

Masterarbeit

ENERGY HARVESTING KONZEPT FÜR EIN FLEXIBLES MATERIALANFORDERUNGSSYSTEM

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Claus Ederer, BSc

1610322015

betreut und begutachtet von

Dipl.-Ing. Dr. Manfred Pauritsch

Graz, im Dezember 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Claus Ederer', is written over a horizontal dotted line.

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert, sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Claudia Eder', is written above a horizontal dotted line.

Unterschrift

DANKSAGUNG

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Daneben gilt mein Dank meiner Frau Andrea Krones, welche in zahlreichen Stunden Korrektur gelesen hat. Sie wies auf Schwächen hin und konnte als Fachfremde immer wieder aufzeigen, worin noch Erklärungsbedarf bestand.

Ganz besonders gilt dieser Dank Herrn Dipl.-Ing. Dr. Manfred Pauritsch, der meine Arbeit unterstützt und somit auch mich betreut hat.

KURZFASSUNG

Aus Gründen der Effizienzsteigerung in Lagerstätten und in Produktionsstätten gewinnen Materialanforderungssysteme in der Industrie immer mehr an Bedeutung. Produktionsmitarbeiter- und mitarbeiterinnen können meist keine aktiven Materialanforderungen an ihren Arbeitsplätzen durchführen, ohne ihren Arbeitsplatz zu verlassen. Sie müssen darauf vertrauen, dass benötigte Kleinteile in bestimmten Zeitintervallen von Lagermitarbeitern- und mitarbeiterinnen angeliefert werden. Aus diesem Grund existiert ein kabelloses Materialanforderungssystem, das es Produktionsmitarbeitern- und mitarbeiterinnen erlaubt, mittels eines mit Batterien betriebenen Materialanforderungssenders aktiv Anforderungen zu tätigen.

Zielsetzung dieser Masterarbeit ist es, ein Konzept zu erstellen, das einen bestehenden Materialanforderungssender, welcher WLAN zur Datenübertragung nutzt und vier Mal täglich betätigt wird, mit Hilfe einer Energy Harvesting Einheit mit Energie versorgt. Mit Hilfe dieses Konzeptes soll es möglich sein dauerhaft auf Versorgungsleitungen oder Batterien, welche den Materialanforderungssender im Moment mit Energie versorgen, zu verzichten. Damit der Energiebedarf des Materialanforderungssenders vermindert wird, wurde LoRaWAN als Alternative zur bestehenden Datenübertragungstechnologie ausgewählt und der zu erwartende Energiebedarf ermittelt. Des Weiteren wurden verschiedene Methoden des Energy Harvesting untersucht und PV-Zellen als geeignetstes Verfahren ausgewählt, um den Materialanforderungssender dauerhaft mit Energie zu versorgen. Damit die Übertragungssicherheit der Daten zu gewährleistet ist und Verbrauchsspitzen des Materialanforderungssenders abdeckt werden, sind verschiedene für diese Anwendung geeignete Energiespeicher untersucht. Daraus resultierend wurde ein Akkumulator mit Lithium-Ionen Technologie für diese Anwendung ausgewählt. Aus diesen Bauteilen wurde ein Testaufbau, der den zu erwartenden Einsatzbedingungen entspricht, realisiert, und eine Auslegungstabelle für den Einsatz des Materialanforderungssenders unter verschiedenen Bedingungen erstellt.

ABSTRACT

To increase the efficiency in storage facilities and in manufacturing facilities, material requisitions systems are increasingly used in the industry. Without these systems, production employees are not able to accomplish an active material requisition without having to leave their workplaces. They must bank on, the required small parts to be delivered by storage staff at certain time intervals. Therefore, a wireless material requisition system, which allows production employees to make active requests with a battery powered material request transmitter exists.

The aim of this master's thesis is to create a concept for supplying energy to an existing material request transmitter, which is actuated just four times a day and uses WLAN for data transmission. This concept should include an energy harvesting unit to operate the transmitter permanently without a supply line or batteries. To reduce the energy consumption of the material request transmitters, LoRaWAN was selected as an energy-saving option to the used data transmission technology. The energy demand of the transmitter was determined and compared with both data transfer technologies. To find the most suitable method to permanently supply the material request transmitter with energy, various methods of energy harvesting were investigated. As a result, various PV cell technologies were selected and trialled. In order to ensure the transmission reliability of the data and to be able to cover consumption peaks of the material request sender, various possibilities of energy storing, which are suitable for this application, were investigated. Finally, an accumulator with lithium-ion technology was selected for this specific usage. With these components, a test arrangement, which corresponds to the expected conditions of use and a dimensioning spreadsheet for the material request transmitter were realized.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Eigenschaften des bestehenden Materialanforderungssystems.....	1
1.3	Ablauf des Anforderungsvorganges	3
1.4	Drahtlose Kommunikation.....	3
1.4.1	Anforderungen an die drahtlose Kommunikation	3
1.4.2	Eigenschaften von WLAN.....	4
1.4.2.1	Reichweite und Datenrate	5
1.4.2.2	Sicherheit.....	5
1.4.3	Energiebedarfsmessung WLAN	5
1.4.3.1	Energiebedarfsberechnung der Variante zwei über 24 Stunden	6
1.4.3.2	Energiebedarfsberechnung der Variante eins über 24 Stunden	7
1.4.3.3	Energiebedarfsberechnung der Variante drei über 24 Stunden.....	7
1.4.4	Berechnung der maximalen Nutzungsdauer mit der momentanen Konfiguration.....	7
1.4.5	Eigenschaften von LoRaWAN	8
1.4.5.1	Netzwerktopologie	9
1.4.5.2	Reichweite und Datenrate	9
1.4.5.3	LoRaWAN Klassen.....	9
1.4.5.4	Sicherheit.....	10
1.4.6	Energiebedarfsmessung LoRaWAN.....	10
1.4.6.1	Energiebedarfsberechnung der Variante zwei über 24 Stunden	10
1.4.6.2	Energiebedarfsberechnung der Variante eins über 24 Stunden	12
1.4.6.3	Energiebedarfsberechnung der Variante drei über 24 Stunden.....	12
1.4.7	Vergleich des Energiebedarfs zwischen WLAN und LoRaWAN	13
2	Energy Harvesting.....	14
2.1	Der thermoelektrische Effekt	15
2.1.1	Der Seebeck-Effekt.....	15
2.2	Der piezoelektrische Effekt	16
2.2.1	Grundsatz des piezoelektrischen Effekts	16
2.2.2	Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Harvesters.....	17
2.3	Energieübertragung mittels Funkwellen	18
2.3.1	Basiskonzept der drahtlosen Energieübertragung	18
2.3.2	Effizienz von kabelloser Energieübertragung	20
2.4	Der photoelektrische Effekt.....	21
2.4.1	Physikalische Grundlagen	21
2.4.2	Eigenschaften von Halbleiterwerkstoffen	21
2.4.3	Der photovoltaische Effekt.....	22
2.5	Verwendete Energy Harvesting Methode	23
3	Photovoltaik-Zellen-Technologien	24

3.1	Die Silizium Zelle	26
3.1.1	Die monokristalline Zelle.....	26
3.1.2	Die polykristalline Zelle	26
3.2	Die Gallium-Arsenid-Zelle.....	27
3.3	Eigenschaften von organischen PV-Zellen.....	27
3.3.1	Die Grätzel-Zelle.....	28
3.4	Spektrale Empfindlichkeit von PV-Zellen.....	28
3.5	Das Emissionsspektrum von künstlicher Beleuchtung	29
3.5.1	Eigenschaften von Quecksilberdampf-Niederdrucklampen	29
3.5.2	Eigenschaften von Quecksilberdampf-Hochdrucklampen.....	30
4	Speichertechnologien.....	32
4.1	Funktionsweise von Akkumulatoren	32
4.2	Typen von Akkumulatoren	33
4.2.1	Eigenschaften von Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren	33
4.2.2	Eigenschaften von Nickel-Zink-Akkumulatoren	34
4.2.3	Eigenschaften von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	35
4.3	Der Doppelschichtkondensator.....	36
4.3.1	Prinzipieller Aufbau von Doppelschichtkondensatoren	36
4.3.2	Elektrische Eigenschaften von Doppelschichtkondensatoren.....	38
4.3.2.1	Laden und Entladen des Doppelschichtkondensators	38
4.3.2.2	Verluste und Wirkungsrad des realen Kondensators	38
4.3.2.3	Lebensdauer des Kondensators	38
4.4	Verwendeter Energiespeicher	39
5	Beleuchtungsverhältnisse im Betrieb	41
5.1	Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke	41
5.2	Messung der Beleuchtungsverhältnisse in den Werkshallen des Betreibers des Materialanforderungssystems.....	42
5.2.1	Messung der Innenraumbeleuchtung im Rohbau.....	44
5.2.2	Messung der Innenraumbeleuchtung in der Montagehalle	44
5.2.3	Messung der Innenraumbeleuchtung im Zwischenlager	45
5.2.4	Messung der Innenraumbeleuchtung in der Montagehalle des Interieurs	46
5.3	Erkenntnisse aus der Beleuchtungsstärkemessung.....	47
6	Vermessung der verwendeten PV-Zellen	48
6.1	Eigenschaften des Energy Harvesting Moduls	48
6.1.1	Erläuterung des MPPT-Verfahrens.....	48
6.1.2	MPPT-Verfahren des verwendeten Energy Harvesting Moduls.....	49
6.2	Versuchsaufbau zur Vermessung der PV-Zellen	50
6.3	PV-Zelle Saver 5V 1W	51
6.3.1	Eigenschaften der PV-Zelle Saver 5V 1W.....	51
6.3.2	Kennlinien der PV-Zelle laut dem Datenblatt.....	51
6.3.3	Vermessung der PV-Zelle Saver 5V 1W	52
6.4	PV-Zelle CAMTOA 5V 250mA 1.25W	56

6.5	PV-Zelle Zimo® 5V 1.2W 240mA	59
6.6	PV-Zelle CASC SC 3GA mA	62
6.7	Auswahl der geeigneten PV-Zelle	65
7	Elektromagnetische Strahlungsverhältnisse im Betrieb	66
7.1	Abschwächung des Signals	66
7.2	Berechnung der Datenübertragungreichweite	66
7.3	Praktische Messung der Datenübertragungreichweite	70
7.3.1	Verwendeter LoRaWAN-Router	70
7.3.2	Ort der Messung	70
7.3.3	Messung der Übertragungreichweite mit dem WLAN-Modul	71
7.3.4	Messung der Übertragungreichweite mit dem LoRaWAN-Modul	73
7.4	Auswahl des geeigneten Datenübertragungssystems	74
8	Auslegungstabelle für den Einsatz des Materialanforderungssystems	75
8.1	Auslegungstabelle bei konstanter Fläche der PV-Zelle	75
8.1.1.1	Berechnung des Energiebedarfs je Materialanforderung der Variante eins des Materialanforderungssystems	75
8.1.1.2	Berechnung des Energiebedarfs je Materialanforderung der Variante zwei des Materialanforderungssystems	76
8.1.1.3	Berechnung des Energiebedarfs je Materialanforderung der Variante drei des Materialanforderungssystems	76
8.2	Auslegungstabelle bei vier Materialanforderungsvorgängen und variabler Fläche der PV-Zelle	79
9	Testaufbau der Konzeption	80
9.1	Mögliche Messmethoden	80
9.1.1	Messung der Spannung über die Zeit	80
9.1.2	Messung mit Impedance Track	81
9.1.3	Erfassen der eingespeisten und der entnommenen Energie	81
9.2	Darstellung des Messaufbaues	82
9.3	LabVIEW zur Datenaufzeichnung	83
9.4	Ergebnis der Messung	85
10	Zusammenfassung und Ausblick	87
10.1	Energieverbrauch des Materialanforderungssenders	87
10.2	Energy Harvesting Konzept	87
10.3	Ausblick und Veränderungsvorschläge	88
	Literaturverzeichnis	89
	Abbildungsverzeichnis	91
	Tabellenverzeichnis	94
	Abkürzungsverzeichnis	96

1 EINLEITUNG

Bei zunehmender Größe und Komplexität von Produktionslinien und Lagern können Materialanforderungen automatisch mit einem Bestellsystem oder durch manuelle Anfragen getätigt werden. Diese Materialanforderungssysteme können drahtgebunden oder kabellos realisiert werden. Durch die steigende Dynamisierung werden dieselben Waren und Materialien zu unterschiedlichen Zeitpunkten an abwechselnden Orten gelagert. Daher gewinnt die Flexibilität von Materialanforderungssystemen zunehmend an Bedeutung. Um dies zu gewährleisten, wird ein flexibles, kabelloses System verwendet, welches nicht dauerhaft mit dem Lagerplatz verbunden ist. Zurzeit wird der Sender des Materialanforderungssystems mit Batterien, welche regelmäßig gewechselt werden müssen, mit Energie versorgt.

Um die Flexibilität des Materialanforderungssenders zu erhöhen und die Umweltbelastung durch den Verbrauch von Batterien zu minimieren, soll geklärt werden, ob dieses System mittels eines Energy Harvester mit Energie versorgt werden kann. Dazu muss eine energieeffiziente Methode der kabellosen Datenübertragung gefunden werden, um möglichst wenig Energie beim Übertragen der Anfrage zu verbrauchen. Des Weiteren muss eine geeignete Energiequelle gefunden werden, welche den Energy Harvester zuverlässig mit Energie versorgt. Um das System zu stabilisieren und einen Bestellvorgang zu gewährleisten, wenn der Energy Harvester keine Energie aus der Umgebung bereitstellen kann, soll auch eine geeignete Energiespeichertechnologie gefunden werden. Resultierend aus diesen Untersuchungen wird ein Testaufbau realisiert, welcher die Umsetzbarkeit aufzeigt. Darüber hinaus wird eine Auslegungstabelle erstellt, welche als Übersicht für den Einsatz des Anforderungssenders an unterschiedlichen Verwendungsorten dienen soll.

1.1 Ausgangssituation

An den Produktionslinien des Betreibers des Materialanforderungssystems werden eine Vielzahl von Kleinteilen benötigt. Diese befinden sich in einem zentralen Lager und werden an kleine Zwischenlager direkt an die Produktionslinie geliefert. Dort werden sie von Produktionsmitarbeitern- und mitarbeiterinnen entnommen und verbaut. Um einen reibungslosen Arbeitsablauf sicherzustellen, wird der Zwischenvorrat an den Produktionslinien von Lagermitarbeitern- und mitarbeiterinnen in bestimmten Zeitintervallen aufgefüllt. Der Produktionsmitarbeiter oder die Produktionsmitarbeiterin kann ohne das Materialanforderungssystem keine aktive Materialanforderung abgeben, ohne den Arbeitsplatz zu verlassen. Geht der Vorrat an verbauenden Teilen zur Neige sind Verzögerungen in der Produktion die Folge. Mit Hilfe des Materialanforderungssystems können Produktionsmitarbeiter und Produktionsmitarbeiterinnen nun aktiv die von ihnen benötigten Teile anfordern. Laut dem Betreiber des Materialanforderungssystems werden täglich maximal vier Materialanforderungen pro Kleinteil getätigt.

1.2 Eigenschaften des bestehenden Materialanforderungssystems

Mit Hilfe des Materialanforderungssenders können Materialanforderungen von Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen an Produktionslinien oder Kleinteilelagern direkt in das Enterprise-Resource-Planning-System (ERP) des Unternehmens getätigt werden. Der Sender hat eine Abmessung von 210 mm x 45 mm und kann mittels vier im Gehäuse verbauten Magneten an Regalen befestigt werden. Wie aus Abb. 1 ersichtlich,

befindet sich an der Vorderseite der Materialanforderungssender ein Etikett oder ein Display mit der Beschreibung der Kleinteile. In den Tasten der Variante zwei des Senders sind Leuchtdioden verbaut, die über den Status der Materialanforderung Auskunft geben.

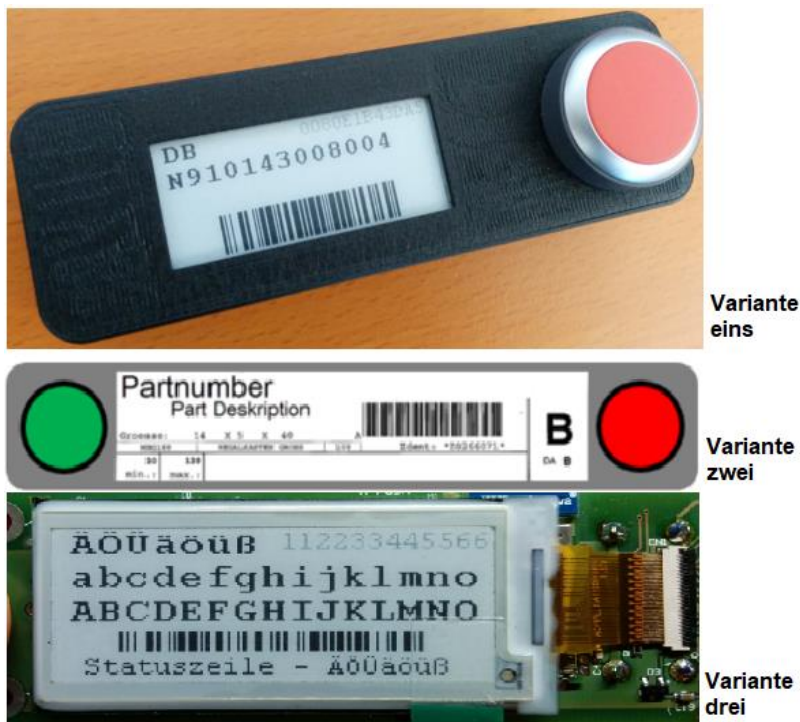


Abb. 1: Varianten des Materialanforderungssenders, Quelle: Eigene Darstellung.

Aktuell werden die Materialanforderungssender von zwei wechselbaren AA Batterien mit Energie versorgt und sind in das bestehende Wireless Local Area Network (WLAN) des Betreibers miteingebunden. Bei zu geringer Batteriespannung erfolgt eine Meldung des Anforderungssenders an das ERP-System des Unternehmens. Das Anforderungssystem soll in Zukunft in drei verschiedenen Ausführungen eingesetzt werden:

- Variante eins: Materialanforderung ohne Rückmeldung über den Status der Anforderung.
- Variante zwei: Materialanforderung mit Rückmeldung, der Status der Anforderung wird über zwei Leuchtdioden angezeigt.
- Variante drei: Materialanforderung mit Rückmeldung, der Status der Bestellung wird über ein E-Ink Display der Firma Dalian Good Display Co.,Ltd. GDE021A1 angezeigt.

Momentan befindet sich nur die Variante zwei im Einsatz. Der Energieverbrauch des Anforderungssystems ist abhängig von der Ausführung und der Häufigkeit der Betätigung des Systems. Um einen reibungslosen Betrieb des Systems sicherzustellen, ist es erforderlich, die Batterien regelmäßig zu überprüfen, beziehungsweise auszuwechseln. Dies ist für den Betreiber kostenintensiv und belastet die Umwelt. Daher wird zusätzlich zu einem Speichermedium ein Energy-Harvester benötigt, welcher aus der Umgebung genügend Energie lukrieren kann, um den Materialanforderungssender betreiben zu können.

1.3 Ablauf des Anforderungsvorganges

Der Anforderungsvorgang wird durch die Betätigung des roten Tasters ausgelöst. Dies löst eine Umlagerung im ERP-System aus und die rote Leuchtdiode beginnt zu blinken. Bei einer unabsichtlichen Betätigung der Anforderungstaste ist ein Abbruch der Anforderung mit der grünen Taste möglich. Bei fertiger Abarbeitung des Anforderungsauftrags im Lager erfolgt eine Rückmeldung des ERP-Systems an den Materialanforderungssender und der grüne Taster beginnt zu blinken. Durch die Betätigung des grünen Tasters wird der Warenerhalt bestätigt und an das ERP-System gemeldet. Die grüne Leuchtdiode erlischt und der Materialanforderungssender ist bereit für die nächste Anforderung. Die Zeit zwischen der Anforderung des Materials und dem Erhalt des Materials soll laut Betreiber maximal eine halbe Stunde dauern. In dieser Zeit erfolgt eine fünfmalige Abfrage des Status' der Anfrage durch den Materialanforderungssender.

1.4 Drahtlose Kommunikation

Die kabellose Kommunikation des Systems funktioniert zurzeit über WLAN. Da in den Betriebsstätten des Betreibers des Materialanforderungssystems eine hohe Auslastung der WLAN Access-Points herrscht, wurde eine Alternative zur derzeitigen kabellosen Datenübertragung gesucht. Die Entscheidung fiel auf die Kommunikation mit Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), eine neue Datenübertragungstechnologie, welche speziell für die Kommunikation im Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) entwickelt wurde. Die Datenübertragung beider Kommunikationsmöglichkeiten geschieht mit verbindungsloser Paketvermittlung. Da der Betreiber des Materialanforderungssystems die kabellose Datenübertragung des Systems auf WLAN oder LoRaWAN beschränkt, wird in dieser Arbeit nicht näher auf andere Möglichkeiten der kabellosen Datenübertragung wie zum Beispiel WirelessHART, ZigBee, Bluetooth oder OpenWSN eingegangen.

1.4.1 Anforderungen an die drahtlose Kommunikation

Da mit einem Energy Harvester nur eine begrenzte Menge an Umgebungsenergie lukriert werden kann, ist die wichtigste Anforderung an die Kommunikation in diesem Anwendungsfall die Energieeffizienz. Die Reichweite der Datenübertragungstechnologie ist ein weiterer wichtiger Aspekt. Die Betriebsstätten des Betreibers des Materialanforderungssystems sind sehr weitläufig und dicht bebaut. Daher sollte die verwendete Funktechnologie nicht empfindlich gegenüber Dämpfung und Reflexion sein. In diesem Abschnitt werden WLAN und LoRaWAN miteinander bezüglich ihrer Eigenschaften und anhand von Standards gegenübergestellt. In Abb. 2 findet sich ein Überblick über die verschiedenen Technologien bezüglich ihrer Reichweite und ihrer Datenübertragungsraten.

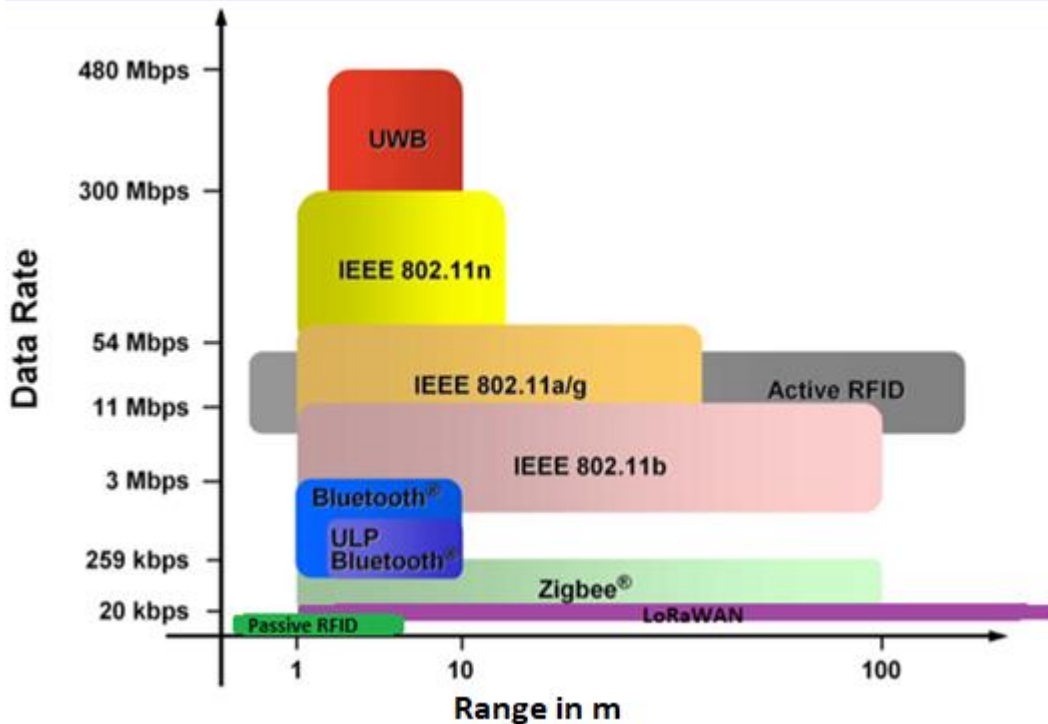


Abb. 2: Drahtlose Netzwerktechnologien abhängig von der Datenrate (Data Rate) und der Reichweite (Range), Quelle: Wirelessdesignmag, Online-Quelle [03.07.2017] (geringfügig modifiziert).

1.4.2 Eigenschaften von WLAN

WLAN ist ein drahtloses lokales Netzwerk, welches zum IEEE 802.11 Standard gehört. Die Netzwerke können mit verschiedenen Modi betrieben werden. Der Betreiber des Materialanforderungssystems nutzt den Infrastruktur-Modus zum Betrieb des Systems. In diesem Modus kommunizieren die Endgeräte nicht direkt miteinander, sondern über einen Access Point. Das Netzwerk entspricht einer Sterntopologie.¹

Wie aus Tab. 1 ersichtlich, nutzt WLAN in Europa das Frequenzband zwischen 2,4 und 2,4835 GHz.

Lower Limit	Upper limit	Regulatory range	Geography
2.402 GHz	2.480 GHz	2.400–2.4835 GHz	China
2.402 GHz	2.480 GHz	2.400–2.4835 GHz	North America
2.402 GHz	2.480 GHz	2.400–2.4835 GHz	Europe ^a
2.473 GHz	2.495 GHz	2.471–2.497 GHz	Japan
2.447 GHz	2.473 GHz	2.445–2.475 GHz	Spain
2.448 GHz	2.482 GHz	2.4465–2.4835 GHz	France

NOTE—The frequency ranges in this table are subject to the geographic-specific regulatory authorities.

Tab. 1: Frequenzbereich, Quelle: IEEE Std 802.11 (2012), S. 1468.

¹ Vgl. Sauter (2015), S. 314 f.

1.4.2.1 Reichweite und Datenrate

Das Unternehmen, welches das Materialbestellsystem betreibt, nutzt WLAN mit dem IEEE 802.11g Standard. Hier ist eine maximale Datenübertragung von 54 Mbit/s möglich. Auf freiem Feld lässt sich eine Übertragungreichweite von 30 m bis 100 m erreichen. In geschlossenen Räumen reduziert sich die Reichweite stark durch Hindernisse und Gemäuer.

1.4.2.2 Sicherheit

Zum Schutz gegen unbefugtes Mitlauschen der Kommunikation wird bei WLAN der Wired Equivalent Privacy (WEP) Schlüssel verwendet. Des Weiteren können zur Authentifizierung Sitzungsschlüssel (Session Keys) erzeugt werden. WLAN unterstützt das symmetrische Verschlüsselungsverfahren Advanced Encryption Standard (AES).²

1.4.3 Energiebedarfsmessung WLAN

Um in weiterer Folge eine geeignete Energy Harvesting Methode und eine mögliche Speichertechnologie für das Materialanforderungssystem zu finden, ist es im Vorfeld nötig, den Energiebedarf zu ermitteln. Damit eine zuverlässige Aussage über den erwarteten Energiebedarf treffen zu können, erfolgt eine Bedarfsmessung während eines Datenübertragungsvorgangs und eine Bedarfsmessung im Standbybetrieb. Für die Messungen wird das WizFi210 WLAN-Modul der Firma WIZnet verwendet, welches den IEEE Standard 802.11 unterstützt. Laut dem Datenblatt hat das Modul im Wartezustand, in welchem die CPU aktiv ist, eine maximale Stromaufnahme von 10 mA. Im Standby-Modus, bei welchem nur die Echtzeituhr mit Spannung versorgt wird, weist das Modul einen Stromverbrauch von 50 μ A auf. Bei einer höchstmöglichen Empfindlichkeit von -94 dBm beim Empfang von Daten liegt der Stromverbrauch bei 130 mA. Die maximale Stromaufnahme beim Versenden von Daten liegt bei 140 mA bei einer höchstmöglichen Sendeleistung von +8 dBm. Das WLAN-Modul kann nach jedem erfolgten Datenübertragungsvorgang in einen Standby-Betrieb versetzt werden. Bei jedem neuerlichen Datenübertragungsvorgang wird das Modul aus dem Standby-Betrieb in den Wartezustand gebracht und es muss sich erneut am Router mit der Internet Protokoll-Adresse (IP) und der Media-Access-Control-Adresse (MAC) anmelden. Da bei allen folgenden Messungen in diesem Kapitel die tatsächlich benötigte elektrische Arbeit gemessen wird, werden die Wirkungsgrade nicht berücksichtigt.

² Vgl. IEEE Std 802.11 (2012), S. 1163 ff.

1.4.3.1 Energiebedarfsberechnung der Variante zwei über 24 Stunden

Die Messung des Energiebedarfs wurde mit dem digitalen Multimeter 34465A 6 $\frac{1}{2}$ Digit Multimeter der Firma KEYSIGHT durchgeführt. Das WLAN-Modul hat laut der durchgeführten Messung einen Strom von 14,7 mA im Wartezustand. Bei einer Spannung von 5 V ergibt sich eine Leistungsaufnahme von 73,5 mW. Beim Senden wurde eine Stromaufnahme von 112 mA gemessen. Folglich benötigt das Modul beim Sendevorgang 560 mW an Leistung. Die Dauer eines Sendevorgangs wurde mit dem Oszilloskop TDS 2024B der Firma Tektronix gemessen. Eine Datenübertragung besteht aus fünf Teilen und dauert jeweils 160 ms. Daraus ergibt sich eine Datenübertragungsdauer von 800 ms. Aus diesen Daten können die benötigte elektrische Arbeit eines Bestellvorgangs und die benötigte elektrische Arbeit über 24 Stunden berechnet werden.

