aller Sensoren gemäß des angenommenen Betriebsprofils wurde mit etwa 3,5J geschätzt.

Hierbei überwiegt deutlich der Ruhestrom der Sensoren. Aus diesem Grunde sind die Sensoren als kompletter Schaltungsblock abschaltbar und in der Zielapplikation werden später nur die tatsächlich benötigten Sensoren eingesetzt.

¹³ [Tex113]

¹⁴ [Tex122]

¹⁵ [STM10]

¹⁶ [Lin10]

2.2.4 Auslegung Energiespeicher-Modul

Es wurden verschiedene Energiespeicher Technologien und Bauelemente auf Ihre Eignung hin untersucht:

1. MEC, Infinite Power Solutions, THINERGY MEC202¹⁷
2. EDLC, Murata, DMF3Z5R5H474M3DTA0¹⁸
3. EDLC, Cooper Bussmann, PHB-5R0V505-R¹⁹
4. MLCC, NIC Components Corp., NMC1812X5R107K6.3²⁰

Für die Auslegung des Energiespeichers wurde primär der Leck Strom der unterschiedlichen Technologien berücksichtigt und weiterhin die Tragfähigkeit für Spitzenströme und natürlich die sinnvoll darstellbare Kapazität hinsichtlich der Bauelemente-Anzahl und der resultierenden Kosten.

Der Vergleich der unterschiedlichen Speichertechnologien erfolgte in einer Bewertungstabelle unter Zugrundelegung des angenommenen virtuellen Betriebsprofils. Das energetisch günstigste Bauelement ist die Mikroenergiezelle. Leider hat der Hersteller dieses Bauteils vom Markt genommen, so dass es nicht mehr einsetzbar ist.

Die nächst günstigste Realisierung kann mit Doppelschichtkondensatoren vom Typ PHB-5R0V505 erreicht werden. Hierbei liegt allerdings der Eigenverbrauch durch Leck Ströme bei 10,8 J/Tag bei einer Speicher Kapazität von 10F. Der Energieeintrag in das System muss natürlich im Mittel deutlich über diesen unvermeidlichen Verlusten liegen, damit es zu einem sinnvollen Betrieb geeignet ist.

Ein in der Kapazität vergleichbarer Aufbau des Energiespeichers mit herkömmlichen Multilayer-Keramikkondensatoren erweist sich aufgrund der Bauelemente Anzahl, der Bauraumes und des immensen Leckstromes als nicht zielführend.

Die lokalen Harvester-Speicher wurden mit 470mF ausgelegt, der Speicher für den Betrieb des Funk-Modules wurde mit 5F ausgelegt und die Kapazität der zentralen Speicherbank ist von 5F bis 55F über Steckbrücken einstellbar.

2.2.5 Auslegung Energiesammel-Modul

Das Energiesammel-Modul dient der Aufladung des Energiespeichers.

Für die Auslegung des thermoelektrischen und des photoelektrischen Generators wurde auf verfügbare Entwicklungsboards der Schaltkreis-Hersteller zurückgegriffen, die typischerweise für den Laboraufbau für die Vorentwicklung verwendet werden. Für jeden Energiesammler wurden die zugeführte und die abgeführte Energie gemessen.

2.2.5.1 Messungen zum thermoelektrischen Generator

Für den thermoelektrischen Generator wurden zwei Peltierelemente, Analog Technologies ATE1-127-3BSH-3²¹, und TE Technologies TE-127-2.0-2.5²², eingesetzt. Die MPPT-Regelung

¹⁷ [Inf122]

¹⁸ [Mur131]

¹⁹ [Coo11]

²⁰ [NICoA],

²¹ [Ana13]

²² [TET12]

erfolgte über eine entsprechende Steuerung auf dem Entwicklungsboard. Bauteile für die MPPT-Regelung werden von verschiedenen Herstellern angeboten.

1. Linear Technology, LTC3108, DC2080A Entwicklungsboard²³
2. Texas Instruments, BQ25504

Bestimmung der Generatorkennlinie des TEG ATE1-127-3BSH-3

Für die Bestimmung der Abgabeleistung des TEG vom Typ ATE1-127-3BSH-3 wurden unter Laborbedingungen verschiedene Temperaturdifferenzen eingestellt, indem ein zweites Element als Heizung verwendet wurde.

Die hierbei entstehende Thermospannung wurde dann mit verschiedenen Widerstandswerten belastet. Gemessen wurden hierfür die Temperaturen der warmen und der kalten Seite und die Thermospannung des Elementes, das als Generator dient. Für die Temperaturdifferenzen erhält man dann die U/I-Kennlinien für die verschiedenen Belastungsfälle.

Für die Messung wurde ein ATE1-127-3BSH-3 als Heizung verwendet. Als Spannungsquelle wurde ein Labornetzteil der Firma Rigol vom Typ DP832A eingesetzt. Die Temperaturmessung wurde mit zwei Thermopaaren vom Typ NiCr und einem Datalogger der Firma Almemo vom Typ 2890-9 durchgeführt.

Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau werden zwei gleiche Peltierelemente übereinandergelegt. Das untere Element dient als Heizung und ist mit der kalten Seite mit einem Kühlkörper mit Lüfter verbunden. Aus der umgebenden Luft wird hierdurch dem heizenden Peltierelement Wärme an der kalten Seite zugeführt.

Die warme Seite des heizenden Peltierelementes ist über eine Kupferfolie und Wärmeleitpaste mit dem als Generator arbeitenden Peltierelement verbunden. Die kalte Seite des als Generator arbeitenden Peltierelementes ist wiederum mit einem Kühlkörper verbunden, der die durch den Wärmefluss durch das Peltierelement entstehende Temperatur an die umgebende Luft abführt und die Temperaturdifferenz über dem Generator aufrechterhält, solange Wärme durch die Heizung nachgeführt wird.

Beide Kühlkörper sind ebenfalls mit Wärmeleitpaste versehen, so dass ein möglichst geringer Wärmewiderstand über die gesamte Kette besteht. Die Temperatur der kalten Seite des als Generator arbeitenden Peltierelementes wird über einen Temperatursensor am Wärme ableitenden Kühlkörper gemessen. Die Temperatur der warmen Seite des Peltierelementes wird an der an das Peltierelement gekoppelten Kupferfolie gemessen. Die Wärmewiderstände der Übergänge vom Peltierelement auf den Kühlkörper und von der Kupferfolie auf das Peltierelement werden bei der Messung nicht berücksichtigt.

²³ [Lin131]

Durchführung der Messung

Zunächst wird über ein Labornetzteil an das als Heizung verwendete Peltierelement eine Spannung von 0V angelegt und die Lüfter der beiden Kühlkörper eingeschaltet. Es wird die Spannung des nicht belasteten Generators und die Temperatur der beiden Temperatursensoren gemessen. Über die Erhöhung des Stromes durch das als Heizung dienenden Peltierelement werden dann verschiedene Temperaturdifferenzen über dem als Generator betriebenen Peltierelementes eingestellt. Für jede Temperaturdifferenz wird dann jeweils für den unbelasteten Fall und die verschiedenen Lastwiderstände die Generatorspannung und die Temperaturdifferenz bestimmt.

Diese Messung wurde für sieben Lastfälle und elf Temperaturdifferenzen durchgeführt. **Tabelle 9** zeigt die Ergebnisse der Messung, die Berechnung der Temperaturdifferenzen und die graphische Darstellung der Kennlinien des TEG erfolgt in einer externen Excel Tabelle²⁴.

Aus den Messwerten wurde zunächst die U/I-Kennlinie abgeleitet. Diese gibt die Abhängigkeit des Stromes von der Spannung bei verschiedenen Lasten über alle Temperaturdifferenzen wieder. **Abbildung 3** zeigt im betrachteten Temperaturbereich eine lineare Abhängigkeit des Stromes von der Spannung. Mit zunehmender Last sinkt die Spannung am TEG.

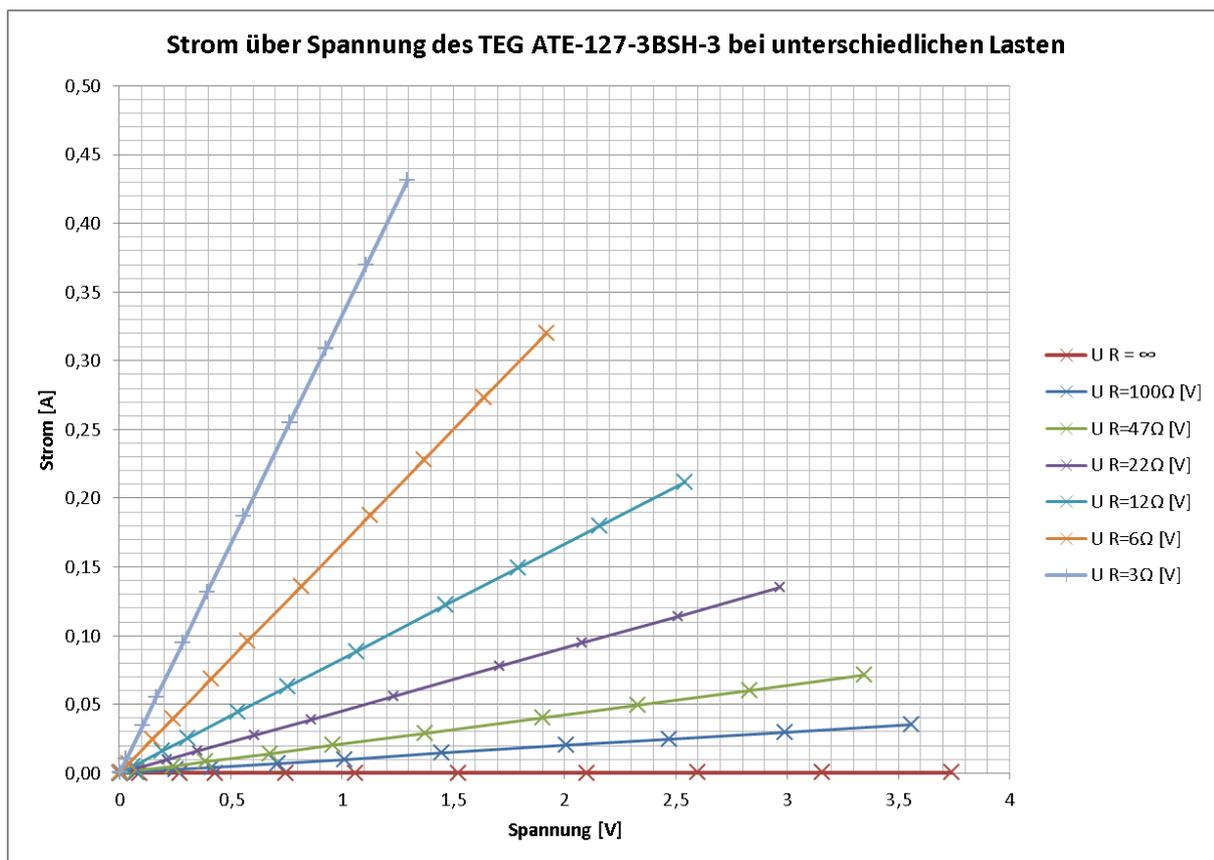


Abbildung 3: U/I-Kennlinie des TEG

24 Messwerte_Harvester.xlsx, © 2014 Kristronics GmbH, Gewerbegrund 7, 24955 Harrislee

Weiterhin kann aus den Messwerten die verfügbare Leistung mit $P = \frac{U^2}{R}$ für jedes ΔT berechnet werden. Damit erhält man dann die temperaturabhängige Leistungskennlinie wie in **Abbildung 4** dargestellt. Die Leistungskennlinie zeigt einen quadratischen Zusammenhang der verfügbaren Leistung zur Temperaturdifferenz über dem TEG. Je höher die Temperaturdifferenz über dem TEG ist, umso höher ist auch die verfügbare Leistung. Die verfügbare Leistung ist damit über den Wärmefluss mit der Temperaturdifferenz verbunden. Der Wärmewiderstand über die Kontaktflächen von der Wärmeeinspeisung und der Wärmeabgabe zur Umgebung beeinflusst den Wärmefluss und muss daher möglichst niedrig gehalten werden um den maximalen Wärmefluss für jede Temperaturdifferenz zu gewährleisten. Der Zusammenhang des Wärmeflusses zur Temperaturdifferenz ist über $\frac{d}{dt} Q = \frac{1}{R_{th}} * (\Delta T)$ gegeben. Aus **Abbildung 4** kann abgelesen werden, dass bei einer Last von 6Ω bei einer Temperaturdifferenz von $10K$ eine Abgabeleistung von ca. $50mW$ erwartet werden kann.

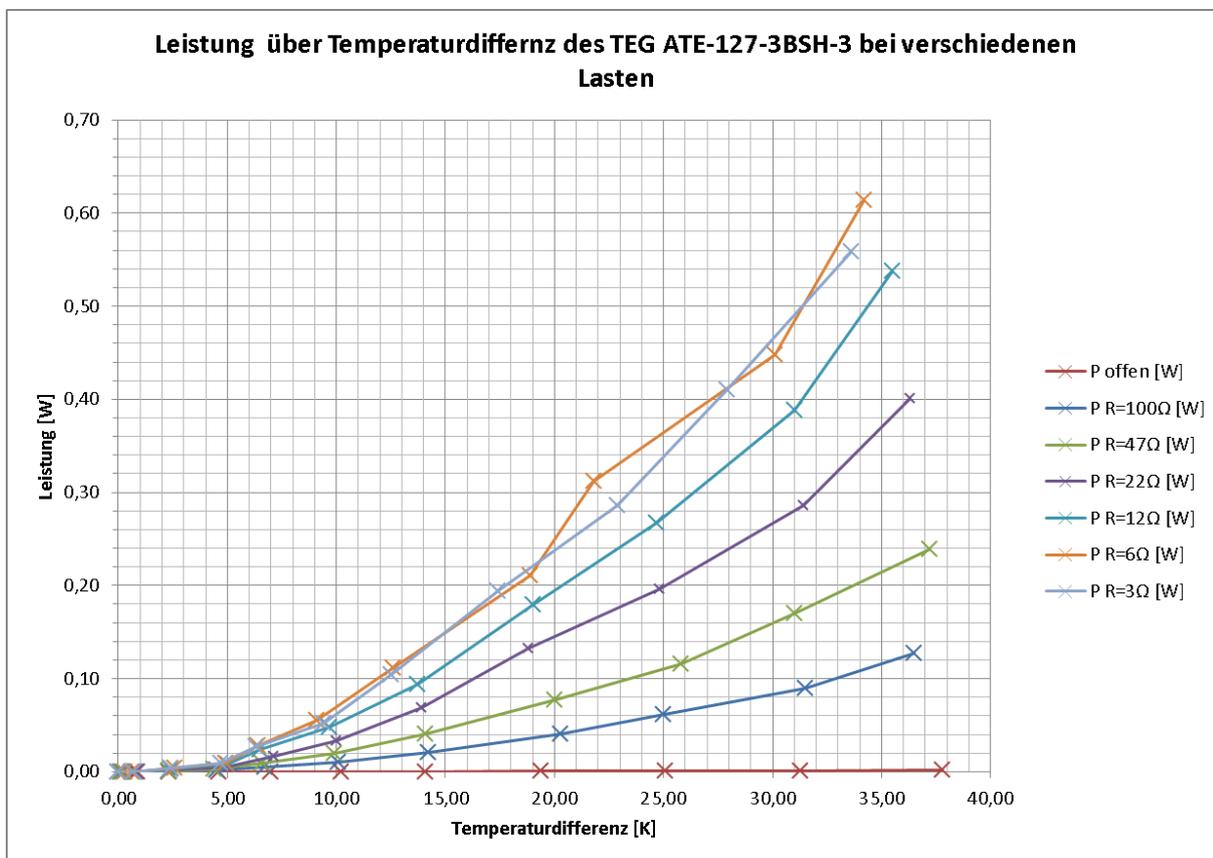


Abbildung 4: P/ΔT- Kennlinie des TEG

Eine leichter ablesbare Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Ausgangsspannung und Strom des TEG bei verschiedenen Temperaturdifferenzen ist mit **Abbildung 5** gezeigt.

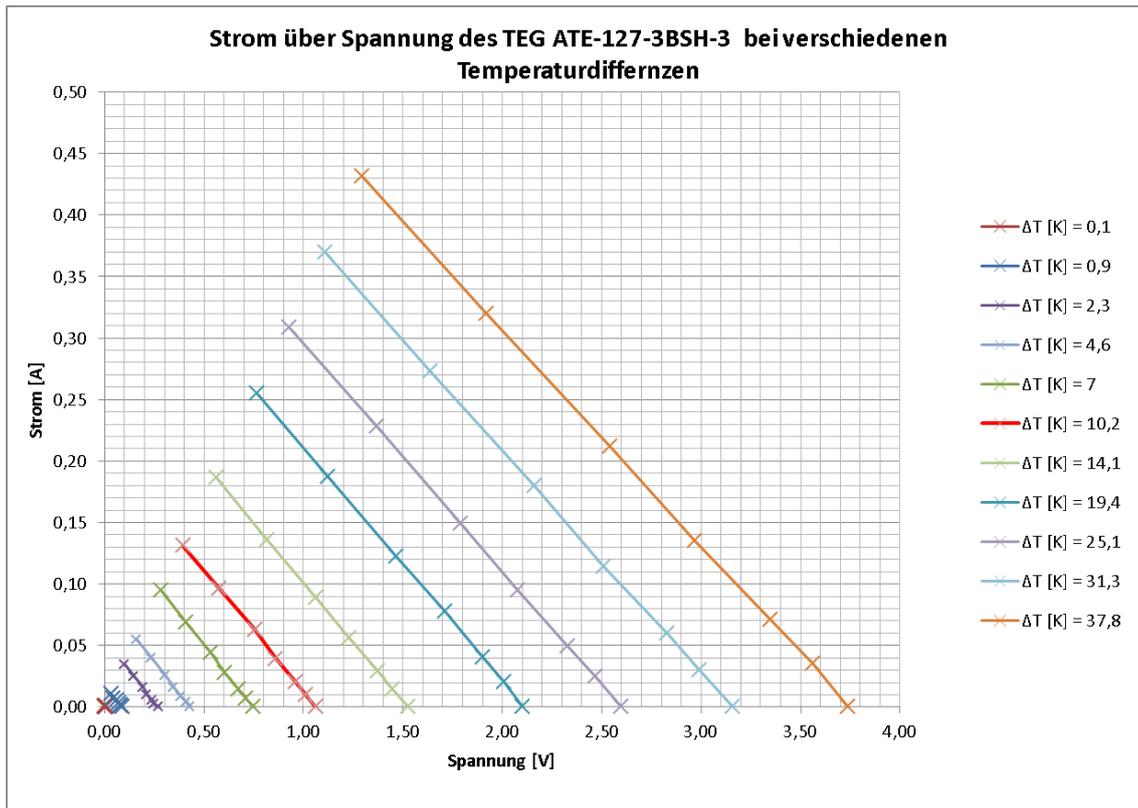


Abbildung 5: U/I-Kennlinie des TEG für verschiedene Temperaturdifferenzen

Für jede Temperaturdifferenz kann in **Abbildung 6** ein Arbeitspunkt gewählt werden, bei dem die Abgabeleistung maximal wird. Bei den vorliegenden Kennlinien ergibt sich der gewählte Arbeitspunkt dann an der Stelle von $\frac{1}{2} U$ ohne Last.

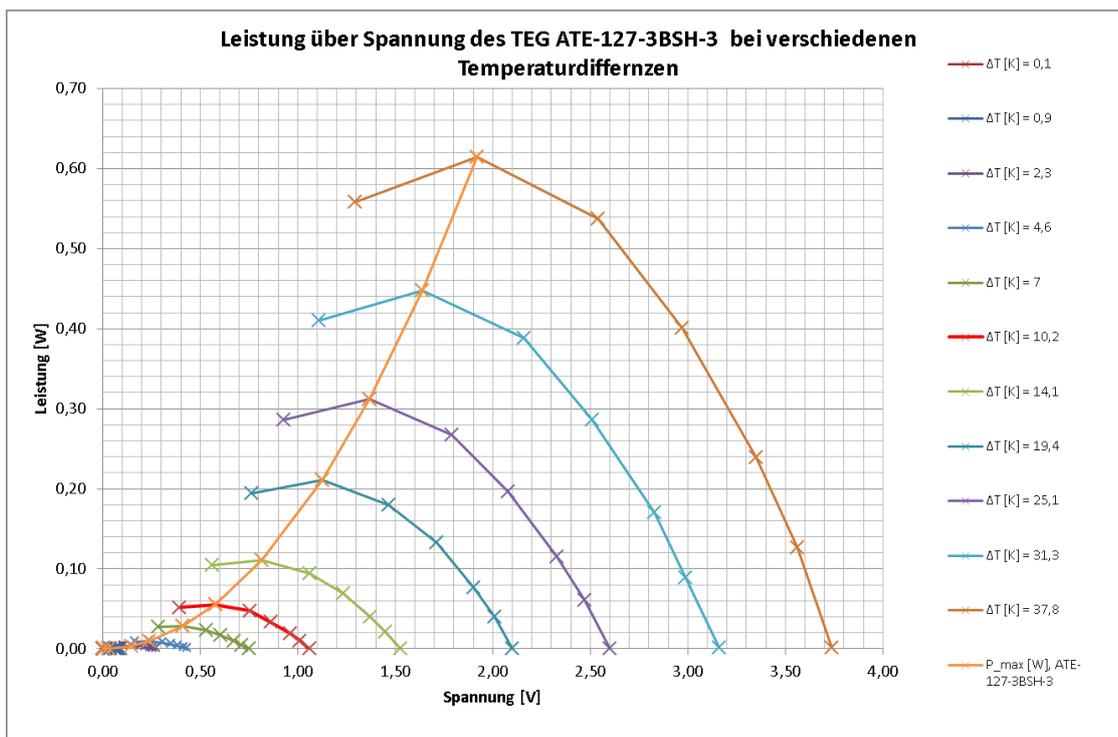


Abbildung 6: P/U-Kennlinie des TEG mit P_{max}

Auslegung des thermoelektrischen Generators

Die nachfolgenden genannten Variablen wurden zur Auslegung und Bewertung des thermoelektrischen Generators verwendet.

Über den Spitzenwert der Leerlaufspannung $U_{0_th_peak}$ wird die Temperaturdifferenz am thermoelektrischen Generator bestimmt.

Über den Wert der Leerlaufspannung U_{0_th} im Übergang zur Betriebsspannung wird der Einsatzpunkt bestimmt.

Über das Produkt der Betriebsspannung U_{th} mit der abgegebenen Ladung C_{th} wird die gesammelte Energie bestimmt.

Für das gewählte Element erhält man bei einer geschätzten Temperaturdifferenz von 8,15K eine Abgabeleistung von etwa 100mW. Die Messung des Elementes ergibt bei einer Temperaturdifferenz von 10K etwas 50mW Abgabeleistung. Der Unterschied der Schätzung zur Messung beruht darin, dass in der Schätzung die Wärmewiderstände im Wärmefluss nicht berücksichtigt sind. Für die Leistungsanpassung des Peltierelementes an das Speicher Modul wurde der integrierte Schaltwandlerbaustein LT3109 gewählt, da bei diesem Bauteil die Richtung des Wärmeflusses nicht berücksichtigt werden muss und die Einsatzspannung am kleinsten ist.

2.2.5.2 Messungen zum piezoelektrischen Generator

Für den piezoelektrischen Generator werden zwei Wandler, PICERAMIC P876 und Vulture MIDE V25W, praktisch geprüft. Für die MPPT-Regelung wurde der integrierte Schaltwandlerbaustein Baustein LTC 3588 ausgewählt.

Auslegung und Bewertung des piezoelektrischen Generators

Zur Auslegung und Bewertung wurden die folgenden Variablen verwendet: Über den Spitzenwert der Leerlaufspannung $U_{0_pm_peak}$ wird die Amplitude der Auslenkung am piezoelektrischen Generator bestimmt. Über den Wert der Leerlaufspannung U_{0_pm} im Übergang zur Betriebsspannung wird der Einsatzpunkt bestimmt. Über das Produkt der Betriebsspannung U_{pm} mit der abgegebenen Ladung C_{pm} wird die gesammelte Energie bestimmt.

Die betrachteten Elemente leisten theoretisch etwa 4mW bzw. 11mW. Welche Leistungen sich praktisch erreichen lassen, konnte an dieser Stelle nicht nachgewiesen werden, da die für die Anregung des Generators benötigte Energieform als Vibration im Rahmen des Projektes nicht sinnvoll darstellen ließ. Eine genauere Auslegung und Beurteilung der praktischen Messwerte kann daher erst in einem weiteren Entwicklungsschritt nach Erfassung des Vibrationsprofils und Entwicklung eines passenden mechanischen Wandlers sinnvoll durchgeführt werden.

2.2.5.3 Messungen zum elektromechanischen Generator

Weiterhin wurde der rotierende elektromagnetische Generator als Energiewandler untersucht. Als elektromechanischer Generator wurde ein BLDC Motor der Firma Nanotec DB22M01²⁵ eingesetzt. Als Energie-Quelle wurde ein Savonius Rotor (eine Windturbine mit mindestens zwei sich überlappenden Schaufeln) angenommen.

Bestimmung der Generatorkennlinie des DB22M01

Für die Bestimmung der Abgabeleistung des DB22M01 wurden in einer Messung unter Laborbedingungen über einen elektrischen Antrieb, der als mechanische Quelle der Rotationsenergie verwendet wird, verschiedene Drehzahlen eingestellt. Die hierbei entstehende Generatorspannung wurde dann mit verschiedenen Widerstandswerten belastet. Gemessen wurden hierfür die

²⁵ [Nan07]

Phasenfrequenz einer Phase des DB22M01 und die gleichgerichtete Generatorspannung des DB22M0. Der Generator wurde dann bei verschiedenen Drehzahlen dann mit den unterschiedlichen Widerständen belastet. Für die Drehzahlen erhält man dann die U/I-Kennlinien für die verschiedenen Belastungsfälle.

Für die Messung wurde ein Proxon Minimot 40 als Antrieb verwendet. Als Spannungsquelle wurde ein Labornetzteil der Firma Rigol vom Typ DP832A eingesetzt. Die Spannungsmessung wurde mit einem Multimeter der Firma Tektronix vom Typ DM250 durchgeführt. Die Frequenzmessung erfolgte mit einem Oszilloskop der Firma Instek vom Typ GDS-2104.

Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau wurde der DB22M01 mechanisch starr mit einem Antrieb verbunden. Die drei Phasen des DB22M01 wurden über drei Dioden-Halbbrücken gleichgerichtet. Die gleichgerichtete Spannung lädt einen Kondensator von 10µF für die Glättung der Ausgangsspannung. Die Phasenspannung direkt am Ausgang einer Phase wird für die Messung der Phasenfrequenz verwendet, hieraus wurde die Drehzahl des Generators bestimmt. Die Drehzahl des Antriebs wurde über das Labornetzteil eingestellt. Der DB22M01 ist als BLDC Motor mit drei Phasen aufgebaut. Im Generatorbetrieb erzeugen die auf dem Rotor aufgebrachten Magnete bei Drehung des Rotors in der Stator Wicklung eine Wechselspannung. Da die Stator Wicklung in drei Phasen ausgeführt ist erhält man auch drei, entsprechend dem geometrischen Aufbau der Wicklung folgend, zeitlich gegeneinander versetzte sinusoidale Wechselspannungen mit einer Frequenz proportional zur Drehzahl des Rotors. Die Wechselspannung ist dabei synchron zur Drehzahl. Mit steigender Drehzahl steigt damit die Frequenz der Wechselspannung, gleichzeitig steigt aber auch die Amplitude der Spannung, sodass bei einer höheren Drehzahl auch eine höhere Leistung verfügbar ist. Die Messung der gleichgerichteten Ausgangsspannung wurde über ein Multimeter durchgeführt und die Messung der Phasenfrequenz wurde über ein Oszilloskop ausgeführt.

Durchführung der Messung

Es wurde die Spannung des nicht belasteten Generators und die Phasenfrequenz bestimmt. Über die Erhöhung der Spannung des elektrischen Antriebs wurde die Drehzahl des Generators erhöht. Für die eingestellten Drehzahlen wurden dann jeweils für den unbelasteten und die verschiedenen Lastwiderstände die Generatorspannung und die Phasenfrequenz bestimmt. Die Drehzahl berechnet sich über $Drehzahl = Phasenfrequenz / Polpaare$, der DB22M01 ist als achtpolige Maschine aufgebaut. Das Absinken der Drehzahl des Antriebs bei Belastung des Generators wurde durch die Erhöhung der Spannung des Labornetzteils kompensiert. Die Messung wurde für sieben Lastfälle und dreizehn Drehzahlen durchgeführt. **Tabelle 10** zeigt die Ergebnisse der Messung, die Berechnung der Drehzahlen und die graphische Darstellung der Kennlinien des DB22M01 erfolgt in einer externen Excel Tabelle²⁶.

Aus den Messwerten wurde zunächst die U/I-Kennlinie abgeleitet. Diese gibt die Abhängigkeit des Stromes von der Spannung bei verschiedenen Lasten über alle Drehzahlen wieder. **Abbildung 7** zeigt im betrachteten Drehzahlbereich eine annähernd lineare Abhängigkeit des Stromes von der Spannung. Mit zunehmender Last sinkt die Spannung am Synchrongenerator.

²⁶ Messwerte_Harvester.xlsx, © 2014 Kristronics GmbH, Gewerbegrund 7, 24955 Harrislee

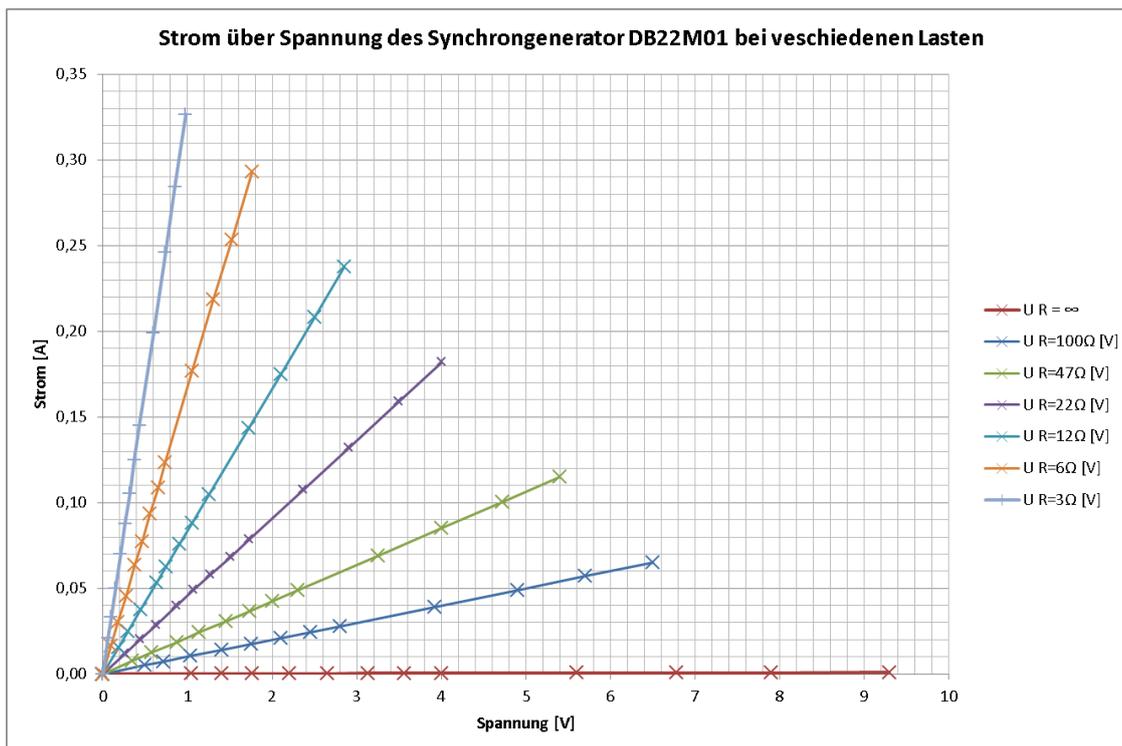


Abbildung 7: U/I-Kennlinie des Synchrongenerators

Weiterhin kann aus den Messwerten die verfügbare Leistung mit $P = \frac{U^2}{R}$ für jede Drehzahl berechnet werden. Damit erhält man dann die drehzahlabhängige Leistungskennlinie wie in **Abbildung 8** dargestellt.

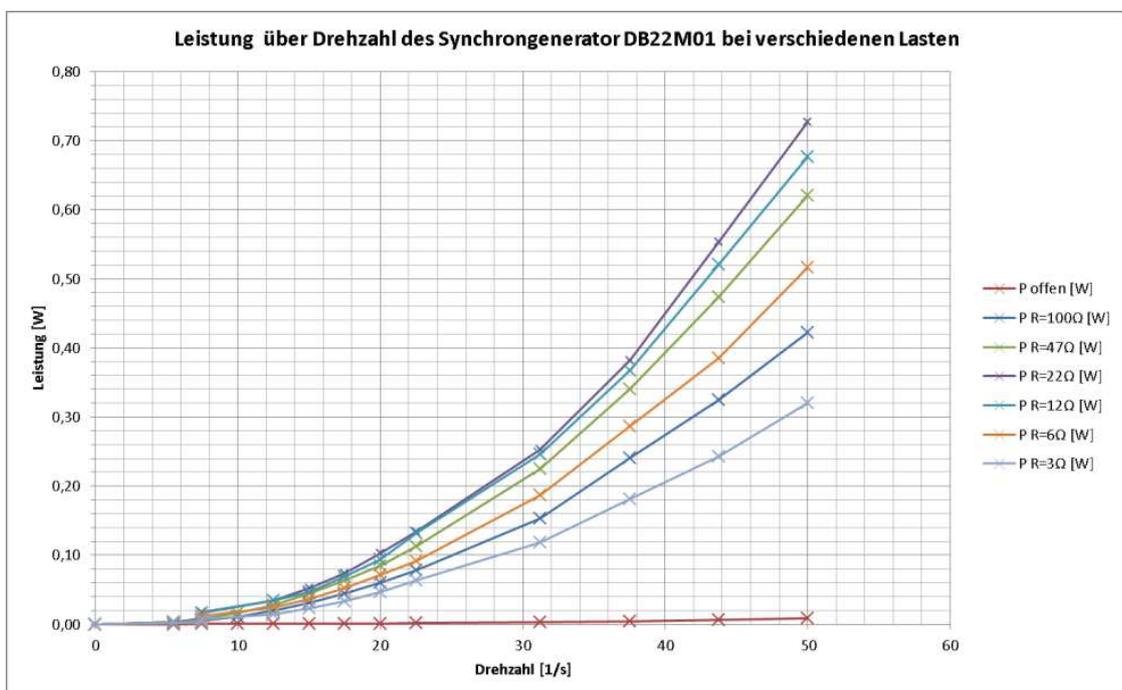


Abbildung 8: P/N- Kennlinie des Synchrongenerators

Die Leistungskennlinie zeigt einen quadratischen Zusammenhang der verfügbaren Leistung zur Drehzahl über dem Synchrongenerator. Je höher die Drehzahl am Synchrongenerator ist, umso höher ist auch die verfügbare Leistung. Die verfügbare Leistung ist damit über die Rotationsgeschwindigkeit mit der Drehzahl verbunden. Die Kopplung über die Rotationsachse von der me-

mechanischen Einspeisung und der Generatorwelle beeinflusst die Konstanz der Drehzahl und muss daher möglichst genau gehalten werden um die geringsten Gleichlaufstörungen zu gewährleisten. Der Zusammenhang der Spannung zur Drehzahl ist über $\frac{d}{dt} \varphi = \frac{1}{P_{mag}} * U$, mit P_{mag} als Proportionalitätsfaktor für die geometrischen und elektrischen Parameter des Motors, gegeben.

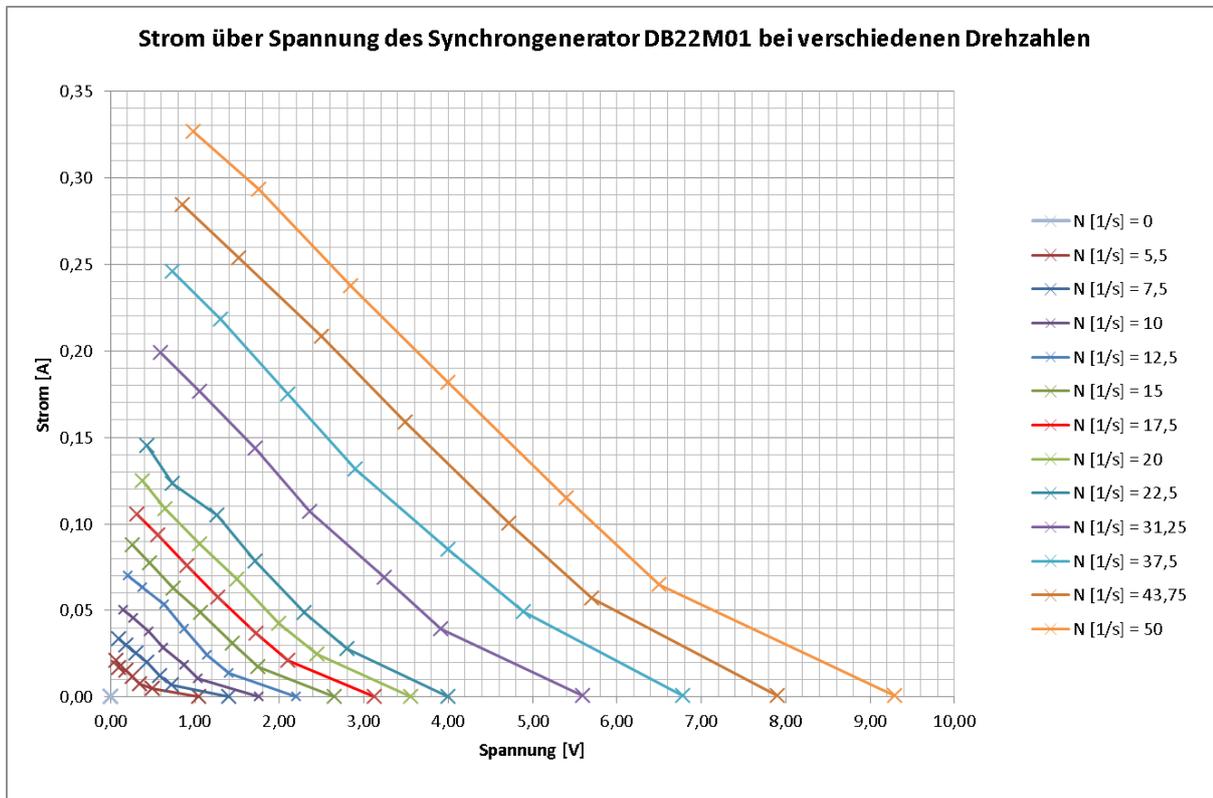


Abbildung 9: U/I-Kennlinie des Synchrongenerators für verschiedene Drehzahlen

Aus **Abbildung 8** kann abgelesen werden, dass bei einer Last von 6Ω bei einer Drehzahl von 15 1/s eine Abgabeleistung von ca. 52mW erwartet werden kann.

Eine leichter ablesbare Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Ausgangsspannung und Strom des Synchrongenerators bei verschiedenen Drehzahlen ist mit **Abbildung 9** gezeigt.

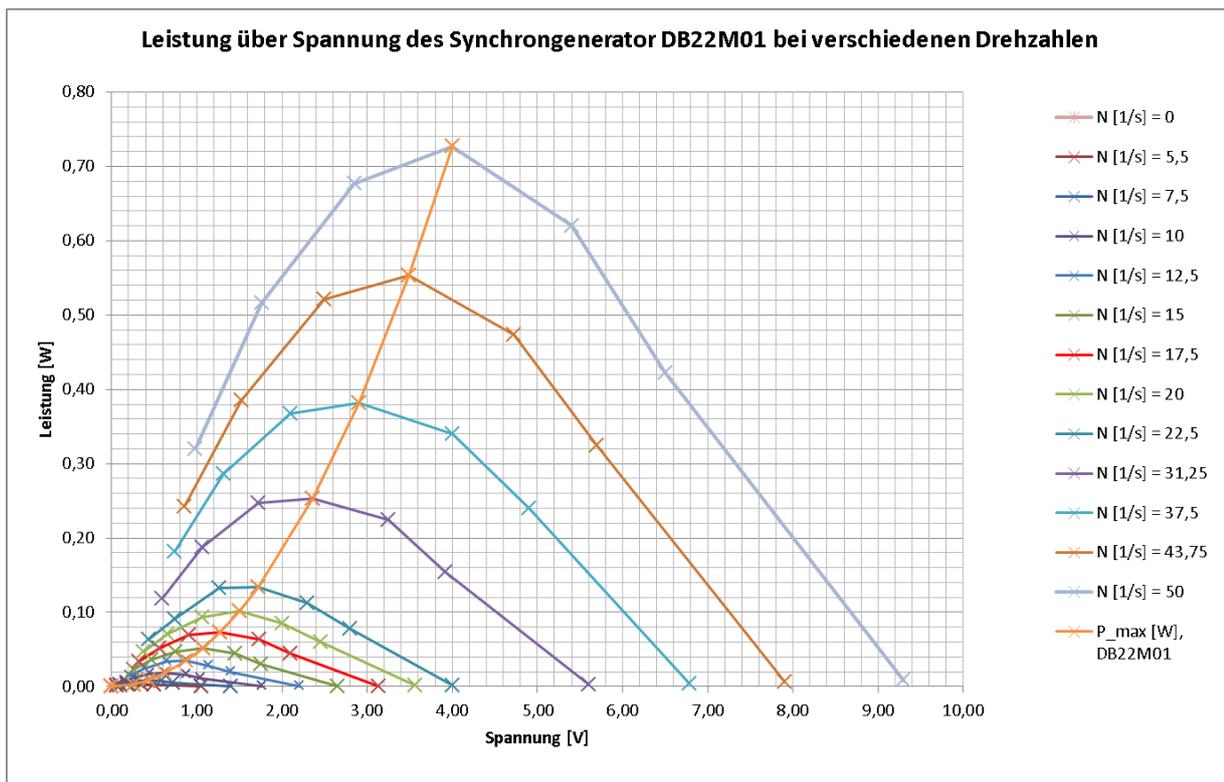


Abbildung 10: P/U-Kennlinie des Synchrongenerators mit P_{max}

Für jede Drehzahl kann gemäß **Abbildung 10** ein Arbeitspunkt gewählt werden, bei dem die Abgabeleistung maximal wird. Bei den vorliegenden Kennlinien ergibt sich der Arbeitspunkt dann an der Stelle von $\frac{1}{2} U$ ohne Last. Der Arbeitspunkt bei der Hälfte der Leerlaufspannung ist dann der Wert, der für einen MPPT Regler gewählt wird.