Benötigte elektrische Arbeit für einen Anforderungsvorgang:

$$W = I * U * t \quad (1.1)$$

W / J Elektrische Arbeit

I / A Strom

U / V Spannung

t / s Zeit in Sekunden

$$W = 0,112 A * 5 V * 0,8 s = 0,448 J$$

Bei einem Materialanforderungsvorgang werden fünf Statusupdates erwartet. Für einen Bestellvorgang werden daher 2,688 J an elektrischer Arbeit benötigt. Bei zu erwartenden vier Materialanforderungsvorgängen pro Tag werden somit 10,75 J an elektrischer Arbeit verbraucht.

Während des Materialanforderungsprozesses, welcher pro Anforderung maximal 30 Minuten (1800 Sekunden) dauern soll, kann das Modul nicht im Standby-Modus betrieben werden. In dieser Zeit muss das Modul im Wartemodus betrieben werden, da es hier zu mehrfachen Statusupdates kommt.

$$W = 14,7 * 10^{-3} A * 5 V * 1800 s * 4 = 529,2 J$$

Den restlichen Zeitraum der 24 Stunden (86400 – 7200 Sekunden) befindet sich das Modul im Standby-Modus.

Benötigte elektrische Arbeit im Standby-Modus in 24 Stunden:

$$W = 50 * 10^{-6} A * 5 V * 79200 s = 19,8 J$$

Während des Materialanforderungsvorgangs, welcher bis zu 30 Minuten dauern kann, gibt eine Leuchtdiode (Light Emitting Diode, LED), Auskunft über den Status der Materialanforderung. Zur Berechnung wird angenommen, dass die LED während der vier Anforderungsvorgänge, welche in 24 Stunden zu erwarten sind, blinkend mit 10 mA bei 3,4 V betrieben wird. Im blinkenden Zustand ist die LED 125 ms eingeschaltet und 375 ms ausgeschaltet. Daraus ergibt sich, dass die LED nur in einem Viertel der Zeit während des Materialanforderungsvorgangs eingeschaltet ist.

$$W = 0,01 \text{ A} * 3,4 \text{ V} * \frac{7200}{4} \text{ s} = 61,2 \text{ J}$$

Die benötigte elektrische Arbeit von 620,95 J, welche der Materialanforderungssender in 24 Stunden in dieser Variante benötigt, ergibt sich aus den Sendevorgängen (10,75 J), dem Energiebedarf im Wartemodus (529,2 J), dem Energiebedarf im Standby-Modus (19,8 J) und der benötigten elektrischen Arbeit für die blinkenden LEDs (61,2 J).

1.4.3.2 Energiebedarfsberechnung der Variante eins über 24 Stunden

Diese Variante des Materialanforderungssenders verzichtet auf jegliche Rückmeldung über den Status der Anforderung. Der Energiebedarf berechnet sich aus vier Sendevorgängen pro Tag (1,79 J) und dem Standby-Betrieb (19,8 J). Es werden 21,59 J an elektrischer Arbeit benötigt.

1.4.3.3 Energiebedarfsberechnung der Variante drei über 24 Stunden

Hier kommt anstelle einer LED zur Statusanzeige ein E-Ink-Display zum Einsatz. Der restliche Materialanforderungsvorgang gleicht dem der Variante zwei.

Das verwendete E-Ink-Display GDE021A1 der Firma Dalian Good Display hat eine Breite von 59,2 mm und eine Höhe von 29,2 mm. Ein Update der Anzeige dauert im Schnitt eine Sekunde und verbraucht 0,657 mW an elektrischer Leistung. Im unbetätigten Zustand ist am Display die Beschreibung der Kleinteile abgebildet. Wird eine Materialanforderung getätigt, gibt das Display den Status der Anforderung wieder. Der Status kann sich bei jeder Statusanfrage des Materialanforderungssenders verändern. In 24 Stunden kann es so zu 24 Änderungen am Display kommen. Dies entspricht einer Update-Zeit von 24 Sekunden.

$$W = 0,657 * 10^{-3} \text{ W} * 24 \text{ s} = 15,769 * 10^{-3} \text{ J}$$

Laut dem Datenblatt benötigt das Display im Deep-Sleep-Modus 2 µA Strom.

$$W = 2 * 10^{-6} \text{ A} * 3 \text{ V} * 86400 \text{ s} = 0,52 \text{ J}$$

Diese Variante würde in 24 Stunden 560,28 J an elektrischer Arbeit benötigen. Der Energiebedarf dieser Variante setzt sich aus den Sendevorgängen (10,75 J), dem Wartemodus (529,2 J), dem Standby-Modus (19,8 J) und dem Energiebedarf für das Display (0,53 J) zusammen.

1.4.4 Berechnung der maximalen Nutzungsdauer mit der momentanen Konfiguration

Zurzeit wird das Materialanforderungssystem mit zwei Mignonzellen der Baugröße LR6, besser bekannt als AA-Batterien, betrieben. Diese nicht wieder aufladbaren Lithium-Batterien, welche im Materialanforderungssystem parallelgeschaltet sind, haben eine Nennspannung von 3,6 V und eine Kapazität von 2600 mAh je Batterie. Die Selbstentladung von Lithium-Batterien, die den Verlust von brauchbarer Kapazität aufgrund von inneren chemischen Reaktionen darstellt, liegt bei circa 0,5% im Monat.³

³ Vgl. (Umweltbundesamt, 2012) S. 20.

Da es sich hier um eine Berechnung mit einer festgelegten Ausgangs- und Restkapazität mit kontinuierlicher Selbstentladung pro Monat handelt, kann die Berechnung mit einer Zinseszinsformel erfolgen. Es handelt sich bei der Berechnung nur um eine Approximation, da sich bei sinkender Spannung der Innenwiderstand der Batterien verändert und die Entladekurve somit nicht linear ist. Daraus ergibt sich eine theoretische Lebensdauer ohne Belastung von 788 Monaten bei einer Restladung von 100 mAh.

$$C_n = C_0(1 - i)^n \quad (1.2)$$

n / Monate	Lebensdauer in Monaten
C_n / Ah	Restladung
C_0 / Ah	Ausgangsladung
i / 1	Selbstentladung pro Monat

Wandelt man diese Formel nach n um, lässt sich daraus die theoretische Lebensdauer der Batterie berechnen:

$$n = \frac{\ln \frac{0,1 \text{ Ah}}{5,2 \text{ Ah}}}{\ln(1 - 0,005)} = 788,27 \text{ Monate}$$

Wie aus dieser Berechnung hervorgeht, kann die Selbstentladung bei Lithium-Batterien vernachlässigt werden.

Die mögliche elektrische Arbeit der Lithium-Batterien lässt sich mit Hilfe der Formel 1.1 berechnen:

$$W = 5,2 \text{ A} * 3,6 \text{ V} * 3600 \text{ s} = 67392 \text{ J}$$

Aus dieser Berechnung kann die Dauer der Nutzung von einem Satz Lithium-Batterien mit der momentanen Konfiguration des Materialanforderungssenders berechnet werden:

$$t = \frac{W_{Ges}}{W_{Tag}} * 24 \text{ h} \quad (1.3)$$

t / h	Zeit in Stunden
W_{Ges} / J	Gespeicherte elektrische Arbeit der Batterie
W_{Tag} / J	Energieverbrauch pro Tag

$$t = \frac{67392 \text{ J}}{635,35 \text{ J}} * 24 \text{ h} = 2545,7 \text{ h}$$

Der Materialanforderungssender lässt sich mit der aktuellen Konfiguration 2245,7 Stunden, was ungefähr 106 Tagen entspricht, betreiben.

1.4.5 Eigenschaften von LoRaWAN

LoRaWAN stellt das Kommunikationsprotokoll und die Systemarchitektur eines drahtlosen Netzwerks dar. Diese Technologie ist im Gegensatz zu WLAN frei verfügbar und wird von einem gemeinnützigen Verein, der LoRa Alliance, betrieben. Alle Spezifikationen, die insbesondere für das Internet der Dinge entwickelt wurden, werden von der Allianz festgelegt. Das LoRa Modulationsverfahren, das für große Reichweiten bei

niedrigem Energieverbrauch und niedriger Datenrate konzipiert ist, wurde von der Firma Semtech entwickelt. In Europa kann das Frequenzband zwischen 867 MHz und 869 MHz genutzt werden.

1.4.5.1 Netzwerktopologie

LoRaWAN-Netzwerke haben üblicherweise eine Stern Topologie, bei der Gateways Nachrichten zwischen Endgeräten und einem zentralen Netzwerkserver weiterleiten. Die Gateways stehen mit einer standardisierten IP-Verbindung mit dem Netzwerkserver in Kontakt.

1.4.5.2 Reichweite und Datenrate

Die Datenraten bei LoRaWAN reichen von 0,3 kbps bis zu 50 kbps. Zur Minimierung des Energieverbrauchs und zur Erhöhung der Gesamtnetzwerkcapazität können die Datenrate und Ausgangsleistung für jedes Endgerät individuell mittels eines Adaptivem Datenratenschemas (ADR) eingestellt werden. Die Auswahl der geeigneten Datenrate ist ein Kompromiss zwischen Reichweite und Übertragungsdauer.⁴

Die Reichweite hängt von mehreren Faktoren, wie zum Beispiel Sendeleistung, Größe der Antenne und Umgebungseinflüssen ab. Die Sendeleistung ist in Europa auf +14 dBm beschränkt. Angaben zur Reichweite sind auf Dokumenten der LoRa Alliance nicht zu finden. Daher wird eine Reichweitenmessung durchgeführt, auf die im Kapitel 7.3 eingegangen wird.

1.4.5.3 LoRaWAN Klassen

Das LoRa-Netzwerk unterscheidet zwischen drei verschiedenen Klassen. Klasse A wird von allen Geräten im Netzwerk verwendet, und stellt die Basis des LoRaWAN dar. Die Klassen B und C können optional verwendet werden. Die Klasse C ist für batteriebetriebene Endgeräte nicht geeignet, da hier das Empfangsfenster permanent geöffnet ist und dies zu einem erhöhten Energiebedarf führt. Daher wird diese Klasse nicht näher betrachtet.

Klasse A:

Diese Klasse erlaubt eine bidirektionale Kommunikation zwischen den Endgeräten und dem Gateway. Jede Datenübertragung vom Endgerät zum Gateway ist von zwei kurzen Downlink-Empfangsfenstern begleitet (Abb. 3). Dies ist die energieeffizienteste Klasse im LoRaWAN-Netzwerk, hat aber den Nachteil, dass eine Downlink-Übertragung vom Gateway warten muss bis zur nächsten Uplink-Übertragung vom Endgerät. Da das Materialanforderungssystem auch Informationen bezüglich des Anforderungsstatus benötigt, wird auch die LoRaWAN Klasse B genauer betrachtet.⁵

⁴ Vgl. LoRa Alliance (Hrsg.) (2016), S. 7.

⁵ Vgl. LoRa Alliance (Hrsg.) (2016), S. 10-13.

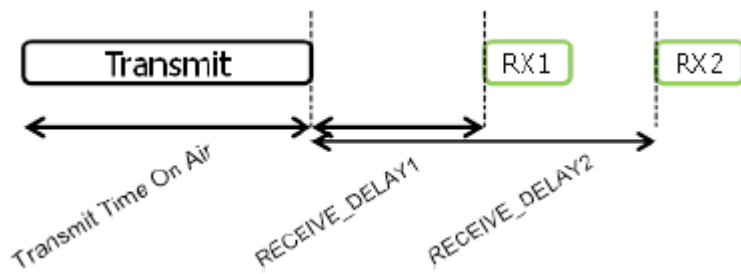


Abb. 3: Sende- und Empfangsvorgang der Klasse A; Quelle: LoRa Alliance (Hrsg.) (2016), S. 12.

Klasse B:

Mit der LoRaWAN Klasse B lassen sich Empfangsfenster mit fixen Zeitintervallen für Server initiierte Downloadnachrichten implementieren. Alle Endgeräte im Netzwerk werden mit Hilfe kleiner Datenpakete (Beacons) synchronisiert, um zu einem vorherbestimmten Zeitpunkt ein Empfangsfenster öffnen zu können.⁶

1.4.5.4 Sicherheit

Die Sicherheit wird im LoRaWAN Netzwerk mit einem symmetrischen Verschlüsselungsverfahren, dem AES, realisiert. Um die Datenintegrität sicherzustellen, können zusätzliche Sitzungsschlüssel (Session Keys) für das Netzwerk oder für Anwendungen generiert werden.⁷

1.4.6 Energiebedarfsmessung LoRaWAN

Wie im Abschnitt 1.4.3 erwähnt, erfolgt auch hier die Messung in zwei Abschnitten. Die Messungen erfolgen anhand des P-NUCLEO-SX1272 RF LoRaWAN Moduls der Firma ST. Das Modul hat laut Datenblatt eine maximale Sendeleistung von +20 dBm und eine Empfangsempfindlichkeit vom -137 dBm.

1.4.6.1 Energiebedarfsberechnung der Variante zwei über 24 Stunden

Der Energiebedarf während eines Datenübertragungsvorgangs wurde mit dem Oszilloskop TDS 2024B der Firma Tektronix gemessen. Wie aus Abb. 4 ersichtlich, wurde zur Ermittlung des Energiebedarfs der Spannungsabfall an einem 10 Ohm Shunt Widerstand gemessen.

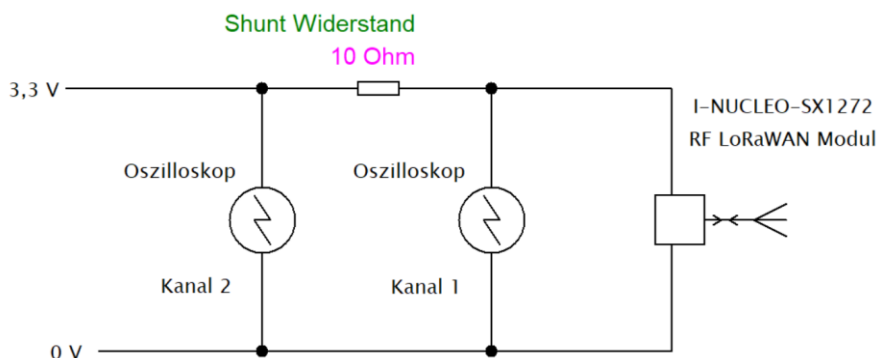


Abb. 4: Schema des Messaufbaues, Quelle: Eigene Darstellung.

⁶ Vgl. LoRa Alliance (Hrsg.) (2016), S. 55 ff.

⁷ Vgl. LoRa Alliance (Hrsg.) (2016), S. 30 f.

Die Berechnung des Energiebedarfs erfolgte mit Hilfe des Oszilloskops durch Subtraktion des Kanals eins vom Kanal zwei. Wie aus Abb. 5 ersichtlich, liegt der Spannungsabfall beim Senden bei 360 mV. Die Sendedauer eines Datenpaketes liegt bei 1700 ms. Beim Empfang von Daten wurde am Shunt-Widerstand 120 mV Spannungsabfall gemessen. Die Sendedauer der beiden Empfangsfenster beträgt zusammen 300 ms.

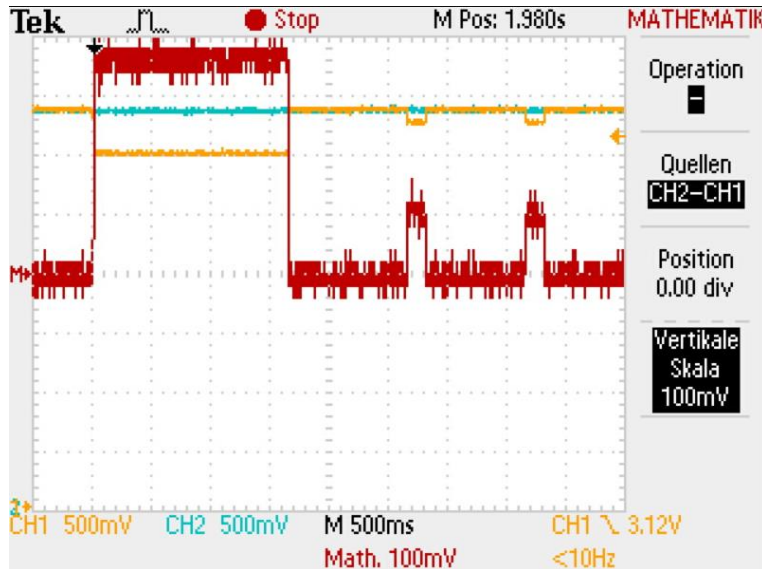


Abb. 5: Energiebedarfsmessung in der LoRa-Klasse A, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus den gemessenen Werten kann die elektrische Arbeit errechnet werden.

Elektrische Arbeit beim Senden:

$$W = \frac{U_s}{R} * U * t \quad (1.4)$$

W / J	Elektrische Arbeit
U_s / V	Spannungsabfall am Shunt Widerstand
R / Ω	Widerstand
U / V	Spannung
t / s	Zeit in Sekunden

$$W_{Senden} = \frac{0,36 V}{10 \Omega} * 3,3 V * 1,7 s = 0,2196 J$$

Elektrische Arbeit beim Empfangen:

$$W_{Empfangen} = \frac{0,12 V}{10 \Omega} * 3,3 V * 0,3 s = 0,01188 J$$

Summe der elektrischen Arbeit von Senden und Empfangen pro 24 Stunden:

$$(W_{Senden} + W_{Empfangen}) * 4 * 6 = 0,2196 J + 0,01188 J * 4 * 6 = 5,56 J$$

Das Materialbestellsystem wird für vier Bestellvorgänge, in welchen jeweils sechs Mal kommuniziert wird, pro Tag ausgelegt. Somit liegt der Energiebedarf für das Senden und das Empfangen bei 5,555 J pro Tag.

Die Messungen zur Ermittlung des Energiebedarfs im Sleep Modus und im Standby Modus erfolgten mit einem digitalen Multimeter 34465A $6\frac{1}{2}$ Digit Multimeter der Firma KEYSIGHT, welches in Serie zwischen Verbraucher und Spannungsquelle geschlossen wurde. Aus den so erhaltenen Strommesswerten und mit Hilfe der Formel 1.1 kann die benötigte elektrische Arbeit berechnet werden.

Benötigte elektrische Arbeit im Sleep Modus pro 24 Stunden:

$$W_{Sleep} = 9 * 10^{-6} A * 3,3 V * 86400s = 2,57 J$$

In diesem stromsparenden Bereitschaftszustand, bei dem der Mikroprozessor kein Programm ausführt, benötigt das Modul 2,57 J pro Tag.

Benötigte elektrische Arbeit im Standby Modus pro Sekunde:

$$W_{Senden} = 200 * 10^{-6} A * 3,3 V * 1 s = 66 * 10^{-6} J$$

In diesem Modus, der bei LoRaWAN als Klasse C bezeichnet wird, ist die benötigte elektrische Arbeit um ein Vielfaches höher als im Sleep Modus. Die Zeit, in der sich das Modul in diesem Zustand befindet, sollte so kurz wie möglich gehalten werden.

Der Gesamtenergiebedarf in 24 Stunden von 69,33 J setzt sich nun aus 5,56 J für die Datenübertragung, 2,57 J im Sleep-Modus und 61,2 J Energiebedarf für die blinkenden LED, welcher in Abschnitt 1.4.3.1 berechnet wurde, zusammen.

1.4.6.2 Energiebedarfsberechnung der Variante eins über 24 Stunden

Wie in Abschnitt 1.4.3.2 erwähnt, wird in dieser Variante des Anforderungssystems auf jegliche Rückmeldung über den Anforderungsstatus verzichtet. Der Energiebedarf über 24 Stunden von 3,5 J setzt sich aus vier Sendevorgängen, welche gesamt 0,93 J benötigen, und dem Energieverbrauch von 2,57 J im Sleep Modus, zusammen.

1.4.6.3 Energiebedarfsberechnung der Variante drei über 24 Stunden

In dieser Variante werden die LEDs zur Statusanzeige durch ein E-Ink-Display ersetzt. Die Berechnung des Energiebedarfs dieses Displays ist dem Abschnitt 1.4.3.3 zu entnehmen. In 24 Stunden werden in dieser Variante des Materialanforderungssystems 8,65 J benötigt. Der Energiebedarf setzt sich aus vier Datenübertragungsvorgängen mit jeweils fünf möglichen Statusupdates, welche insgesamt 5,56 J an Energie benötigen, 2,57 J für den Sleep Modus und 0,52 J für das Display, zusammen.

1.4.7 Vergleich des Energiebedarfs zwischen WLAN und LoRaWAN

Um die beiden Datenübertragungssysteme besser miteinander vergleichen zu können, wurden die Energiebedarfsrechnungen aus den vorangegangenen Abschnitten in Tab. 2 zusammengefasst.

	WLAN	LoRaWAN
	in Joule	in Joule
Energiebedarf in 24 Stunden bei Variante eins	21,59	3,5
Energiebedarf in 24 Stunden bei Variante zwei	620,95	69,33
Energiebedarf in 24 Stunden bei Variante drei	560,28	8,65

Tab. 2: Energiebedarfsvergleich zwischen WLAN und LoRaWAN, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie sich daraus erkennen lässt, ist der Energiebedarf des Anforderungssystems mit WLAN um ein Vielfaches höher als mit LoRaWAN. Auf Grund dessen kann eine Vorauswahl für das geeignete Datenübertragungssystem zu Gunsten von LoRaWAN getroffen werden. Für die weiteren Messungen wird WLAN dennoch miteinbezogen, um weitere Vorteile beziehungsweise Nachteile des Datenübertragungssystems zu identifizieren.

2 ENERGY HARVESTING

In diesem Kapitel werden der Begriff „Energy Harvesting“ und die Möglichkeiten des Energy Harvesting beschrieben. Unter dem Begriff Energy Harvesting versteht man die Ernte von Energie, die in verschiedenen Formen in unserer Umgebung existiert und sich umformen lässt. Das ist vor allem für kleine Geräte mit Drahtlostechnologie von Bedeutung, die durch die Absorption von Energie aus der Umgebung energieautark funktionieren können.⁸

Für das Materialanforderungssystem würde dies bedeuten, dass es ohne Zuleitung mit Energie versorgt werden kann. Die Energieversorgung ohne Zuleitung kann auch von einer Batterie übernommen werden. Batterien haben den Nachteil, dass sie regelmäßig überprüft und getauscht werden müssen. Das führt zu einem erhöhten Aufwand für die Instandhaltung und gebrauchte Batterien belasten die Umwelt. Energy Harvesting kann hier als echte Alternative dienen. Die folgende Abb. 6 zeigt die Leistungsdichte von verschiedenen Energiequellen vor der Umwandlung in elektrische Energie.

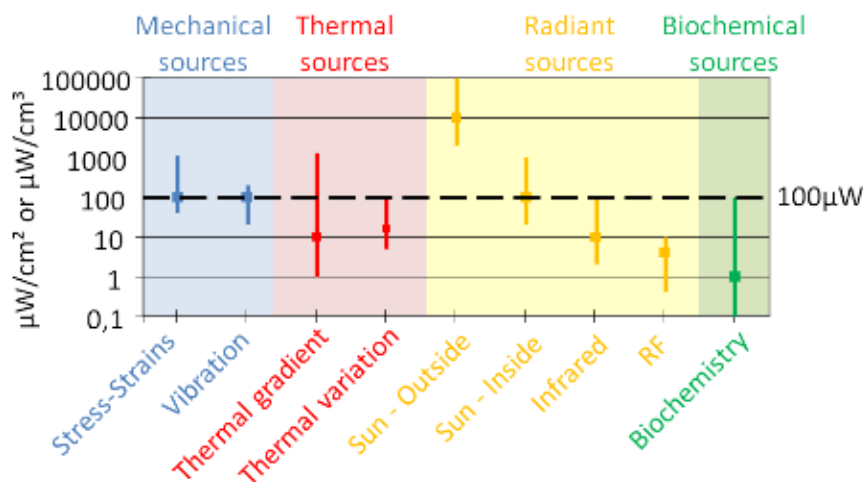


Abb. 6: Leistungsdichte von Energiequellen vor der Umwandlung, Quelle: Boisseau/Despesse/Seddik, Online-Quelle [19.04.2017].

Aus Abb. 6 lässt sich erkennen, dass sich vor allem mechanische Schwingungen, Temperaturunterschiede und Strahlungsquellen als Energiequelle zum Energy Harvesting für das Materialbestellsystem eignen. Diese drei Methoden der Energieumwandlung beruhen auf vier unterschiedlichen Effekten:

⁸ Vgl. Zeilhofer-Ficker (2008), S. 1 f.

- thermoelektrischer Effekt.
Aufgrund von einem Temperaturunterschied wird Energie gewonnen.
- piezoelektrischer Effekt.
Durch Druck oder Vibration wird auf Kristalle eine Kraft ausgeübt und in Spannung umgewandelt.
- Elektromagnetische Strahlung
Elektromagnetische Strahlung wird in nutzbare Energie umgewandelt.
- photoelektrischer Effekt.
Photonen aus der Umgebungsbeleuchtung werden in elektrische Energie umgewandelt.

Chemische Quellen, wie zum Beispiel die Osmose, scheiden als Energiequelle für diese Anwendung aus, weil ihre Leistungsdichte zu gering ist.

2.1 Der thermoelektrische Effekt

Temperaturunterschiede findet man in unserer Umgebung sehr häufig, daher ist die Gewinnung von Energie aus unterschiedlichen Wärmequellen eine interessante Möglichkeit des Energy Harvesting. Unter dem Begriff thermoelektrischer Effekt versteht man die Wechselwirkung von Wärmefluss und Elektrizität in einem Stromkreis. Die Umwandlung der Energie aufgrund von Temperaturunterschieden in zwei verschiedenen elektrischen Leitern wird als Seebeck-Effekt bezeichnet.

2.1.1 Der Seebeck-Effekt

Der Seebeck-Effekt bezeichnet die Entstehung einer elektromotorischen Kraft (EMK) in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen elektrischen Leitern, bei denen die Kontaktstellen bei verschiedenen Temperaturen gehalten werden. Dieser Effekt kann zur Temperaturmessung und zur Energiegewinnung genutzt werden. Wird der Effekt für Letzteres genutzt, so wird anstelle von Metallen ein Halbleitermaterial verwendet. Verglichen mit Metallen haben diese Materialien einen deutlich höheren Seebeck-Koeffizienten und sind daher laut der folgenden Formel besser als thermoelektrischer Generator geeignet.

$$V_T = S * \Delta T \tag{2.1}$$

V_T / V	Thermoelektrisch generierte Spannung
$S / \mu V * K^{-1}$	Seebeck Koeffizient
$\Delta T / K$	Temperaturunterschied

In n-dotierten Halbleitern erzeugt der Seebeck-Effekt einen Strom von überschüssigen Elektronen von der heißen Kontaktstelle zur kalten. Die Halbleiter sind elektrisch in Serie, thermisch parallelgeschaltet. Aus Abb. 7 ist ersichtlich, dass sich daraus ein Elektronenfluss entwickelt, der eine Spannung zur Folge hat.

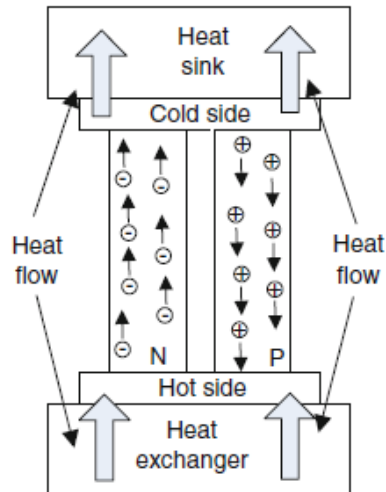


Abb. 7: Struktur eines thermoelektrischen Generators auf Halbleiterbasis, Quelle: Carvalho/Paulino (2016), S. 13.

Thermoelektrische Generatoren haben auch bei einem hohen Temperaturunterschied an den Kontaktstellen einen sehr niedrigen Wirkungsgrad. Die zu erwartende Energieausbeute wird daher nicht ausreichen, um das Materialanforderungssystem zuverlässig mit Energie zu versorgen, daher scheidet diese Möglichkeit des Energy Harvesting aus.⁹

2.2 Der piezoelektrische Effekt

Durch die Verformung von piezoelektrischen Materialien, wie zum Beispiel den piezoelektrischen Kristallen oder piezoelektrischen Keramiken, wird eine Spannung erzeugt, welche dem piezoelektrischen Effekt zugrunde liegt. Die Verformung der Materialien kann durch Vibrationen, ausgelöst durch Unwuchten, erzeugt werden.

2.2.1 Grundsatz des piezoelektrischen Effekts

Piezoelektrische Materialien haben gemeinsam, dass ihre Kristallstruktur kein Zentrum der Symmetrie besitzt. Die Materialien haben keine spezifische Polarität, weil sie aus orientierten Dipolen bestehen. Wird ein piezoelektrisches Material mit einer Kraft oder einem elektrischen Feld beaufschlagt, ändert sich der Abstand zwischen positiven und negativen Dipolen. Dies führt zu einer Polarisierung und damit zu einer elektrischen Ladung oder zu einer makroskopischen Veränderung der Abmessung des Materials (Abb. 8).¹⁰

⁹ Vgl. Carvalho/Paulino (2016), S. 11 ff.

¹⁰ Vgl. Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 84 f.