Auslegung und Bewertung des elektromechanischen Generators

Die nachfolgend genannten Variablen wurden zur Auslegung und Bewertung verwendet:

Über den Spitzenwert der Leerlaufspannung $U_{0_em_peak}$ wurde die benötigte Drehzahl des elektromagnetischen Generators bestimmt. Über den Wert der Leerlaufspannung U_{0_em} im Übergang zur Betriebsspannung wird der Einsatzpunkt bestimmt. Über das Produkt der Betriebsspannung U_{em} mit der abgegebenen Ladung wird die gesammelte Energie C_{em} bestimmt.

Die detaillierte Auslegung des Synchrongenerators erfolgte anhand einer Bewertungstabelle unter Zugrundlegung eines virtuellen Betriebsprofils. Die Tabelle ergibt einen theoretischen Wert für die verfügbare Leistung bei einer Drehzahl von 15 1/s von 129mW. Die Messung des DB22M01 ergibt eine verfügbare Leistung von 52mW. Der Unterschied der beiden Werte resultiert darin, dass in den theoretischen Berechnungen der Wirkungsgrad und die Verluste der Gleichrichterdiode nicht berücksichtigt sind. Für die Leistungsanpassung an das Speicher Modul wurde der integrierte Schaltwandler vom Typ BQ25504²⁷ ausgewählt.

Anmerkung zum elektromechanischen Generator:

Die hier beispielhaft erzielte Leistung bleibt deutlich hinter den anderen Quellen zurück. Es könnte daher der Eindruck entstehen, dass dieser potentiellen Quelle keine große Beachtung zugemessen werden sollte. Das ist in diesem Fall irreführend, da ja noch erhebliche ungenutzte Optimierungspotentiale bestehen: Wir haben aus Verfügbarkeitsgründen einen Motor als Generator ge-

²⁷ [Tex111]

nutzt – spezielle Generatoren haben sicher höhere Wirkungsgrade – und bei höheren Drehzahlen würde der Generator viel mehr leisten können, hier könnte man z.B. ein Getriebe zur Leistungs-Anpassung an die antreibende Quelle einsetzen.

2.2.5.4 Messungen zum photoelektrischen Generator

Für die Bestimmung der Abgabeleistung der Solarzelle unter Laborbedingungen wurden über eine Glühlampe als Beleuchtungsquelle verschiedene Helligkeiten eingestellt. Die verschiedenen Helligkeiten werden nicht über die Änderung der Versorgungsspannung der Lampe sondern über die Änderung des Abstands der Lampe zur Solarzelle eingestellt. Eine Änderung der Versorgungsspannung würde nicht nur die Helligkeit, sondern zusätzlich das Spektrum der Beleuchtung ändern, was die Messergebnisse verfälschen würde.

Die hierbei entstehende Generatorspannung wurde dann mit verschiedenen Widerstandswerten belastet. Gemessen werden hierfür die Spannung der Solarzelle und der Abstand der Beleuchtung. Über den Abstand der Beleuchtung und den im Kurzschluss fließenden Strom wurde mit dem Wert für den Kurzschlussstrom bei maximaler Beleuchtung mit Tageslicht und senkrechter Einstrahlung die relative Helligkeit berechnet. Der Wert des Kurzschlussstromes der Solarzelle bei maximaler Beleuchtung wurde dem Datenblatt entnommen. Der Generator wurde bei den verschiedenen Beleuchtungsstärken dann mit den unterschiedlichen Widerständen belastet. Für die verschiedenen Helligkeiten erhält man dann die U/I-Kennlinien für die verschiedenen Belastungsfälle.

Für die Messung wurde eine H7 12V/55W Kraftfahrzeug Lampe als Beleuchtung verwendet. Die Lampe wurde mit 25W betrieben. Als Spannungsquelle wurde ein Labornetzteil der Firma Rigol vom Typ DP832A eingesetzt. Die Spannungsmessung erfolgte mit einem Multimeter der Firma Keithley vom Typ 2700.

Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau wurde die Solarzelle senkrecht unter der Beleuchtung angebracht. Die Ausrichtung der Solarzelle erfolgte bei einem mittleren Abstand der Beleuchtung so, dass eine Position der Solarzelle unter der Beleuchtung erreicht wird, bei der die Leerlaufspannung ein Maximum annimmt. Die Lampe wurde über ein Stativ in der Höhe verstellbar angebracht. Der kleinste einstellbare Abstand betrug 35mm, der größte Abstand war 450mm. Da die Abstrahlung des Lichtes der Glühlampe in alle Raumrichtungen von der Glühwendel aus betrachtet gleich erfolgt, wird über die Vergrößerung des Abstandes eine größere Fläche beleuchtet. Da die Helligkeit der Lampe jedoch gleich bleibt und die ausgeleuchtete Fläche größer wird, nimmt die Helligkeit für die Fläche der Solarzelle ab. Damit kann die Helligkeit des auf die Solarzelle auftreffenden Lichtes ohne Änderung des Spektrums der Beleuchtung durch die Änderung des Abstandes der Beleuchtung von der Solarzelle durchgeführt werden. Die in Bezug auf die maximale im Datenblatt angegebene Referenzbeleuchtung durch die Lampe erzeugte Beleuchtung kann über den Kurzschlussstrom berechnet werden. Gemessen wurde daher die Kurzschlussströme bei verschiedenen Abständen und die Spannung bei verschiedenen Lasten.

Durchführung der Messung

Beginnend mit dem geringsten Abstand wird die Leerlaufspannung bestimmt. Hierzu wird zunächst die Solarzelle abgedeckt, um eine Erwärmung der Solarzelle durch die Beleuchtung zu verhindern. Dann wurde die Lampe eingeschaltet und gewartet, bis sich eine stabile Helligkeit an der Lampe einstellt. Dann wurde die Abdeckung von der Solarzelle entfernt und der Maximale Wert der Spannung gemessen. Dann wird die Solarzelle wieder abgedeckt und die Lampe ausgeschaltet. Die Messung wurde für die verschiedenen Lastwiderstände bis hin zum Kurz-

schluss durchgeführt. Im Kurzschluss wird mit dem Multimeter der Strom gemessen und nicht die Spannung. Die relative Beleuchtungsstärke wird dann über das Verhältnis des gemessenen Kurzschlussstroms zum Kurzschlussstrom laut Datenblatt für die maximale Beleuchtung mit $P_{rel} = I_{SCmess}/I_{SC}$ berechnet. Diese Messreihe wird für die verschiedenen Abstände durchgeführt. Die Messung wurde für vierzehn Lastfälle und fünf Abstände durchgeführt.

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Messung.

Die detaillierte Berechnung der relativen Beleuchtungsleistung und die graphische Darstellung der Kennlinien der Solarzelle mit einer Fläche von 52mm x 52mm erfolgt in der externen Excel Tabelle²⁸.

Aus den Messwerten wird zunächst die U/I-Kennlinie abgeleitet. Diese gibt die Abhängigkeit des Stromes von der Spannung bei verschiedenen Lasten über alle Beleuchtungsstärken wieder.

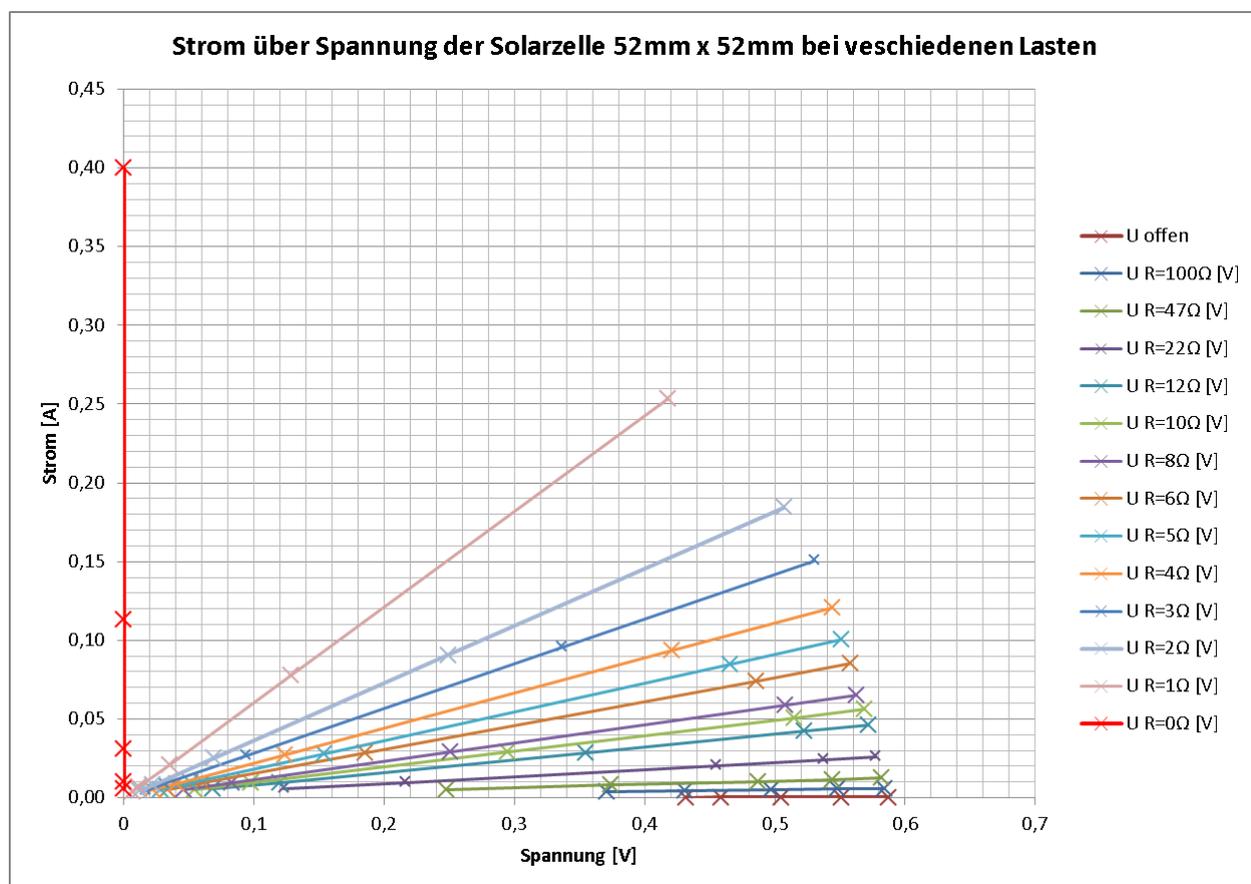


Abbildung 11: U/I-Kennlinie der Solarzelle

Abbildung 11 zeigt im betrachteten Beleuchtungsbereich eine annähernd lineare Abhängigkeit des Stromes von der Spannung. Mit zunehmender Last sinkt die Spannung am Solargenerator. Weiterhin kann aus den Messwerten die verfügbare Leistung mit $P = \frac{U^2}{R}$ für jede Beleuchtungsstärke berechnet werden. Damit erhält man dann die beleuchtungsabhängige Leistungskennlinie wie in **Abbildung 12** dargestellt.

28 Anhang A 1, Tabelle 11, Messwerte_Harvester.xlsx, © 2014 Kristronics GmbH, Gewerbegrund 7, 24955 Harrislee

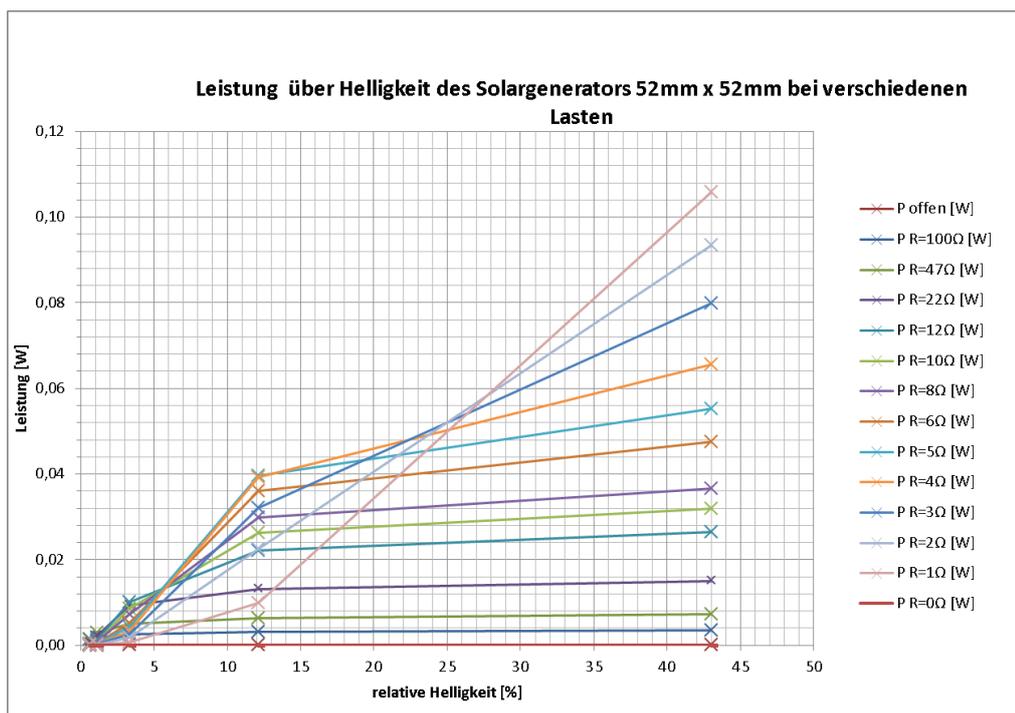


Abbildung 12: $P/P_{\text{Helligkeit}}$ - Kennlinie der Solarzelle

Die Leistungskennlinie zeigt für niedrige Lasten einen quadratischen Zusammenhang der verfügbaren Leistung zur Beleuchtungsstärke über dem Solargenerator und für hohe Lasten einen logarithmischen Zusammenhang der verfügbaren Leistung zur Beleuchtungsstärke. Dieser Wechsel der Abhängigkeit resultiert aus der Nichtlinearität der Kennlinie der Solarzelle.

Aus **Abbildung 12** kann abgelesen werden, dass bei einer Last von 5Ω bei einer relativen Beleuchtungsstärke von 12% eine Abgabeleistung von ca. 40mW erwartet werden kann. Eine leichter ablesbare Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Ausgangsspannung und Strom des Solargenerators bei verschiedenen Beleuchtungsstärken ist mit **Abbildung 13** gezeigt.

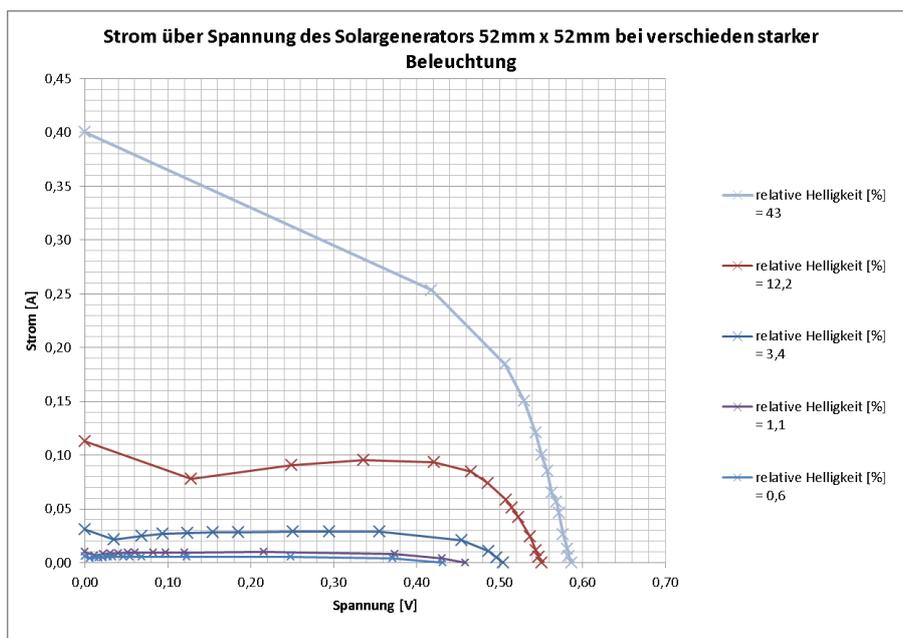


Abbildung 13: U/I-Kennlinie des Solargenerators für verschiedene Beleuchtungsstärken

Für jede Beleuchtungsstärke kann in **Abbildung 14** ein Arbeitspunkt gewählt werden bei dem die Abgabeleistung maximal wird. Bei den vorliegenden Kennlinien ergibt sich der Arbeitspunkt dann an der Stelle von $U_{MPPT} = 0,8 * U_{leer}$. Der Arbeitspunkt bei 80% der Leerlaufspannung ist dann der Wert, der für einen MPPT Regler gewählt wird.

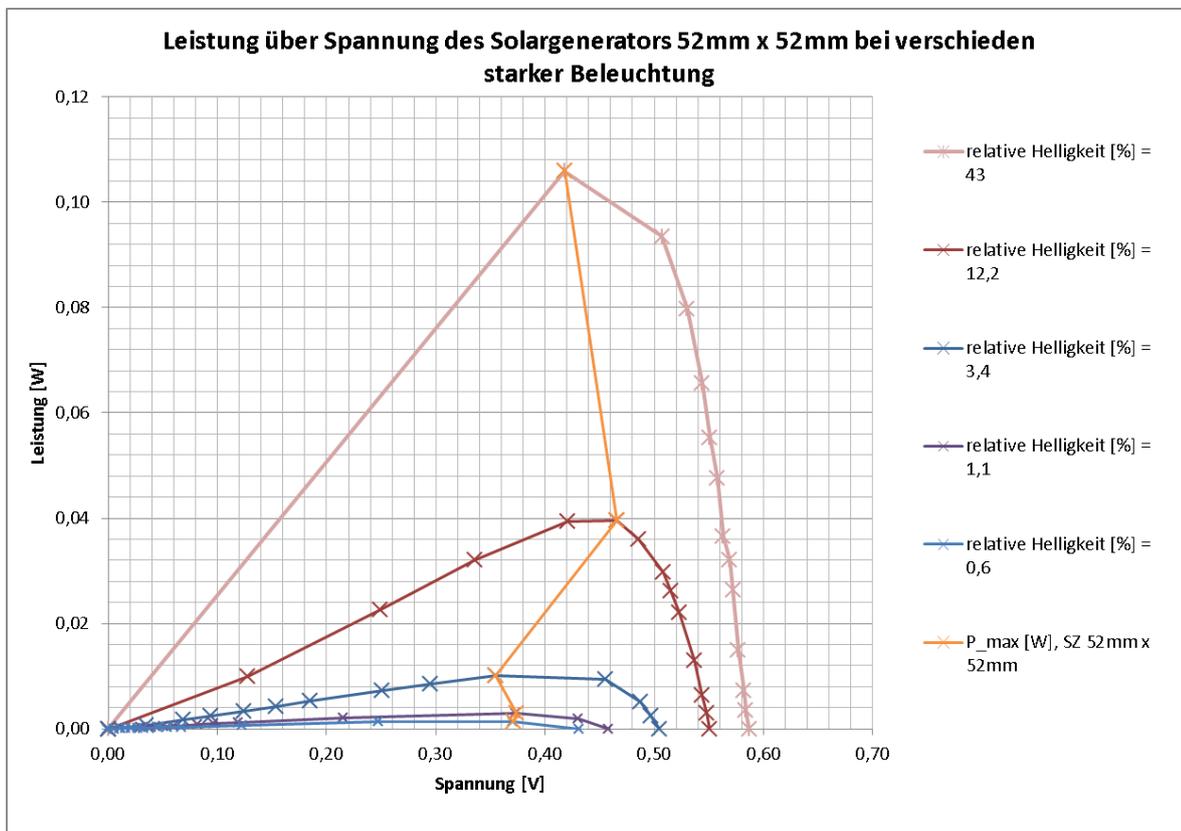


Abbildung 14: P/U-Kennlinie des Solargenerators mit Pmax

Die Nichtlinearität der Kennlinie der Leuchtdiode bewirkt die Stufigkeit der Kennlinien für Beleuchtungsstärken, die von der für 12% abweichen. Diese Ungenauigkeit resultiert aus der Beschränkung der Lastwiderstände auf wenige Werte und auf dem großen Messbereich für die Spannungsmessung an der Solarzelle, die eine Messbereich Umschaltung des Messgerätes erzwingen.

Auslegung und Bewertung des photoelektrischen Generators

Die nachfolgenden genannten Variablen wurden zur Auslegung und Bewertung des photoelektrischen Generators verwendet:

Der Spitzenwert der Leerlaufspannung $U_{0_ph_peak}$ gibt die Intensität des verfügbaren Lichtes wieder. Über den Wert der Leerlaufspannung U_{0_ph} im Übergang zur Betriebsspannung wird der Einsatzpunkt bestimmt. Über das Produkt der Betriebsspannung mit der abgegebenen Ladung C_{ph} wird die gesammelte Energie bestimmt.

Für die Berechnung der theoretischen Abgabeleistung der Solarzelle bei einer relativen Ausleuchtung von 12% erhält man einen Wert von 53mW. Die Messung mit einer Ausleuchtung von 12% wurde hat eine Abgabeleistung von 40mW ermittelt. Die Unterschiede resultieren aus der Messungenauigkeit in Bezug auf die Ausleuchtung. Für die Leistungsanpassung an das Speicher Modul wurde der integrierte Schaltwandler vom Typ LTC3105²⁹ ausgewählt.

²⁹ [Lin11]

2.2.5.5 Zusammenfassung der Messungen zum Energiesammel-Modul

Die Messungen zum Energiesammel-Modul dienen zum einen der Bewertung der verfügbaren Leistung und zum anderen der Festlegung des Arbeitspunktes für die Leistungsanpassung der jeweiligen Steuerschaltungen.

Unabhängig von der Temperaturdifferenz ist für den thermoelektrischen Generator eine Leistungsanpassung dann gegeben, wenn der Arbeitspunkt der Steuerschaltung für 50% der Leerlaufspannung gewählt wird.

Unabhängig von der Drehzahl ist für den Synchrongenerator ist eine Leistungsanpassung dann gegeben, wenn der Arbeitspunkt der Steuerungsschaltung für 40% der Leerlaufspannung gewählt wird.

Unabhängig von der Beleuchtungsstärke ist für den Solargenerator ist eine Leistungsanpassung dann gegeben, wenn der Arbeitspunkt der Steuerungsschaltung für 80% der Leerlaufspannung gewählt wird.

Abbildung 15 zeigt die relative Ausgangsspannung zur Leerlaufspannung der Generatoren für verschiedene Einspeiseleistungen. Für den Arbeitspunkt wird der Mittelwert der relativen Ausgangsspannung gewählt.

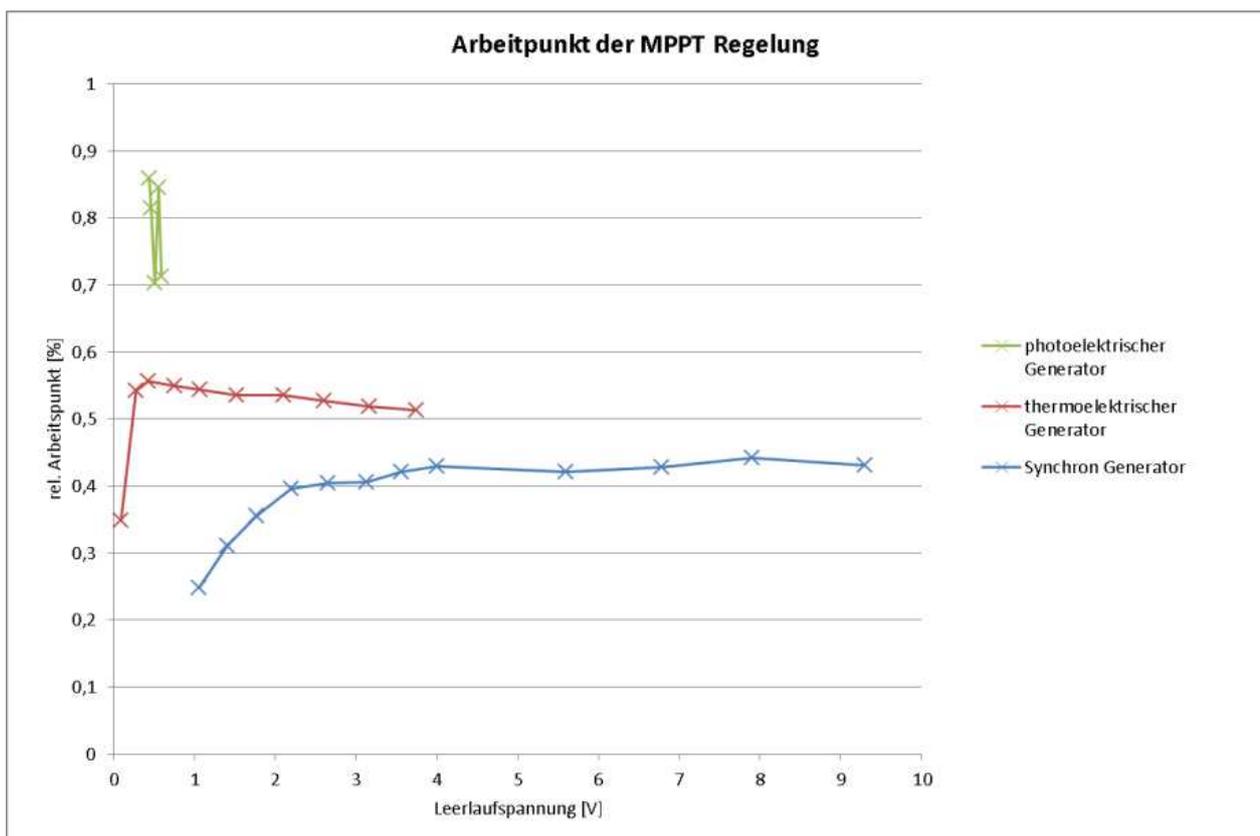


Abbildung 15: Arbeitspunkte für die Generatoren

Thermogenerator

Die **Tabelle 5** gibt die Werte der maximalen Leistung und der zugehörigen Spannungen für die jeweilige Temperaturdifferenz bei dem betrachteten Thermogenerator an. Für eine Temperaturdifferenz von 10K liefert der thermoelektrische Generator eine maximale Leistung von 55,5mW.

U_0 [V]	U_L [V]	P_{max} [W], ATE-127-3BSH-3	ΔT [K]	Ladedauer für 50F bei 5V [h]
0,089	0,031	0,00032	0,7	216
0,273	0,148	0,00365	2,3	19
0,43	0,239	0,00952	4,7	7,3
0,749	0,411	0,02815	6,7	2,4
1,061	0,577	0,05549	9,8	1,3
1,525	0,817	0,11125	13,7	0,62
2,1	1,125	0,21094	19,4	0,33
2,6	1,369	0,31236	24,5	0,22
3,16	1,639	0,44772	31,0	0,15
3,74	1,92	0,6144	36,2	0,11

Tabelle 5: P_{max} für ATE-127-3BSH-3

Eine Ladezeit von weniger als 24 Stunden wird für eine gewählte Speichergröße von 50F mit 5V ab einer verfügbaren Temperaturdifferenz von etwa 3K unterschritten. Für eine Temperaturdifferenz von 10K beträgt die kürzeste Ladedauer etwa 1 Stunde und 15 Minuten. Die Vorrichtung zur Bereitstellung dieser Temperaturdifferenz sollte daher ein ΔT von 4-10K für diese Dauer bereitstellen können.

Rotationsgenerator

Die **Tabelle 6** gibt die Werte der maximalen Leistung und der zugehörigen Spannungen für die jeweilige Drehzahl an. Für eine Drehzahl von 15 1/s liefert der Synchrongenerator eine maximale Leistung von 52mW. Eine Ladezeit von weniger als 24 Stunden wird für einen Speicher von 50F mit 5V ab einer Drehzahl von etwa 5,5 1/s unterschritten.

Für eine Drehzahl von 15 1/s beträgt die kürzeste Ladedauer etwa 1 Stunde und 20 Minuten. Die Vorrichtung zur Bereitstellung dieser Drehzahl sollte daher 6-15 Umdrehungen pro Sekunde für diese Dauer bereitstellen können.

U_0 [V]	U_L [V]	P_{max} [W], DB22M01	N [1/s]	Ladedauer für 50F bei 5V [h]
1,05	0,26	0,003	5,5	22,6
1,4	0,435	0,008	7,5	8,07
1,76	0,625	0,017	10	3,91
2,2	0,87	0,034	12,5	2,01
2,65	1,07	0,052	15	1,33
3,13	1,27	0,073	17,5	0,94
3,56	1,5	0,102	20	0,67
4	1,72	0,134	22,5	0,51
5,6	2,36	0,253	31,25	0,27
6,78	2,9	0,382	37,5	0,18
7,9	3,49	0,553	43,75	0,12
9,3	4	0,727	50	0,09

Tabelle 6: P_{max} für DB22M01

Photoelektrischer Generator

Die **Tabelle 7** gibt die Werte der maximalen Leistung und der zugehörigen Spannungen für die jeweilige Beleuchtungsstärke an. Für eine relative Beleuchtungsstärke von 12% liefert der Solar-generator eine maximale Leistung von 40mW.

U_0 [V]	U_L [V]	P_{max} [W], SZ 52mm x 52mm	relative Helligkeit [%]	Ladedauer für 50F bei 5V [h]
0,587	0,371	0,0014	0,6	49,7
0,551	0,374	0,0030	1,1	23,1
0,505	0,355	0,0102	3,4	6,8
0,459	0,466	0,0396	12,2	1,7
0,432	0,418	0,1059	43,0	0,7

Tabelle 7: P_{max} für SZ 52mm x 52mm

Eine Ladezeit von weniger als 24 Stunden wird für einen Speicher von 50F mit 5V ab einer relativen Beleuchtungsstärke von etwa 1% unterschritten. Für eine Beleuchtungsstärke von 12% beträgt die kürzeste Ladedauer etwa 1 Stunde und 45 Minuten. Falls eine Beleuchtungsdauer mit 12% relativer Beleuchtungsstärke im Mittel nicht verfügbar ist, sollte die Fläche für den Solargenerator vergrößert werden.

Die maximal verfügbare Leistung für die Generatoren ist in **Abbildung 16** angegeben.

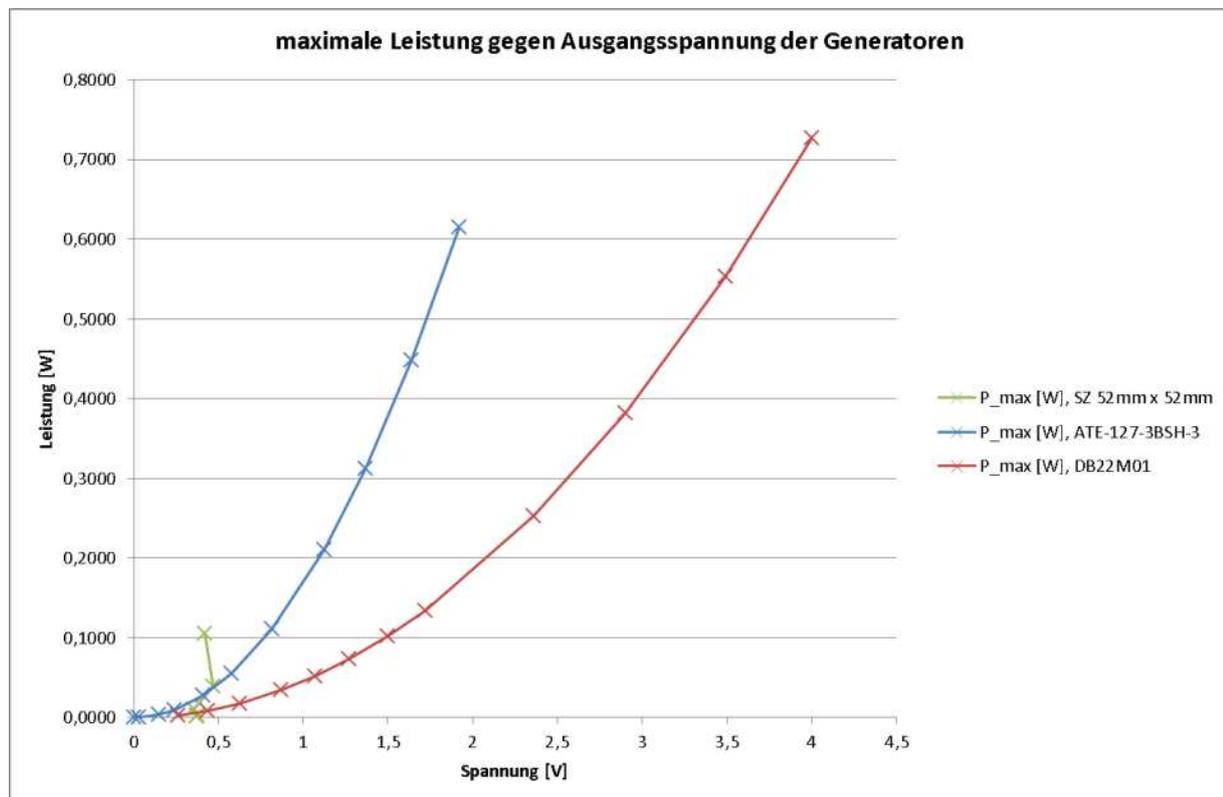


Abbildung 16: P_{max} / U Kennlinie der Generatoren

2.3 Schaltungsentwurf der Triple-H-Plattform

Zusätzlich zu den Grundfunktionen für Energie-Sammlung und -Speicherung wurden vorgesehen: Ein Spannungswandler zur Unterstützung der CPU-Programmierung, über den der Speicher von extern geladen werden kann, eine USB-Schnittstelle für jedes Funk-Modul, sowie eine JTAG Schnittstelle für die CPU. Diese für die Entwicklung der Software notwendigen Baugruppen werden im regulären Betriebsfall deaktiviert.

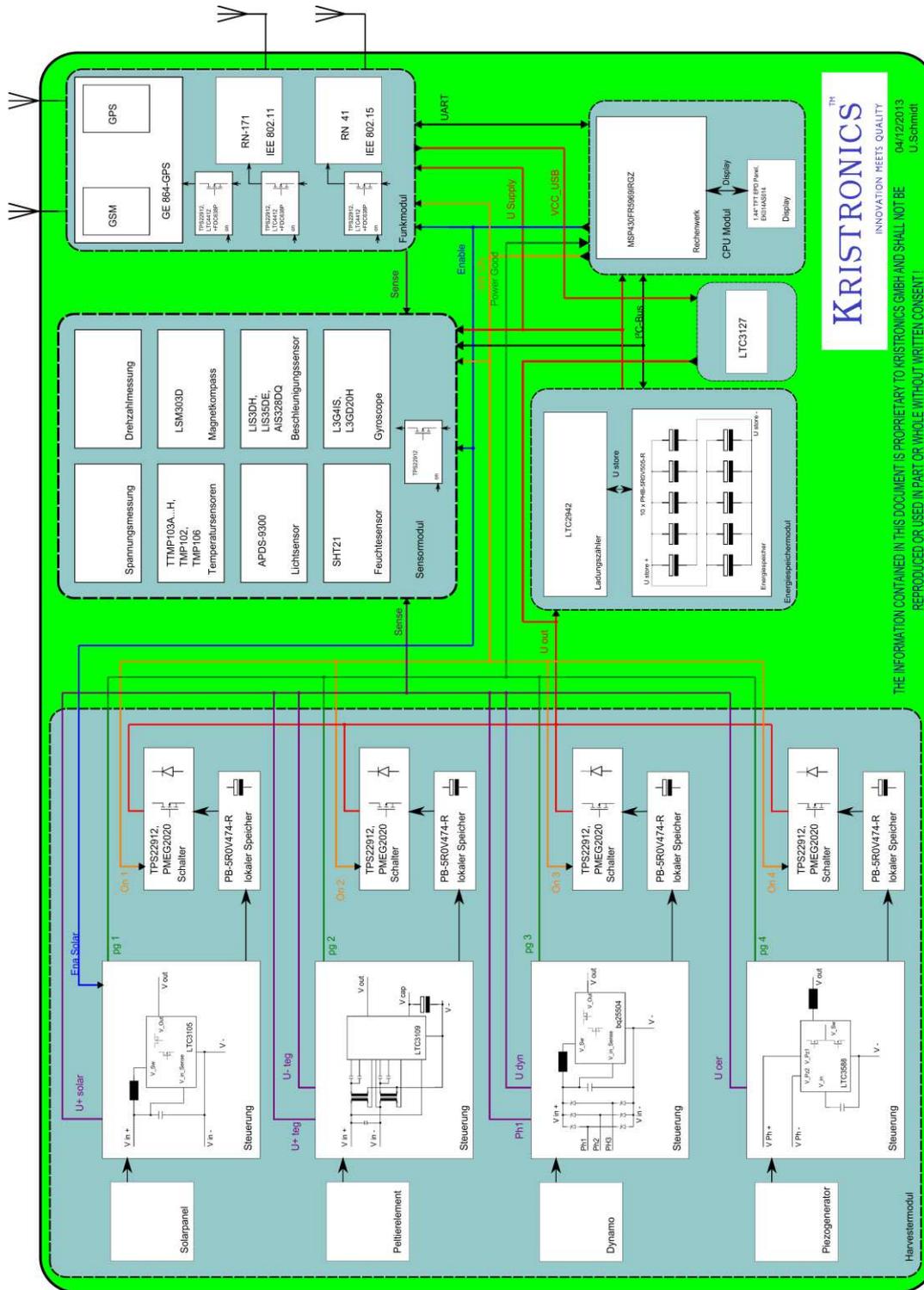


Abbildung 17: Detailliertes Bockschaltbild der Triple-H-Plattform

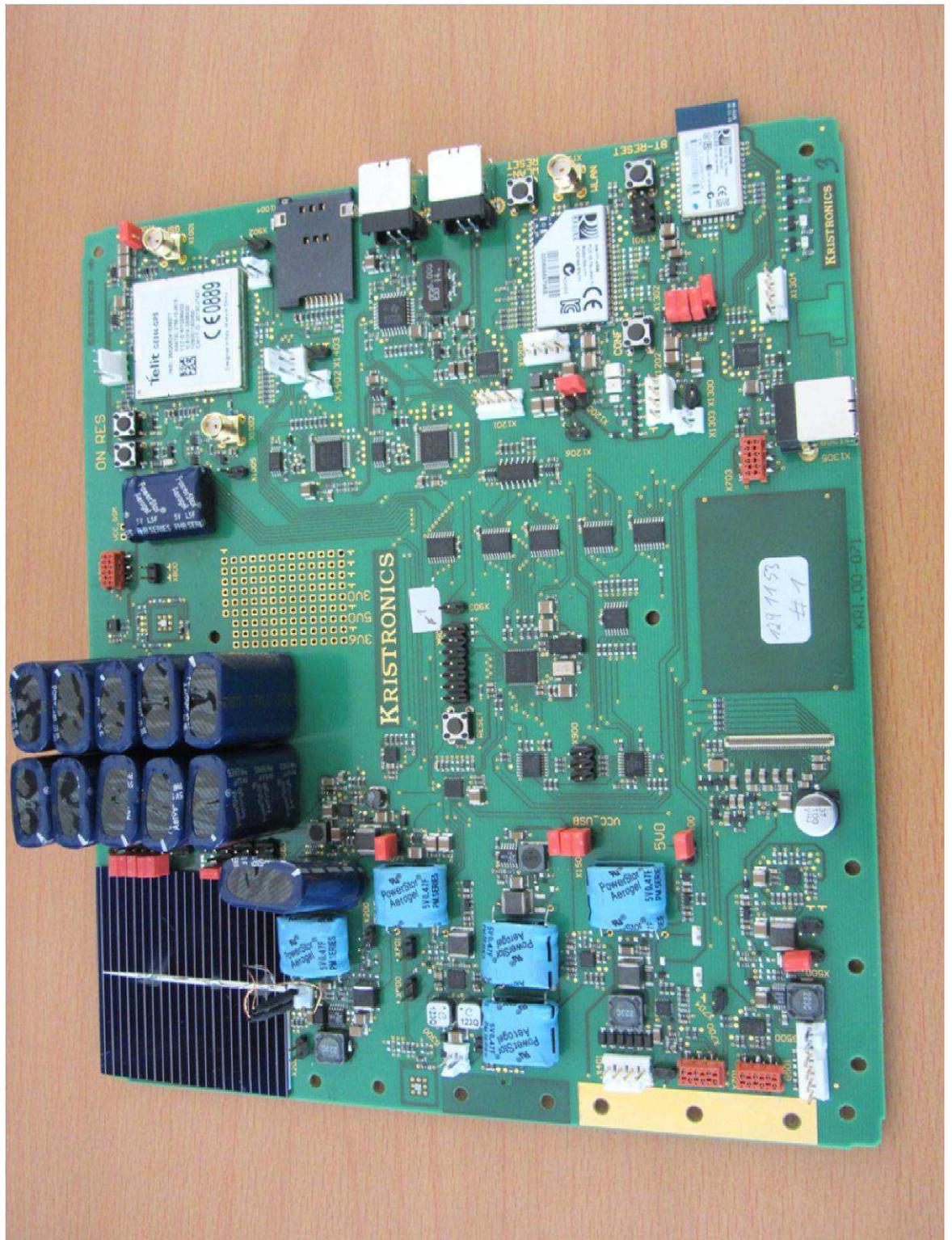


Abbildung 18: Foto der bestückten Leiterplatte in Komplettbestückung

Abbildung 19 zeigt den auf dem Blockschaltbild basierenden Schaltungsentwurf für die Triple-H-Plattform, der auch die erste Seite des fünfzehn Seiten umfassenden Schaltplanes darstellt.