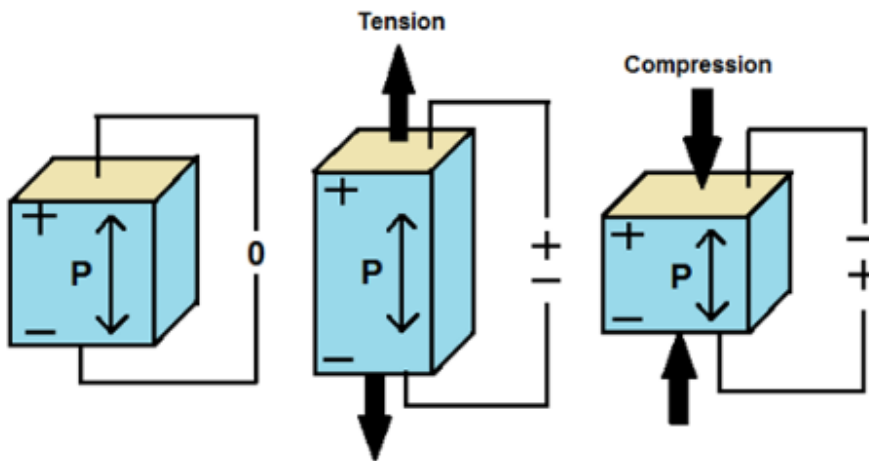


Abb. 8: Piezoelektrisches Material unterschiedlich belastet, Quelle: Boisseau/Despesse/Seddik, Online-Quelle [19.04.2017].

Mit folgender Formel lässt sich die Ladung berechnen, falls ein piezoelektrisches Material belastet oder verformt wird:

$$Q = d * F \quad (2.2)$$

Q / C	Ladung
$d / pC * N^{-1}$	Piezoelektrischer Koeffizient (z.B.: Quarz $24 * 10^{-12} C$)
F / N	Kraft

Die meisten piezoelektrischen Materialien sind natürliche oder synthetisch hergestellte Monokristalle oder polykristalline Materialien, wie die weit verbreitete piezoelektrische Keramik Blei-Zirkonat-Titanat (PZT).

2.2.2 Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Harvesters

Ein piezoelektrischer Energieerzeuger besteht typischerweise aus einem oder zwei piezokeramischen Schichten. Schwingungen werden in elektrische Ladungen umgewandelt, welche eine Spannung hervorrufen, die proportional zur Kraft der Schwingung ist. Piezoelektrische Generatoren besitzen, im Gegensatz zu herkömmlichen Spannungsquellen, eine sehr hohe Ausgangsimpedanz und benötigen daher eine geeignete elektrische Verschaltung mit dem Harvester. Auf der linken Seite in Abb. 9 sind die mechanischen Verluste: Dämpfung (R), Masse (L) und Steifigkeit (C). Die Transformation der mechanischen zur elektrischen Energie erfolgt mittels eines Transformators mit der Übersetzung n . Die rechte Seite der Abbildung stellt den elektrischen Teil der Schaltung dar. Hier ist die Kapazität des piezoelektrischen Materials (C_p) ersichtlich. Die elektrische Schaltung kann vereinfacht als Stromquelle mit einem parallel geschalteten Kondensator dargestellt werden.¹¹

¹¹ Vgl. Carvalho/Paulino (2016), S. 9 f.

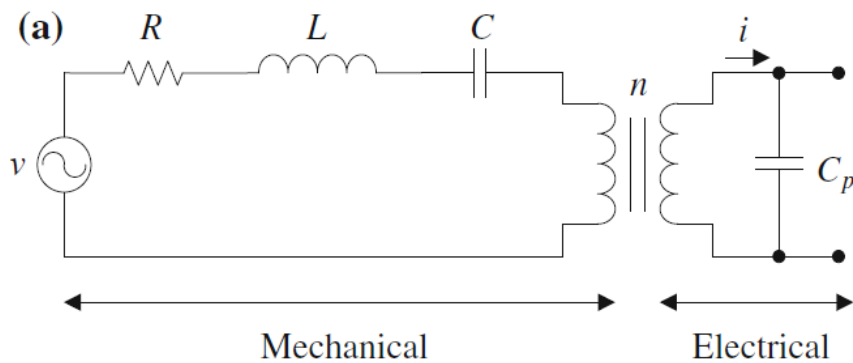


Abb. 9: Model eines piezoelektrischen Harvesters, Quelle: Carvalho/Paulino (2016), S. 10.

Zur Bereitstellung der benötigten Energie für das Materialbestellsystem ist ein piezoelektrischer Harvester nicht geeignet, weil nicht sichergestellt werden kann, dass ausreichend Vibrationsenergie vorhanden ist.

2.3 Energieübertragung mittels Funkwellen

Dieses Kapitel behandelt Energy Harvesting aus elektromagnetischen Feldern. Die Energieübertragung mit Funkfrequenzen ist heutzutage eine der wichtigsten Forschungszweige der Hersteller von mobilen Geräten. Mit Hilfe dieser Technologie kann auf Steckverbindungen zum Laden oder Anschließen von Handys oder Laptops verzichtet werden. Durch den vermehrten Einsatz von Datenfunkübertragungssystemen, welche genügend Energie zu Verfügung stellen, ist die Energieübertragung über kleine Distanzen möglich. Die Übertragungsenergie ist stark abhängig vom verwendeten Frequenzband und der maximal zulässigen Funkleistung.¹²

2.3.1 Basiskonzept der drahtlosen Energieübertragung

Wie aus Abb. 10 ersichtlich, sind die grundlegenden Elemente einer drahtlosen Energieübertragung eine Quelle, welche ein elektromagnetisches Feld erzeugt und ein Empfänger, welcher die elektromagnetische Energie empfängt und in eine Gleichspannung umwandelt. Zwischen dem Sender und dem Empfänger befindet sich der Übertragungskanal. Dieser ist idealerweise aus Luft, kann aber auch aus einem festen Medium, wie zum Beispiel Beton bestehen. Entscheidend für die Energieübertragung sind nicht nur die Distanz, sondern auch die Übertragungsfrequenz, die Beschaffenheit des Übertragungsmediums und Störfelder in der Umgebung.¹³

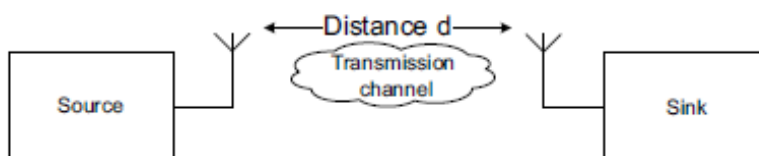


Abb. 10: Grundlegende Elemente einer drahtlosen Energieübertragung, Quelle: Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 443.

¹² Vgl. Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 435 f.

Die Quelle besteht aus einem Generator für die Übertragungsfrequenz und einem Verstärker mit passendem Netzwerk für die Antenne (Abb. 11). Der Controller kümmert sich um das Übertragungssystem bei verschiedenen Arbeitsbedingungen. Werden mit der Energie zusätzlich auch Daten übertragen, sind darüber hinaus ein Modulator und ein Demodulator notwendig.¹³

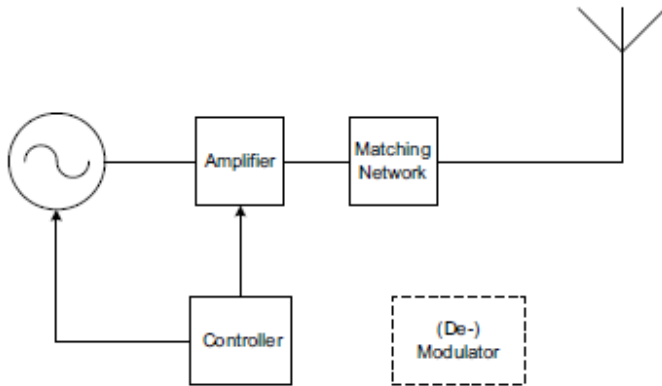


Abb. 11: Bausteine der Energiequelle, Quelle: Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 444.

Wie aus Abb. 12 ersichtlich, besteht der Empfänger aus einer Antenne mit passender Schaltung, einem Gleichrichter und einem Spannungswandler. Auch hier ist bei zusätzlicher Datenübertragung ein Modulator bzw. Demodulator nötig. Das Design der Antenne und die passende Schaltung haben einen großen Einfluss auf die Effizienz der Übertragung. Die Amplituden der Übertragungsfrequenz sind sehr klein, daher besteht die größte Herausforderung darin, die erhaltenen HF-Signale möglichst mit hoher Effizienz in eine größere Gleichspannung umzuwandeln.¹³

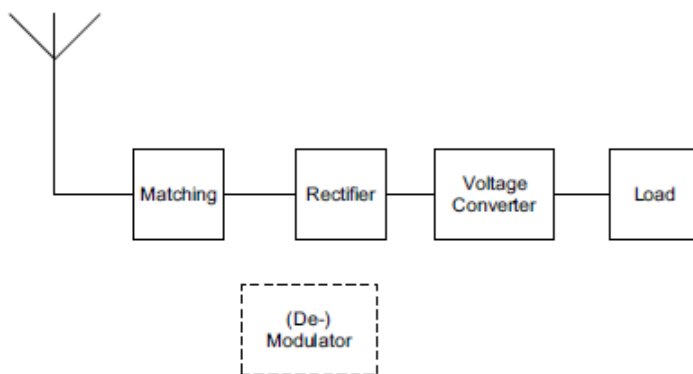


Abb. 12: Bausteine des Empfängers, Quelle: Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 445.

¹³ Vgl. Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 443 ff.

2.3.2 Effizienz von kabelloser Energieübertragung

Die Effizienz der niederfrequenten, kabellosen Energieübertragung, welche auch als induktive Nahfeldkopplung bezeichnet wird, ist aus der Abb. 13 ersichtlich. Bereits bei einem Antennenabstand von 10 cm ist die Effizienz dermaßen gering, dass diese Möglichkeit des Energy Harvesting ausscheidet. Dies lässt sich aus dem Zusammenhang zwischen Magnetfeld und Distanz mit folgender Formel berechnen:

$$H(x) = \frac{I \cdot N \cdot r^2}{2\sqrt{(r^2 + x^2)^3}} \quad (2.3)$$

$H / A \cdot m^{-1}$	Magnetische Feldstärke
r / m	Radius der Windungen
I / A	Wicklungsstrom
x / m	Abstand von der Wicklung
$N / 1$	Anzahl der Windungen

Ist der Abstand von der Wicklung größer oder gleich dem Radius der Wicklung, sinkt die magnetische Feldstärke extrem.¹⁴

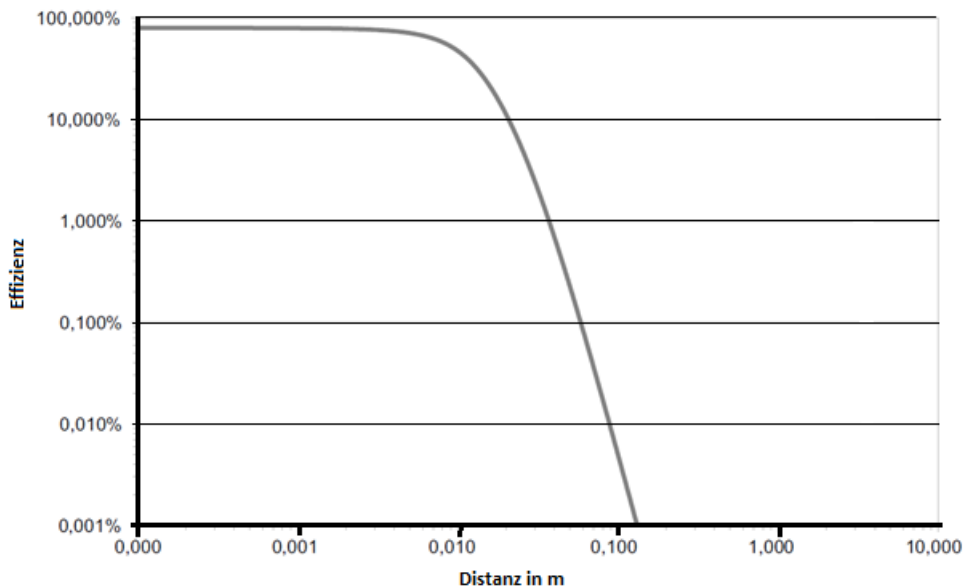


Abb. 13: Effizienz einer niederfrequenten, kabellosen Energieübertragung bei 13,56 MHz, Quelle: Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 457 (geringfügig modifiziert).

Auf Grund der schlechten Effizienz ist diese Art des Energy Harvesting nicht zur Anwendung als Energieversorgung des Anforderungssenders geeignet.¹⁵

¹⁴ Vgl. Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 456.

¹⁵ Vgl. Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 457 f.

2.4 Der photoelektrische Effekt

Der photoelektrische Effekt beschreibt unterschiedliche Prozesse der Wechselwirkung von Photonen, welche Teilchen der elektromagnetischen Strahlung sind, mit Materie. Es kann zwischen drei Arten des photoelektrischen Effekts unterschieden werden:

- äußerer photoelektrischer Effekt.
- innerer photoelektrischer Effekt.
- Photoionisation.

Für die Anwendung als Energy Harvester ist der innere photoelektrische Effekt, welcher aus der Photoleitung und dem photovoltaischen Effekt besteht, entscheidend. Daher wird in im folgenden Abschnitt ausschließlich dieser Effekt behandelt.

2.4.1 Physikalische Grundlagen

Um das Licht in elektrische Energie umwandeln zu können, müssen drei grundlegende Prozesse erfüllt werden. Als Erstes müssen die Photonen des Lichts absorbiert werden. Dadurch werden im nächsten Schritt die Ladungsträger von einem niedrigen zu einem höheren Energiezustand angeregt. Der zurückbleibende niedrigere Zustand, wovon das Elektron angeregt wurde, wird als Loch bezeichnet. Die dritte grundlegende Voraussetzung für das Auftreten des photovoltaischen Effekts, ist die Existenz eines inneren elektrischen Feldes, das die Ladungsträger trennt. Mit Halbleiterwerkstoffen lassen sich diese erforderlichen Voraussetzungen erfüllen.¹⁶

2.4.2 Eigenschaften von Halbleiterwerkstoffen

Halbleiter unterscheiden sich von leitenden Materialien vor allem durch geringe Anzahl von freien Ladungsträgern. Die Elektronen sind an die Atome gebunden, können jedoch zeitweise, im Gegensatz zu Isolatoren, mittels der elektrischer Spannung, mittels des Lichtes oder mittels der Wärme herausgelöst werden. Diese Elektronen werden als Valenzelektronen bezeichnet und ermöglichen einen Ladungstransport. Der bei Raumtemperatur fast vollständig besetzte Energiebereich stellt das Valenzband dar. Wird hier ein Elektron angeregt, springt es auf die nächste höhere Ebene. Diese ist ein weitgehend unbesetzter Energiebereich und wird als Leitungsband titulierte. Die beiden Energiebereiche sind durch die Energielücke (E_G) voneinander getrennt.

Die minimale Energie, in Elektronenvolt (eV), welche benötigt wird, um ein Elektron vom Valenzband (E_V) in das Leitungsband (E_L) zu heben, errechnet sich somit aus der Formel:

$$E_G = E_L - E_V \quad (2.4)$$

E_G / eV	Energielücke
E_L / eV	Unterkante des Leitungsbandes
E_V / eV	Oberkante des Valenzbandes

¹⁶ Vgl. Meissner (1993), S. 14.

Halbleitermaterialien unterscheiden sich durch unterschiedlich ausgeprägte Energielücken. In der folgenden Tab. 3 ist der Energieaufwand zur Überbrückung der Energielücke bei 300 K von verschiedenen Halbleitermaterialien angeführt.¹⁷

Material	E_G / eV
Ge	0.66
Si	1.12
GaAs	1.42
CdS	2.42
CdTe	1.56
ZnS	3.68
CuInSe ₂	1

Tab. 3: Minimale Energie, um ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband zu heben ausgehend von verschiedenen Halbleiterwerkstoffen, Quelle: Meissner (1993), S. 16.

2.4.3 Der photovoltaische Effekt

In diesem Abschnitt wird die Energieumwandlung durch die Wechselwirkung von Photonen mit Halbleitern näher beschrieben.

Zur positiven Beeinflussung der Eigenschaften von Halbleitern werden diese dotiert, also technisch verunreinigt. Wird Silizium mit Phosphor oder Arsen dotiert, wird die Elektronenbindung geschwächt und es kommt zu einem leichten Elektronenüberschuss. Majoritätsladungsträger sind bei dieser n-Dotierung die Elektronen, weil diese häufiger vorkommen. Bei einem p-dotierten Halbleiter, der zum Beispiel mit Bor oder Aluminium verunreinigt wurde, liegt ein Elektronenmangel vor, die Majoritätsladungsträger werden hier als Defektelektronen oder Löcher bezeichnet.

Bei Photovoltaik-Zellen (PV-Zellen) wird der photovoltaische Effekt genutzt, indem dünne Schichten mit definierter Dotierung übereinander aufgebaut werden. Dadurch entsteht ein p-n Übergang. Dabei entsteht in der Diffusionszone durch Diffusionsbewegung der Moleküle eine Verarmung von Löchern und Elektronen. In dieser Zone diffundieren Löcher, vom p- in das n-Gebiet und Elektronen vom n- in das p-Gebiet. Dieser Konzentrationsausgleich der frei beweglichen Ladungsträger hat ein elektrisches Feld an der Grenzzone zufolge. Es entsteht ein Gleichgewichtszustand, bei welchem sich Feldstrom und Diffusionsstrom gegenseitig kompensieren. Mit dem Auftreffen eines Photons auf die PV-Zelle, nehmen freie Elektronen einen spezifischen Teil der Energie auf, um in eine höhere Ebene gehoben zu werden. Wie aus Tab. 3 ersichtlich benötigt ein Elektron eines Silizium Atoms 1,12 eV um vom Valenz- in das Leitungsband gehoben zu werden. Damit der Effekt genutzt werden kann, ist es entscheidend, dass die Energie des Photons in die Grenzschicht dringt und dort freie Elektronen erzeugt. Diese freien Elektronen werden zur n-Schicht gezogen, die dabei entstandenen Löcher werden in Richtung p-Zone angezogen. Es kommt zu einem

¹⁷ Vgl. Meissner (1993), S. 15 f.

Elektronenüberschuss in der n-Schicht und zu einem Elektronenmangel in der p-Schicht. Wie aus Abb. 14 ersichtlich, lässt sich diese Ausgleichsenergie nutzen.¹⁸

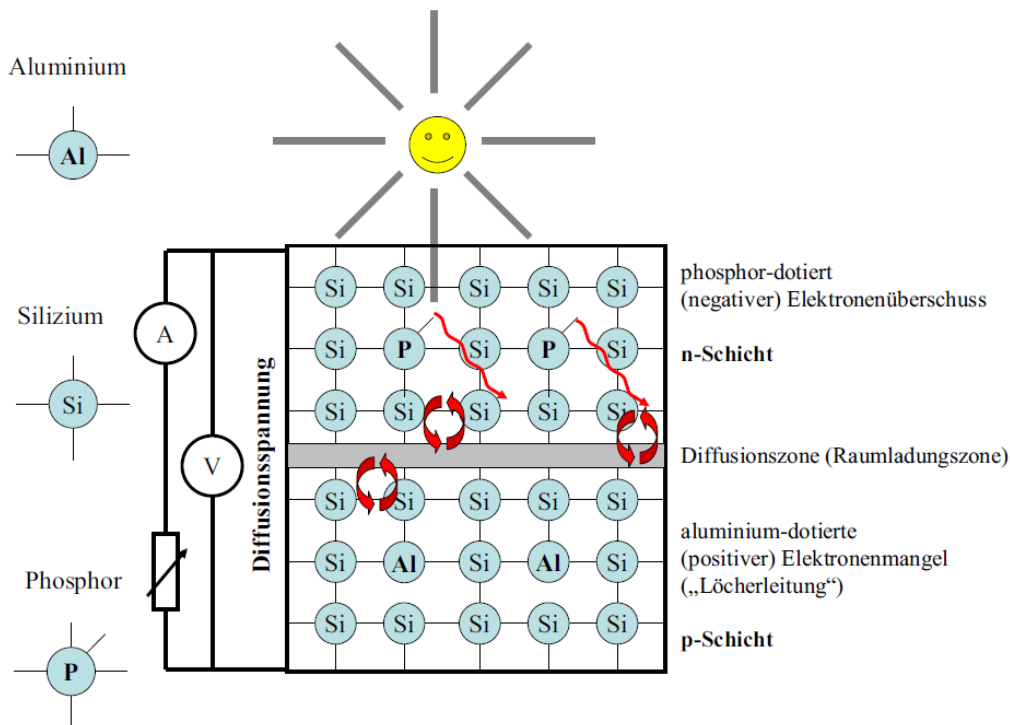


Abb. 14: Photovoltaischer Effekt, Quelle: Watter (2015), S. 18.

Die Anzahl der Elektronen, welche zum Fließen kommt, steigt genau gleich mit den eindringenden Photonen in die Zelle.¹⁸

2.5 Verwendete Energy Harvesting Methode

Da der Materialanforderungssender einen hohen Energiebedarf besitzt und sichergestellt werden kann, dass Beleuchtung an den Einsatzorten der Materialanforderungssender vorhanden ist, wird für diese Masterarbeit die Energy Harvesting Methode mit PV-Zellen verwendet. Wollte man den piezoelektrischen Effekt für diese Anwendung ausnützen, so müsste man gewährleisten, dass der Anforderungssender an einer Stelle angebracht wird, bei welcher ausreichend Vibrationsenergie vorhanden ist. Da dies nicht sichergestellt werden kann, scheidet diese Methode für diese spezielle Anwendung aus. Ein Energy Harvester, welcher den thermoelektrischen Effekt ausnutzt, scheidet ebenfalls aus, da sich der Montageort des Anforderungssenders zumeist an Regalen befindet. Hier ist die Temperaturdifferenz an den Kontaktstellen zu gering, um die benötigte Leistungsmenge für den Anforderungssender zu generieren. Die Ausnützung der vorhandenen elektromagnetischen Funkwellen zur Generierung von Energie aus der Umgebung scheidet aus, weil die Leistung nicht ausreicht um den Materialanforderungssender mit Leistung zu versorgen. Der Montageort der Anforderungssender ist an Arbeitstagen 24 Stunden beleuchtet. Dieser Umstand lässt sich für einen Energy Harvester, welcher den photovoltaische Effekt ausnutzt, verwenden. Daher werden für diese Anwendung PV-Zellen eingesetzt, um aus der Umgebung Energie zu generieren.

¹⁸ Vgl. Watter (2015), S. 15-18.

3 PHOTOVOLTAIK-ZELLEN-TECHNOLOGIEN

Polykristalline- und monokristalline- Photovoltaik-Zellen (Crystalline Si Cells) sind die am weitest verbreiteten PV-Zellen. Wie aus Abb. 15 ersichtlich, ist die Effizienz von monokristallinen- und polykristallinen-PV-Zellen seit circa 20 Jahren beinahe gleichbleibend und hat sich kaum weiterentwickelt. Gallium-Arsenid (GaAs) PV-Zellen (Single-Junction GaAs) bestehen aus Galliumarsenid-Einkristallen, welches aus Gallium und Arsen hergestellt werden und haben zurzeit die größte Effizienz. Auf Grund des hohen Preisniveaus sind diese PV-Zellen noch nicht weit verbreitet. Dünnschicht- PV-Zellen (Thin-Film Technologies) haben einen ähnlichen Wirkungsgrad wie polykristalline- oder monokristalline-PV-Zellen, sind jedoch wesentlich dünner und verbrauchen daher weniger Rohstoffe. Das Preisniveau von Dünnschicht- PV-Zellen liegt deutlich höher als das von polykristalline- und monokristalline- PV-Zellen. Andere PV-Zellen-Technologien (Emerging PV), wie zum Beispiel organische PV-Zellen stehen noch am Beginn ihrer Entwicklung und haben bis heute einen niedrigen Wirkungsgrad.

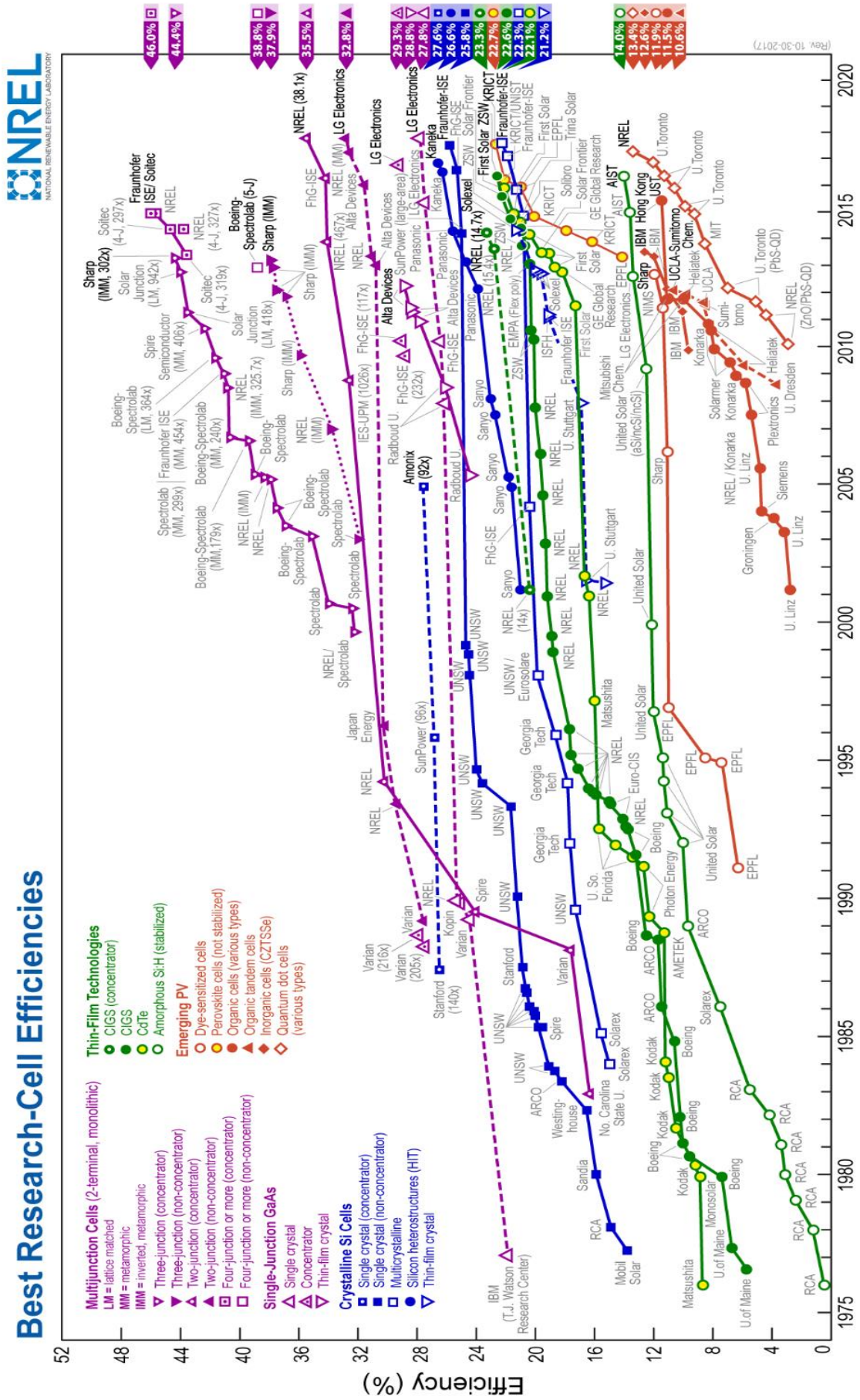


Abb. 15: Wirkungsgrade von PV-Zellen unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs, Quelle: NREL (2017), Online-Quelle [06.07.2017].

3.1 Die Silizium Zelle

Nahezu 95% aller weltweit eingesetzten PV-Zellen bestehen aus Silizium. Da etwa ein Viertel unserer Erdkruste aus Silizium besteht, ist dieser Rohstoff ausreichend vorhanden und in den Kosten günstig. Die Herstellung der PV-Zellen erfolgt aus großen tiegelgegossenen Siliziumblöcken. Diese werden in große Scheiben geschnitten und gereinigt. Mit diesem Herstellungsverfahren lassen sich PV-Zellen mit akzeptablem Wirkungsgrad sehr kostengünstig fertigen.¹⁹

3.1.1 Die monokristalline Zelle

Rund 30% aller hergestellten PV-Zellen sind monokristalline-PV-Zellen. Wie aus Abb. 15 ersichtlich, hat diese Zellenart eine maximale Effizienz von 27,6%. Da diese Zellen einen schlechten Absorptionskoeffizienten haben, weisen diese eine Dicke zwischen 100-200 μm auf, um das auftreffende Licht bestmöglich zu absorbieren (Abb. 16).²⁰

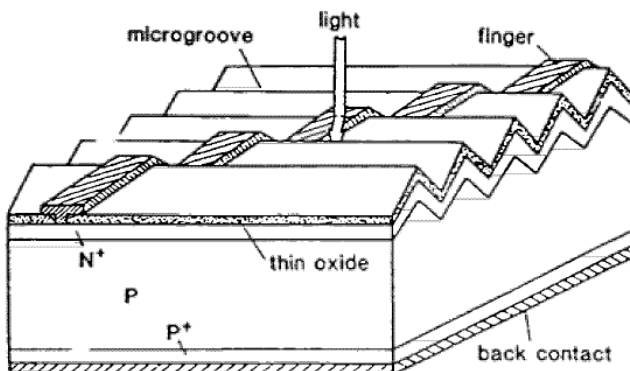


Abb. 16: Darstellung einer Hochleistungs-PV-Zelle, μg -PESC-Solarzelle /Gre85/, $\eta_{\text{AM1,5}} = 21,5\%$, Quelle: Wagemann/Eschrich (2010), S. 84.