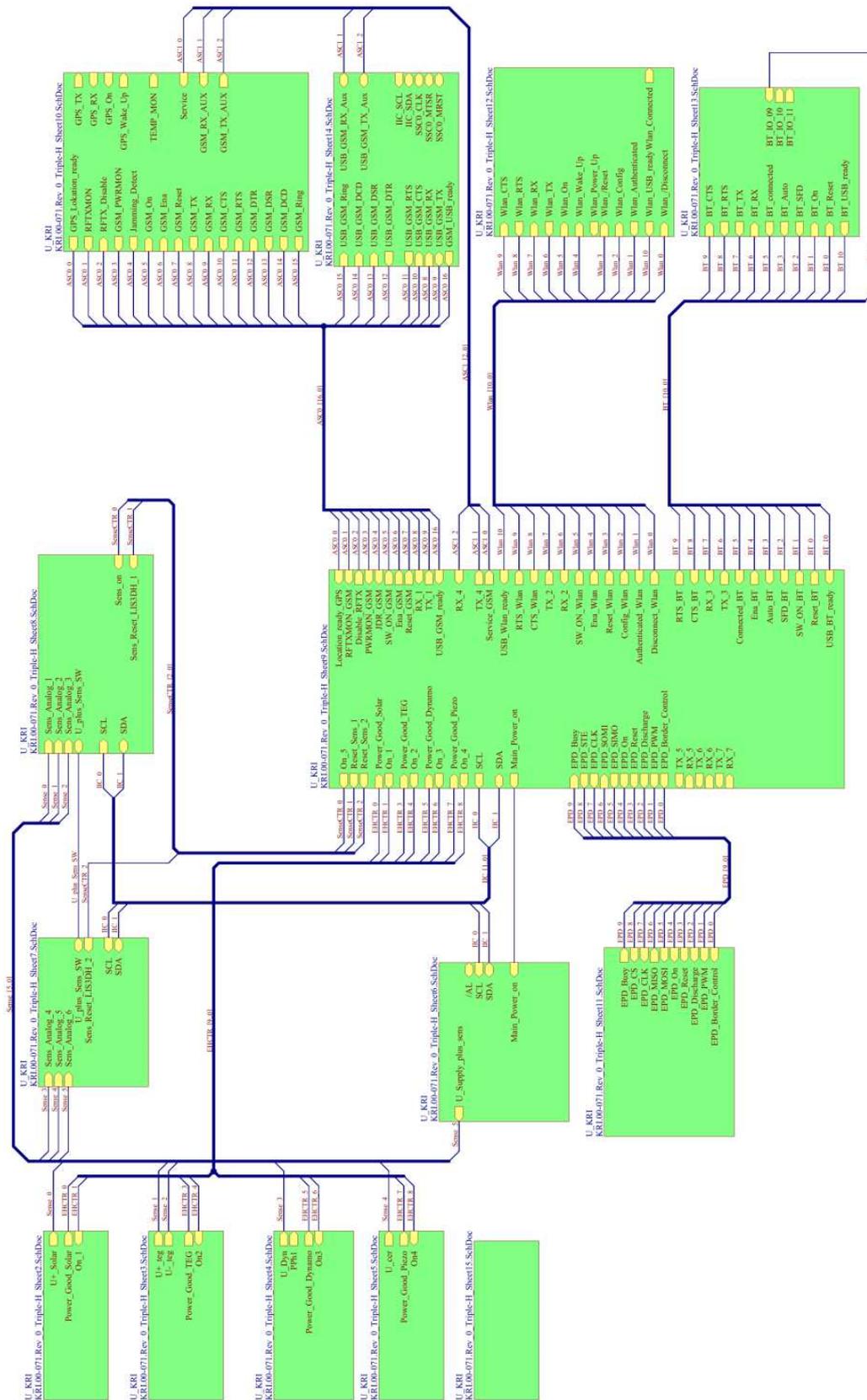


Abbildung 19: Blockschaltung für die Triple-H-Plattform

Das CPU-Modul ist über einen SPI-Bus und sechs GPIO Leitungen mit dem Display verbunden. Das Display kann über die CPU vollständig von der Versorgungsspannung getrennt werden. Das Speicher Modul ist über den I²C-Bus und eine GPIO Leitung mit der CPU verbunden, über die GPIO Leitung wird der Schaltregler für die beiden Hauptversorgungsspannungen eingeschaltet.

Das CPU-Modul ist mit jeweils zwei Leitungen mit den vier Energy-Harvestern verbunden. Hierüber wird die Verfügbarkeit elektrischer Energie geprüft und die Ladungsübertragung an das zentrale Speicher Modul gesteuert.

Die Harvester sind mit insgesamt fünf Leitungen mit dem Sensor-Modul verbunden, hierüber kann der Zustand der einzelnen Harvester gemessen werden.

Das Sensor-Modul ist mit dem I²C-Bus verbunden über den die Sensoren des Moduls vom CPU-Modul gesteuert werden. Zum CPU-Modul bestehen noch drei GPIO Verbindungen, eine für die Trennung der Sensoren von der Versorgungsspannung sowie zwei Reset Leitungen.

Das GSM-Modul ist über zwei Busverbindungen mit dem CPU-Modul verbunden. Der erste Bus enthält fünfzehn Signale, die für die Steuerung des GSM-Moduls benötigt werden. Der Bus ist nur aktiv, wenn die drei weiteren Busverbindungen inaktiv sind. Der zweite Bus bedient die Programmierschnittstelle des GSM-Moduls.

Das WLAN-Modul ist ebenfalls über einen Bus mit dem CPU-Modul verbunden. Hierüber erfolgt die Steuerung des WLAN-Moduls. Dieser Bus ist ebenfalls nur dann aktiv, wenn die anderen drei Busverbindungen inaktiv sind. Das Bluetooth-Modul wird über den vierten Bus gesteuert.

Im Anhang A 4 werden die Schaltungsteile im Detail beschrieben.

2.3.1 Die Funktion der Triple-H-Plattform

Die Triple-H-Plattform sammelt über vier verschiedene Energy-Harvester Schaltungen die für den Betrieb der Plattform notwendige Energie.

Sobald für wenigstens einen der Harvester genügend Energie verfügbar ist wird ein lokal für diesen Harvester vorgesehener Doppelschichtkondensator auf eine Spannung von 5V geladen. Ist für weitere Harvester genügend Energie vorhanden, arbeiten die Harvester parallel.

Um die Funk-Module bei Bedarf programmieren zu können, wird über einen Schaltregler die Spannung der verwendeten USB Schnittstelle zur Ladung des Hauptspeichers verwendet. Über diesen Pfad kann auch eine externe Versorgung mit einer Spannung von nicht mehr als 5V eingesetzt werden.

Für die Triple-H-Plattform werden zwei verschiedene Spannungspegel benötigt. Für das CPU-Modul werden 3,0V benötigt, für die Sensoren, das Display und die Funk-Module werden 3,6V benötigt. Die 3 Volt Versorgung erfolgt über entsprechende Linearregler der Harvester und des Spannungsreglers im Speicher Modul. Diese Spannung ist nicht schaltbar, sondern ist stets verfügbar, wenn die von den Harvestern erzeugte Spannung 3,0V überschreitet, oder eine genügend große Restladung im Hauptspeicher verfügbar ist.

Die Versorgung der CPU erfolgt unabhängig vom Ladezustand des Speichermoduls, jeder Harvester liefert aus seinem lokalen Speicher über einen Linearregler die erforderliche Spannung. Die Linearregler werden bei Erreichen einer Ladespannung von 3V am lokalen Speicher des zugehörigen Harvesters eingeschaltet, bei einer Spannung von 1V wird der Linearregler abgeschaltet. Der Schalter zur Umladung des Lokalen Speichers in den Hauptspeicher schaltet entweder bei Unterschreitung einer Eingangsspannung von 1,4V oder bei einer Steuerspannung von 1,1V ab. Dies bewirkt, dass die CPU bei nicht oder nur gering geladenem Hauptspeicher bei jedem Umlade Vorgang wieder einen Reset durchläuft. Ein stabiler Betrieb der CPU wird

nach Ladung des Hauptspeichers auf wenigstens 3V erreicht, da dann ein zusätzlicher Linearregler der durch den Hauptspeicher versorgt wird aktiv wird.

Wenn einer der Harvester eine Ausgangsspannung von 5V erreicht, wird über die CPU diese Spannung auf den Hauptspeicher übertragen, wobei der Kondensator des Harvesters entladen wird. Die Menge der zufließenden Ladung kann mit einem Coulomb Zähler im Speicher Modul gemessen werden. Die Ladeschlussspannung von 5V ist dabei in den Harvester Schaltungen durch die Hardware festgelegt.

Die CPU beginnt bei einer Spannung von minimal 1,8V zu arbeiten. Im Bereich bis 2,7V ist jedoch als einzige Funktion die Ladung des Hauptspeichers sinnvoll. Daher wird die Spannung für die Versorgung der CPU nicht direkt vom Harvester an die CPU geleitet, sondern über jeweils einen Linearregler mit einer Einschaltsschwelle von 3V erzeugt. Die Abschaltsschwelle wird bei einer Spannung von 1V erreicht. Wenn ein Harvester die eingestellte Ausgangsspannung erreicht, wird durch die CPU ein Umlade Vorgang vom lokalen Speicher in den Hauptspeicher ausgeführt. Dieser Zyklus wird bis zum Erreichen einer Spannung von 5V wiederholt ausgeführt. Auf diese Weise wird der Hauptspeicher nach und nach auf die Ladeschlussspannung geladen.

Die tatsächliche Dauer des Ladevorgangs ist natürlich von der an den Harvestern verfügbaren Energie abhängig. In dem Spannungsbereich von 3V bis 3,6V muss die CPU in einem Energiesparmodus betrieben werden, der die Ladung des Hauptspeichers bei einem möglichst geringem Eigenverbrauch ermöglicht.

Ab einer Spannung von mindestens 3V können auch die Sensoren sinnvoll abgefragt werden. Die Sensoren des Sensor-Moduls werden über einen I²C Bus bedient. Der Coulomb Zähler bildet hierzu eine Ausnahme, da dieser am 5V Pfad angebunden ist und der Zähler nicht abgeschaltet werden kann.

Die CPU kann, wenn eine hinreichende Ladung im Hauptspeicher verfügbar ist den Schaltregler für die Bereitstellung der 3,6V Versorgung einschalten. Der Schaltregler arbeitet im Spannungsbereich von mehr als 3,6V Spannung am Hauptspeicher als Buck Regler. Im Bereich darunter bis zum Erreichen der Entladeschluss Spannung von 650mV arbeitet er als Boost Regler.

Wenn der Schaltregler des Hauptspeichers die 3,6V stabil erreicht hat, kann eines der drei Funk-Module freigeschaltet werden. Hierdurch wird der für das gewählte Funk-Modul benötigte lokale Speicher geladen. Wenn sich die Spannung am Funk-Modul stabilisiert hat, ist dieses für die CPU zugänglich. Da die Anzahl der GPIO Ports und der UARTs nicht ausreicht, um die Funk-Module gleichzeitig zu betreiben, sind die Schnittstellen zu den Funk-Modulen über eine Multiplexerschaltung geführt. Die Auswahl eines Kanals des Multiplexers erfolgt über drei Adressleitungen und ein Signal für Output-Enable. Das Output-Enable ist zusätzlich über ein Signal verriegelt, das feststellt ob ein USB Stecker gesteckt ist oder nicht.

Belegung des Multiplexers:

- Kanal 0: Kein Device ausgewählt,
- Kanal 1: GSM-Modul.
- Kanal 2: WLAN- Modul.
- Kanal 3: Bluetooth-Modul.
- Kanal 4: Service Schnittstelle des GSM-Moduls
- Kanal 5: Freischaltung der Funk-Module, wenn diese über die USB Schnittstellen angesprochen werden sollen.

Wird eine Entladespannung von 2,7 V am Hauptspeicher erreicht, so ist die Dauer der Verfügbarkeit der für den Betrieb notwendigen Spannung nicht mehr bestimmt, diese Zeit kann von der CPU verwendet werden um die Plattform geordnet stillzulegen. Die Programmierung der CPU erfolgt über eine JTAG Schnittstelle.

Das Display wird über eine SPI Schnittstelle angesprochen. Hierfür sind zusätzlich zum SPI Bus weitere Signale notwendig. Das Display kann über die CPU spannungsfrei geschaltet werden. Bei Abschaltung des Displays werden die Kondensatoren für das Display über den Schalter entladen.

Das GSM-Modul wird über Kanal 1 der Multiplexschaltung angesprochen. Hierzu wird zunächst über den I²C Bus der Schaltregler für die Versorgungsspannung von 3,6V eingeschaltet.

Verfügbar sind dann die Ausgänge für SW_ON_GSM, Reset, Ena_GSM, Disable RFTX sowie Rx und Tx für die serielle Schnittstelle ASC0 des GSM-Moduls.

Die Eingänge Location_ready_GPS, RFTXMON_GSM, POWMON_GSM und JDR_GSM ermöglichen die Überwachung des GSM-Moduls. Dann kann über das Signal SW_ON_GSM die Versorgungsspannung zum GSM-Modul freigeschaltet werden. Über das Signal Ena_GSM wird das Funk-Modul eingeschaltet. Reset bewirkt die Rücksetzung auf einen definierten Zustand. Disable RFTX schaltet die Funkverbindung ab. Die Signale Ena_GSM und Reset können auch über Taster ausgeführt werden. Das Modul beinhaltet eine gelbe Leuchtdiode, die über den Status Ausgang des Funk-Moduls gesteuert wird. Über die Signale Rx und Tx können Daten und Kommandos an das Funk-Modul übertragen werden.

Das Integrierte GPS Modul wird über das GSM-Modul angesprochen, die Ermittlung der Ortsdaten erfolgt daher über das GSM-Modul. Über Kanal 4 kann der Service Port des GSM-Moduls durch die CPU bedient werden. Hierfür werden über den Multiplexer dieselben Ausgänge wie in Kanal 1 zuzüglich des Signals Service_GSM für die Steuerung des Service Eingangs des Funk-Moduls bereitgestellt. Der Service Eingang des Funk-Moduls kann über einen Jumper auf On, Off oder CPU gesteuert gesetzt werden. Zusätzlich kann für den Betrieb über die USB Schnittstelle die Versorgungsspannung über Kanal 5 freigeschaltet werden. Über die USB Schnittstelle sind die Schnittstellen ASC0 und ASC1 erreichbar, hierüber kann dann die Programmierung des Funk-Moduls erfolgen. Eine Kommunikation zwischen der CPU und dem GSM-Modul ist im Betrieb über die USB Schnittstelle nicht möglich.

Die USB Schnittstelle für das GSM-Modul beinhaltet einen USB HUB und zwei programmierbare UARTs, hierüber werden die seriellen Schnittstellen des GSM-Moduls ASC0 und ASC1 mit dem Host PC verbunden. Über den USB Port soll die Programmierung des GSM-Moduls ermöglicht werden. Die Konfiguration der UARTs erfolgt ebenfalls über die USB Schnittstelle.

Der UART für ASC0 muss eine vollständige RS232 Schnittstelle bereitstellen, der UART für ASC1 benötigt nur Rx und Tx. Für die Programmierung des GSM-Moduls muss der Service Eingang am GSM-Modul über einen Jumper auf Low gesetzt werden.

Das WLAN-Modul wird über den Kanal 2 des Multiplexers angesprochen. Hierzu wird zunächst über den I²C Bus der Schaltregler für die Versorgungsspannung von 3,6V eingeschaltet. Verfügbar sind dann die Ausgänge für SW_ON_WLAN, Reset, Ena_WLAN, Disconnect_WLAN, Config_WLAN sowie RTS, CTS, Rx und Tx für die serielle Schnittstelle des WLAN-Moduls.

Über das Signal SW_ON_WLAN wird die Versorgungsspannung zum WLAN Modul freigeschaltet werden. Über Ena_WLAN wird das Funk-Modul eingeschaltet. Reset bewirkt die Rücksetzung auf einen definierten Zustand. Disconnect_WLAN schaltet die Funkverbindung ab, über Config_WLAN kann das Funk-Modul konfiguriert werden.

Die Signale Config_WLAN und Reset können auch über Taster ausgeführt werden. Über fünf Leuchtdioden wird der Zustand des WLAN-Moduls angezeigt: eine grüne Diode zeigt die Verfügbarkeit der Versorgungsspannung, eine rote Diode zeigt den Betriebszustand des WLAN-Moduls, eine gelbe Diode zeigt die Aufforderung zum Verbindungsabbruch, eine weitere rote Diode zeigt den Verbindungsstatus und eine weitere grüne Diode zeigt ob die Authentifizierung erfolgt ist. Für die Programmierung des WLAN-Moduls ist die Serielle Schnittstelle über einen programmierbaren UART auch mit einem USB-Port verbunden. Der programmierbare UART kann über die USB Schnittstelle konfiguriert werden. Der UART muss die Signale Rx, Tx, RTS und CTS unterstützen. Das WLAN-Modul kann über vier vierpolige Stiftleisten durch ein externes Modul ersetzt werden.

Das Bluetooth-Modul wird über den Kanal 3 des Multiplexers angesprochen. Hierzu wird zunächst über den I²C Bus der Schaltregler für die Versorgungsspannung von 3,6V eingeschaltet.

Verfügbar sind dann die Ausgänge für SW_ON_BT, Reset, Ena_BT sowie RTS, CTS, Rx und Tx für die serielle Schnittstelle des Bluetooth-Moduls.

Über das Signal SW_ON_BT wird die Versorgungsspannung zum Bluetooth-Modul freigeschaltet werden. Reset bewirkt die Rücksetzung auf einen definierten Zustand. Das Signal Ena_BT ist nur auf einen GPIO Port gelegt, die Funktion kann über die Programmierung des Bluetooth-Moduls festgelegt werden. Ein Reset kann auch über einen Taster ausgeführt werden.

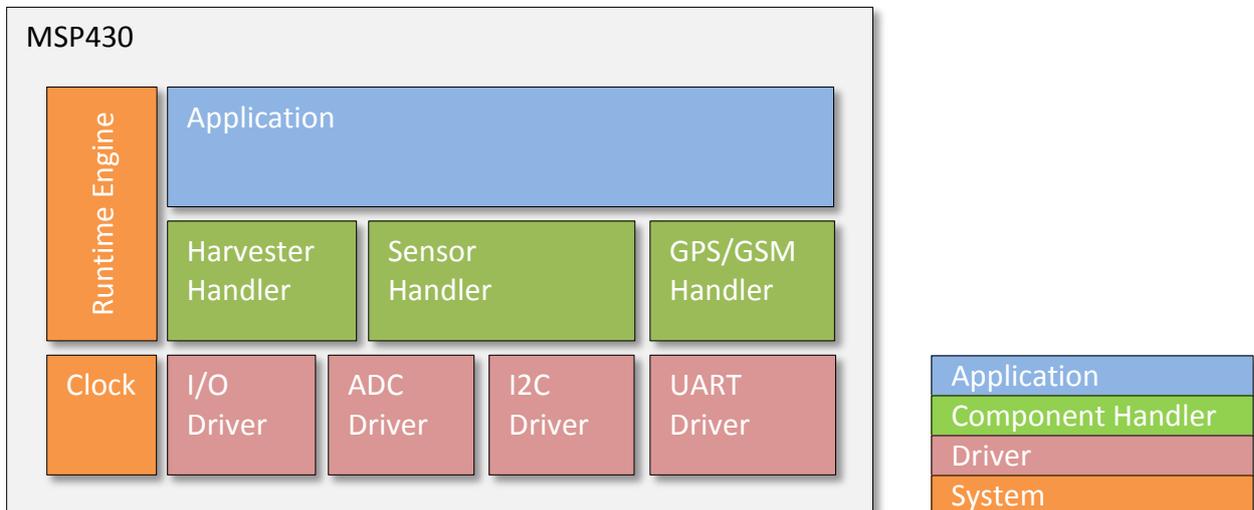
Über vier Leuchtdioden wird der Zustand des Bluetooth-Moduls angezeigt: der Status wird über eine grüne Led, der Funk Status über eine rote Led, der Verbindungsstatus über eine gelbe und die Konfiguration ebenfalls über eine gelbe Led angezeigt. Die Leds werden über GPIOs des Funk-Moduls gesteuert und sind damit abhängig von der Programmierung des Moduls. Die Konfiguration kann über ein achtpoliges Stecker Feld über Jumper durchgeführt werden. Einstellbar sind die Baudrate, ob das Funk-Modul als Master betrieben werden soll, ob der Verbindungsaufbau automatisch erfolgen soll und ob die Default Einstellungen verwendet werden sollen. Eine SPI Schnittstelle ist auf einen Stecker geführt. Für die Programmierung des Bluetooth-Moduls ist die Serielle Schnittstelle über einen programmierbaren UART auch mit einem USB-Port verbunden. Der programmierbare UART kann über die USB Schnittstelle konfiguriert werden. Der UART muss die Signale Rx, Tx, RTS und CTS unterstützen.

Die Programmierung eines Funk-Moduls oder der CPU ist ein Sonderbetriebszustand der Triple-H-Plattform, da hierbei die Sammelfunktion der Harvester zwar gegeben ist, aber die Versorgung der Plattform über eine externe Quelle erfolgt. Hierfür wird der Hauptspeicher über die Spannung der USB Schnittstelle geladen, Der Schaltregler für die Versorgung der Funk-Module muss dann durch die CPU eingeschaltet werden wie auch bei der Versorgung durch die Harvester. Auch für den Betrieb der Funk-Module über eine USB Schnittstelle muss das gewählte Funk-Modul über die CPU eingeschaltet werden.

Die notwendigen Signale werden über den Kanal 5 der Multiplexschaltung bereitgestellt, hierbei werden jedoch der Empfänger und der Sender des UART hochohmig geschaltet, so dass nur noch eine Verbindung zur USB Schnittstelle besteht.

2.4 Softwarearchitektur

Für die Software wurde eine geeignete Architektur konzipiert. Diese verzichtet bewusst auf komplexe Implementierungen wie Betriebssystem oder Echtzeit-Scheduler, da diese Ressourcen und damit auch Energie verbrauchen.



Das Konzept sieht die Aufteilung in verschiedene Softwareschichten (Layer) vor, die über eine einfache Systemschicht (üblicherweise ein Betriebssystem) verbunden sind.