Auf Grund der guten Effizienz und des moderaten Preises könnte die monokristalline-PV-Zelle für die Anwendung als Energy-Harvester geeignet sein. Das wird im Kapitel 6 mit Messungen näher erläutert.

3.1.2 Die polykristalline Zelle

Ungefähr 60% aller weltweit hergestellten PV-Zellen sind polykristalline-Zellen. Diese Zellen sind einfacher herzustellen als monokristalline-Zellen und daher auch günstiger. Die Zellen weisen einen höheren Fremdstoffgehalt als monokristalline-Zellen auf. Die maximale Effizienz der polykristallinen Zelle liegt bei 21,9 % (siehe Abb. 15).²¹

Polykristalline-PV-Zellen sind die günstigsten PV-Zellen auf dem Markt. Die Eignung als Energielieferant für das Materialanforderungssystem wird im Kapitel 6 experimentell untersucht.

¹⁹ Vgl. Wagemann/Eschrich (2010), S. 5.

²⁰ Vgl. Wagemann/Eschrich (2010), S. 63 f.

²¹ Vgl. Wagemann/Eschrich (2010), S. 90 f.

3.2 Die Gallium-Arsenid-Zelle

Im Vergleich zu Siliziumzellen, die aus indirektem Halbleitermaterial bestehen (Elementarhalbleiter), sind die GaAs-PV-Zellen ein direktes Halbleitermaterial (Verbindungshalbleiter). Die Materialdicke kann um einiges geringer ausfallen als bei der Silizium-Zelle. Auf Grund der geringen Materialstärke werden diese Zellen häufig als Tandem-PV-Zellen ausgeführt (Abb. 17). Dies hat den Vorteil, dass unterschiedliche Halbleitermaterialien verschiedene Teile des Lichtspektrums besser nutzen können und somit die Effizienz gesteigert wird. Wie aus Abb. 15 ersichtlich, liegt der maximal erreichte Wirkungsgrad dieser PV-Zellen bei 46%. Das Herstellungsverfahren ist sehr aufwändig und der Preis dementsprechend hoch. GaAs-Zellen wurden einst nur bei extraterrestrischen Anwendungen eingesetzt. Aufgrund neuer Anwendungsgebiete ist die Nachfrage gestiegen und die Produktion wurde gesteigert, was eine Preisminderung zur Folge hatte. Die Preise sind momentan um den Faktor zwölf höher als die bei Siliziumzellen.²²

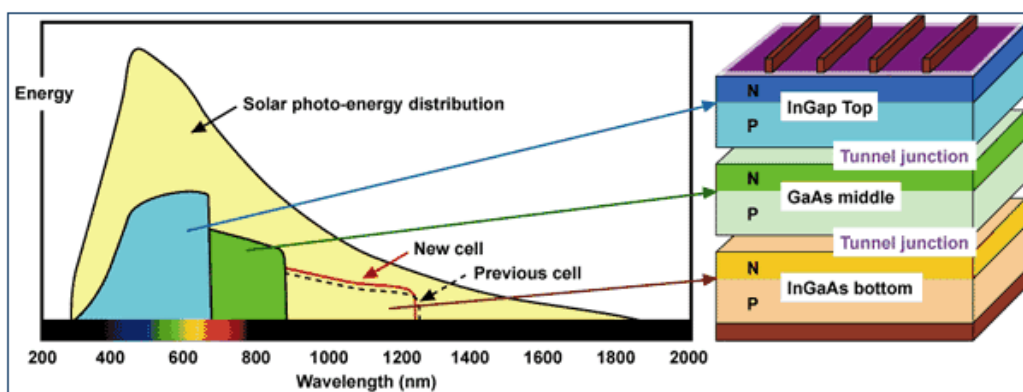


Abb. 17: Für GaAs-PV-Zellen nutzbare spektrale Einstrahlung des Sonnenlichtes, Quelle: Solarify (2013), Online-Quelle [06.07.2017].

Für die Anwendung als Energielieferant für das Materialanforderungssystem ist der Preis der Zellen noch zu hoch. Das könnte sich in absehbarer Zeit ändern, weshalb die Energieausbeute dieser Zellen im Kapitel 6 näher untersucht wird.

3.3 Eigenschaften von organischen PV-Zellen

Die organischen-PV-Zellen lassen sich in zwei unterschiedliche Kategorien einteilen. Sie können sich entweder aus Halbleitern, bestehend aus organischen Molekülen oder aus anorganischen Elektrolyt-Farbstoffen beziehungsweise aus organischen Elektrolyt-Farbstoffen zusammensetzen. PV-Zellen aus dem mineralischen Werkstoff Perowskit konnten unter optimalen Bedingungen im Labor eine Effizienz von 22,1% erreichen. Diese Zellen sind momentan im experimentellen Stadium und nicht erhältlich.²³

²² Vgl. Wagemann/Eschrich (2010), S. 119 ff.

²³ Vgl. Wagemann/Eschrich (2010), S. 173.

3.3.1 Die Grätzel-Zelle

Die Grätzel-Zelle besteht unter anderem aus einem Elektrolyt und zwei Elektroden. Der Elektrolyt besteht aus einem organischen Farbstoff, dessen Moleküle das Sonnenlicht einfangen und dabei Elektronen freisetzen. Dies kann als technische Photosynthese betrachtet werden. Grätzel-Zellen erreichen unter optimalen Bedingungen eine Effizienz von 11% (Abb. 15).²⁴

Trifft das Sonnenlicht auf den Farbstoff (Elektrolyt), wie aus Abb. 18 ersichtlich, werden Elektronen durch die Energie von den Photonen herausgelöst. Diese müssen durch die Titandioxidschicht (TiO_2) dringen um zur Photoelektrode (TCO-Schicht) zu gelangen. Über einen Verbraucher kommen die Elektroden zur Gegenelektrode. Zum Abschluss passieren die Elektronen einen Katalysator (Platin) und gelangen so wieder an ihren Ausgangsort zurück.²⁵

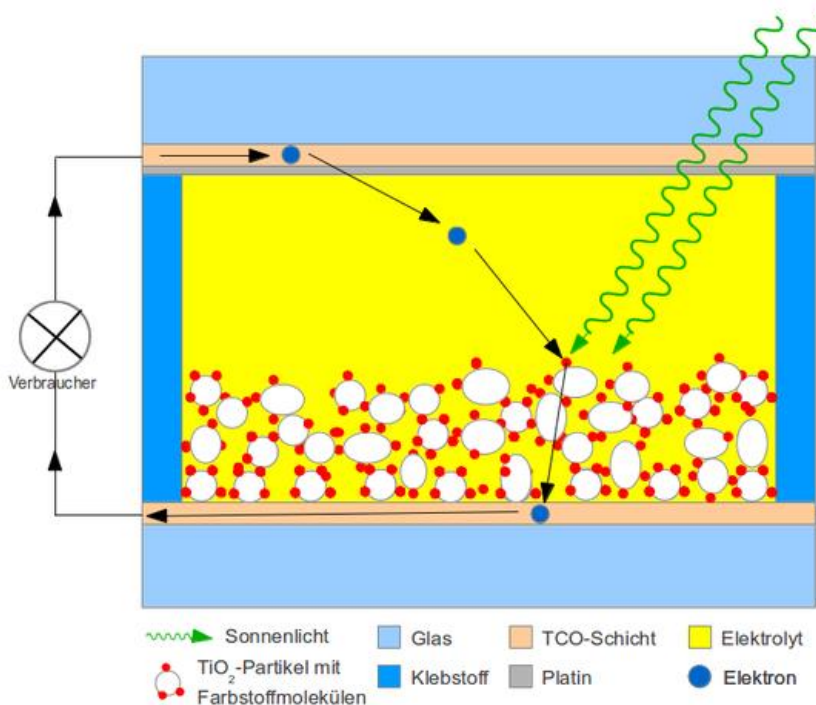


Abb. 18: Funktionsweise einer Grätzel-Zelle, Quelle: Läderach (2013), Online-Quelle [07.07.2017].

Grätzel-PV-Zellen können für Experimente von verschiedenen Herstellern angefordert werden, sind aber wegen ihrer schlechten Effizienz nicht für die Anwendung als Energieversorgung für die Materialanforderungssender geeignet.

3.4 Spektrale Empfindlichkeit von PV-Zellen

Der Photonenstrom, der beim Auftreffen einer bestimmten optischen Leistung generiert wird, gibt Auskunft über die spektrale Empfindlichkeit von PV-Zellen. Wie aus Abb. 19 ersichtlich, können Siliziumzellen kurzwelliges Licht unter 400 nm Wellenlänge schlecht nutzen. Das kurzwellige Licht wird zum großen Teil in

²⁴ Vgl. Bürke/Wengenmayr (2007), S. 37.

²⁵ Vgl. Läderach (2013), Onlinequelle [07.07.2017].

der N-Emitterschicht absorbiert und kann dadurch nicht zur Diffusionszone durchdringen. Im Spektralbereich oberhalb von 1100 nm Wellenlänge dringt das Licht zu weit in die PV-Zellen ein. Die Lichtphotonen können die Bandlücke des Siliziums nicht überwinden, weil ihre Energie bereits zu gering ist. Durch den Einsatz und die Kombination von verschiedenen Halbleiterwerkstoffen kann das Spektrum des Sonnenlichts besser ausgenutzt werden²⁶

Das Emissionsspektrum der künstlichen Beleuchtungsquellen, die der Betreiber des Materialanforderungssystems nutzt, ist für den effizienten Betrieb der PV-Zellen von entscheidender Bedeutung und wird daher im nächsten Abschnitt näher betrachtet.

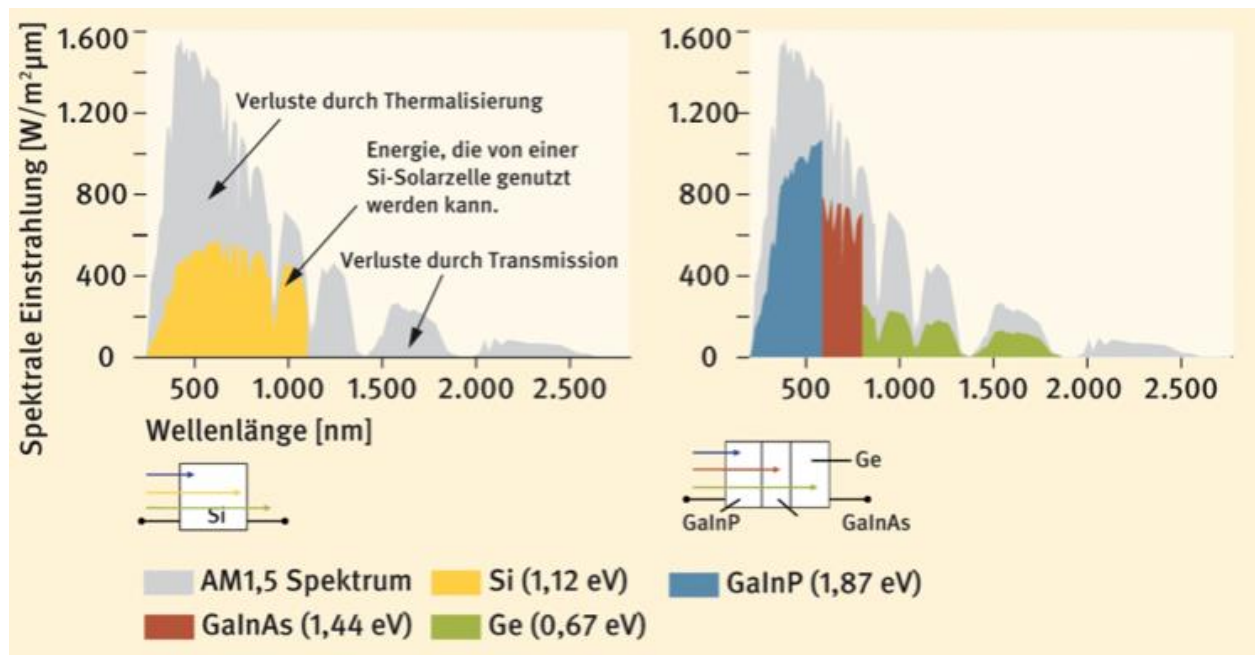


Abb. 19: Für PV-Zellen nutzbare spektrale Einstrahlung des Sonnenlichts, Quelle: energy-mag (2015), Online-Quelle [06.07.2017].

3.5 Das Emissionsspektrum von künstlicher Beleuchtung

Die Fertigungshallen des Betreibers des Materialanforderungssystems sind ausschließlich mit künstlicher Beleuchtung ausgestattet. An den Hallendecken befinden sich Quecksilberdampf-Hochdrucklampen, die eine flächendeckende Beleuchtung der Hallen erzeugen. Arbeitsplätze, bei denen diese Beleuchtung nicht ausreicht, werden zusätzlich mit Quecksilberdampf-Niederdruck Lampen beleuchtet. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit nur diese zwei Arten der künstlichen Beleuchtung behandelt.

3.5.1 Eigenschaften von Quecksilberdampf-Niederdrucklampen

Quecksilberdampf-Niederdrucklampen werden auch weithin als Leuchtstoffröhren bezeichnet. Die Röhre dieser Gasentladungslampen besteht aus Kalknatronglas. Die Lampe ist zum größten Teil mit Argon gefüllt. Ein kleiner Teil der Füllung besteht aus Quecksilber, das für die Lichterzeugung verantwortlich ist. Die

²⁶ Vgl. Mertens (2015), S. 96 f.

Gasfüllung wird mithilfe einer hohen Zündspannung ionisiert. Der Großteil der vom Quecksilber abgegebenen Strahlung liegt im ultravioletten Bereich und muss an der Innenseite der Röhre mit einem Leuchtstoff in sichtbares Licht umgewandelt werden. Für diese Umwandlung, welche auch Fluoreszenz genannt wird, können je nach gewünschter Farbtemperatur des Lichts verschiedene Leuchtstoffe verwendet werden.²⁷

Vergleicht man das Spektrum von Tageslicht mit dem Emissionsspektrum einer Leuchtstofflampe, wird deutlich, dass diese nur bestimmte Teile des möglichen Spektrums einer PV-Zelle bedient. Aus der Abb. 20 ist ersichtlich, dass Leuchtstofflampen keine Strahlung im Bereich über 750 nm Wellenlänge abgeben. Hingegen könnten zum Beispiel Silizium Zellen den Bereich zwischen 750 nm und 1100nm noch nutzen, um Energie zu lukrieren.

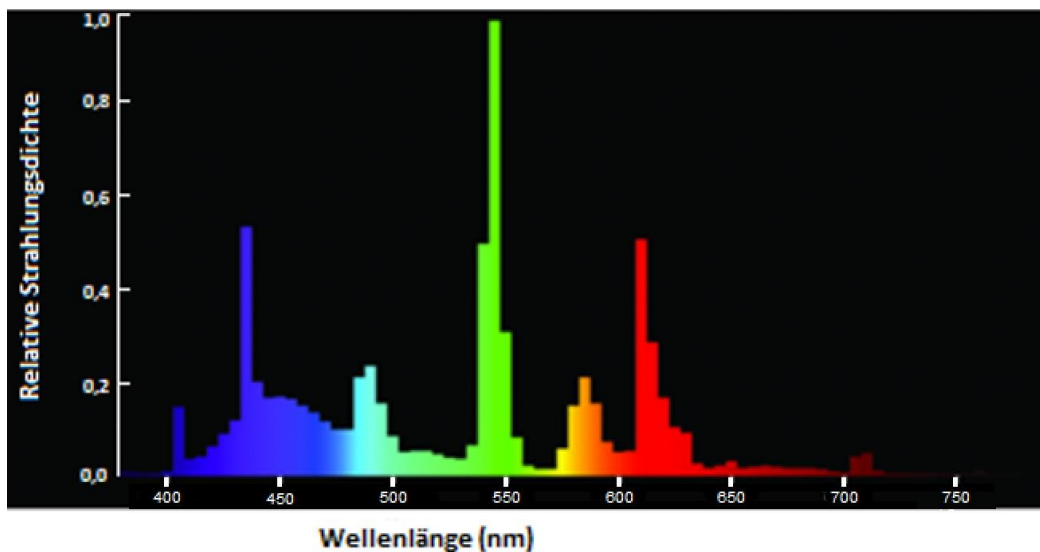


Abb. 20: Emissionsspektrum einer Leuchtstofflampe von Osram (Farbtemperatur 6500 K), Quelle: Paschotta (2017), Online-Quelle [06.07.17] (leicht modifiziert).

3.5.2 Eigenschaften von Quecksilberdampf-Hochdrucklampen

Bei Quecksilberdampf-Hochdrucklampen entsteht das Licht, wie auch bei der Quecksilberdampf-Niederdrucklampe, durch eine Gasentladung, welche in einem Entladungsrohr zwischen zwei Elektroden nach der Zündung entsteht. Der Aufbau der Lampe ist in Abb. 21 dargestellt.

²⁷ Vgl. Dohlus (2010), S. 142 ff.

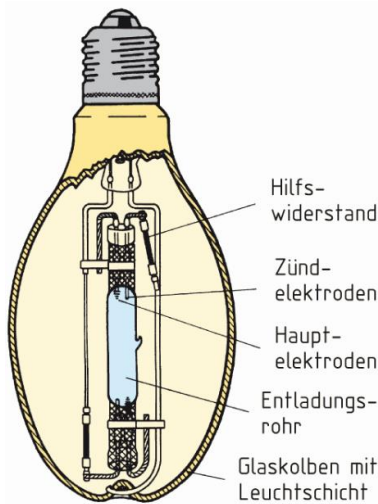


Abb. 21: Aufbau einer Quecksilberdampf-Hochdrucklampe, Quelle: Tkotz (2009), S. 361.

Beim Kaltstart der Lampe ist der Druck im Entladungsrohr sehr gering. Das führt zu einem hohen Kathodenfall in der Lampe, was wiederum eine geringe Lichtausbeute zur Folge hat. Die Zeit in der die Lampen ihren Betriebsdruck von circa einem MPa erreichen, sollte daher möglichst kurz sein. Nach dem Erreichen des Betriebsdruckes ist die Lichtausbeute dieser Lampen sehr gut, weshalb sie häufig Anwendung als Lichtquelle in Industriehallen finden. Ein großer Teil der abgegebenen Strahlung der Lampe besteht aus ultraviolettem Licht. Auf Grund der höheren Elektronenenergie, die durch den höheren Druck hervorgerufen wird, können auch Übergänge zwischen den angeregten Zuständen entstehen. Wie aus Abb. 22 ersichtlich, betrifft das vor allem Übergänge im Bereich von 404,7 nm, 435,8 nm, 546,1 nm, 577 nm und 579 nm Wellenlänge. Über 700 nm Wellenlänge gibt die Quecksilberdampf-Hochdrucklampe kaum Strahlung ab. Dieser Teil des Spektrums, den die PV-Zelle nutzen könnte, wird nicht angeregt.²⁸

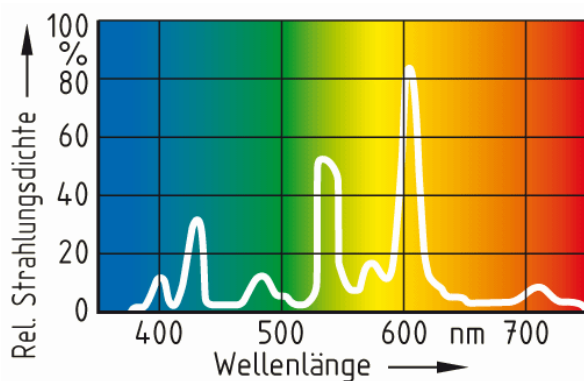


Abb. 22: Emissionsspektrum einer Quecksilberdampf Hochdrucklampe, Quelle: Tkotz (2009), S. 361.

²⁸ Vgl. Dohlus (2010), S. 165 ff.

4 SPEICHERTECHNOLOGIEN

Die benötigte Energie zum Senden der Materialanfrage kann nicht direkt aus der PV-Zelle entnommen werden, weil im Moment des Sendens viel Leistung benötigt wird und die PV-Zelle dementsprechend groß dimensioniert werden müsste. Wäre die Lichtzufuhr zur PV-Zelle während des Sendevorgangs unterbrochen, käme es zu einem Abbruch der Datenübertragung und die Materialanfrage würde nicht in das ERP-System des Betreibers eingehen. Durch die Verwendung eines Zwischenspeichers, der von einer PV-Zelle gespeist wird, solange es die Beleuchtungsverhältnisse zulassen, können Energiebedarfsspitzen optimal abgedeckt werden. PV-Zelle und Speicher müssen derart dimensioniert werden, dass sie bei den gegebenen Beleuchtungsverhältnissen in den Produktionsstätten des Betreibers des Materialanforderungssystems, vier Materialanforderungen pro Tag garantiert versenden können.

Elektrochemische Speicher (galvanische Zellen) können in Primärzellen und Sekundärzellen eingeteilt werden. Primärzellen sind elektrische Speicher, die nicht wieder aufgeladen werden können. Diese umgangssprachlich als Batterien bezeichneten galvanischen Zellen werden zumeist aus Zink und Mangan gefertigt. Zu den Sekundärzellen zählen alle Arten von Akkumulatoren und elektrochemische Doppelschichtkondensatoren, die als Supercaps bekannt sind. Da die Wiederaufladbarkeit des elektrischen Speichers unabdingbar ist, werden in diesem Kapitel nur Sekundärzellen betrachtet.²⁹

4.1 Funktionsweise von Akkumulatoren

Ein Akkumulator ist ein Bauelement, das die in seinen aktiven Materialien enthaltene chemische Energie direkt in elektrische Energie umwandeln kann. Dies geschieht mit Hilfe von elektrochemischen Oxidations-Reduktions-Prozessen (Redox). Der Akkumulator kann durch die Umkehrung des Prozesses wieder aufgeladen werden. Eine Batterie oder ein Akkumulator besteht aus einer oder mehreren Zellen, die je nach gewünschter Spannungshöhe und Kapazität, in Serie oder parallel geschlossen werden. Die Zellen bestehen aus drei Hauptkomponenten:

1. aus der Anode, die Elektronen an den angeschlossenen Stromkreis abgibt und bei elektrochemischen Prozess oxidiert.
2. aus der Kathode, die die Elektronen aus dem angeschlossenen Stromkreis aufnimmt und bei diesem Prozess reduziert wird.
3. aus dem Elektrolyt, das als Medium zur Übertragung der Ladung innerhalb der Zelle zwischen Anode und Kathode dient. Der Elektrolyt ist meistens eine Flüssigkeit, wie zum Beispiel Wasser oder ein Lösungsmittel mit gelösten Salzen, Säuren oder Alkalien. Manche Sekundärzellen nutzen einen festen Elektrolyt oder Polymerelektrolyte, die eine gelartige Konsistenz besitzen.³⁰

Wie aus Abb. 23 ersichtlich, unterscheiden sich die Sekundärzellen stark untereinander in ihrer Energiedichte und in ihrer Leistungsdichte. Doppelschichtkondensatoren, die in Abschnitt 4.3 genauer beschrieben werden, haben eine hohe Leistungsdichte, bezogen auf ihr Volumen. Sie können sehr schnell geladen und

²⁹ Vgl. Korthauer (2013), S. 5 ff.

³⁰ Vgl. Linden/Reddy (2011), S. 26 f.

entladen werden. Das passiert jedoch auf Kosten der Energiedichte. Akkumulatoren verfügen über eine hohe Energiedichte und können somit viel Energie pro Masse speichern.

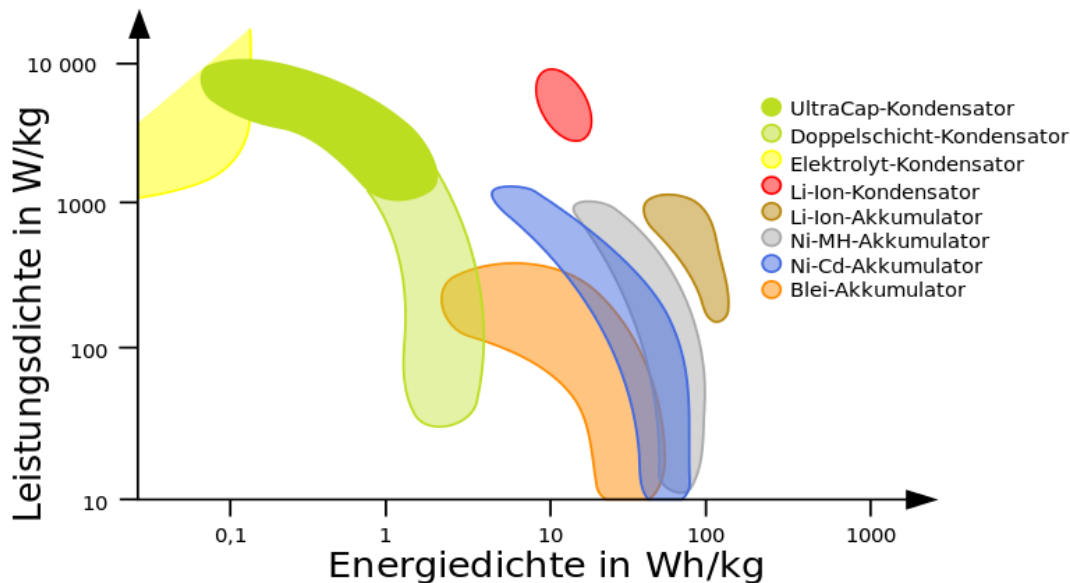


Abb. 23: Leistungsdichte als Funktion der Energiedichte von Sekundärzellen, Quelle: Universität Leipzig (2017), Online-Quelle [02.08.2017].

4.2 Typen von Akkumulatoren

Batterien und Akkumulatoren sind elektrochemische Elemente, welche die in ihnen gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie umwandeln können. Im Gegensatz zu Batterien können Akkumulatoren aufgeladen werden, wodurch elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt und gespeichert werden kann. Es gibt sehr viele unterschiedliche Arten von Akkumulatoren, die sich aufgrund der Nennspannung, der Wirkungsgrades und der Energiedichte unterscheiden. Da für die Anwendung in dem Materialanforderungssender ein möglichst kleiner und kostengünstiger Energiespeicher benötigt wird, werden nur Typen von Akkumulatoren betrachtet, die diese Anforderung erfüllen.³¹

4.2.1 Eigenschaften von Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren

Die Anode des Nickel-Metallhydrid-Akkumulators, die aus Metallhydrid besteht, nimmt beim Entladevorgang Wasserstoff auf und gibt diesen beim Entladen wieder ab. Die Kathode des Akkumulators besteht aus Nickelschaum, das Elektrolyt aus einer Kalilauge (Abb. 24). Handelsübliche Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren sind mit einer Energiedichte von 80 Wh/kg erhältlich. Die Leerlaufspannung einer Zelle beträgt ungefähr 1,3 V. Die Akkumulatoren haben eine Entladeschlussspannung von einem Volt. Werden sie unter diesem Wert entladen, so können sie einen irreparablen Schaden davontragen. Die Selbstentladung dieser Sekundärzellen war in der Vergangenheit mit 20 % pro Woche sehr hoch, daher wurden neue Separatoren entwickelt, welche die Selbstentladung auf 15 % pro Jahr reduzieren.

³¹ Vgl. Salomon (2011), S. 42.

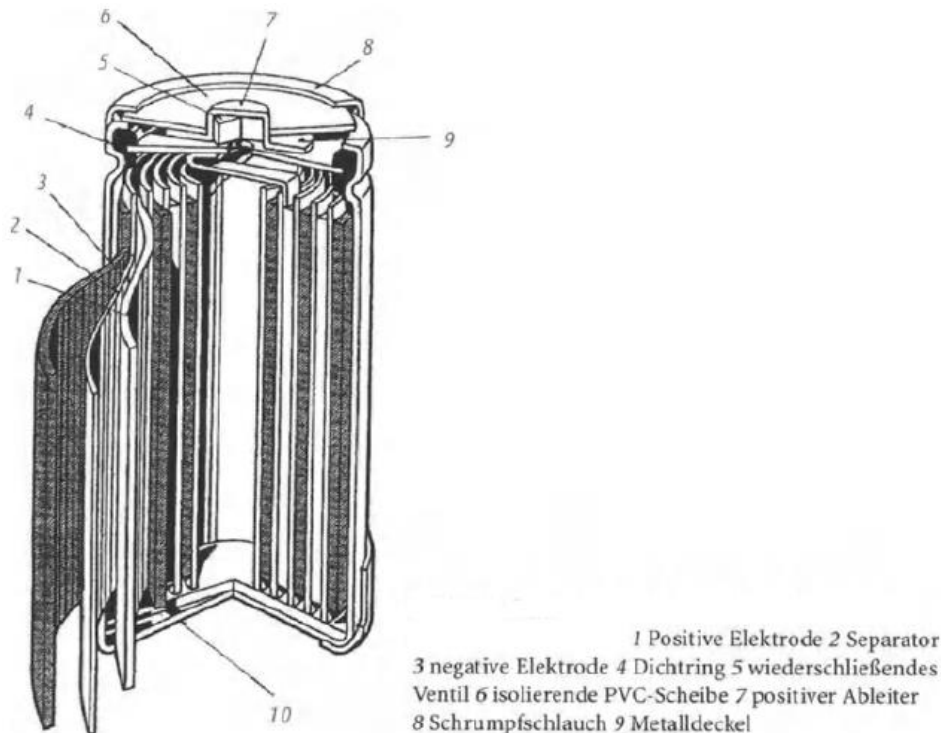


Abb. 24: Schematischer Schnitt durch eine Nickel-Metallhydrid-Batterie, Quelle: Trueb/Rüetschi (1998), S. 101 (leicht modifiziert).

Die Alterung des Speichermediums spielt ebenfalls eine zentrale Rolle. Die Lebensdauer von Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren beträgt zwischen 10 und 15 Jahren. Folgende Faktoren beeinflussen die Alterung:

- Selbstentladung unter die Entladeschlussspannung.
- Durch mehrfaches Teilentladen verliert der Akkumulator zwischen 50 und 100 mV an Maximalspannung.
- Durch Dauerladung bei zu hohen Temperaturen wird die Entladespannung vermindert.
- Das Speichermetall wird durch Korrosion aufgebraucht und vermindert daher die Ladekapazität.³²

4.2.2 Eigenschaften von Nickel-Zink-Akkumulatoren

Nickel-Zink-Akkumulatoren haben eine Zellspannung von 1,65 V. Auf Grund dieser hohen Spannungslage sind diese Sekundärzellen sehr gut als Ersatz für Primärzellen geeignet. Primärzellen, zum Beispiel aus Alkali-Mangan, haben eine Zellspannung von 1,5 V. Werden diese durch einen Nickel-Metallhydrid-Akkumulator, der eine Spannung von 1,3 V besitzt, ersetzt, kann es zu einer verminderten Leistung und einer vorzeitigen Abschaltung des Betriebsmittels kommen. Die Energiedichte von Nickel-Zink-Akkumulatoren, die nach 900 Ladezyklen noch circa 80 % der Ausgangsenergiedichte beträgt, liegt zwischen 70 Wh/kg und 110 Wh/kg. Die Zellen sind nicht für eine längere Lagerung geeignet, weil sie eine Selbstentladung von 20 % im Monat aufweisen. Handelsübliche Mignon-Zellen können mit einer Kapazität von 2500 mAh geordert werden.³³

³² Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 274-279.

³³ Vgl. Phillips/Mohanta (2011), S. 732-755.

4.2.3 Eigenschaften von Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind auf Grund ihrer Eigenschaften sehr weit verbreitet. Sie weisen eine Zellspannung zwischen 3,0 V und 4,2 V auf. Typischerweise liegt die Zellspannung bei 3,6 V. Eine Lithium-Ionen-Zelle kann somit drei Nickel-Metallhydrid-Zellen ersetzen. Im Handel erhältliche Lithium-Ionen-Akkumulatoren haben eine Energiedichte von bis zu 230 Wh/kg. Das entspricht etwa dem Vierfachen eines Bleiakкумуляtors. Die mögliche Leistungsdichte von 1500 W/kg ist dem Niveau eines Doppelschichtkondensators ähnlich.³⁴

Die Selbstentladung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist mit 4% pro Monat sehr gering. Nach ungefähr 1000 Entlade- und Ladezyklen besitzen die Zellen noch 80% ihrer Anfangskapazität.³⁵

In der Consumer-Elektronik sind Lithium-Polymer-Akkumulatoren weit verbreitet. Diese Zellen haben keinen flüssigen Elektrolyt, sondern einen Polymer- oder Gelelektrolyt. Die flexiblen Verpackungen dieser Akkumulatoren bestehen aus heiß versiegeltem, aluminiertem Kunststoff (Abb. 25). Die positive Elektrode des Lithium-Polymer-Akkumulators besteht aus einem lithiiertem Metalloxid oder einem lithiiertem Metallphosphat. Für die negative Elektrode nutzen viele Zellen synthetischen oder natürlichen Graphit in hoher Konzentration. Der Werkstoff ist zu niedrigen Kosten verfügbar und hat eine hohe spezifische Kapazität.³⁶

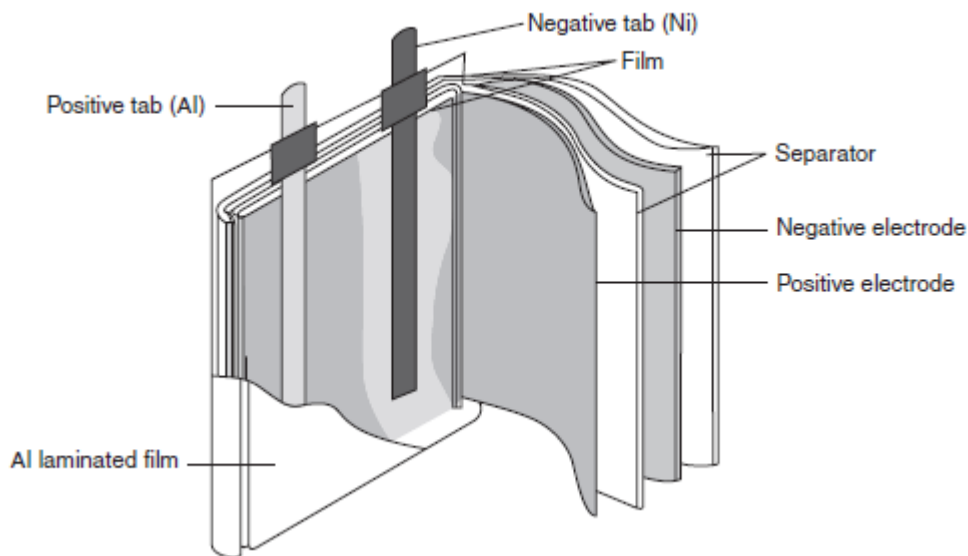


Abb. 25: Aufbau eines Lithium-Polymer-Akkumulators, Quelle: Dahn/Ehrlich (2011), S. 860.

Diagnose und Überwachungselektronik für Lithium-Polymer-Akkumulatoren

Damit die Lebensdauer erhöht und die Akkumulatoren vor Zerstörung geschützt werden, müssen Schutzkreise an den Zellen verbaut werden, um diese vor unabsichtlicher Überladung und Tiefenentladung zu bewahren. Bei einer Tiefenentladung unter 2,5 V kommt es zu unwiederbringlichen Kapazitätsverlusten

³⁴ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 222 f.

³⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2012), S. 20.

³⁶ Vgl. Dahn/Ehrlich (2011), S. 859 ff.

und zu einer beschleunigten Selbstentladung. Wird der Akku mit einer Spannung $> 4,2$ V geladen, kann dies zur Selbstentzündung führen. Der Ladevorgang der Akkumulatoren erfolgt daher mit konstanter Stromzufuhr, bis die zulässige Höchstspannung erreicht wird. Im Folgenden wird der Lithium-Polymer-Akkumulator mit einer konstanten Spannung fertiggeladen. Um unkontrollierten chemischen Reaktionen bei Materialfehlern, Unfällen und Fehlbedienungen entgegenzuwirken, gibt es eine Vielzahl an Sicherheitsmaßnahmen, die in den Akkumulator integriert sein können. So werden zum Beispiel kleine Schmelzsicherungen in den Akkumulatoren verbaut, die bei Überladung oder bei Kurzschluss den Stromkreis unterbrechen. Des Weiteren werden Sicherheitsventile als Sollbruchstellen in den Akkumulatoren verbaut. Diese öffnen sich bei einem plötzlichen Druckaufbau und trennen in Kombination mit einer Abschaltvorrichtung den Strom innerhalb der Zelle. Werden mehrere Lithium-Polymer-Akkumulatoren zusammengeschlossen, ist ein Batterie-Management-System, das die Temperatur, die Leistung, die Überladung und die Tiefenentladung jeder Zelle misst, vonnöten. Bei einzelnen Zellen wird die Ladungsbuchhaltung zur Überwachung verwendet. Hier werden kontinuierlich die Spannung, der Strom, die Temperatur und die elektrische Ladung aufgezeichnet. Daraus wird mit einem Mikrokontroller der Ladezustand des Akkumulators berechnet.³⁷

4.3 Der Doppelschichtkondensator

Doppelschichtkondensatoren stellen ein Bindeglied zwischen Kondensator und Batterie dar. Sie speichern die Energie in den Fest-Flüssig-Grenzflächen zwischen Elektrode und flüssigem Elektrolyt.³⁸

4.3.1 Prinzipieller Aufbau von Doppelschichtkondensatoren

Im Gegensatz zu einem klassischen Kondensator, welcher nur aus zwei Elektroden und einem Dielektrikum besteht, ist in einem Doppelschichtkondensator zusätzlich eine Elektrolytschicht vorhanden (Abb. 26).

³⁷ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 234 ff.

³⁸ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 23.

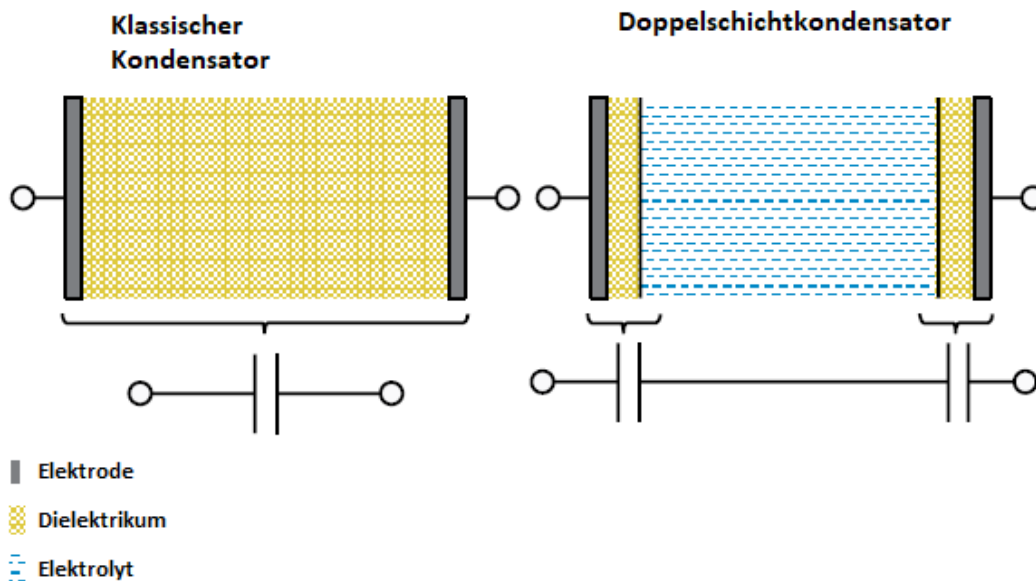


Abb. 26: Vergleich zwischen dem Aufbau eines klassischen Kondensators und dem eines Doppelschichtkondensators, Quelle: Sterner/Stadler (2014), S. 167 (leicht modifiziert).

Die elektrische Energie wird durch Ladungstrennung auf den zwei Elektroden im elektrischen Feld gespeichert. Die Kapazität setzt sich aus der Doppelschichtkapazität (90%) und einer Pseudokapazität (10%) zusammen.³⁹

Um eine größtmögliche Kapazität zu erreichen, sollte die Elektrode eine sehr große Oberfläche besitzen. Durch die Verwendung von Kohlenstoff als Elektrodenmaterial wird dies erzielt. In den Anfängen wurde Aktivkohle zum Bau von Elektroden verwendet. Moderne Doppelschichtkondensatoren können auch Elektroden aus Kohlenstoffnanoröhrchen oder Kohlenstoff-Aerogel besitzen. Diese haben eine größere spezifische Oberfläche als Aktivkohle.⁴⁰

Der Elektrolyt des Doppelschichtkondensators stellt eine elektrisch leitfähige Verbindung zwischen den Elektroden dar. Es muss den elektrischen Strom in Form von positiv geladenen Kationen zum Minuspol und negativ geladenen Anionen zum Pluspol transportieren. Man unterscheidet zwischen wässrigen Elektrolytlösungen, die den elektrischen Strom mit Hilfe von Säuren, Basen oder Salzen leiten, und nicht wässrigen Systemen, die bei kommerziellen Anwendungen aus einem Leitsalz in einem Lösemittel bestehen.⁴¹

³⁹ Vgl. Sterner/Stadler (2014), S. 164 ff.

⁴⁰ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 44 ff.

⁴¹ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 81 f.

4.3.2 Elektrische Eigenschaften von Doppelschichtkondensatoren

4.3.2.1 Laden und Entladen des Doppelschichtkondensators

Wird beim Ladevorgang eine Spannung an den Kondensator angelegt, so bewirkt dies eine Ladungstrennung im Kondensator. Da die Gesamtkapazität eines Doppelschichtkondensators aus einer Vielzahl von Einzelkapazitäten besteht, ist das Ladeverhalten gegenüber einem klassischen Kondensator leicht verändert.⁴²

4.3.2.2 Verluste und Wirkungsgrad des realen Kondensators

Da reale Kondensatoren verlustbehaftet sind, können sie die in ihnen gespeicherte Energie nur begrenzte Zeit speichern. Vor allem die Selbstentladung des Doppelschichtkondensators, die durch den endlichen Widerstand des Dielektrikums entsteht, kann zu Problemen führen. Eine Vorhersage über das Ausmaß der Selbstentladung ist nahezu unmöglich, weil diese nicht konstant ist. Vielmehr hängt sie von verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel der Zellspannung und dem Verlauf der vorherigen Lade- und Entladezyklen ab. Doppelschichtkondensatoren haben einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von über 90%. Dieser wird aus dem Verhältnis der abgegebenen und der zugeführten Energie ermittelt.⁴³

4.3.2.3 Lebensdauer des Kondensators

Im Gegensatz zu Batterien und Akkumulatoren treten bei Doppelschichtkondensatoren keine irreparablen Schäden, die das Elektrodenmaterial zerstören und die Lebensdauer begrenzen während des Entlade- und Ladevorgangs auf. Die Kondensatoren können für mehrere Millionen Lade- und Entladezyklen verwendet werden.⁴⁴

⁴² Vgl. Sterner/Stadler (2014), S. 167 f.

⁴³ Vgl. Sterner/Stadler (2014), S. 176 ff.

⁴⁴ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 128.

4.4 Verwendeter Energiespeicher

Um die Auswahl eines geeigneten Energiespeichers für das Energy Harvesting Konzept zu erleichtern, findet sich in der nachfolgender Tab. 4 ein Vergleich aller in der Arbeit erwähnten Speichertechnologien.

	Nickel-Metallhydrid-Akkumulator	Nickel-Zink-Akkumulator	Lithium-Ionen-Akkumulator	Doppelschichtkondensator
Energiedichte (Wh / kg)	80	70-110	230	≤ 5
Leistungsdichte (W / kg)	220	280-2500	1500	> 2500
Zellspannung (V)	1,3	1,65	4,2	$\leq 3V$
Anzahl der möglichen Ladezyklen	600-1200	300-900	500-1000	> 10000
Selbstentladung pro Monat (%)	1,25	20	4	-

Tab. 4: Vergleich der Speichertechnologien, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhand der Tabelle sind die Vor- und Nachteile der Speichertechnologien klar erkennbar. Lithium-Ionen Akkumulatoren haben eine sehr hohe Energiedichte in Kombination mit einer akzeptablen Leistungsdichte, weshalb diese Technologie für dieses Energy Harvesting Konzept verwendet wird. Im Gegensatz zu den Doppelschichtkondensatoren, die auf Grund ihrer Eigenschaften ebenfalls für das Konzept geeignet wären, sind Lithium-Ionen Akkumulatoren großtechnisch erprobt und besitzen einen sehr umfangreichen Einsatzbereich. Bei einem Defekt können die Akkumulatoren problemlos ausgetauscht werden. Ein defekter Doppelschichtkondensator müsste gegebenenfalls ausgelötet werden, was zusätzliche Instandhaltungskosten verursachen würde. Darüber hinaus sind auf Grund der geringeren Verbreitung von Doppelschichtkondensatoren die genauen Kosten für den Einsatz im Materialanforderungssystem schwer zu bestimmen.

Für den Testaufbau wird ein Lithium-Ionen Akkumulator mit einer Spannung von 3,7 V und einer Kapazität von 230 mA verwendet. Dies entspricht einer speicherbaren Energiemenge von 0,851 Wh oder 3063,6 J. Mit der Formel (1.3), angeführt auf Seite 7, und den Daten für den Energieverbrauch aus Kapitel 1.4 lässt sich die maximale Betriebsdauer mit diesem Speichermedium unter Verwendung von WLAN und LoRaWAN in der Variante zwei des Materialanforderungssenders berechnen.

Maximale Betriebsdauer mit WLAN:

$$t = \frac{3063,6 J}{635,35 J} * 24 h = 115,7 h$$

Maximale Betriebsdauer mit LoRaWAN:

$$t = \frac{3063,6 J}{83,73 J} * 24 h = 878,14 h$$

Wie aus dieser Berechnung hervorgeht, kann mit dem verwendeten Akkumulator kein sicherer Betrieb über längere Zeit unter Verwendung von WLAN garantiert werden, falls der Energy-Harvester nicht funktionieren sollte.

5 BELEUCHTUNGSVERHÄLTNISSE IM BETRIEB

Die Beleuchtungsverhältnisse in den Hallen des Betreibers des Materialanforderungssystems haben einen entscheidenden Einfluss auf die verwendeten PV-Zellen, denn die erbrachte Leistung dieser ist nicht nur von der Beleuchtungsstärke, sondern auch von der Wellenlänge des auftreffenden Lichtes abhängig.

5.1 Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke

Für die Umwandlung des Lichtes in elektrische Energie ist ausschlaggebend, wie viele Photonen, welche Elektronen vom Valenzband in das Leistungsband heben, auf die Oberfläche der PV-Zellen treffen. Hierzu müsste die Bestrahlungsstärke E in W/m^2 , welche die Leistung der gesamten eingehenden elektromagnetischen Energie darstellt, gemessen werden. Daher wäre eine radiometrische Messung, die auch Infrarotstrahlung und ultraviolette Strahlung miteinbezieht, mit einem Radiometer nötig. Für diese Arbeit stand kein Radiometer zur Verfügung, daher mussten alle Messungen mit einem Luxmeter durchgeführt werden. Mit diesem Messgerät lässt sich die Beleuchtungsstärke E_v , die das visuelle Pendant der Bestrahlungsstärke darstellt, in lux messen. Die Beleuchtungsstärke ist das Verhältnis des Lichtstromes, der auf eine Fläche auftrifft, zur Größe dieser Fläche. An allen Einsatzorten des Materialanforderungssenders muss eine Messung der Beleuchtungsstärke vom Betreiber des Systems vorgenommen werden. Da dem Betreiber ausschließlich Luxmeter für Beleuchtungsstärkemessungen zur Verfügung stehen, ist dies für ihn die einzige Methode um sicherzustellen, dass die Beleuchtungsstärke ausreicht um die Materialanforderungssender betreiben zu können.⁴⁵

Mit Luxmetern werden Messungen zur Beleuchtungsstärke an Arbeitsplätzen vorgenommen. Für Messungen dieser Art ist nur der für den Menschen sichtbare Bereich des Lichtes wichtig. Wie aus Abb. 27 ersichtlich, misst das Luxmeter die Helligkeit am Messpunkt, unabhängig von der Richtung und der Ausdehnung der Lichtquelle, mit der Helligkeitsfunktion $V(\lambda)$. Der Bereich über 750 nm, in dem PV-Zellen ebenfalls Photonen zur Energieumwandlung absorbieren, wird vom Luxmeter nicht gemessen.

⁴⁵ Vgl. Theiß (2000), S. 35 ff.

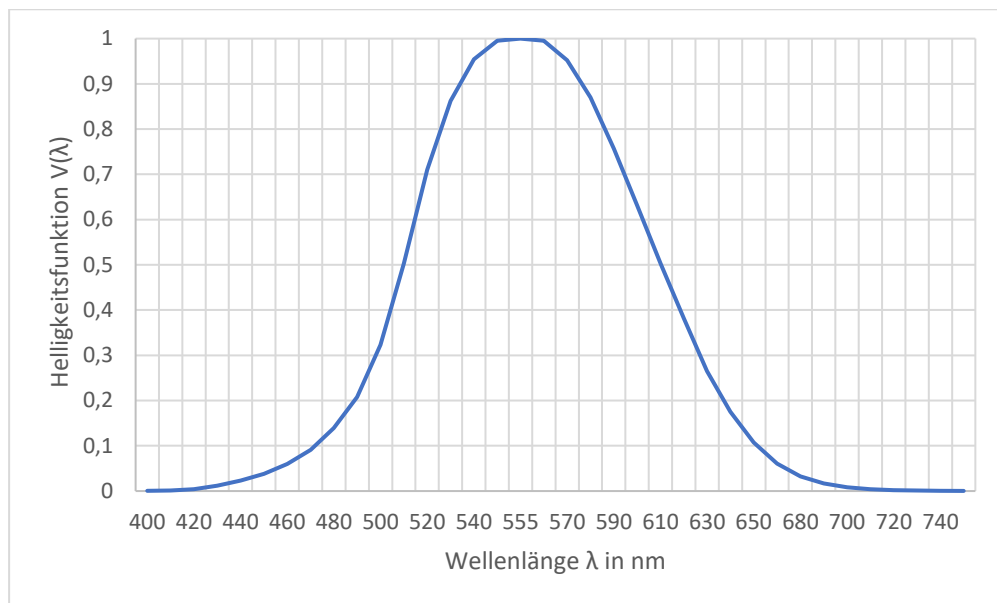


Abb. 27: Spektrale Empfindlichkeit von Luxmetern, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie in Abb. 27 ersichtlich ist, könnte bei Beleuchtungsstärkemessungen mit einem Luxmeter auch bei einem niedrigen Messwert ausreichend Bestrahlungsstärke für die PV-Zelle vorhanden sein. Für eine einzelne Anwendung, bei welcher die Position und der Abstand der Beleuchtungsquellen von der PV-Zelle sowie das Emissionsspektrum der verwendeten Beleuchtung bekannt sind, kann mit Hilfe eines Wirkungsfaktors aus der Beleuchtungsstärke die tatsächliche Bestrahlungsstärke berechnet werden. Für diese Arbeit ist das jedoch nicht möglich, weil geplant ist, den Materialanforderungssender tausendfach einzusetzen. Die Sender werden in unterschiedlich hohen Hallen mit verschiedenen Beleuchtungsarten in variierenden Montagehöhen zum Einsatz kommen.

5.2 Messung der Beleuchtungsverhältnisse in den Werkshallen des Betreibers des Materialanforderungssystems

Das Mindestmaß der Beleuchtungsverhältnisse, bestehend aus der mittleren Beleuchtungsstärke (E_M) an den Arbeitsplätzen, ist mit der Norm EN 12464-1 geregelt. Hierzu müssen an verschiedenen Punkten in den Arbeitsstätten Beleuchtungsstärkemessungen durchgeführt werden. Darauffolgend kann aus diesen Messwerten ein Mittelwert berechnet werden, der größer oder gleich dem von der Norm geforderten Mittelwert sein sollte. Für die Messungen in dieser Arbeit spielt die mittlere Beleuchtungsstärke nur eine untergeordnete Rolle, weil die Beleuchtungsstärke an jedem Montageort des Materialanforderungssenders einen Mindestwert haben muss. In der Tab. 5 sind die für den Betreiber des Materialanforderungssystems relevanten Anforderungen für die Beleuchtungsstärke aufgelistet. Wie anhand dieser Tabelle ersichtlich, muss die Beleuchtungsstärke an den Arbeitsplätzen mit Montage- und Inspektionstätigkeiten sehr hoch sein. In Lagerbereichen werden keine hohen Ansprüche an die Beleuchtungsstärke gestellt.

Art des Raumes, Aufgabe oder Tätigkeit	Mittlere Beleuchtungsstärke
	E_M in lux
Automobilbau	
Karosseriebau und Montage	500
Lackieren, Spritzkabinen, Schleifkabinen	750
Lackieren: ausbessern, Inspektion	1000
Polsterei	1000
Endkontrolle	1000
Regallager	
Fahrwege mit Personenverkehr	150

Tab. 5: Ausgewählte Beleuchtungsstärken nach ÖNORM EN 12464-1, Quelle: ÖNORM EN 12464-1 (2011).

Für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit ist der kleinste Wert der gemessenen Beleuchtungsstärke ausschlaggebend, weil sich daran die mögliche elektrische Arbeit der PV-Zellen orientieren wird.

Das Luxmeter, Modell 45170 der Firma EXTECH-Instruments, wurde für die praktischen Messungen verwendet. Dieses Messgerät kann Beleuchtungsstärken bis 20000 lux bei einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ messen. Um für diese Arbeit relevante Messergebnisse zu erhalten, wurden die Messungen an möglichen Montagepunkten des Materialanforderungssenders durchgeführt. Der Betreiber des Materialanforderungssystems möchte aus Gründen des Datenschutzes keine genauen Angaben und Bilder, betreffend seiner Hallen und der Tätigkeiten in diesen, preisgeben.

5.2.1 Messung der Innenraumbeleuchtung im Rohbau

Laut der Norm EN 12464-1 müssen bei Montagetätigkeiten im Automobilbau, die in dieser Halle durchgeführt werden, mindestens 500 lux mittlere Beleuchtungsstärke vorhanden sein. Wie aus der folgenden Tab. 6 ersichtlich, wurde dieser Mindestwert nicht an allen Messpunkten erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Montagepunkte der Materialanforderungssender bei Regalen angebracht werden, die sich nicht direkt bei den Arbeitsplätzen der Produktion befinden. Diese befinden sich meist wenige Schritte hinter den eigentlichen Arbeitsplätzen und werden daher nicht direkt von Lampen bestrahlt. Des Weiteren waren manche Messpunkte von Teilen der Gebäudekonstruktion, beziehungsweise von Stützwerten der Rohbau-Montage abgeschattet. In dieser Halle wurden 20 Messungen an aussagekräftigen Punkten durchgeführt.

Messpunkt	Beleuchtungsstärke	Messpunkt	Beleuchtungsstärke	
	Ev in lux		Ev in lux	
1	1250	11	390	
2	420	12	380	
3	605	13	170	
4	720	14	630	
5	450	15	480	
6	220	16	680	
7	780	17	520	
8	820	18	470	
9	370	19	480	
10	380	20	780	

Tab. 6: Messung der Innenraumbeleuchtung im Rohbau, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie aus den Messungen hervorgeht beträgt der kleinste Wert dieser Messung 170 lux und der größte Wert 1250 lux. Der niedrigste Messwert liegt deutlich unter der von der Norm geforderten Mindestbeleuchtungsstärke.

5.2.2 Messung der Innenraumbeleuchtung in der Montagehalle

In dieser Halle, die dem Fertigen von Automobilen dient, muss laut der Norm EN 12464-1 ebenfalls eine Beleuchtungsstärke von 500 lux gegeben sein. Wie aus der folgenden Tab. 7 ersichtlich, wurde dieser Wert nicht an allen Messpunkten erreicht. Auch hier liegt es vor allem daran, dass sich die Montagepunkte des Materialanforderungssenders nicht direkt bei den stark ausgeleuchteten Arbeitsplätzen an den Montagelinien befinden.

Messpunkt	Beleuchtungsstärke	Messpunkt	Beleuchtungsstärke
	E_v in lux		E_v in lux
1	770	11	550
2	140	12	850
3	210	13	360
4	640	14	1250
5	720	15	1150
6	570	16	1320
7	840	17	1130
8	825	18	230
9	830	19	250
10	1470	20	860
		21	740

Tab. 7: Messung der Innenraumbeleuchtung in der Montagehalle, Quelle: Eigene Darstellung.

Der niedrigste gemessene Wert der Beleuchtungsstärke in dieser Halle liegt bei 140 lux. Der Höchstwert der Beleuchtungsstärke in dieser Halle beträgt 1470 lux.

5.2.3 Messung der Innenraumbeleuchtung im Zwischenlager

In Regallagern, die Fahrwege mit Personenverkehr aufweisen, muss laut Norm EN 12464-1 eine Beleuchtungsstärke von 150 lux vorhanden sein. Da sich dieses Lager direkt im Anschluss einer Produktionsstraße befindet und dort rege Betriebsamkeit von Flurförderfahrzeugen und Personen herrscht, ist die Beleuchtungsstärke in diesem Abschnitt der Halle, wie aus Tab. 8 ersichtlich, an allen Messpunkten deutlich über dem von der Norm geforderten Wert.

Messpunkt	Beleuchtungsstärke	Messpunkt	Beleuchtungsstärke
	Ev in lux		Ev in lux
1	710	11	720
2	620	12	520
3	710	13	450
4	600	14	380
5	880	15	510
6	400	16	390
7	440	17	420
8	450	18	560
9	380	19	
10	650	20	

Tab. 8: Messung der Innenraumbeleuchtung im Zwischenlager, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Höchstwert der Beleuchtungsstärke in dieser Lagerhalle liegt bei 880 lux, der niedrigste Wert beträgt 380 lux.

5.2.4 Messung der Innenraumbeleuchtung in der Montagehalle des Interieurs

Die Montage des Interieurs ist ein besonders heikler Prozess in der Fertigung eines Automobiles, daher sind hier äußerst gute Lichtverhältnisse vonnöten. Die Behälter, in denen sich die Kleinteile für die Montage der Innenausstattung der Fahrzeuge befinden, müssen ebenfalls gut ausgeleuchtet werden. Das ist sehr wichtig für die Qualität der Fahrzeuge, weil dadurch die Kleinteile einer letzten Qualitätskontrolle vor dem Einbau unterzogen werden können und es aufgrund dessen zu einer Minimierung der Falschwahl von Kleinteilen kommt. Wie aus Tab. 9 ersichtlich, ist die Beleuchtungsstärke an allen Messpunkten in dieser Halle über den von der Norm geforderten Wert von 500 lux.