2.4.1 System

Die Systemschicht (System) wird in diesem Fall durch einen einfachen Scheduler gebildet, der nacheinander die Module der anderen Schichten aufruft. Die Module der anderen Schichten tauschen ihre Daten nicht über die Systemschicht aus, sondern direkt untereinander über Datenstrukturen, welche als Schnittstellen dienen. Auch hier liegt der Fokus auf Einfachheit und Ressourcensparung zu Gunsten eines niedrigen Energieverbrauches.

Eine Besonderheit der Systemschicht ist ihre Fähigkeit über ein autonomes Zeitgebersystem (Clock) aus einem Schlafzustand in bestimmten Intervallen (z.B. alle 15 Minuten) bzw. zu bestimmten Zeitpunkten (zum Beispiel jeden Mittwoch um 18:00) zu erwachen und den Scheduler auszuführen. Dies bedingt allerdings ausreichend Energievorräte im System.

2.4.2 Treiber

Die Treiberschicht (Driver) stellt die Schnittstelle zwischen Hard- und Software da. Folgende Treiber sind vorgesehen:

- I/O Treiber - stellt die Funktion für den Zugriff auf digitale Ein- und Ausgabe-Ports des Controllers zur Verfügung. Diese werden z.B. für die Steuerung der Harvester-Ladepfade durch den Harvester-Handler benötigt.
- ADC-Treiber - stellt die Funktion für den Zugriff auf Analog-Digital-Wandler des Controllers zur Verfügung. Diese werden z.B. für die Ermittlung von Spannungswerten vom Sensor-Handler benötigt.
- I2C-Treiber - stellt die Funktion für die I2C-Kommunikation zur Verfügung. Diese benötigt z.B. der Sensor-Handler für den Datenaustausch mit den verschiedenen Sensoren: Ladungszähler, Lichtsensor, Temperatursensor, Gyroskope usw.

- UART-Treiber - stellt die Funktion für die Kommunikation über die serielle Schnittstelle zur Verfügung. Diese werden vom GPS/GSM-Handler verwendet, um Positionsdaten zu empfangen und SMS Nachrichten zu verwenden.

2.4.3 Komponenten

Die Komponentenschicht (Component-Handler) stellt eine Sicht auf die Funktionsblöcke der Hardware dar, ohne dass dabei für die Applikation sichtbar ist, über welche Treiber diese Komponenten mit der Hardware interagieren. Hier greift das Konzept der Abstraktion, das eine Portierung der Funktion (Komponenten und Applikation) auf andere Hardware extrem vereinfacht. Folgende Komponenten sind vorgesehen:

- Harvester-Handler: Funktionsblöcke für die einzelnen Harvester (Solarpanel, Peltierelement, Dynamo, Piezogenerator und auch Energiespeicher) kapseln die Aktivierung/Deaktivierung, die Steuerung der Umladung, die Erfassung des Spannungswertes und des Ladezustandes.
- Sensor-Handler: Funktionsblöcke für die einzelnen Sensoren kapseln die Messwerte von Temperatursensor und Gyroskop.
- GPS- und GSM-Handler: Funktionsblöcke für die Erfassung der aktuellen Position und das Versenden von SMS Nachrichten.

Alle Komponenten stellen auch Funktionen zur Initialisierung, Parametrisierung und Statusabfrage zur Verfügung. So ist z.B. der GSM-Handler mit einer Rufnummer zu initialisieren, der GPS-Handler liefert plausibilisierte Daten über die Anzahl der gefundenen Satelliten.

2.4.4 Applikation

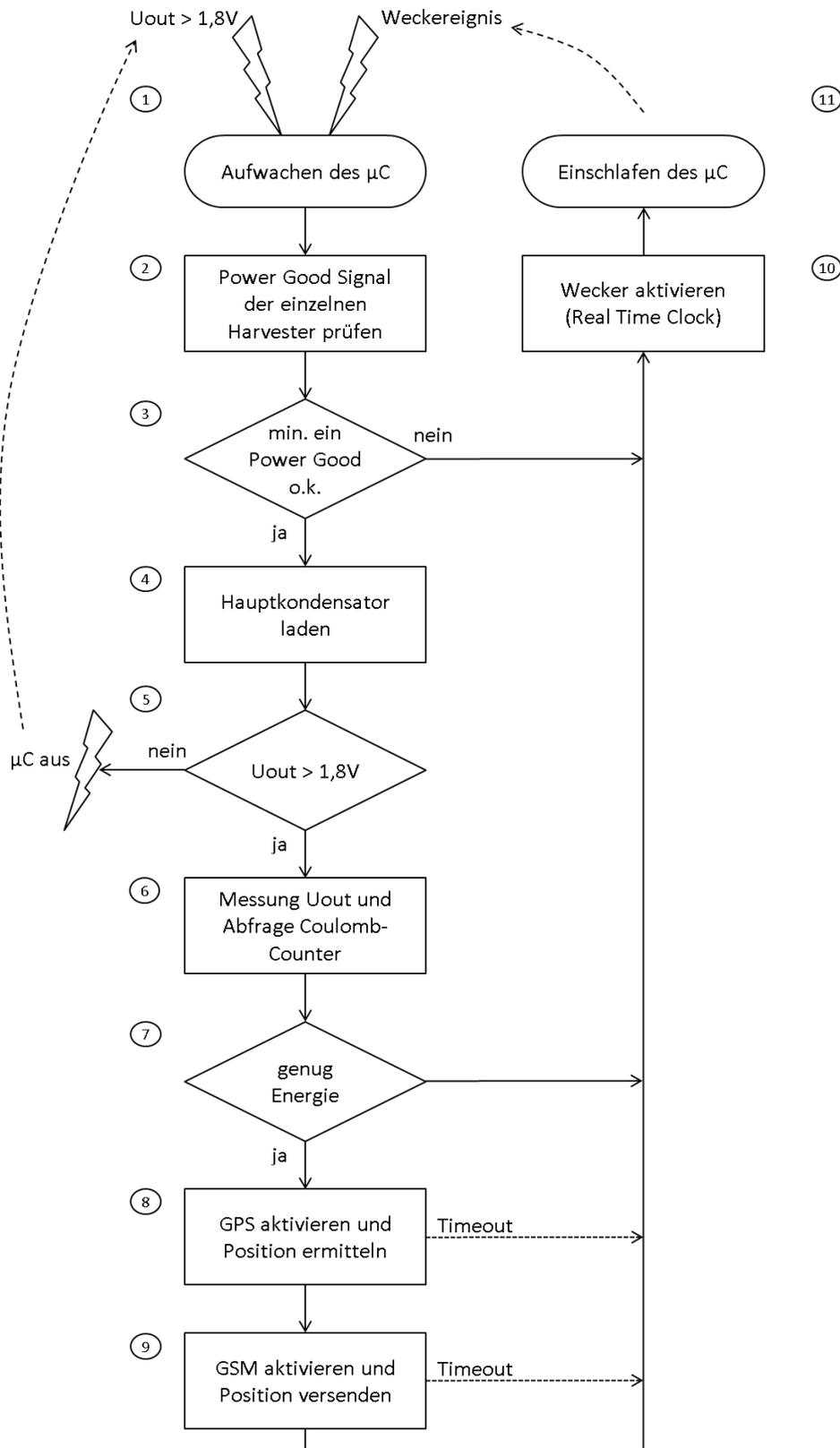
Die Applikation setzt die eigentliche Ablaufsteuerung um. Dazu gehören die folgenden Hauptaufgaben:

- Umladen von Energie aus den Harvestern in das Energiespeichermodul.
- Bei ausreichend vorhandener Energie im Energiespeichermodul die GPS Position erfassen und eine SMS versenden.
- Steuerung des Einschlaf- und Aufwachprozesses des Systems.

Die Abbildung auf der nächsten Seite zeigt den geplanten Ablauf im Konzept. Ausgegangen wird dabei von einem leeren, noch nie gestarteten System.

1. Die CPU beginnt ab einer Harvester-Spannung von 1,8V zu arbeiten. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Informationen über die verfügbare Energie vorliegen, wird zunächst im höchsten Energiesparmodus gestartet und eine minimale Initialisierung durchgeführt.
2. Die erste Aufgabe ist es, eine Information über die verfügbare Energie zu bekommen. Dazu wird das *Power Good (PG)* Signal der einzelnen Harvester abgefragt.
3. Liefert keiner der Harvester ein *Power Good* Signal, legt sich das System unverzüglich wieder schlafen (siehe dazu Punkt 10).
4. Für Harvester, die *Power Good* liefern, kann eine Umladung in das Energiespeichermodul erfolgen, wenn die Spannung am Harvester ausreichend ist ($>2,7V$). Die Umladungsprozedur selber wird durch Spannungsmessungen und Messung der umgeladenen Energie (durch den Coulomb-Counter) überwacht.

5. In Grenzfällen kann es vorkommen, dass die Spannung des Harvesters wieder unter 1,8V fällt. Dies wird den μ Controller wieder in den Reset-Zustand schicken. Der Ablauf wird somit durch die Hardware beendet.



6. Die Überwachung der Spannungen und Ladungen liefert Information über die verfügbare Energie.
7. Ist die Energie ausreichend für eine Übermittlung der Position, so wird diese angestoßen, andernfalls legt sich das System schlafen (siehe Punkt 10).
Um eine Bewertung der benötigten Energie vorzunehmen, müssen Informationen über den Energieverbrauch bei einer Positionsbestimmung (GPS) und beim Versenden einer SMS (GSM) vorliegen. Im ersten Ansatz greift man hier auf feste typische Werte zurück. Da sich je nach Umgebungsbedingungen der Energieverbrauch ändern kann, muss die Überwachung der Spannungen und der Ladung in den Punkten 8 und 9 fortgeführt werden. Ein zweiter Ansatz ist, dass die Software aus den Messungen des Energieverbrauchs für eine Positionsbestimmung und Sendung den Schwellwert für die Bewertung lernt (z.B. als Mittelwert aus den letzten 5 Messungen).
8. Zur Bestimmung der Position wird erst jetzt das GPS-Modul aktiviert. Es muss dabei gewartet werden, bis plausible Daten vorliegen. Dieses Warten und die Überwachung der verfügbaren Energie müssen mit einem Abbruchkriterium (Timeout) versehen werden, damit sich das System geordnet schlafen legen kann.
9. Wurde die Position erfolgreich bestimmt, wird nun das Senden der SMS angestoßen. Auch hier wird ein Abbruchkriterium wie unter Punkt 8 benötigt.
10. In allen Fällen (geordneter Abbruch oder erfolgreiches Senden) legt sich das System wieder schlafen. Hierzu wird zunächst der nächste Weckzeitpunkt gesetzt. Dieser kann im einfachsten Fall durch einen im Schlafmodus laufenden Zähler als Schwellwert dargestellt werden (damit das System z.B. alle 10 Sekunden einmal aufwacht), eine komplexere Lösung ist die Verwendung der Echtzeituhr (RTC), die z.B. ein Aufwachen zu einem bestimmten Zeitpunkt (z.B. jeden Mittwoch um 22:00) ermöglicht.
11. Ist das System eingeschlafen, bestimmt die Hardware über den eingestellten Weckzeitpunkt, wann das System wieder neu startet.

2.4.5 Beispielhafte Implementierung

Die Implementierung erfolgte in diesem Schritt aus Zeitgründen noch nicht im vollen Umfang des vorgesehenen Gesamtkonzeptes. Der Schwerpunkt wurde zunächst auf die Positionsbestimmung und das Senden der SMS gelegt. Das Energiemanagement beschränkt sich zurzeit auf die Abfrage der digitalen Energiezustandssignale.

So konnte erfolgreich gezeigt werden, dass das System in der Lage ist, hochzufahren, Energie zu sammeln und mit seinem Speicher-Inhalt per GPS seine Position zu ermitteln und diese erfolgreich per SMS über das GSM-Netz zu versenden.

3. Fazit

Es wurde erfolgreich ein modulares System entwickelt und realisiert, das aus verschiedenen Energiequellen genügend Energie sammelt, umwandelt und so speichert, dass autark per GSM-Modul eine Nachricht mit den Sensordaten und der Systemposition versendet werden kann. Die korrekte Funktionsweise der einzelnen Module wurde dabei in vitro nachgewiesen.

Die Hardware wurde so ausgelegt, dass über die GSM-Anbindung hinaus zahlreiche Konfigurations- und Erweiterungsmöglichkeiten bestehen, die aber im Rahmen des Projektes noch nicht in Betrieb genommen werden konnten.

Zur Schaffung belastbarer Grundlagen in Richtung der erwartbaren Energie-„Ernte“ und zur optimalen Auswahl der Einzel-Komponenten wurde sehr viel Zeit auf die Analyse und Auswahl der Generatoren verwendet. Die eigentliche Entwicklung der komplexen Hardware hat dann deutlich mehr Zeit benötigt als geplant, so dass am Projektende die Entwicklung der Software und die praktische Erprobung sich auf einen kurzen Funktionsnachweis beschränken mussten.

In den nächsten Schritten sollte die Software soweit ausgebaut werden, dass ein komplettes Energiemanagement vorgehalten wird und dass auch die optional vorgesehenen HW-Module angesteuert werden können. Erst dann sind weitere praktische Messungen zum Energiehaushalt des Systems und damit Maßnahmen zu Optimierung des Eigen-Energieverbrauches und der Wirkungsgrade möglich.

Danach wäre es sinnvoll, die für die Applikation praktisch verwendbaren Generatoren auszulegen und Feldversuche in Richtung der geplanten Applikation durchzuführen, die um festzustellen, welche Leistung das System unter realen Umweltbedingungen erbringen kann.

Mit dieser Baugruppe steht nun eine Plattform für ein energieautarkes, modulares und drahtloses Sensorsystem als Entwicklungs-System zur Verfügung, die genügend Energie sammeln und vorhalten kann, um zum Beispiel einmal pro Tag per GSM ein SMS-Telegramm zu versenden. Auf dieser Basis können nun die nächsten Schritte in Richtung Applikationsrealisierung zügig und risikoarm erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [Ana12] Analog Technologies Inc. 2012. *TEC Module ATE1-288*. [PDF] [Hrsg.] Analog Technologies Inc. Santa Clara, California 95051, USA : s.n., 18. 9 2012. Daten Blatt.
- [Ana13] —. 2013. *TEC Modules ATE1-127*. [PDF] [Hrsg.] Analog Technologies Inc. Santa Clara, California 95051, USA : s.n., 23. 4 2013. Katalog.
- [Ana11] —. 2011. *TEG Modules Thermoelectric Generators*. [PDF] [Hrsg.] Analog Technologies Inc. Sunnyvale, California 94089, USA : s.n., 1. 2 2011. Katalog.
- [AVX14] AVX GmbH. 2014. *BestCap Ultra Low ESR High Power Puls Supercapacitors*. [PDF] [Hrsg.] AVX Corporation. D-85399 Hallbergmoos, Bayern, Deutschland : s.n., 2014. Datenblatt Ver.11.4.
- [Coo11] Cooper Busmann. 2011. [PDF] [Hrsg.] Cooper Busmann. St. Louis, Missouri 63178, USA : s.n., 2011. Data Sheet 4402.
- [Cym12] Cymbet Corporation. 2012. *CBC-PV-02 Photovoltaic Cell*. [PDF] [Hrsg.] Cymbet Corporation. Elk River, Minnesota 55330-1773, USA : s.n., 2012. Data Sheet preliminary.
- [CymoA] —. o.A.. *Cymbet EnerChip(TM) Smart Solid State Batteries Product Overview and User Guide*. [PDF] [Hrsg.] Cymbet Corporation. Elk River, Minnesota Elk 55330, USA : s.n., o.A. Application Note.
- [Cym13] —. 2013. *EnerChip(TM) EP Universal Energy Harvester Eval Kit*. [PDF] [Hrsg.] Cymbet Corporation. Elk River, Minnesota 55330-1773, USA : s.n., 2013. Data Sheet.
- [Jim10] Drew, Jim. 2010. *Energy Harvester Produces Power from Local Environment, Eliminating Batteries in Wireless Sensors*. [PDF] [Hrsg.] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. Milpitas, California 95035-7417, USA : s.n., 2010. Design Notes.
- [EdwoA] Edward J. Burke, Richard J. Buist. o.A.. *Thermoelectric Coolers As Power Generators*. [PDF] [Hrsg.] Marlow Industries Inc. Dallas, Texas, USA : s.n., o.A.
- [Ene111] Energy Micro AS. 2011. *Cortex M3 Referenz Manual*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 4. 2 2011. D0002_Rev1.0.
- [Ene132] —. 2013. *EFM32 Getting Started Application Note*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 8. 5 2013. AN0009_Rev1.15.
- [Ene122] —. 2012. *EFM32GG Reference Manual*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 24. 4 2012. D0053_Rev0.96.
- [Ene134] —. 2013. *EFM32GG990 Data Sheet*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 28. 6 2013. D0046_Rev1.10 Preliminary.
- [Ene131] —. 2013. *Energy Modes Application Note*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 8. 5 2013. AN0007_Rev1.07.
- [Ene13] —. 2013. *Hardware Design Considerations Application Note*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 8. 5 2013. AN0002_Rev1.34.
- [Ene10] —. 2010. *Starter Kit EFM32-G8XX-STK User Manual*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro. Oslo, Norwegen : s.n., 12. 11 2010. t0008_1.01.
- [Ene12] —. 2012. *Starter Kit EFM32GG-STK3700 User Manual*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 31. 5 2012. t0014_0.11.
- [Ene121] —. 2012. *Starter Kit EFM32LG-STK3600*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 31. 5 2012. t0026_0.11.
- [Ene11] —. 2011. *Starter Kit EFM32TG-STK3300 User Manual*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 13. 5 2011. t0011_1.0.
- [Ene133] —. 2013. *Using EFM32 in Energy Harvesting Applications Application Note*. [PDF] [Hrsg.] Energy Micro AS. Oslo, Norwegen : s.n., 12. 6 2013. AN0061_Rev1.01.

- [Fut11] Future Technology Devices International Ltd. 2011.** *FT2232D Dual USB to serial UART/FIFO IC Datasheet.* [PDF] [Hrsg.] Future Technology Devices International Ltd. Glasgow G41 1HH, United Kingdom : s.n., 18. 4 2011. FT_000173 Rev.2.05.
- [Fut05] —. 2005.** *FT2232L Dual USB UART/FIFO I.C.* [PDF] [Hrsg.] Future Technology Devices International Ltd. Glasgow G5 8QB, United Kingdom : s.n., 5 2005. DS2232L Rev. 1.5.
- [Fut13] —. 2013.** *USB Hardware Design Guidelines for FTDI ICs.* [PDF] [Hrsg.] Future Technology Devices International Ltd. Glasgow G41 1HH, United Kingdom : s.n., 1. 11 2013. FT_000292 Rev. 1.1.
- [Han131] Hanwha Q CELLS GmbH. 2013.** *POLYKRISTALLINE SOLARZELLE.* [PDF] [Hrsg.] Hanwha Q CELLS GmbH. D-06766 Bitterfeld-Wolfen, Deutschland : s.n., 1 2013. Daten Blatt.
- [Han13] —. 2013.** *VOLLQUADRATISCHE MONOKRISTALLINE SOLARZELLE.* [PDF] [Hrsg.] Hanwha Q CELLS GmbH. D-06766 Bitterfeld-Wolfen, Deutschland : s.n., 4 2013. Daten Blatt.
- [Hof11] Hoffart, Fran. 2011.** *Tiny 2-Cell Solar Panel Charges Batteries in Compact, Off-Grid Devices.* [PDF] [Hrsg.] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. Milpitas, California 95035-7417, USA : s.n., 2011. Design Note.
- [Inf121] Infinite Power Solutions Inc. 2012.** *A Guide to Handling, Connecting and Charging THINERG MEC200 Series Micro-Energy Cells.* [PDF] [Hrsg.] Infinite Power Solutions Inc. Littleton, Colorado 80127, USA : s.n., 2 2012. AN1014 Ver.1.1 Application Note.
- [Inf12] —. 2012.** *ADP-201 THINERGY Application Development Platform Kit.* [PDF] [Hrsg.] Infinite Power Solutions Inc. Littleton, Colorado 80127, USA : s.n., 2 2012. PB0004 Ver.1.1 Product Brief.
- [Inf124] —. 2012.** *ADP-201: THINERGY Application Development Platform User Manual.* [PDF] [Hrsg.] Infinite Power Solutions Inc. Littleton, Colorado 80127, USA : s.n., 3. 8 2012. UM002 Ver.3.0 User Manual.
- [Inf123] —. 2012.** *Organic-Free, All-Solid-State Thin-Film Batteries for Cell Phones, Tablets, and Future Devices.* [PDF] [Hrsg.] Infinite Power Solutions Inc. Littleton, Colorado 80127, USA : s.n., 5 2012. White Paper.
- [Inf122] —. 2012.** *Thinergy MEC202 Solide-State, Flexible, Rechargeable Thin Film Micro-Energy Cell.* [PDF] [Hrsg.] Infinite Power Solutions Inc. Littleton, Colorado 80127, USA : s.n., 11. 7 2012. DS1015 Ver.1.2 Product Data Sheet.
- [IXY11] IXYS Corporation. 2011.** *IXOLAR (TM) High Efficiency SolarBIT.* [PDF] [Hrsg.] IXYS Corporation. Milpitas, California 95035-7418, USA : s.n., 3 2011. Data Sheet Preliminary.
- [KEM13] KEMET Electronics Corporation. 2013.** *Surface Mount Multilayer Ceramic Chip Capacitors (SMD MLCCs).* [PDF] [Hrsg.] KEMET Electronics Corporation. Greenville, South Carolina 29606, USA : s.n., 29. 5 2013. Katalog.
- [Lin112] Linear Technology Corporation. 2011.** *Demo Manual DC1496B LTC2941/LTC2942 Battery Gas Gauge with IIC Interface and 14-Bit ADC.* [PDF] Milpitas, California 95035-7417, USA : s.n., 2. 3 2011. Manual.
- [Lin13] —. 2013.** *Demo Manual DC2080A.* [PDF] [Hrsg.] Linear Technology Corporation. Milpitas, California 95035, USA : s.n., 8. 1 2013. Manual.
- [Lin04] —. 2011.** *Demo Manual DC590B USB Serial Controller for Linear Technology QuikEval Demo Boards.* [PDF] [Hrsg.] Linear Technology Corporation. Milpitas, California 95035-7417, USA : s.n., 24. 5 2011. Manual.
- [Lin131] —. 2013.** *Energy Harvesting (EH) Multi-Source Demo Board with Transducers.* [Hrsg.] Linear Technology Corporation. Milpitas, California 95035, USA : s.n., 8. 1 2013.