Messpunkt	Beleuchtungsstärke	Messpunkt	Beleuchtungsstärke
	Ev in lux		Ev in lux
1	1200	11	750
2	1300	12	800
3	1310	13	1120
4	1300	14	1080
5	1150	15	980
6	1150	16	780
7	1200	17	1060
8	1100	18	1050
9	850	19	850
10	860	20	910

Tab. 9: Messung der Innenraumbeleuchtung in der Montagehalle des Interieurs, Quelle: Eigene Darstellung.

In dieser Montagehalle liegt der niedrigste gemessene Wert der Beleuchtungsstärke bei 750 lux, der Höchstwert liegt bei 1310 lux.

5.3 Erkenntnisse aus der Beleuchtungsstärkemessung

Für die weitere Vorgehensweise zur Auswahl von geeigneten Komponenten für das Energy Harvesting Konzept ist es unabdingbar, eine minimale Beleuchtungsstärke an den Einsatzorten des Materialanforderungssenders festzulegen. Obwohl die Beleuchtungsstärke an einigen Messpunkten deutlich unter 500 lux liegt, wird die minimale Beleuchtungsstärke vom Betreiber des Materialanforderungssystems mit 500 lux festgelegt. An Montageorten, die diese Beleuchtungsstärke nicht aufweisen, wird eine zusätzliche Beleuchtung angebracht. Daraus resultierend wird diese Beleuchtungsstärke für die weitere Arbeit als minimalster Wert angenommen.

6 VERMESSUNG DER VERWENDETEN PV-ZELLEN

Als Energiequelle für den Materialanforderungssender soll eine PV-Zelle dienen. Die maximale nutzbare Fläche für eine PV-Zelle ist durch die Oberseite der Sendeeinheit von 210 mm x 45 mm, was 9450 mm² entspricht, begrenzt. Mit dieser Fläche sind PV-Zellen mit einer Leistung von über einem Watt erhältlich. Um einen Überblick über die verschiedenen PV-Zellen-Technologien und deren Tauglichkeit als Energiequelle zu bekommen, wurden vier unterschiedliche Typen von PV-Zellen angeschafft und vermessen. An den PV-Zellen wurde nicht wie meist üblich die Leerlaufspannung und der Kurzschlussstrom gemessen, weil das im Konzept verwendete Energy Harvesting Modul das Maximum Power Point Tracking (MPPT) Verfahren zur Leistungsoptimierung der PV-Zelle verwendet. Um zu veranschaulichen, wie abhängig die erbrachte Leistung der PV-Zellen vom Umfang der spektralen Einstrahlung ist, wurden die Zellen unter zwei verschiedenen Szenarien getestet. Im ersten Szenario wurde die erbrachte Leistung der PV-Zellen mit indirektem Sonnenlicht und dem Licht aus Leuchtstoffröhren gemessen. Im zweiten Szenario wurden die PV-Zellen in einer Kammer ohne Fenster, welche ausschließlich Leuchtstoffröhren als Beleuchtung hatten, vermessen. Zur Messung der Beleuchtung diente das Luxmeter 45170 der Firma Extech. Die Spannung und der Strom wurden mit zwei digitalen Multimetern 2100 6½ der Firma KEITHLEY gemessen.

6.1 Eigenschaften des Energy Harvesting Moduls

Das "bq25570 Battery Charger Evaluation Module for Energy Harvesting" ist eine Energy Harvesting Managementlösung, die speziell für Ultra-Low-Power-Anwendungen konzipiert wurde. Das System kann Mikrowatt und Milliwatt, welche aus verschiedenen Gleichstromquellen, wie zum Beispiel PV-Zellen oder thermoelektrischen Generatoren, erzeugt werden, verwalten, um damit Akkumulatoren oder Supercaps zu laden und Verbraucher wie den Materialanforderungssender mit Energie zu versorgen. Das Energy Harvesting-Modul, das mit einer maximalen Eingangsspannung von 5,1 V beaufschlagt werden kann, beginnt bei einer Spannung von 330 mV die an ihm angeschlossenen Speicherelemente zu laden. Die Spannung zum Aufladen der Batterie ist vom Hersteller voreingestellt, sie liegt zwischen 4,04 V und 4,32 V und muss daher für den verwendeten Akkumulator nicht adaptiert werden. Die Ausgangsspannung ist mit einer Höhe von 1,75 V und 1,85 V ebenfalls vorgegeben und muss auf 4,5 V angehoben werden, um den Materialanforderungssender zu versorgen. Hierzu mussten die Widerstände des integrierten Spannungsteilers, welcher die Höhe der Ausgangsspannung bestimmt, verändert werden. Um aus den angeschlossenen PV-Zellen die maximale elektrische Leistung beziehen zu können, stellt das Energy Harvesting Modul eine MPPT-Verfahren zur Verfügung.⁴⁶

6.1.1 Erläuterung des MPPT-Verfahrens

Mit dem MPPT Verfahren können PV-Zellen dahingehend angepasst werden, dass aus ihnen die größtmögliche Leistung entnommen wird (Abb. 28). Der MPPT-Punkt ist somit der Arbeitspunkt mit dem größten

⁴⁶ Vgl. Texas Instruments (Hrsg.) (2015), S. 1 ff.

Produkt aus der Spannung und dem Strom. Dieses Verfahren, welches auch als Leistungsanpassung bekannt ist, wird speziell in der Solartechnologie verwendet, weil der Innenwiderstand der PV-Zellen nicht linear ist, sondern sich durch Lichteinstrahlung und Temperatur verändert. Bei PV-Zellen liegt der MPPT-Punkt zwischen 70% und 80% der Leerlaufspannung.⁴⁷

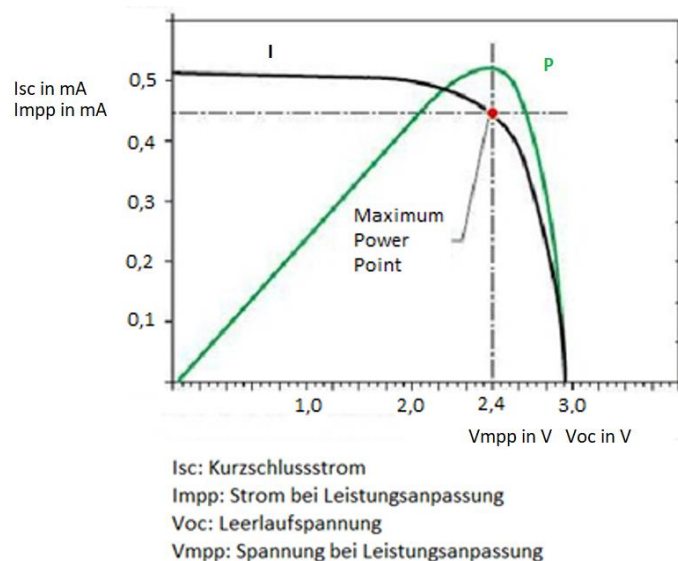


Abb. 28: Darstellung des Maximum Power Point Tracking, Quelle: Solar Energy Explorer (2014), Online-Quelle [28.08.2017] (leicht modifiziert).

6.1.2 MPPT-Verfahren des verwendeten Energy Harvesting Moduls

Das verwendete Energy Harvesting Modul erfasst alle 16 Sekunden die Leerlaufspannung der angeschlossenen Energiequelle. Hierfür wird das Laden des Energiespeichers für 256 ms unterbrochen. Die daraus resultierende Referenzspannung wird gespeichert und kann am VREF_SAMP- Pin des Moduls gemessen werden (Abb. 29). Dient eine PV-Zelle als Energiequelle, so wird der MPPT-Regelpunkt auf 80% der Leerlaufspannung gebracht. Bei Verwendung von anderen Energiequellen, wie zum Beispiel eines thermoelektrischen Generators, kann der MPPT-Punkt auf 50% der Leerlaufspannung reguliert werden. Wenn die verwendete Energiequelle weder 80% noch 50% der Leerlaufspannung als MPPT-Punkt hat, kann mit Hilfe von externen Widerständen ein genaues Verhältnis für den MPPT-Regelpunkt hergestellt werden.⁴⁸

⁴⁷ Vgl. Wagemann/Eschrich (2010), S. 211.

⁴⁸ Vgl. Texas Instruments (Hrsg.) (2015), S. 14.

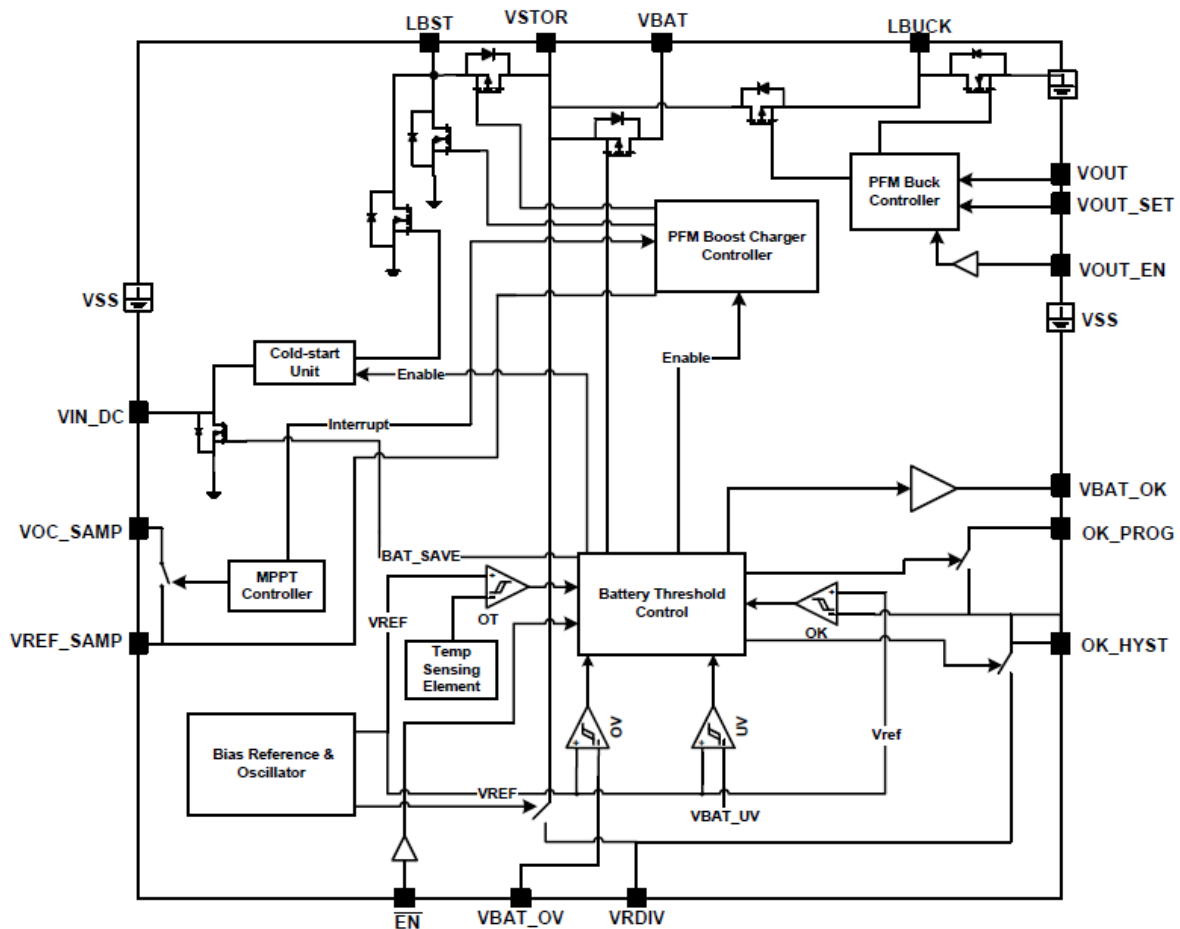


Abb. 29: Blockdiagramm des Energy Harvesting Moduls, Quelle: Texas Instruments (Hrsg.) (2015), S. 14.

6.2 Versuchsaufbau zur Vermessung der PV-Zellen

Die PV-Zellen werden mittels des VIN_DC Anschlusses am Energy Harvesting Modul angeschlossen (Abb. 29). Da die Spannung, welche die PV-Zellen liefern in diesem Anwendungsfall geringer als die benötigte Spannung zum Laden des Akkumulators ist, kommt ein interner Aufwärtswandler (Boost-Converter) zum Einsatz. Am Anschluss VBAT, welcher aus Abb. 29 ersichtlich ist, wurde ein nicht vollständig geladener Lithium-Ionen Akkumulator, der in Kapitel 4.4 beschrieben wurde, angeschlossen. Das Laden dieses Akkumulators stellt in diesem Anwendungsfall die Last dar. Die Vermessungen der PV-Zellen fanden unter zwei verschiedenen Bedingungen statt. Bei der ersten Messung wurden Spannung und Strom im MPPT-Punkt bei künstlicher Beleuchtung durch Quecksilberdampf-Niederdrucklampen und indirektem Tageslicht gemessen. Der Abstand zwischen den PV-Zellen und der künstlichen Beleuchtung beträgt bei jeder Messung 1,6 m. Die zweite Messung findet unter Ausschluss des Tageslichtes, nur mit Leuchtstoffröhren als Beleuchtung, statt. Auch bei dieser Messung liegt der Abstand zwischen den Natriumdampf-Niederdrucklampen und den PV-Zellen bei 1,6 m.

6.3 PV-Zelle Saver 5V 1W

Bei der hier vermessenen PV-Zelle der Firma Saver handelt es sich um ein Produkt der Firma IXYS. Diese monokristalline PV-Zelle mit der Bezeichnung SLMD481H12L hat die Abmessungen von 90 mm x 79 mm, was einer Fläche von 7110 mm² entspricht.

6.3.1 Eigenschaften der PV-Zelle Saver 5V 1W

Die PV-Zelle, welche eine Effizienz von 22% besitzt, hat eine maximale Leerlaufspannung von 7,56 V und einen maximalen Kurzschlussstrom von 200 mA bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m². Am MPPT-Punkt kann die PV-Zelle eine Spannung von 6,06 V und einen Strom von 178 mA erreichen. Die Maximalleistung der Zelle ist somit 1081 mW.⁴⁹

6.3.2 Kennlinien der PV-Zelle laut dem Datenblatt

In Abb. 30 kann man die Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Bestrahlungsstärke deutlich erkennen. Wie aus dieser Abbildung ersichtlich liegt die Leerlaufspannung abhängig von der Strahlungsintensität deutlich unter der Spannung, die im Abschnitt 6.3.3 gemessen wird. Die Werte in dieser Abbildung beziehen sich auf eine PV-Zelle. Die vermessene PV-Zelle besteht aus acht Einzelzellen.

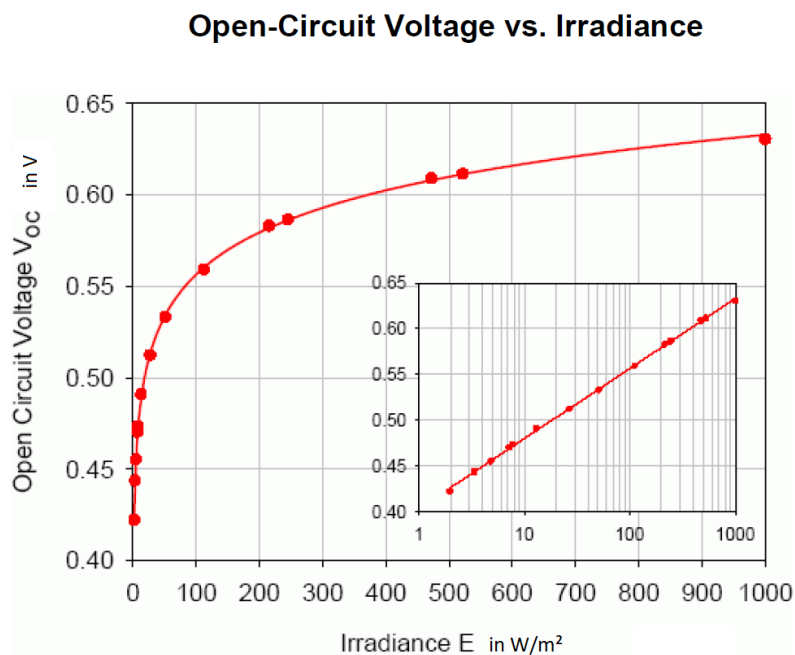


Abb. 30: Leerlaufspannung V_{oc} in Abhängigkeit der Strahlungsintensität E , Quelle: IXYS (Hrsg.) (2016), S. 2 (leicht modifiziert).

In Abb. 31 ist die Quanteneffizienz der PV-Zelle in ihrer Abhängigkeit von der Wellenlänge ersichtlich. Die PV-Zelle kann das Spektrum zwischen 450 nm und 800 nm, was ungefähr dem für den Menschen sichtbaren Teil der elektromagnetischen Strahlung entspricht, mit einer Effizienz von über 90% absorbieren.

⁴⁹ Vgl. IXYS (Hrsg.) (2016), S. 1.

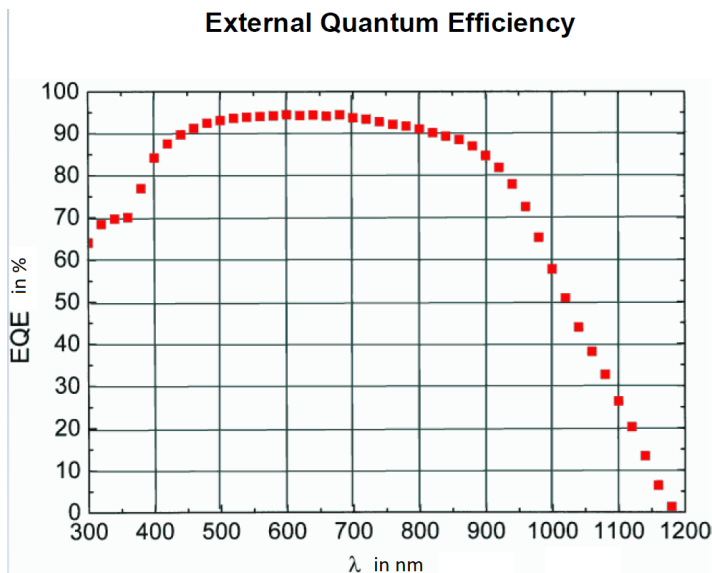


Abb. 31: Effizienz der PV-Zelle (EQE) in Abhängigkeit der Wellenlänge (λ): Quelle: IXYS (Hrsg.) (2016), S. 2 (leicht modifiziert).

Aus Abb. 32 ist die Strom-Spannungskennlinie (blaue Kurve) und Spannungs-Leistungskennlinie (rote Kurve) der PV-Zelle bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² ersichtlich. Auch hier bezieht sich die Abbildung auf eine einzelne PV-Zelle.

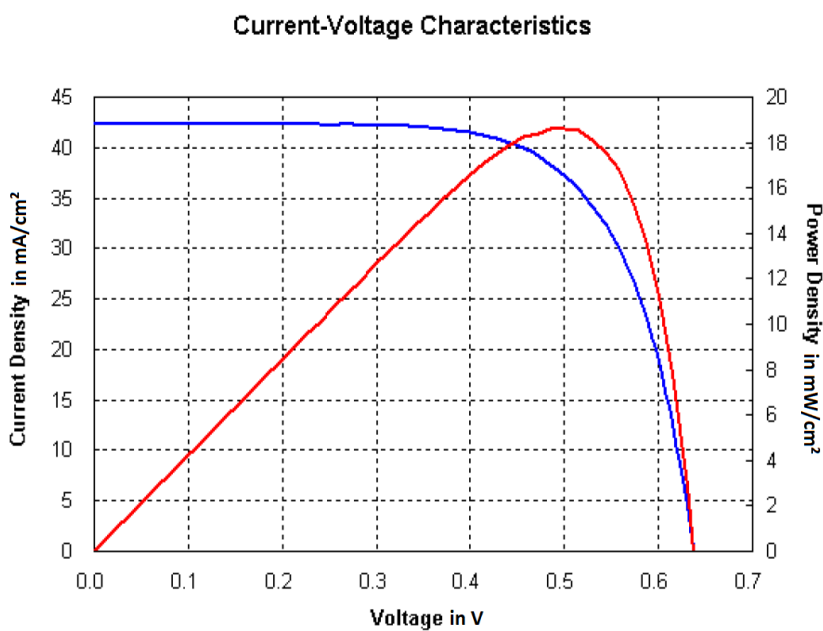


Abb. 32: Strom-Spannungskennlinie (blaue Kurve) und Spannungs-Leistungskennlinie (rote Kurve) der PV-Zelle, Quelle: IXYS (Hrsg.) (2016), S. 2.

6.3.3 Vermessung der PV-Zelle Saver 5V 1W

Bei der ersten Messung wurden Spannung und Strom im MPPT-Punkt bei künstlicher Beleuchtung und indirektem Tageslicht gemessen. Die zweite Messung fand unter Ausschluss des Tageslichtes, nur mit Leuchtstoffröhren als Beleuchtung, statt. Wie aus der Tab. 10 ersichtlich, steigen die elektrische Leistung und der Strom mit der Beleuchtungsstärke konstant an. Das Energy Harvesting Modul, das in Abschnitt 6.1 erklärt worden ist, regelt die Spannung mit 2,78 V, damit immer der optimale MPPT-Punkt erhalten wird.

Vermessung der verwendeten PV-Zellen

Beleuchtungsstärke	Spannung im MPPT-Punkt	Strom im MPPT-Punkt	Elektrische Leistung bei indirektem Tageslicht und künstlicher Beleuchtung	Elektrische Arbeit in 24 Stunden
E_v / lux	$U_{\text{Mpp}} / \text{V}$	$I_{\text{Mpp}} / \text{mA}$	P / mW	W / J
100	1,82	0,075	0,137	11,794
150	1,99	0,11	0,219	18,913
200	2,11	0,133	0,281	24,246
250	2,22	0,165	0,366	31,648
300	2,24	0,174	0,390	33,675
400	2,38	0,24	0,571	49,352
500	2,46	0,296	0,728	62,913
600	2,7	0,453	1,223	105,676
700	2,7	0,499	1,347	116,407
800	2,75	0,536	1,474	127,354
900	2,76	0,625	1,725	149,040
1000	2,78	0,698	1,940	167,654
1100	2,78	0,71	1,974	170,536
1200	2,78	0,889	2,471	213,531

Tab. 10: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle Saver im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Werte aus Tab. 11 entstammen der zweiten Messung. Hier wurde die PV-Zelle ausschließlich mit künstlichem Licht aus Leuchtstoffröhren beleuchtet.

Beleuchtungsstärke	Spannung im MPPT-Punkt	Strom im MPPT-Punkt	Elektrische Leistung bei künstlicher Beleuchtung	Elektrische Arbeit in 24 Stunden
E_V / lux	$U_{\text{Mpp}} / \text{V}$	$I_{\text{Mpp}} / \text{mA}$	P / mW	W / J
100	1,32	0,037	0,049	4,220
150	1,59	0,04	0,064	5,495
200	1,78	0,057	0,101	8,766
250	1,91	0,084	0,160	13,862
300	2,02	0,1	0,202	17,453
400	2,18	0,146	0,318	27,499
500	2,27	0,168	0,381	32,950
600	2,55	0,23	0,587	50,674
700	2,63	0,265	0,697	60,216
800	2,68	0,295	0,791	68,308
900	2,75	0,338	0,930	80,309
1000	2,79	0,378	1,055	91,119

Tab. 11 : Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle Saver im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei einer Beleuchtungsstärke von 500 lux können bei künstlicher Beleuchtung 0,0046 J in 24 Stunden pro Quadratmillimeter erzeugt werden.

Zur Veranschaulichung wird in der Abb. 33 die elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und bei künstlichem Licht und die elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht als Diagramm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Licht der Leuchtstoffröhren bei gleicher Beleuchtungsstärke bei Weitem nicht das für die PV-Zelle nutzbare Spektrum abdeckt.

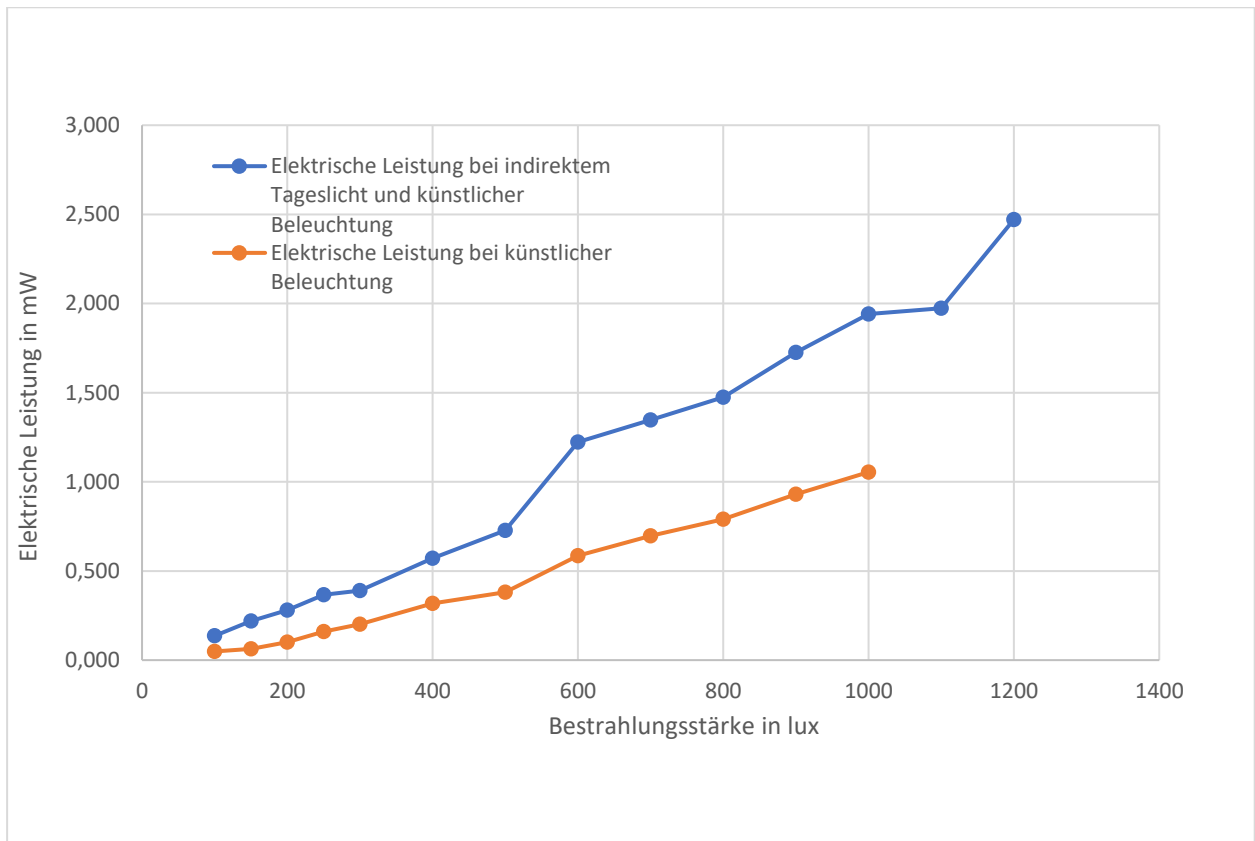


Abb. 33: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4 PV-Zelle CAMTOA 5V 250mA 1.25W

Diese monokristalline PV-Zelle mit einer Fläche von 110 mm x 70 mm (7700 mm²) wird vom Hersteller für Innenräume als besonders geeignet angepriesen. Der Hersteller hat kein Datenblatt zur Verfügung gestellt, deshalb sind die Spannung von 5 V, der Strom von 250 mA und die daraus resultierende Leistung von 1,25 W die einzigen Angaben zu dieser PV-Zelle.

Bei der PV-Zelle wurden die Spannung und der Strom im MPPT-Punkt gemessen. Daraus wurden die elektrische Leistung und die elektrische Arbeit berechnet. Die Messung erfolgte bei indirektem Tageslicht und bei Licht von Leuchtstoffröhren (Tab. 12).

Beleuchtungsstärke	Spannung im MPPT-Punkt	Strom im MPPT-Punkt	Elektrische Leistung bei indirektem Tageslicht und künstlicher Beleuchtung	Elektrische Arbeit in 24 Stunden
E_V / lux	U_{Mpp} / V	I_{Mpp} / mA	P / mW	W / J
100	2,48	0,09	0,223	19,284
150	2,63	0,117	0,308	26,586
200	2,78	0,152	0,423	36,509
250	2,72	0,184	0,500	43,241
300	2,73	0,24	0,655	56,609
400	2,84	0,312	0,886	76,557
500	3,03	0,407	1,233	106,549
600	2,89	0,56	1,618	139,830
700	3,03	0,6	1,818	157,075
800	3,03	0,7	2,121	183,254
900	3,03	0,77	2,333	201,580
1000	3,03	0,925	2,803	242,158
1100	3,03	1,15	3,485	301,061
1200	3,06	1,22	3,733	322,548

Tab. 12: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle CAMTOA im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Messungen, welche in Tab. 13 eingetragen wurden, erfolgten bei Licht aus Leuchtstoffröhren. Hier ist wiederum ein signifikanter Unterschied zu den vorangegangenen Messungen feststellbar. Ist diese PV-Zelle ausschließlich mit künstlichem Licht beaufschlagt, wird die Leistung um über 30% vermindert.