- [Lin10]** —. **2010.** *LTC 2942-1 1A Battery Gas Gauge with internal Sense Resistor and Temperature/Voltage Measurement.* [PDF] [Hrsg.] Linear Technology Corporation. Milpitas, California 95035-7417, USA : s.n., 2010. Data Sheet.
- [Lin11]** —. **2011.** *LTC3105 400mA Step-Up DC/DC Converter with Maximum Power Point Control and 250mV Start-Up.* [PDF] [Hrsg.] Linear Technology Corporation. Milpitas, California 95035-7417, USA : s.n., 2 2011. Data Sheet.
- [Lin12]** —. **2012.** *LTC3109 Auto-Polarity, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager.* [PDF] [Hrsg.] Linear Technology Corporation. Milpitas, California 95035-7417, USA : s.n., 6 2012. Data Sheet.
- [Lin111]** —. **2011.** *LTC3588-2 Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply with 14V Minimum VIN.* [PDF] [Hrsg.] Linear Technology Corporation. Milpitas, California 95035-7417, USA : s.n., 5 2011. Data Sheet.
- [Mic133] Microchip Technology Inc. 2013.** *Bluetooth Data Module Command Reference & Advanced Information User's Guide.* [PDF] [Hrsg.] Roving Networks. Chandler, Arizona, USA : s.n., 26. 3 2013. Ver. 1.0r.
- [Mic13]** —. **2013.** *RN131/171 Evaluation Kit User's Guide.* [PDF] [Hrsg.] Microchip Technology Inc. Chandler, Arizona, USA : s.n., 8 2013. Rev. A. ISBN 978-1-62077-365-9.
- [Mic131]** —. **2013.** *RN131/171 PICtail(TM)/PICtail plus DaughterBoard User's Guide.* [PDF] [Hrsg.] Microchip Technology Inc. Chandler, Arizona, USA : s.n., 8 2013. Rev. A. ISBN 978-1-62077-366-6.
- [Mic14]** —. **2014.** *RN171 2.4GHz IEEE Std. 802.11b/g Wireless LAN Module.* [PDF] [Hrsg.] Microchip Technology Inc. Chandler, Arizona, USA : s.n., 2 2014. DS70005171A Rev.A. ISBN 9781620778418.
- [Mic12]** —. **2012.** *RN-171 802.11b/g Wireless LAN Module.* [PDF] [Hrsg.] Roving Networks. Chandler, Arizona, USA : s.n., 2. 10 2012. Ver. 3.21.
- [Mic121]** —. **2012.** *RN-171-EK Evaluation Board.* [PDF] [Hrsg.] Roving Networks. Chandler, Arizona, USA : s.n., 18. 9 2012. Ver. 109.
- [Mic122]** —. **2012.** *RN-41-EK & RN-42-EK Evaluation Kit User's Guide.* [PDF] [Hrsg.] Roving Networks. Chandler, Arizona, USA : s.n., 10. 12 2012. Ver. 1.0.
- [Mic10]** —. **2010.** *RN-41-SM/RN-42-SM Data Sheet.* [PDF] [Hrsg.] Roving Networks. Chandler, Arizona, USA : s.n., 12. 7 2010.
- [Mic132]** —. **2013.** *RN42/RN42N Class2 Bluetooth-Module.* [PDF] [Hrsg.] Roving Networks. Chandler, Arizona, USA : s.n., 11. 4 2013. Ver. 2.32r.
- [Mic141]** —. **2014.** *WiFly Command Reference, Advanced Features and Applications User's Guide.* [PDF] [Hrsg.] Microchip Technology Inc. Chandler, Arizona, USA : s.n., 2014. Rev. A.
- [Mid13] Mide Technology Corporation. 2013.** *PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTERS.* [PDF] [Hrsg.] Mide Technology Corporation. Medford, Massachusetts 02155, USA : s.n., 23. 1 2013. Rev. 002 Katalog.
- [Mur13] Murata Electronics N.A., Inc. . 2013.** *High Performance Electrical Double-Layer Capacitors DMF Series.* [PDF] [Hrsg.] Murata Americas. Smyrna, Georgia 30080, USA : s.n., 1 2013. Product Guide.
- [Mur12] Murata Manufacturing Co., Ltd. 2012.** *High Performance Electrical Double Layer Capacitor.* [PDF] [Hrsg.] Ltd. Murata Manufacturing Co. Tokyo, Japan : s.n., 27. 4 2012. Katalog.
- [Mur131]** —. **2013.** *High Performance Electrical Double Layer Capacitor DMF Series.* [PDF] [Hrsg.] Ltd. Murata Manufacturing Co. Tokyo, Japan : s.n., 15. 4 2013. Katalog.

- [Nan07] Nanotec Electronic GmbH & Co. KG. 2007.** *Brushless DC Motor DB22M01.* [PDF] [Hrsg.] Nanotec Electronic GmbH & Co. KG. D-85622 Feldkirchen, Deutschland : s.n., 23. 5 2007. Daten Blatt.
- [NiCoA] NIC Components Corp. o.A..** *Multilayer Ceramic Chip Capacitors.* [Hrsg.] NIC Components Corp. Melville, New York 11747, USA : s.n., o.A. Datenblatt.
- [PauoA] Paul G. Lau, Richard J. Buist. o.A..** *Calculation of Thermoelectric Power Generation Performance Using Finite Element Analysis.* [PDF] [Hrsg.] TE Technology Inc. Traverse City, Michigan 49686, USA : s.n., o.A.
- [Phy] Physik Instrumente GmbH und Co. KG. 2011.** *DuraAct Flächenwandler.* [PDF] [Hrsg.] Physik Instrumente GmbH und Co. KG. D-76228 Karlsruhe/Palmbach, Deutschland : s.n., 2011. Daten Blatt.
- [Phy07] —. 2007.** *DuraAct(TM) - Piezoelektrische Flächenwandler für Industrie und Forschung.* [PDF] [Hrsg.] Physik Instrumente GmbH und Co. KG. D-76228 Karlsruhe/Palmbach, Deutschland : s.n., 10. 1 2007. Katalog.
- [Phy14] —. 2014.** *Piezoelectric Ceramic Products.* [Hrsg.] Physik Instrumente GmbH und Co. KG. D-76228 Karlsruhe/Palmbach, Deutschland : s.n., 2 2014. Katalog.
- [Phy12] Physik Instrumente GmbH & Co. KG. 2012.** *Elektronikmodul für Energy Harvesting.* [dPDF] [Hrsg.] Physik Instrumente GmbH & Co. KG. 76228 Karlsruhe/Palmbach, Deutschland : s.n., 9 2012. Katalog.
- [RFr14] R. Friedlander, N. Shacham, S. Podval. 2014.** *Sol Chip (TM) Energy Harvester.* [PDF] [Hrsg.] Sol Chip Ltd. Haifa, Israel : s.n., 2 2014. Ver.1.0.
- [Red12] Redpine Signals Inc. 2012.** *RS-9110-N-11-28 Self Contained 802.11 a/b/g/n Module with Networking Stack.* [PDF] [Hrsg.] Redpine Signals Inc. San Jose, California 95131, USA : s.n., 11 2012. Datenblatt, Ver. 1.9.
- [Ren] Renesas Electronics Corporation. 2012.** *Renesas MPU's & MCU's RL78 Family.* [PDF] [Hrsg.] Renesas Electronics Corporation. 40472 Düsseldorf, Deutschland : s.n., 9 2012. R01CP0003EJ0401.
- [Ren13] —. 2013.** *RL78/G13 Datasheet.* [PDF] [Hrsg.] Renesas Electronics Corporation. 40472 Düsseldorf, Deutschland : s.n., 2. 8 2013. R01DS0131EJ0300 Rev. 3.00.
- [RicoA] Richard J. Buist, Paul G. Lau. o.A..** *Thermoelectric Power Generator Design and Selection from TE Cooling Module Specifications.* [PDF] [Hrsg.] TE Technologies Inc. Traverse City, Michigan 49686, USA : s.n., o.A.
- [San07] Sanyo Semiconductor Co., Ltd. 2007.** *Amorphous Silicon Solar Cells / Amorphous Photosensors.* [PDF] [Hrsg.] Ltd. Sanyo Semiconductor Co. Tokyo, Japan : s.n., 11 2007. Katalog.
- [San05] —. 2005.** *Sanyo Amorphous Solar Cell.* [PDF] [Hrsg.] Ltd. Sanyo Semiconductor Co. Tokyo, Japan : s.n., 12 2005. Datenblatt.
- [BIR11] SCHULZE, BIRGIT. 2011.** *Energy Harvesting Uses the Piezo Effect.* [PDF] [Hrsg.] Physik Instrumente GmbH und Co. KG. 76228 Karlsruhe, Deutschland : s.n., 7 2011. White Paper.
- [Sen11] Sensirion AG. 2011.** *Datasheet SHT21 Humidity and Temperature Sensor IC.* [PDF] [Hrsg.] Sensirion AG. CH-8712 Staefa, Zürich, Schweiz : s.n., 12 2011. Ver. 3, Datenblatt.
- [Sha13] Shanghai SIMCom Wireless Solutions LTD. 2013.** *SIM900 The GSM/GPRS Module for M2M applications.* [PDF] [Hrsg.] Shanghai SIMCom Wireless Solutions LTD. Shanghai, P.R. China : s.n., 2013.
- [Sha10] —. 2010.** *SIM900_Hardware Design_V2.0.* [Hrsg.] Shanghai SIMCom Wireless Solutions LTD. Shanghai, P.R. China : s.n., 15. 12 2010.

- [SIM132] SIMCom Wireless Solutions Ltd. 2013. *SIM908_Hardware Design_V2.01*. [PDF] [Hrsg.] SIMCom Wireless Solutions Ltd. Shanghai, P.R. China : s.n., 24. 4 2013. Application Note.
- [SIM13] —. 2013. *SIM908_Specification_V1106*. [pdf] [Hrsg.] SIMCom Wireless Solutions Ltd. Shanghai, P.R.China : s.n., 24. 4 2013.
- [SIM131] —. 2013. *SIM908-EVB kit_User Guide_V1.01*. [Hrsg.] SIMCom Wireless Solutions Ltd. Shanghai, P.R. China : s.n., 24. 4 2013. User Guide.
- [Sol131] Sol Chip Ltd. 2013. *Sol Chip (TM) Energy Harvester Definition*. [PDF] [Hrsg.] Sol Chip Ltd. Haifa, Israel : s.n., 11 2013. Rev. 2.4.
- [Sol13] —. 2013. *Sol Chip (TM) EVAL-101 Evaluation Board User Manual*. [PDF] [Hrsg.] Sol Chip Ltd. Haifa, Israel : s.n., 10 2013. Rev. 0.2.
- [STM13] ST Microelectronics. 2013. *Discovery kit for STM32L100 Value Line microcontrollers Data Brief*. [PDF] [Hrsg.] ST Microelectronics. Genf, Schweiz : s.n., 8 2013. DocID025087 Rev 1.
- [STM132] —. 2013. *L3GD20H MEMS Motion Sensor: Three Axis digital Output Gyroscope*. [PDF] [Hrsg.] ST Microelectronics. Genf, Schweiz : s.n., 3 2013. Datenblatt.
- [STM09] —. 2009. *LIS35DE MEMS Motion Sensor 3-axis +/-2g/+8g smart digital output "piccolo" accelerometer*. [PDF] [Hrsg.] ST Microelectronics. Genf, Schweiz : s.n., 4 2009. Datenblatt.
- [STM10] —. 2010. *LIS3DH MEMS digital output motion Sensor ultra low Power high Performance 3-axis "nano" accelerometer*. [PDF] [Hrsg.] ST Microelectronics. Genf, Schweiz : s.n., 5 2010. Datenblatt.
- [STM131] —. 2013. *Ultralow power 32-bit MCU ARM®-based Cortex™-M3 Data Sheet*. [Hrsg.] Schweiz. Genf : s.n., 2 2013. DocID024295 Rev 1 preliminary data.
- [Sun13] Sunways AG Photovoltaic Technology. 2013. *Sunways Solar Cells Mono 156 (AH50-H)*. [PDF] [Hrsg.] Sunways AG Photovoltaic Technology. D - 78467 Konstanz, Deutschland : s.n., 3 2013. Daten Blatt.
- [Sun12] —. 2012. *Sunways Solar Cells Multi 156 (CA50-L)*. [PDF] [Hrsg.] Sunways AG Photovoltaic Technology. D - 78467 Konstanz, Deutschland : s.n., 12 2012. Daten Blatt.
- [Sun121] Sunways AG. 2012. *Sunways Solar Cell Multi 156 2BB*. [PDF] [Hrsg.] Sunways AG. D - 78467 Konstanz, Deutschland : s.n., 9 2012. Daten Blatt.
- [TDK14] TDK Corporation. 2014. *MULTILAYER CERAMIC CHIP CAPACITORS*. [Hrsg.] TDK Europe GmbH. 40472 Düsseldorf, Deutschland : s.n., 4 2014. Katalog.
- [TET12] TE Technologies Inc. 2012. *TE-127-2.0-2.5 Thermoelectric Module (Peltier Modul) Specifications*. [PDF] [Hrsg.] TE Technologies Inc. Traverse City, Michigan 49696-8257, USA : s.n., 15. 5 2012. Data Sheet.
- [Tel135] Telit Communications S.P.A. 2013. *Antenna Detection Application Note*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 2. 7 2013. 80000NT10002a Rev. 6.
- [Tel132] —. 2013. *GE 864-GPS*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 2013. Datenblatt.
- [Tel131] —. 2013. *GE/GC864-QUAD V2 and GE864-GPS Hardware User Guide*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 22. 4 2013. 1vv0300915 Rev.12.
- [Tel11] —. 2011. *GM, GE/GL Families GPS Solutions User Guide*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 2. 12 2011. 1vv0300914 Rev. 1.
- [Tel136] —. 2013. *SIM Access Profile User Guide*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 2. 5 2013. 80000ST10029a Rev. 4.
- [Tel137] —. 2013. *Sim Integration Design Guide*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 12. 11 2013. 80000NT10001a Rev.10.

- [Tel138] —. 2013. *SIM/USIM Application Toolkit Application Note*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless SAolutions. I-34010, Italien : s.n., 16. 4 2013. 80000NT10030A Rev. 3.
- [Tel134] —. 2013. *Telit CMUX Implementation User Guide*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 15. 2 2013. 1vv0300994 Rev. 3.
- [Tel133] —. 2013. *Telit EVK2 Datasheet*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 2013. Datenblatt.
- [Tel13] —. 2013. *Telit EVK2 User Guide*. [PDF] [Hrsg.] Telit Wireless Solutions. I-34010 Sgonico, Italien : s.n., 30. 5 2013. 1vv0300704 Rev.17.
- [Tex13] **Texas Instruments Incorporated**. 2013. *2/3 Port Hub for the Universal Serial Bus with optional serial EEPROM Interface*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 6. 9 2013. SLLS372F.
- [Tex111] —. 2011. *bq25504 EVM – Ultra Low Power Boost Converter with Battery Management for Energy Harvester Applications*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 10 2011. User's Guide.
- [Tex132] —. 2013. *MSP430 Hardware Tools User's Guide*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 5 2013. Rev. P.
- [Tex133] —. 2013. *MSP430FR58xx/MSP430FR59xx/MSP430FR68xx and MSP430FR69xx Family Use's Guide*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 10 2013. SLAU367B Preliminary Information.
- [Tex12] —. 2012. *MSP430FR59xx/MSP430FR58xx Mixed Signal Microcontroller*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 10 2012. SLAS704 Product Preview.
- [Tex11] —. 2011. *TI USB 1.1/USB 2.0 Hub FAQ's Application Report*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 3 2011.
- [Tex112] —. 2011. *TMP006 User's Guide*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 5 2011. User's Guide.
- [Tex122] —. 2012. *TMP006/TMP006B Infrared Thermopile Sensor in Chip-Scale Package*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 12 2012. Data Sheet.
- [Tex113] —. 2011. *TMP103 Low Power, Digital Temperature Sensor With Two Wire Interface inWCSP*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 3 2011. Data Sheet.
- [Tex131] —. 2013. *TUSB2036 and TUSB2077a EVM User's Guide*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 12 2013.
- [Tex06] —. 2006. *Tusb2036 Errata*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 10 2006. SLLZ053.
- [Tex121] —. 2012. *Ultra Low Power Boost Converter with Battery Management for Energy Harvester Applications*. [PDF] [Hrsg.] Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas 75265, USA : s.n., 9 2012. Data Sheet BQ25504.
- [ubl13] **u-blox AG**. 2013. *EVK-G20 Quad-band GSM/GPRS Wireless Evaluation Kit Getting Startet*. [PDF] [Hrsg.] u-blox AG. 8800 Thalwil, Zürich, Schweiz : s.n., 22. 1 2013. GSM.G1-EK-11002-2.
- [ubl12] —. 2012. *Leon-G100/Leon G200 quad-band GSM/GPRS Data and Voice Modules Data Sheet*. [PDF] [Hrsg.] u-blox AG. 8800 Thalwil, Zürich, Schweiz : s.n., 3. 12 2012. Rev. 5.
- [ubl121] —. 2012. *Leon-G100/LeonG200 quad-band GSM/GPRS Data and Voice Modules System Integration Manual*. [PDF] [Hrsg.] u-blox AG. 88000 Thalwil, Zürich, Schweiz : s.n., 19. 12 2012. Rev. G3 preliminary.
- [ubl131] —. 2013. *Max-7 u-blox 7 GPS/GNSS modules Data Sheet*. [PDF] [Hrsg.] u-blox AG. 88000 Thalwil, Zürich, Schweiz : s.n., 10. 4 2013. Rev. A.

[ubl132] —. 2013. *Sara-G3 Series versatile 2.5G GSM/GPRS modules*. [PDF] [Hrsg.] u-blox AG. 8800 Thalwil, Zürich, Schweiz : s.n., 2013. Rev. C.

A 1. Bewertungsmatrix der verfügbaren zur benötigten Energie

Die Bewertungsmatrix zeigt das Verhältnis der verfügbaren zur benötigten Energie für die Kombination der Verbraucher in der linken Spalte zu den in Acht rechts daneben stehenden Spalten mit den Energiequellen, sowohl einzeln als auch in Kombination. Die Verhältniszahlen sind ganzzahlig gerundet. Werte größer als 3 werden grün, Werte zwischen 1 und 3 sind gelb und Werte kleiner als 1 sind rot dargestellt.

Werte unter 1 sind nicht geeignet. Werte zwischen 1 und 3 sind nur unter optimalen Bedingungen geeignet. Werte größer als 3 sind auch unter weit weniger günstigen Umwelt-Bedingungen geeignet. Um diese Vergleichsbasis zu erhalten, wurde der Energieverbrauch der Verbraucher anhand eines virtuellen Betriebsprofils bewertet und für alle Kombinationen von Verbrauchern zusammengestellt. Auf der anderen Seite wurde für jede Energiequelle der zu erwartende Energieeintrag unter realistischen Umweltbedingungen und den vorgefundenen Wirkungsgraden sowie der unvermeidbaren Verluste im Speicher ermittelt.