Beleuchtungsstärke	Spannung im MPPT-Punkt	Strom im MPPT-Punkt	Elektrische Leistung bei künstlicher Beleuchtung	Elektrische Arbeit in 24 Stunden
EV / lux	UMpp / V	IMpp / mA	P / mW	W / J
100	2,31	0,06	0,139	11,975
150	2,48	0,075	0,186	16,070
200	2,5	0,096	0,240	20,736
250	2,53	0,106	0,268	23,171
300	2,7	0,167	0,451	38,958
400	2,8	0,218	0,610	52,739
500	2,87	0,25	0,718	61,992
600	3,02	0,33	0,997	86,106
700	3,08	0,387	1,192	102,985
800	3,13	0,433	1,355	117,097
900	3,17	0,493	1,563	135,027
1000	3,22	0,54	1,739	150,232

Tab. 13: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle CAMTOA im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.

Mit Hilfe dieser PV-Zelle lassen sich bei 500 lux künstlicher Beleuchtungsstärke in 24 Stunden 0,0081 J pro Quadratmillimeter aus der Umgebung generieren.

In Abb. 34 wird die Leistungsminderung durch den Verlust des Tageslichtes anhand der Gegenüberstellung der beiden Messszenarien verdeutlicht.

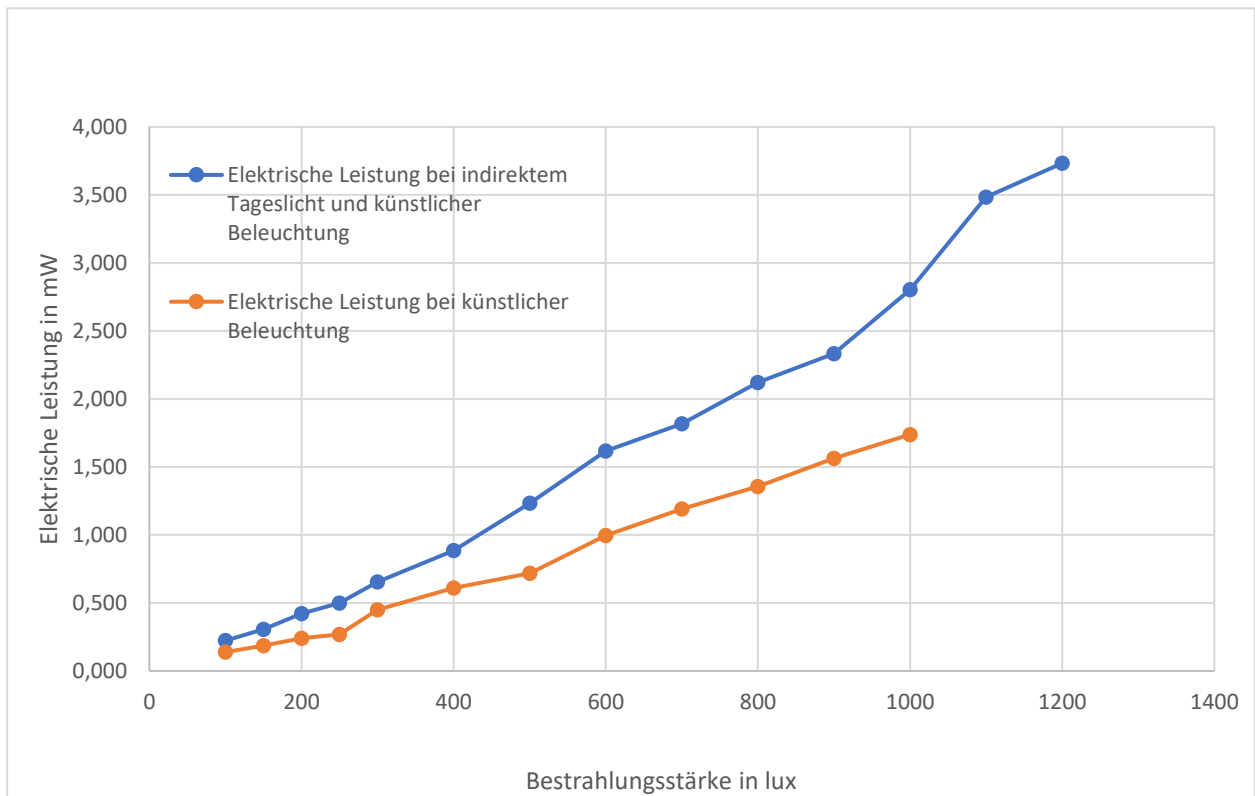


Abb. 34: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5 PV-Zelle Zimo® 5V 1.2W 240mA

Die polykristalline PV-Zelle von Zimo kann unter idealen Bedingungen eine Spannung von 5 V und einen Strom von 240 mA liefern. Daraus ergibt sich eine maximale Leistung von 240 mW, welche die Zelle liefern kann. Die PV-Zelle hat eine Abmessung von 135 mm x 64,7 mm, was einer Fläche von 8734,5 mm² entspricht. Der Distributor stellt kein Datenblatt der Zelle zur Verfügung, deshalb sind dies die einzigen Angaben zur PV-Zelle.

In folgender Tab. 14 finden sich die Messwerte der Spannung und des Stromes im MPPT-Punkt, bei der Beleuchtung mit indirektem Tageslicht kombiniert mit der Beleuchtung von Leuchtstoffröhren.

Beleuchtungsstärke	Spannung im MPPT-Punkt	Strom im MPPT-Punkt	Elektrische Leistung bei indirektem Tageslicht und künstlicher Beleuchtung	Elektrische Arbeit in 24 Stunden
E_v / lux	U_{Mpp} / V	I_{Mpp} / mA	P / mW	W / J
100	1,95	0,1	0,195	16,848
150	2,23	0,128	0,285	24,662
200	2,36	0,167	0,394	34,052
250	2,36	0,2	0,472	40,781
300	2,52	0,234	0,590	50,948
400	2,64	0,31	0,818	70,710
500	2,7	0,331	0,894	77,216
600	2,78	0,425	1,182	102,082
700	2,94	0,68	1,999	172,731
800	2,78	0,847	2,355	203,443
900	2,95	0,9	2,655	229,392
1000	3,08	0,87	2,680	231,517
1100	2,95	1,04	3,068	265,075
1200	2,85	1,22	3,477	300,413

Tab. 14: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle Zimo® im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Messwerte aus folgender Tab. 15 lassen erkennen, dass die elektrische Leistung der PV-Zelle bei rein künstlicher Beleuchtung um mehr als die Hälfte abnimmt.

Beleuchtungsstärke	Spannung im MPPT-Punkt	Strom im MPPT-Punkt	Elektrische Leistung bei künstlicher Beleuchtung	Elektrische Arbeit in 24 Stunden
E_v / lux	$U_{\text{Mpp}} / \text{V}$	$I_{\text{Mpp}} / \text{mA}$	P / mW	W / J
100	1,72	0,04	0,069	5,944
150	2,24	0,045	0,101	8,709
200	2,21	0,07	0,155	13,366
250	2,15	0,1	0,215	18,576
300	2,3	0,11	0,253	21,859
400	2,4	0,15	0,360	31,104
500	2,51	0,2	0,502	43,373
600	2,71	0,27	0,732	63,219
700	2,78	0,315	0,876	75,660
800	2,85	0,354	1,009	87,169
900	2,9	0,398	1,154	99,723
1000	2,95	0,454	1,339	115,716

Tab. 15: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle Zimo® im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.

Jeder Quadratmillimeter dieser Zelle kann in 24 Stunden 0,005 J bei 500 lux künstlicher Beleuchtungsstärke an elektrischer Arbeit generieren.

In Abb. 35 wird die Leistungsminderung durch den Wegfall des Tageslichtes, anhand der Gegenüberstellung der beiden Messszenarien verdeutlicht.

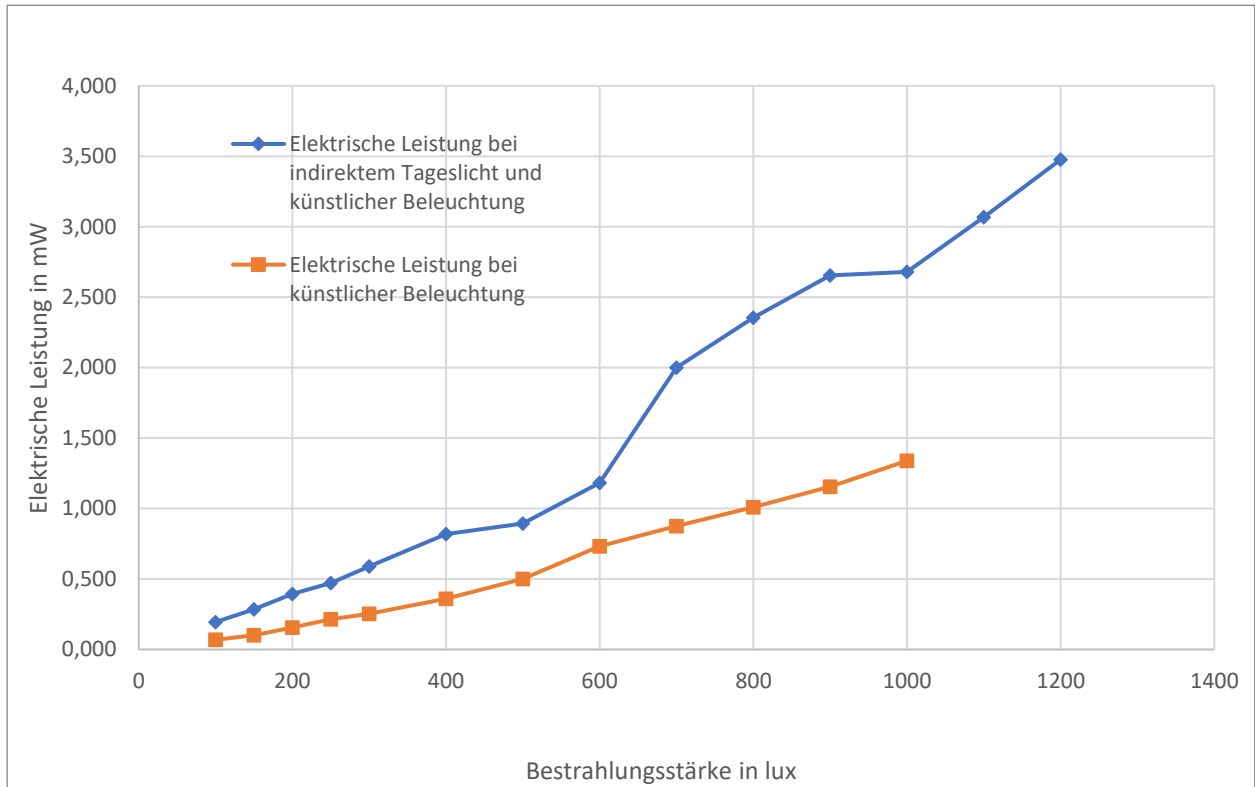


Abb. 35: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung.

6.6 PV-Zelle CASC SC 3GA mA

Die Gallium-Arsenit-PV-Zellen der Firma CASC, die laut ihrem Datenblatt eine Effizienz von 30% besitzen, konnten nur mit der Größe 17 mm x 17 mm geordert werden. Diese haben unter idealen Bedingungen eine maximale Spannung von 4424,9 mV und liefern einen maximalen Strom von 15 mA. Um auf eine mit den anderen PV-Zellen vergleichbare elektrische Leistung zu kommen, wurden 14 PV-Zellen parallelgeschaltet. Die PV-Zellen haben eine elektrische Leistung von ungefähr 0,9 W gemeinsam, bei einer Fläche von 4046 mm².

Die Messungen, die bei indirektem Tageslicht und künstlicher bei Beleuchtung durchgeführt wurden, sind in folgender Tab. 16 eingetragen.

Beleuchtungsstärke	Spannung im MPPT-Punkt	Strom im MPPT-Punkt	Elektrische Leistung bei indirektem Tageslicht und künstlicher Beleuchtung	Elektrische Arbeit in 24 Stunden
E_v / lux	U_{Mpp} / V	I_{Mpp} / mA	P / mW	W / J
100	1,93	0,1	0,193	16,6752
150	1,89	0,13	0,2457	21,22848
200	1,99	0,14	0,2786	24,07104
250	1,97	0,17	0,3349	28,93536
300	2,01	0,23	0,4623	39,94272
400	2,16	0,29	0,6264	54,12096
500	2,1	0,41	0,861	74,3904
600	2,3	0,45	1,035	89,424
700	2,5	0,42	1,05	90,72
800	2,4	0,52	1,248	107,8272
900	2,4	0,69	1,656	143,0784
1000	2,5	0,75	1,875	162
1100	2,5	0,77	1,925	166,32
1200	2,5	0,78	1,95	168,48

Tab. 16: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle CASC im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus der Tab. 16 wird ersichtlich, dass die Gallium-Arsenit PV-Zelle bei deutlich kleinerer Fläche annähernd so viel Energie lukrieren kann wie die polykristalline PV-Zelle von Zimo®. Nur die PV-Zelle von CAMTOA konnte bessere Werte erreichen.

Die Messwerte, die bei künstlicher Beleuchtung erzielt wurden, blieben deutlich hinter den Erwartungen. Aus Tab. 17 ist ersichtlich, dass Gallium-Arsenid PV-Zellen nicht für den Einsatz in geschlossenen Räumen geeignet sind. Das Emissionsspektrum der Leuchtstoffröhren deckt sich nicht mit dem benötigten Bestrahlungsspektrum dieser PV-Zellen.

Beleuchtungsstärke	Spannung im MPPT-Punkt	Strom im MPPT-Punkt	Elektrische Leistung bei künstlicher Beleuchtung	Elektrische Arbeit in 24 Stunden
E_v / lux	U_{Mpp} / V	I_{Mpp} / mA	P / mW	W / J
100	1,66	0,03	0,0498	4,30272
150	1,75	0,04	0,07	6,048
200	1,87	0,06	0,1122	9,69408
250	1,86	0,07	0,1302	11,24928
300	1,91	0,09	0,1719	14,85216
400	1,91	0,1	0,191	16,5024
500	2	0,13	0,26	22,464
600	2,1	0,175	0,3675	31,752
700	2,13	0,196	0,41748	36,070272
800	2,16	0,214	0,46224	39,937536
900	2,18	0,232	0,50576	43,697664
1000	2,2	0,26	0,572	49,4208

Tab. 17: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle CASC im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.

Pro Quadratmillimeter lassen sich 0,0056 Joule an elektrischer Arbeit in 24 Stunden bei einer künstlichen Beleuchtungsstärke von 500 lux generieren.

Wie aus der Gegenüberstellung der beiden Messszenarien aus Abb. 36: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung, ersichtlich, ist die Leistungsminderung durch den Wegfall des Tageslichtanteils der elektromagnetischen Strahlung, bei dieser PV-Zelle besonders signifikant.

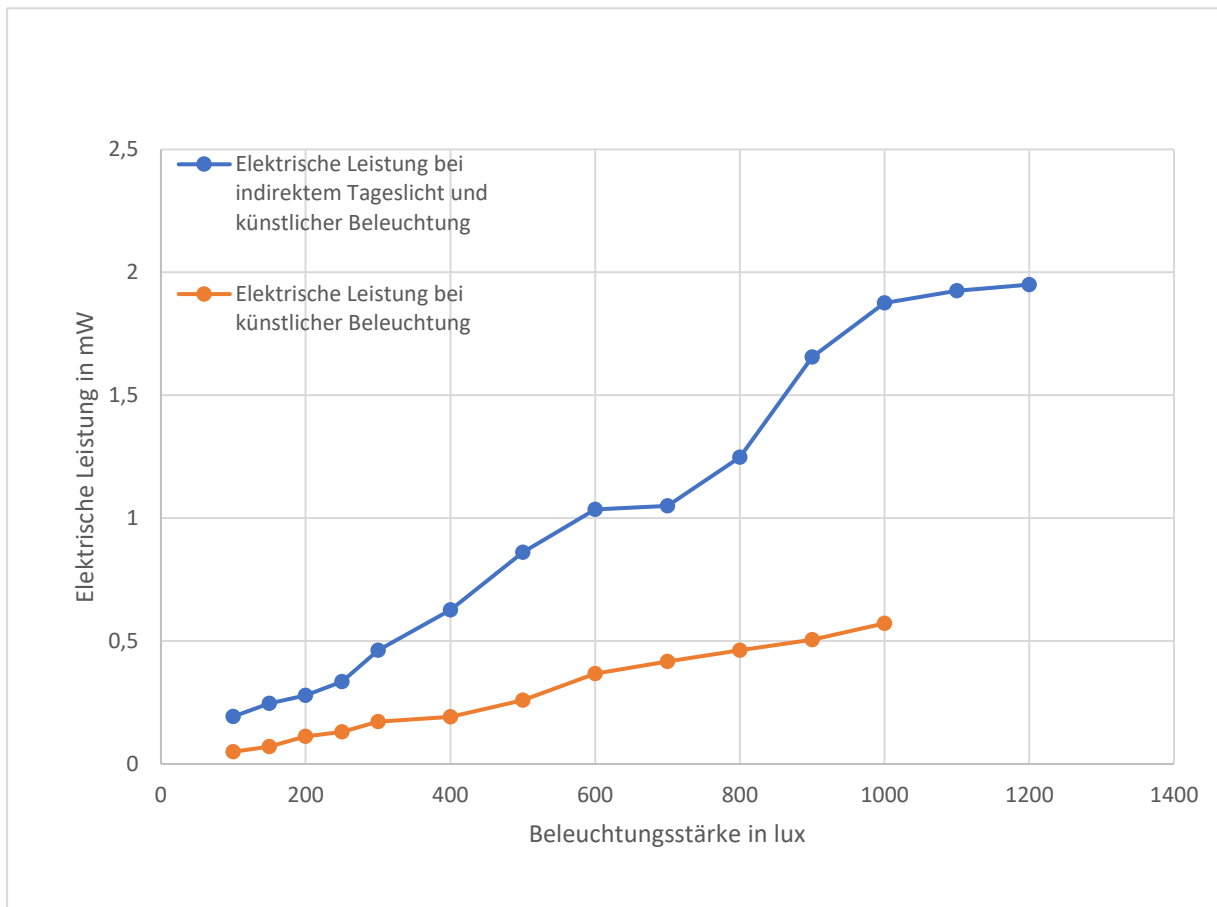


Abb. 36: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung.

6.7 Auswahl der geeigneten PV-Zelle

Um die Auswahl der geeigneten PV-Zelle für das Energy Harvesting Konzept zu vereinfachen, wurde in Abb. 37 die elektrische Leistung der vermessenen Zellen gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass die monokristalline PV-Zelle der Firma CAMTOA mit den zur Verfügung stehenden Beleuchtungsverhältnissen am besten zurechtkommt. Vor allem in dem wichtigen Bereich von 500 lux liegt die Leistungsausbeute dieser Zelle deutlich über der der anderen PV-Zellen. Für die weiteren Vorgehensweisen in dieser Arbeit wird daher diese PV-Zelle verwendet.

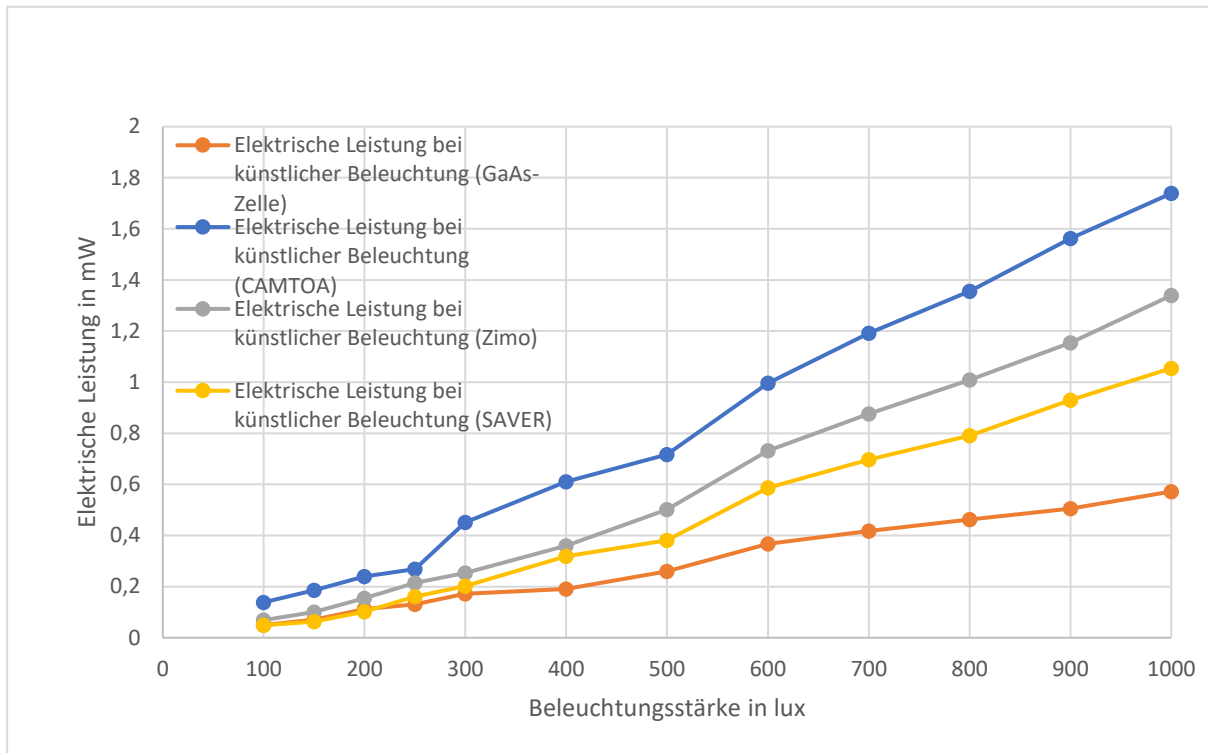


Abb. 37: Gegenüberstellung der elektrischen Leistung der verschiedenen PV-Zellen bei künstlicher Beleuchtung, Quelle: Eigene Darstellung.

7 ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNGSVERHÄLTNISSE IM BETRIEB

Die kabellose Übertragung der Daten erfolgt mit Hilfe von Sendeantennen, welche die leitungsgebundenen elektromagnetischen Wellen in sogenannte Freiraumwellen umwandeln können und Empfangsantennen, welche die empfangenen Freiraumwellen wieder in leitungsgebundene elektromagnetische Wellen zurückwandeln können. Das Übertragungssignal wird nicht nur durch den freien Raum gedämpft, sondern es entstehen bei auftretenden Hindernissen Reflexionen, die zu einer Mehrwegsausbreitung führen.⁵⁰

Die Abschwächung des Signals durch die Dämpfung und die Reflexion ist ein entscheidender Punkt zur Auswahl der geeigneten kabellosen Datenübertragung, weil bei steigender Abschwächung die Sendeleistung des Materialanforderungssenders erhöht werden muss, was zu einer Energieverbrauchssteigerung führt. In diesem Kapitel wird die theoretische Reichweite des Übertragungssignals berechnet und im Anschluss daran mit Messungen unter realen Bedingungen verglichen.

7.1 Abschwächung des Signals

Im Vakuum nimmt die Leistung von elektromagnetischen Wellen quadratisch zur Entfernung vom Ausgangspunkt ab. Dies wird als Freiraumdämpfung bezeichnet. Zusätzlich zu dieser Leistungsabnahme sind elektromagnetische Wellen mit der zu betrachtenden Wellenlänge empfindlicher gegenüber festen Gegenständen. Vor allem mit Eisengittern armierte Betonwände oder Betondecken können das Signal erheblich abschwächen. Des Weiteren sind Überlagerungseffekte, die durch Reflexionen entstehen, für die Abschwächung des Signals verantwortlich.⁵¹

7.2 Berechnung der Datenübertragungreichweite

Um die Reichweite von WLAN und LoRaWAN abschätzen zu können, wird die Freiraumformel nach Friis in Formel (7.2) modifiziert verwendet. Mit Hilfe dieser Gleichung und der Daten bezüglich Ausgangsleistung und Empfindlichkeit des WLAN-Moduls, beziehungsweise des LoRaWAN-Moduls, kann die maximale Datenübertragungreichweite eruiert werden. Zur Berechnung mit der Friis-Formel muss im ersten Schritt die Wellenlänge der jeweiligen Signale ermittelt werden.

⁵⁰ Vgl. Gessler/Krause (2015), S. 81.

⁵¹ Vgl. Kauffels (2008), S. 918 f.

Berechnung der Wellenlänge des WLAN-Signals bei einer Frequenz von 2,4 GHz:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7.1)$$

λ / m	Wellenlänge
$c / m/s$	Lichtgeschwindigkeit
$f / 1/s$	Frequenz

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2,997 * 10^8 \frac{m}{s}}{2,4 * 10^9 \frac{1}{s}} = 0,125 m$$

Berechnung der Wellenlänge des LoRaWAN-Signals bei einer Frequenz von 868 MHz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2,997 * 10^8 \frac{m}{s}}{0,868 * 10^9 \frac{1}{s}} = 0,345 m$$

Sowohl der Antennengewinn beim Sender als auch der Antennengewinn beim Empfänger, der den Wirkungsgrad und die Richtwirkung der Antenne zusammenfasst, sind nicht bekannt, daher werden diese Werte mit Eins angenommen. Die maximale Empfangsleistung des verwendeten WLAN-Moduls WizFi210 beträgt laut dem Datenblatt 8 dBm, was einer Leistung von $6 * 10^{-3} W$ entspricht. Die kleinstmögliche Empfangsleistung hängt von der Datenübertragungsgeschwindigkeit ab und liegt bei -94 dBm ($3,981 * 10^{-13} W$) bei einem Mbps.

Berechnung der theoretisch möglichen Übertragungsdistanz des WLAN-Moduls im Vakuum mittels der Freiraumformel nach Friis:

$$d = \sqrt{\frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * P_r}} \quad (7.2)$$

d / m	Distanz zwischen Sender und Empfänger
P_r / W	Empfangsleistung
P_t / W	Sendeleistung
G_t / dB	Antennengewinn beim Sender
G_r / dB	Antennengewinn beim Empfänger
λ / m	Wellenlänge

$$d = \sqrt{\frac{0,006 W * 1 * 1 * 0,125^2 m}{(4\pi)^2 * 3,981 * 10^{-13} W}} = 1221,18 m$$

Das P-Nucleo LoRaWAN-Modul hat eine größtmögliche Sendeleistung von 20 dBm (0,1 W) und eine minimale Empfangsleistung von -137 dBm ($1,995 * 10^{-17} W$). Die Leistungsübertragungsbilanz des LoRaWAN-Moduls ist mit 157 dBm wesentlich größer als beim WLAN-Modul.

Berechnung der theoretisch möglichen Übertragungsdistanz des LoRaWAN-Moduls:

$$d = \sqrt{\frac{0,1 \text{ W} * 1 * 1 * 0,345^2 \text{ m}}{(4\pi)^2 * 1,995 * 10^{-17} \text{ W}}} = 1943738,25 \text{ m}$$

Die Sende- und Empfangsleistung des Transceivers des P-Nucleo Moduls werden vom Hersteller außergewöhnlich leistungsstark angegeben. Die große Sendedistanz lässt sich vor allem auf die hohe Empfangsempfindlichkeit des Moduls zurückführen und ist illusorisch. Andere Hersteller von Transceivern, wie zum Beispiel Nordic Semiconductor, die den in der Praxis häufig eingesetzten Transceiver nRF905 herstellen, geben die Sendeleistung mit 10dBm und die Empfangsleistung mit -100 dBm an. Da diese Werte viel realistischer erscheinen, werden die weiteren Berechnungen mit diesen Werten durchgeführt.

Berechnung der theoretisch möglichen Übertragungsdistanz des LoRaWAN-Moduls mit einem nRF905 Transceiver von Nordic Semiconductors:

$$d = \sqrt{\frac{0,01 \text{ W} * 1 * 1 * 0,345^2 \text{ m}}{(4\pi)^2 * 10 * 10^{-14} \text{ W}}} = 8681,79 \text{ m}$$

Auch diese theoretische Übertragungsdistanz scheint sehr hoch zu sein, kommt der Realität aber näher.

Die Friis-Gleichung ist nur für den Freiraum gültig, deshalb wird zur Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen, wie Reflexionen und Abschattungen, der Pfadverlustexponent n, der aus der Tab. 18 ersichtlich ist, für unterschiedliche Umgebungen miteinberechnet. Hieraus errechnet sich der allgemeine Pfadverlust L.⁵²

Da die Materialanforderungssender in Produktionshallen mit Zwischenwänden aus Stahlbeton betrieben werden, wird aus der Tab. 18 der größtmögliche Pfadverlustexponent gewählt.

Umgebung	Pfadverlust n
Freiraum (freie Sichtverbindung)	2,0
Städtische Umgebung	2,7 - 3,5
Abgeschattete städtische Umgebung	3,0 - 5,0
Innerhalb von Gebäuden, mit Sichtbehinderung	4,0 - 6,0
Innerhalb von Fabriken, mit Sichtbehinderung	2,0 - 3,0

Tab. 18: Pfadverlustexponenten für unterschiedliche Umgebungen, Quelle: Gessler/Krause (2015), S. 82.

⁵² Vgl. Gessler/Krause (2015), S. 82.