Bewertungsmatrix verfügbare Energie pro benötigte Energie	TEG	Solar	Piezo 1	Piezo 2	Dynamo	TEG +Solar +Piezo 1	TEG +Solar +Piezo 2	TEG +Solar +Dynamo
Telit + Energy Micro+ Sensoren +MEC	59	54	4	11	1	117	124	114
ublox + Energy Micro+ Sensoren +MEC	45	41	3	9	1	89	95	87
SIMCom + Energy Micro+ Sensoren +MEC	45	41	3	9	1	89	95	87
Redpine + Energy Micro+ Sensoren +MEC	75	69	5	14	1	148	158	144
Telit + Energy Micro+ Sensoren +Cooper Bussmann	52	48	3	10	1	104	111	101
ublox + Energy Micro+ Sensoren +Cooper Bussmann	41	38	3	8	1	81	87	79
SIMCom + Energy Micro+ Sensoren +Cooper Bussmann	41	38	3	8	1	81	87	79
Redpine + Energy Micro+ Sensoren +Cooper Bussmann	65	59	4	12	1	128	136	125
Telit + Energy Micro+ Sensoren +Murata	33	30	2	6	0	65	70	64
ublox + Energy Micro+ Sensoren +Murata	28	26	2	5	0	56	59	54
SIMCom + Energy Micro+ Sensoren +Murata	28	26	2	5	0	56	59	54
Redpine + Energy Micro+ Sensoren +Murata	37	34	2	7	0	74	79	72
Telit + Energy Micro+ Sensoren +MLCC	5	4	0	1	0	9	10	9
ublox + Energy Micro+ Sensoren +MLCC	4	4	0	1	0	9	9	9
SIMCom + Energy Micro+ Sensoren +MLCC	4	4	0	1	0	9	9	9
Redpine + Energy Micro+ Sensoren +MLCC	5	4	0	1	0	9	10	9
Telit + STM+ Sensoren +MEC	59	54	4	11	1	117	125	114
ublox + STM+ Sensoren +MEC	45	42	3	9	1	90	95	87
SIMCom + STM+ Sensoren +MEC	45	42	3	9	1	90	95	87
Redpine + STM+ Sensoren +MEC	75	69	5	15	1	149	159	145
Telit + STM+ Sensoren +Cooper Bussmann	53	48	3	10	1	104	111	102
ublox + STM+ Sensoren +Cooper Bussmann	41	38	3	8	1	82	87	80
SIMCom + STM+ Sensoren +Cooper Bussmann	41	38	3	8	1	82	87	80
Redpine + STM+ Sensoren +Cooper Bussmann	65	60	4	13	1	129	137	125
Telit + STM+ Sensoren +Murata	33	30	2	6	0	66	70	64

ublox + STM+ Sensoren + Murata	28	26	2	5	0	56	60	55
SIMCom + STM+ Sensoren + Murata	28	26	2	5	0	56	60	55
Redpine + STM+ Sensoren + Murata	38	35	2	7	1	75	79	73
Telit + STM+ Sensoren +MLCC	5	4	0	1	0	9	10	9
ublox + STM+ Sensoren +MLCC	4	4	0	1	0	9	9	9
SIMCom + STM+ Sensoren +MLCC	4	4	0	1	0	9	9	9
Redpine + STM+ Sensoren +MLCC	5	4	0	1	0	9	10	9
Telit + Renesas+ Sensoren +MEC	59	54	4	11	1	116	124	113
ublox + Renesas+ Sensoren +MEC	45	41	3	9	1	89	95	87
SIMCom + Renesas+ Sensoren +MEC	45	41	3	9	1	89	95	87
Redpine + Renesas+ Sensoren +MEC	74	68	5	14	1	147	157	144
Telit + Renesas+ Sensoren +Cooper Bussmann	52	48	3	10	1	103	110	101
ublox + Renesas+ Sensoren +Cooper Bussmann	41	38	3	8	1	81	87	79
SIMCom + Renesas+ Sensoren +Cooper Bussmann	41	38	3	8	1	81	87	79
Redpine + Renesas+ Sensoren +Cooper Bussmann	64	59	4	12	1	127	136	124
Telit + Renesas+ Sensoren +Murata	33	30	2	6	0	65	70	64
ublox + Renesas+ Sensoren + Murata	28	26	2	5	0	56	59	54
SIMCom + Renesas+ Sensoren + Murata	28	26	2	5	0	56	59	54
Redpine + Renesas+ Sensoren + Murata	37	34	2	7	0	74	79	72
Telit + Renesas+ Sensoren +MLCC	5	4	0	1	0	9	10	9
ublox + Renesas+ Sensoren +MLCC	4	4	0	1	0	9	9	9
SIMCom + Renesas+ Sensoren +MLCC	4	4	0	1	0	9	9	9
Redpine + Renesas+ Sensoren +MLCC	5	4	0	1	0	9	10	9
Telit + TI+ Sensoren +MEC	60	55	4	12	1	119	126	116
ublox + TI+ Sensoren +MEC	46	42	3	9	1	90	96	88
SIMCom + TI+ Sensoren +MEC	46	42	3	9	1	90	96	88
Redpine + TI+ Sensoren +MEC	76	70	5	15	1	151	161	147
Telit + TI+ Sensoren +Cooper Bussmann	53	49	3	10	1	105	112	103
ublox + TI+ Sensoren +Cooper Bussmann	42	38	3	8	1	82	88	80
SIMCom + TI+ Sensoren +Cooper Bussmann	42	38	3	8	1	82	88	80
Redpine + TI+ Sensoren +Cooper Bussmann	66	60	4	13	1	130	139	127
Telit + TI+ Sensoren +Murata	33	31	2	6	0	66	70	64
ublox + TI+ Sensoren + Murata	28	26	2	5	0	56	60	55
SIMCom + TI+ Sensoren + Murata	28	26	2	5	0	56	60	55
Redpine + TI+ Sensoren + Murata	38	35	2	7	1	75	80	73
Telit + TI+ Sensoren +MLCC	5	4	0	1	0	9	10	9
ublox + TI+ Sensoren +MLCC	4	4	0	1	0	9	9	9
SIMCom + TI+ Sensoren +MLCC	4	4	0	1	0	9	9	9
Redpine + TI+ Sensoren +MLCC	5	4	0	1	0	9	10	9

Tabelle 8: Bewertungsmatrix der verfügbaren zur benötigten Energie

A 2. Matlab Programm zur Bestimmung des Energiebedarfes des GSM-Moduls

```
%% Import data from text file.
% Script for importing data from the following text file:
%
%   \\FS01\Home$\Uls\MATLAB\Triple_H\ISendSms3SignalData.txt
%
% To extend the code to different selected data or a different text file,
% generate a function instead of a script.

% Auto-generated by MATLAB on 2014/05/23 11:56:35

%% Initialize variables.
filename = '\\FS01\Home$\Uls\MATLAB\Triple_H\ISendSms3SignalData.txt';
delimiter = ',';
startRow = 21;

%% Format string for each line of text:
%   column1: double (%f)
%   column2: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%f%f[^\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to format string.
% This call is based on the structure of the file used to generate this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating the code
% from the Import Tool.
textscan(fileID, '%[^\n\r]', startRow-1, 'ReturnOnError', false);
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue',
,NaN,'ReturnOnError', false);

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Post processing for unimportable data.
% No unimportable data rules were applied during the import, so no post
% processing code is included. To generate code which works for
% unimportable data, select unimportable cells in a file and regenerate the
% script.

%% Create output variable
ISendSms3SignalData = [dataArray{1:end-1}];
%% Clear temporary variables
clearvars filename delimiter startRow formatSpec fileID dataArray ans;
%% Berechnung
Dateiname='ISendSms3SignalData';
Zeit=ISendSms3SignalData(:,1)-min(ISendSms3SignalData(:,1));
Strom=ISendSms3SignalData(:,2);
Laenge=size(Zeit);
Schritt=1/(round(1/(Zeit(2,1)-Zeit(1,1))));
Start=round(1.5/Schritt);
Stop=round(13/Schritt);
Messdauer=Zeit(Stop,1)-Zeit(Start,1);
Zeit_1=(Zeit(Start:Stop,1))-Zeit(Start,1);
```

```
Strom_1=Strom(Start:Stop,1);
Spannung=3.6; %[V]
Ladung=trapz(Zeit_1,Strom_1); %[As]
Energie=Ladung*Spannung; %[J]
Spitzenstrom=max(Strom_1); %[A]
Stromminimum=min(Strom_1); %[A]
Strommittel=mean(Strom_1); %[A]
Leistungsmittel=Energie/max(Zeit_1); %[W]
Spitzenleistung=Spannung*Spitzenstrom; %[W]
%% Ausgabe
ErgebnisUeberschrift={'Dateiname',Dateiname,' '};
Ergebnis={'Messdauer',Messdauer,'[s]';...
          'Aufloesung',Schritt,'[s]';...
          'Spannung',Spannung,'[V]';...
          'Spitzenstrom',Spitzenstrom,'[A]';...
          'Stromminimum',Stromminimum,'[A]';...
          'Strommittel',Strommittel,'[A]';...
          'Ladung',Ladung,'[As]';...
          'Energie',Energie,'[J]';...
          'Spitzenleistung',Spitzenleistung,'[W]';...
          'Leistungsmittel',Leistungsmittel,'[W]'};
fileID = fopen('Ergebnisse_Reihe_2.txt','w');
FormatUeberschrift='%s %s %s\r\n';
Format='%s %12.6f %s\r\n';
[nrows,ncols] = size(ErgebnisUeberschrift);
for row = 1:nrows
fprintf(fileID,FormatUeberschrift,ErgebnisUeberschrift{row,:});
end
fclose(fileID);
fileID = fopen('Ergebnisse_Reihe_2.txt','a');
[nrows,ncols] = size(Ergebnis);
for row = 1:nrows
fprintf(fileID,Format,Ergebnis{row,:});
end
fclose(fileID);
figure
plot(Zeit,Strom)
title('Strombedarf des GSM-Moduls fuer eine SMS')
xlabel('Zeit [s]')
ylabel('Strom [A]')
grid on
figure
plot(Zeit_1,Strom_1)
title('Strombedarf des GSM-Moduls fuer eine SMS')
xlabel('Zeit [s]')
ylabel('Strom [A]')
grid on
```

A 3. Messwerte der Messungen zum Energiesammel-Modul

Die nachfolgenden Tabellen beinhalten die Messwerte zu den einzelnen Energiesammel-Modulen.

T_In_TEG [°C]	T_Out_TEG [°C]	U_TEG [V]	R_Last [Ω]	Kommentar
21	21,1	0,003	offen	
21,7	22,6	0,089	Offen	
21,4	23,7	0,273	Offen	
22,1	26,7	0,43	Offen	
23,8	30,8	0,749	Offen	
24,6	34,8	1,061	Offen	
26,7	40,8	1,525	Offen	
28,7	48,1	2,1	Offen	
29,5	54,6	2,6	Offen	
31,7	63	3,16	Offen	
32,6	70,4	3,74	Offen	
21,2	21,2	0,001	100	
21,7	22,5	0,079	100	
21,4	23,7	0,253	100	
22,1	26,6	0,415	100	
24,1	30,8	0,712	100	
24,5	34,6	1,011	100	
26,6	40,8	1,449	100	
28	48,3	2,01	100	
30	55	2,47	100	
31,5	63	2,99	100	
34	70,5	3,56	100	
21,2	21,3	0,007	47	
21,8	22,5	0,078	47	
21,6	23,9	0,241	47	
22	26,4	0,384	47	
24,1	30,7	0,675	47	
24,5	34,4	0,96	47	
26,5	40,6	1,372	47	
28,3	48,3	1,9	47	
29	54,8	2,33	47	
31,5	62,5	2,83	47	
33	70,2	3,35	47	
20,9	21,1	0,007	22	
21,2	22	0,071	22	
21,6	24	0,216	22	
21,9	26,8	0,349	22	
23,7	30,8	0,606	22	
24,3	34,3	0,861	22	
26,5	40,4	1,232	22	
29,1	47,9	1,71	22	
29,4	54,2	2,08	22	
31	62,4	2,51	22	
33	69,3	2,97	22	
20,8	21	0,005	12	
21,4	22,1	0,062	12	
21,6	24	0,194	12	
21,9	26,9	0,307	12	
24,1	30,6	0,532	12	
24,4	34,1	0,755	12	
26,5	40,2	1,063	12	
28,5	47,5	1,468	12	
29,4	54,1	1,79	12	
31	62	2,16	12	
33	68,5	2,54	12	
20,7	21	0,004	6	
21,6	22,2	0,041	6	
21,4	24	0,148	6	
22	26,9	0,239	6	
23,5	29,9	0,411	6	
24,5	33,6	0,577	6	
27	39,6	0,817	6	
27,7	46,6	1,125	6	
30,9	52,7	1,369	6	

30,5	60,6	1,639	6	
33,5	67,7	1,92	6	
21	21	0,002	3	
22	22	0,031	3	
22	24	0,104	3	
22	27	0,165	3	
23	30	0,285	3	
24	33	0,394	3	
27	39	0,56	3	
29	46	0,764	3	
29	52	0,926	3	
31	59	1,109	3	
33	66	1,294	3	

Tabelle 9: Messungen der Generatorkennlinie des TEG

F_PH_Dynamo [Hz]	N_Dynamo [1/s]	U_Dynamo [V]	R_Last [Ω]	Kommentar
0	0	0	offen	
22	5,5	1,05	offen	
30	7,5	1,4	offen	
40	10	1,76	offen	
50	12,5	2,2	offen	
60	15	2,65	offen	
70	17,5	3,13	offen	
80	20	3,56	offen	
90	22,5	4	offen	
125	31,25	5,6	offen	
150	37,5	6,78	offen	
175	43,75	7,9	offen	
200	50	9,3	offen	
0	0	0	100	
22	5,5	0,5	100	
30	7,5	0,72	100	
40	10	1,04	100	
50	12,5	1,4	100	
60	15	1,75	100	
70	17,5	2,1	100	
80	20	2,45	100	
90	22,5	2,8	100	
125	31,25	3,92	100	
150	37,5	4,9	100	
175	43,75	5,7	100	
200	50	6,5	100	
0	0	0	47	
22	5,5	0,35	47	
30	7,5	0,58	47	
40	10	0,875	47	
50	12,5	1,14	47	
60	15	1,45	47	
70	17,5	1,73	47	
80	20	2	47	
90	22,5	2,3	47	
125	31,25	3,25	47	
150	37,5	4	47	
175	43,75	4,72	47	
200	50	5,4	47	
0	0	0	22	
22	5,5	0,26	22	
30	7,5	0,435	22	
30	7,5	0,625	22	
50	12,5	0,87	22	
60	15	1,07	22	
70	17,5	1,27	22	
80	20	1,5	22	
90	22,5	1,72	22	
125	31,25	2,36	22	
150	37,5	2,9	22	
175	43,75	3,49	22	
200	50	4	22	
0	0	0	12	
22	5,5	0,185	12	

30	7,5	0,3	12	
30	7,5	0,45	12	
50	12,5	0,64	12	
60	15	0,75	12	
70	17,5	0,91	12	
80	20	1,06	12	
90	22,5	1,26	12	
125	31,25	1,72	12	
150	37,5	2,1	12	
175	43,75	2,5	12	
200	50	2,85	12	
0	0	0	6	
22	5,5	0,1	6	
30	7,5	0,18	6	
30	7,5	0,273	6	
50	12,5	0,38	6	
60	15	0,465	6	
70	17,5	0,56	6	
80	20	0,653	6	
90	22,5	0,74	6	
125	31,25	1,06	6	
150	37,5	1,31	6	
175	43,75	1,52	6	
200	50	1,76	6	
0	0	0	3	
22	5,5	0,063	3	
30	7,5	0,1	3	
30	7,5	0,15	3	
50	12,5	0,21	3	
60	15	0,263	3	
70	17,5	0,316	3	
80	20	0,375	3	
90	22,5	0,435	3	
125	31,25	0,597	3	
150	37,5	0,738	3	
175	43,75	0,853	3	
200	50	0,98	3	

Tabelle 10: Messungen der Generator Kennlinie des Synchrongenerators

Abstand [mm]	Prel [%]	U_Solar [V]	R_Last [Ω]	Kommentar
35	43,0	0,587	offen	
75	12,2	0,551	offen	
150	3,4	0,505	offen	
300	1,1	0,459	offen	
450	0,6	0,432	Offen	
35	43,0	0,584	100	R _{mess} =98,62
75	12,2	0,548	100	
150	3,4	0,497	100	
300	1,1	0,431	100	
450	0,6	0,371	100	
35	43,0	0,582	47	R _{mess} =46,65
75	12,2	0,544	47	
150	3,4	0,487	47	
300	1,1	0,374	47	
450	0,6	0,248	47	
35	43,0	0,577	22	R _{mess} =22,16
75	12,2	0,537	22	
150	3,4	0,455	22	
300	1,1	0,216	22	
450	0,6	0,123	22	
35	43,0	0,572	12	R _{mess} =12,41
75	12,2	0,523	12	
150	3,4	0,355	12	
300	1,1	0,12	12	
450	0,6	0,068	12	
35	43,0	0,569	10	R _{mess} =10,12
75	12,2	0,515	10	
150	3,4	0,295	10	
300	1,1	0,098	10	
450	0,6	0,055	10	

35	43,0	0,563	8	$R_{\text{mess}}=8,67$
75	12,2	0,508	8	
150	3,4	0,251	8	
300	1,1	0,083	8	
450	0,6	0,046	8	
35	43,0	0,558	6	$R_{\text{mess}}=6,55$
75	12,2	0,486	6	
150	3,4	0,185	6	
300	1,1	0,061	6	
450	0,6	0,033	6	
35	43,0	0,551	5	$R_{\text{mess}}=5,49$
75	12,2	0,466	5	
150	3,4	0,154	5	
300	1,1	0,051	5	
450	0,6	0,028	5	
35	43,0	0,544	4	$R_{\text{mess}}=4,51$
75	12,2	0,421	4	
150	3,4	0,124	4	
300	1,1	0,040	4	
450	0,6	0,022	4	
35	43,0	0,530	3	$R_{\text{mess}}=3,52$
75	12,2	0,336	3	
150	3,4	0,094	3	
300	1,1	0,030	3	
450	0,6	0,017	3	
35	43,0	0,507	2	$R_{\text{mess}}=2,75$
75	12,2	0,249	2	
150	3,4	0,069	2	
300	1,1	0,022	2	
450	0,6	0,012	2	
35	43,0	0,418	1	$R_{\text{mess}}=1,65$
75	12,2	0,128	1	
150	3,4	0,035	1	
300	1,1	0,011	1	
450	0,6	0,006	1	
		$I_{\text{SCmess}} [\text{A}]$		
35	43,0	0,400	0	
75	12,2	0,113	0	
150	3,4	0,031	0	
300	1,1	0,010	0	
450	0,6	0,006	0	

Tabelle 11: Messungen der Generatorkennlinie der Solarzelle

A 4. 3D-Modell der Triple-H-Plattform

Abbildung 20 zeigt das 3D Modell der Triple-H-Plattform als Ausgabe des CAD Programmes in der Draufsicht.

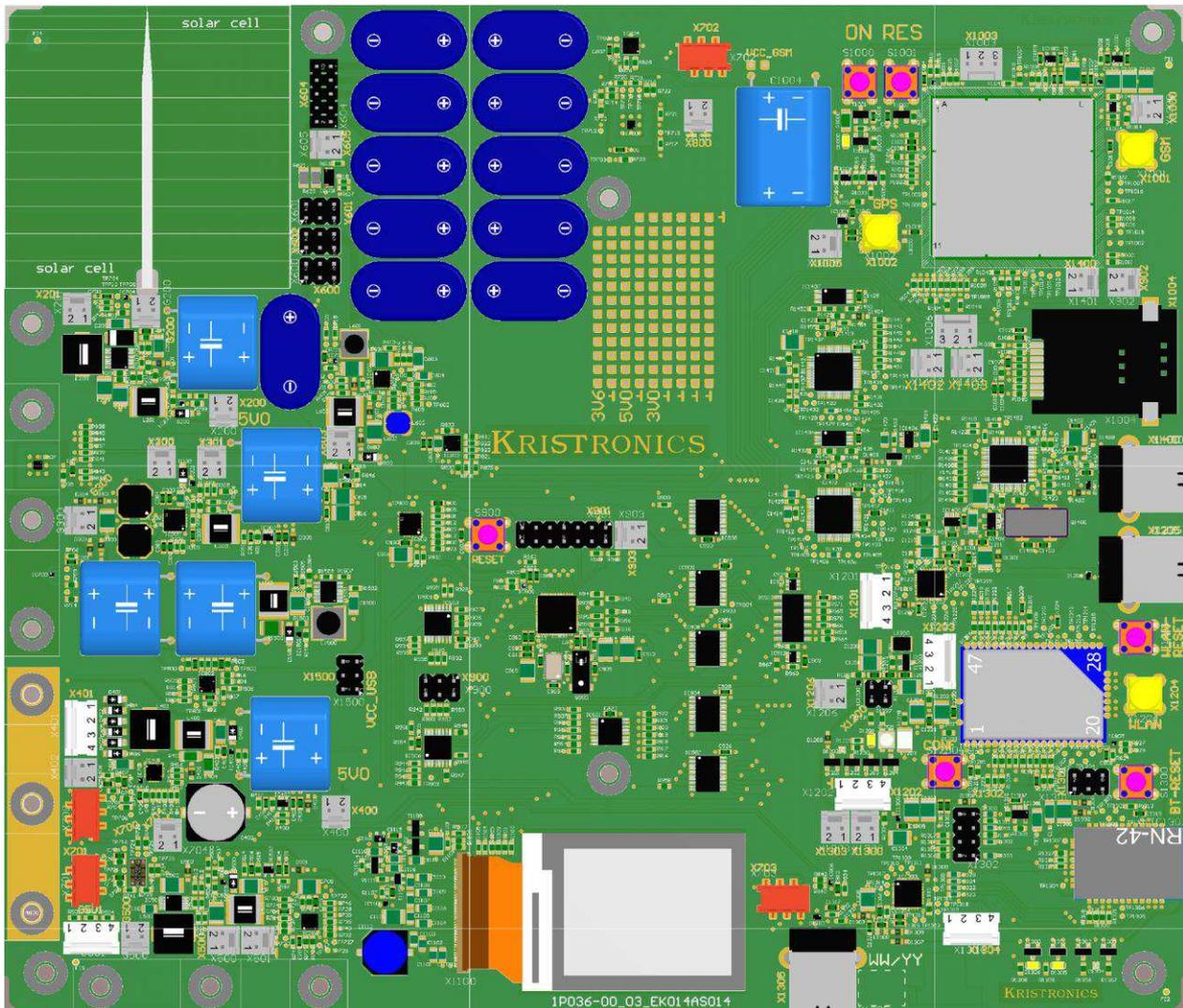


Abbildung 20: 3D Modell der Triple-H-Plattform