Berechnung des Leistungsverlustfaktors L für das WLAN-Modul:

$$L = 10,99 * n + 10 * n * \log(d) + 10 * n * \log\left(\frac{1}{\lambda}\right) \quad (7.3)$$

$L / 1$	Faktor für Leistungsverlust
n / n	Pfadverlust
d / m	Maximale Distanz zwischen Sender und Empfänger im Freiraum
λ / m	Wellenlänge

$$L = 10,99 * 6 + 10 * 6 * \log(1221,18 \text{ m}) + 10 * 6 * \log\left(\frac{1}{0,125 \text{ m}}\right) = 305,33$$

Berechnung des Leistungsverlustfaktors L für das LoRaWAN-Modul mit einem nRF905 Transceiver von Nordic Semiconductors:

$$L = 10,99 * 6 + 10 * 6 * \log(8681,79 \text{ m}) + 10 * 6 * \log\left(\frac{1}{0,345 \text{ m}}\right) = 329,99$$

Mit Hilfe dieses Leistungsverlustfaktors kann nun die theoretische Reichweite der drahtlosen lokalen Netzwerke innerhalb von Gebäuden mit Sichtbehinderung berechnet werden.

Berechnung der theoretisch möglichen Übertragungsdistanz des WLAN-Moduls innerhalb von Gebäuden mit Sichtbehinderung anhand der erweiterten Freiraumformel nach Friis:

$$d = \sqrt{\frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * P_r * L}} \quad (7.4)$$

d / m	Distanz zwischen Sender und Empfänger
P_r / W	Kleinstmögliche Empfangsleistung
P_t / W	Größtmögliche Sendeleistung
G_t / dB	Antennengewinn beim Sender
G_r / dB	Antennengewinn beim Empfänger
λ / m	Wellenlänge
$L / 1$	Faktor für Leistungsverlust

$$d = \sqrt{\frac{0,006 \text{ W} * 1 * 1 * 0,125^2 \text{ m}}{(4\pi)^2 * 3,981 * 10^{-13} \text{ W} * 305,33}} = 69,89 \text{ m}$$

Berechnung der theoretisch möglichen Übertragungsdistanz des LoRaWAN-Moduls mit einem nRF905 Transceiver von Nordic Semiconductors innerhalb von Gebäuden mit Sichtbehinderung:

$$d = \sqrt{\frac{0,01 \text{ W} * 1 * 1 * 0,345^2 \text{ m}}{(4\pi)^2 * 10 * 10^{-14} \text{ W} * 329,99}} = 477,92 \text{ m}$$

Wie aus dieser Berechnung hervorgeht, ist die Datenübertragung mit einer niedrigeren Frequenz in Gebäuden bezüglich der Reichweite vorteilhafter.

7.3 Praktische Messung der Datenübertragungreichweite

In diesem Abschnitt erfolgt die praktische Messung der Datenübertragungreichweite von WLAN und LoRaWAN in einer Halle.

7.3.1 Verwendeter LoRaWAN-Router

Für die praktische Messung der Übertragungreichweite der Daten, wurde der Router MultiConnect Conduit der Firma MULTITECH verwendet. Dieser programmierbare Router, welcher speziell für industrielle IoT Anwendungen konzipiert wurde, ermöglicht eine bidirektionale Kommunikation im 868 MHz Frequenzbereich, welcher von LoRaWAN verwendet wird.

7.3.2 Ort der Messung

Die praktische Messung der Datenübertragungreichweite des WLAN-Moduls und des LoRaWAN-Moduls fand in einer Logistikhalle statt. Wie aus Abb. 38 ersichtlich, hat die Halle eine Länge von 131 m und eine maximale Breite von 69 m. Die einzelnen Hallenabschnitte werden durch 15 cm dicke Stahlbetonwände voneinander getrennt. Zwischen den einzelnen Hallensegmenten befindet sich jeweils eine Durchfahrt für Förderfahrzeuge, die während der Messung geöffnet war. In der Lagerhalle finden sich mehrere Abschnitte mit Bodenblocklagern und Regallagern. Die Regallager, die eine Höhe von sechs Metern aufwiesen, waren nicht vollständig mit Waren befüllt. Die Router der beiden Datenübertragungssysteme wurden an einem exponierten Punkt in drei Metern Höhe aufgebaut.

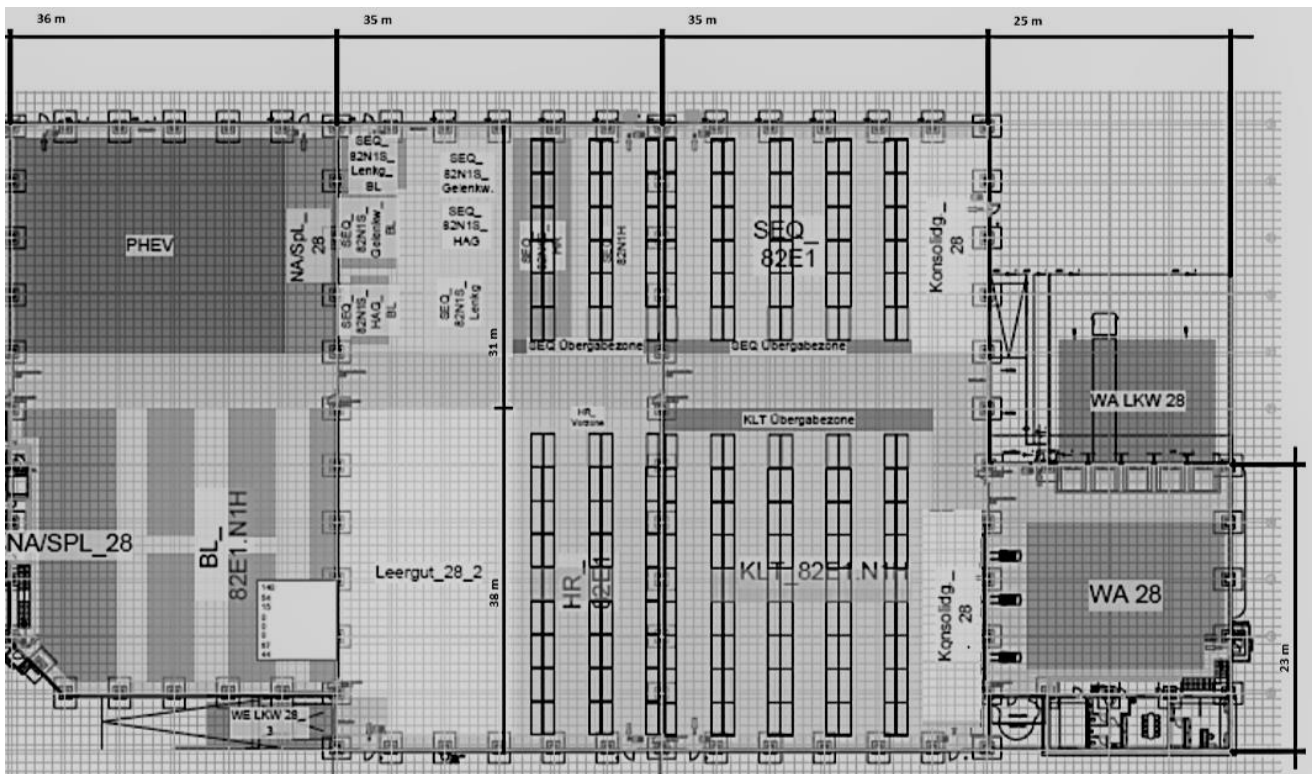


Abb. 38: Ort der praktischen Messung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Datenübertragungsreichweite wurde mit Hilfe des Received Signal Strength Indication Wertes (RSSI) ermittelt. Dieser Wert ist ein Indikator für die Empfangsfeldstärke und gibt diese in dBm wieder. Der RSSI-Wert wurde an allen Außenkanten und an den Durchfahrtmöglichkeiten der Hallensegmente gemessen und dokumentiert.

7.3.3 Messung der Übertragungsreichweite mit dem WLAN-Modul

Wie aus Abb. 39 ersichtlich, ist die Empfangsleistung im Hallenabschnitt, in welchem sich der WLAN-Router befindet, ausreichend. Im nächsten Abschnitt der Halle sinkt der RSSI-Wert an den Stellen, die am entferntesten vom Router sind, unter -84 dBm. Laut dem Datenblatt beginnt sich die Datenübertragungsgeschwindigkeit ab diesem Wert zu verringern. Im dritten Abschnitt der Halle konnte kein Signal empfangen werden. Die maximale Datenübertragungsreichweite vom Router zum am weitest entfernten Messpunkt, an dem der RSSI-Wert empfangen wurde, beträgt ungefähr 85 m. Das übertrifft den im vorigen Abschnitt berechneten Wert und bestätigt die Richtigkeit der Angaben im Datenblatt des WLAN-Moduls.

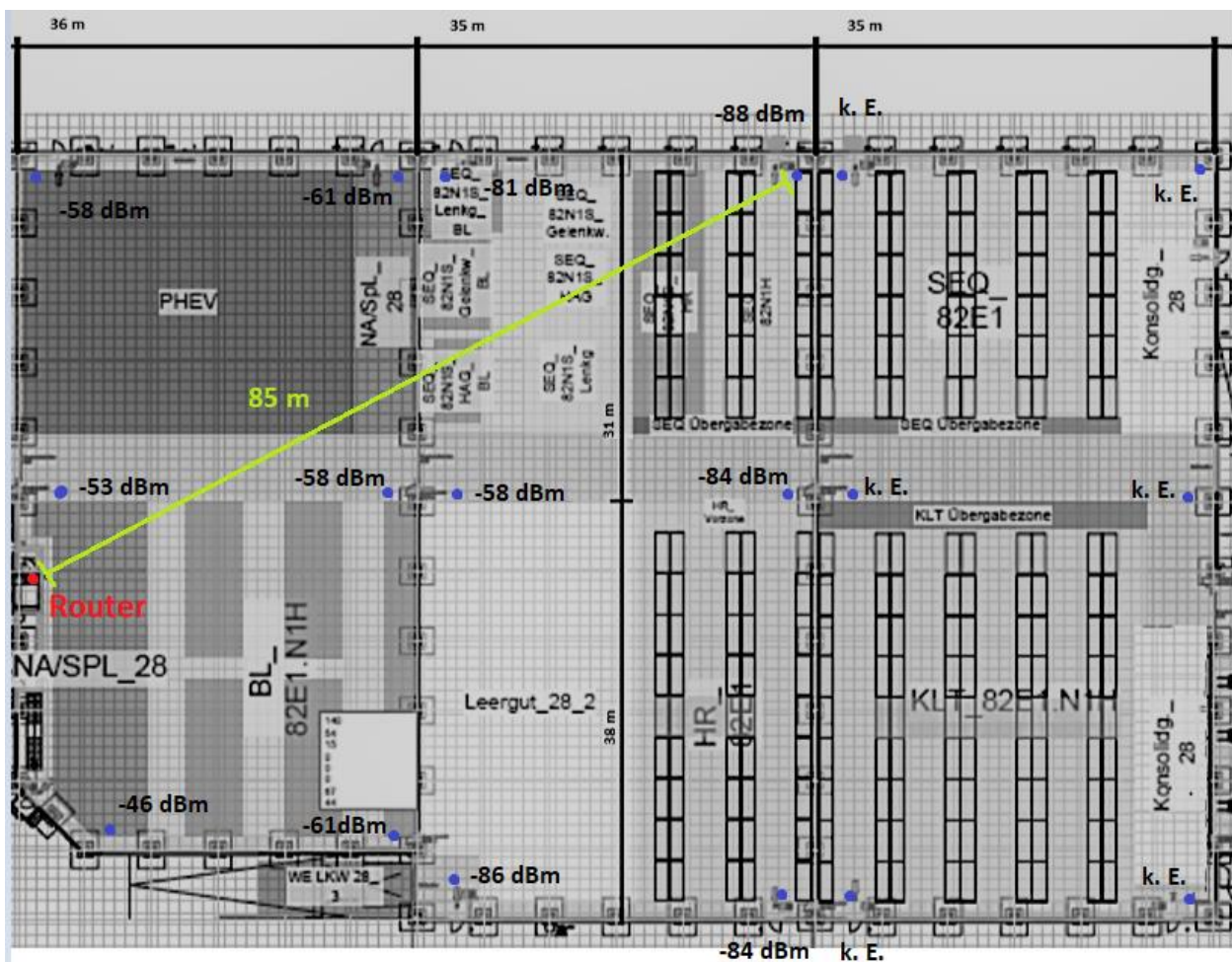


Abb. 39: Reichweitenmessung mittels WLAN, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Verdeutlichung werden die gemessenen RSSI-Werte in Abb. 40 farblich dargestellt. In den grün dargestellten Bereichen ist die volle Datenübertragungsleistung vorhanden. In den Abschnitten, die gelb dargestellt sind, kommt es auf Grund der Abschwächung des Signals zur Beeinträchtigung der Übertragungsgeschwindigkeit. Die Bereiche ohne Empfang wurden in roter Farbe gekennzeichnet.

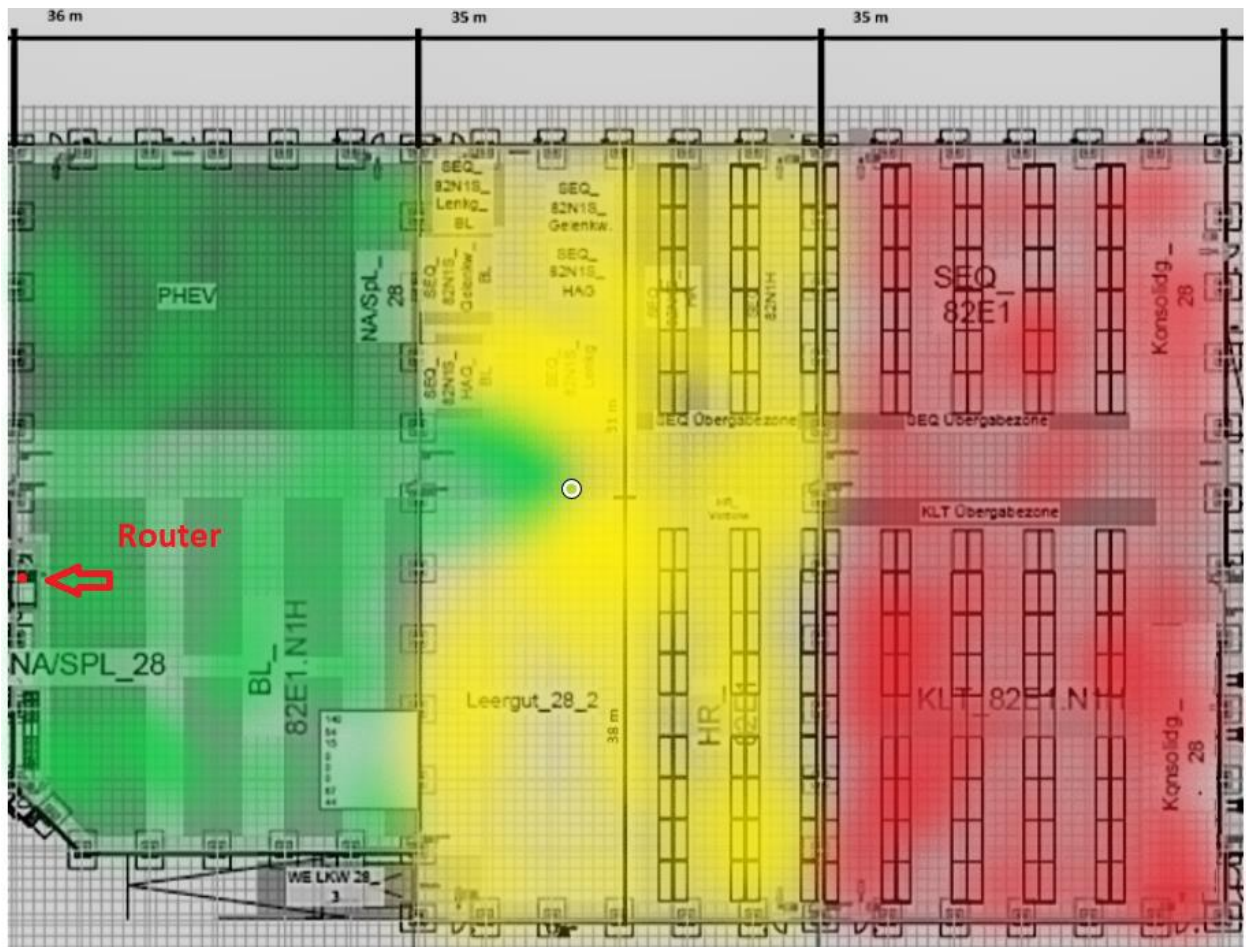


Abb. 40: Farblich hinterlegte Darstellung der Reichweite mittels WLAN, Quelle: Eigene Darstellung.

7.3.4 Messung der Übertragungsreichweite mit dem LoRaWAN-Modul

Wie aus Abb. 41 ersichtlich, kann ein RSSI-Wert an fast allen Stellen der Lagerhalle empfangen werden. Die maximale Datenübertragungsreichweite beträgt 131 m. Dieser Wert liegt deutlich unter dem theoretischen Wert, der im letzten Abschnitt berechnet wurde. Die Datenübertragungsreichweite vom LoRaWAN ist dennoch wesentlich höher als die vom WLAN.

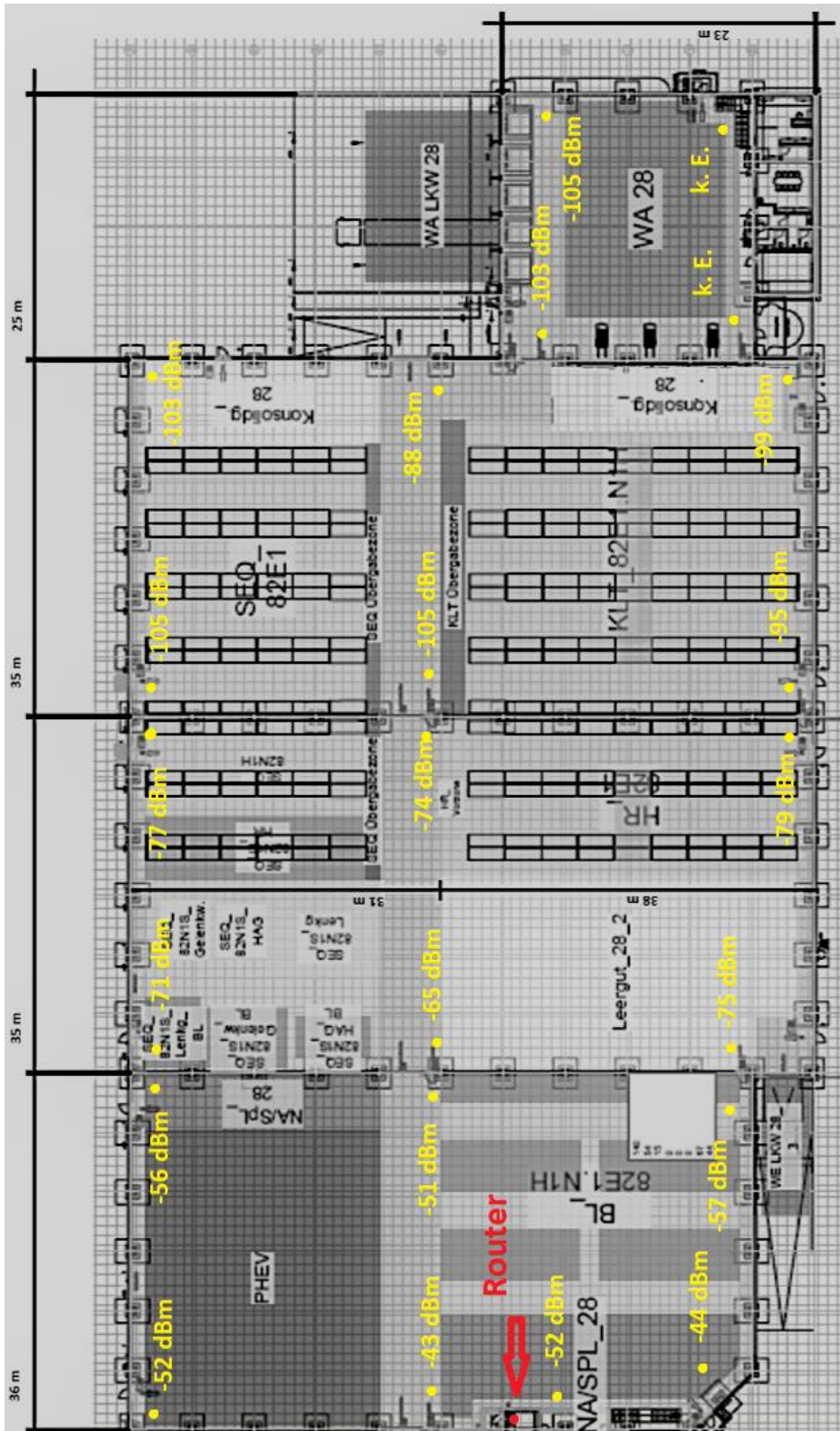


Abb. 41: Szenario 1 Reichweitenmessung mittels LoRaWAN, Quelle: Eigene Darstellung.

Laut dem Datenblatt des Transceivers nimmt die Datenübertragungsgeschwindigkeit unter -92 dBm stark ab. Daher wurden diese Bereiche in Abb. 42 gelb hinterlegt. In den grün gekennzeichneten Bereichen sind Datenübertragungsgeschwindigkeiten bis 250 kbps möglich. Im rot gekennzeichneten Bereich war die Empfangsleistung zu gering, um Daten übertragen zu können.

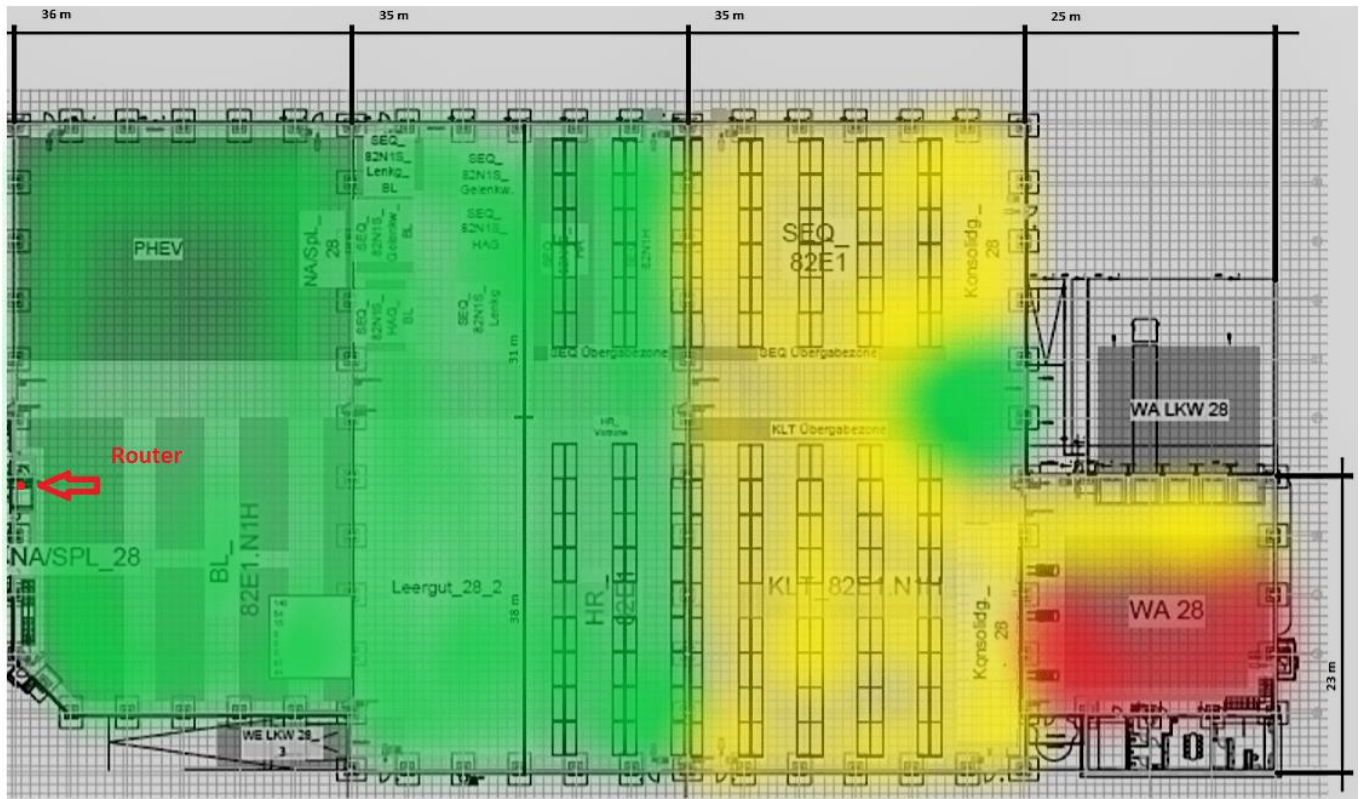


Abb. 42: farblich hinterlegte Darstellung der Reichweite mittels LoRaWAN, Quelle: Eigene Darstellung.

7.4 Auswahl des geeigneten Datenübertragungssystems

Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, ist die Reichweite der Datenübertragung von LoRaWAN deutlich höher als die von WLAN. Da keine hohe Datenübertragungsgeschwindigkeit für das Anforderungssystem nötig ist, der Energieverbrauch deutlich geringer und höhere Datenübertragungsradien möglich sind, wird in dieser Arbeit LoRaWAN zur kabellosen Datenübertragung verwendet.

8 AUSLEGUNGSTABELLE FÜR DEN EINSATZ DES MATERIALANFORDERUNGSSYSTEMS

In diesem Kapitel wird eine Auslegungstabelle für den Einsatz des Materialanforderungssystems erstellt. Diese Tabelle soll einerseits in dieser Arbeit als Übersicht über die zuvor getätigten Messungen und Berechnungen dienen und andererseits den Betreibern des Materialanforderungssystems eine sofortige Auswahl der geeigneten Variante des Anforderungssystems unter den gegebenen Bedingungen ermöglichen.

8.1 Auslegungstabelle bei konstanter Fläche der PV-Zelle

Mit Hilfe dieser Auslegungstabelle ist es dem Betreiber des Materialanforderungssystems, welcher auch die Montage der Materialanforderungssender durchführt, möglich, die Anzahl der machbaren Anforderungsvorgänge in 24 Stunden, mit den drei verschiedenen Varianten des Systems, abhängig von der Beleuchtungsstärke zu erkennen. Die Anzahl der möglichen Anforderungsvorgänge hängt von mehreren Parametern ab:

- von der verwendeten Variante des Materialanforderungssystems.
- von der Beleuchtungsstärke am Einsatzort des Anforderungssenders.
- von den Eigenschaften der verwendeten PV-Zelle.

In dieser Auslegungstabelle wird angenommen, dass die Fläche der verwendeten PV-Zelle CAMTOA, welche in Kapitel 6.4 vermessen wurde, konstant bleibt (7700 mm²). Daher wurden für die weiteren Berechnungen die Werte aus der Tab. 13, welche die Messung zur elektrischen Arbeit der PV-Zelle in 24 Stunden beinhaltet, herangezogen. Um die Anzahl der möglichen Anforderungsvorgänge der unterschiedlichen Varianten des Systems bei der jeweiligen Beleuchtungsstärke eruiieren zu können, wurden die Werte der Energiebedarfsmessung, welche sich im Kapitel 1.4.6 befinden, für die weiteren Berechnungen genutzt.

8.1.1.1 Berechnung des Energiebedarfs je Materialanforderung der Variante eins des Materialanforderungssystems

Wie aus dem Kapitel 1.4.6 zu entnehmen ist, benötigt der LoRaWAN-Transceiver für jeden Sende- und Empfangsvorgang 0,23148 J an elektrischer Arbeit. Der Energieverbrauch im Sleep-Modus von 2,57 J in 24 Stunden wird durch die Sendedauer von zwei Sekunden nur geringfügig vermindert. Dieser Wert wird daher für die weitere Berechnung als konstant angenommen. Die Anzahl der möglichen Materialanforderungen mit dieser Variante des Systems sind in der Tab. 19 zu finden.

$$W = n * W_{Datex} + W_{Sleep} \quad (8.1)$$

W / J	Elektrische Arbeit
$n / 1$	Anzahl der Materialanforderungen
W_{Datex} / J	Elektrische Arbeit beim Datentransfer
W_{Sleep} / J	Elektrische Arbeit im Sleep-Modus

8.1.1.2 Berechnung des Energiebedarfs je Materialanforderung der Variante zwei des Materialanforderungssystems

Eine Materialanforderung dieser Variante besteht aus sechs Datenübertragungsvorgängen zu je 0,23148 J, 30 Minuten blinkende LED zu je 15,3 J und 2,57 J Energiebedarf für den Sleep-Modus in 24 Stunden. Der Energiebedarf für den Sleep-Modus wird auch hier als konstant angenommen, da sich der Wert durch die steigende Anzahl der Materialanforderungen nur geringfügig verändert. Die mögliche Anzahl der Materialanforderungen, abhängig von der Beleuchtungsstärke, finden sich in der Tab. 19.

$$W = 6 * n * W_{Datex} + n * W_{LED} + W_{Sleep} \quad (8.2)$$

W / J	Elektrische Arbeit
$n / 1$	Anzahl der Materialanforderungen
W_{Datex} / J	Elektrische Arbeit beim Datentransfer
W_{LED} / J	Elektrische Arbeit für die LED
W_{Sleep} / J	Elektrische Arbeit im Sleep-Modus

8.1.1.3 Berechnung des Energiebedarfs je Materialanforderung der Variante drei des Materialanforderungssystems

Bei einem Materialanforderungsvorgang mit dieser Variante des Systems werden sechs Mal 0,23148 J an elektrischer Arbeit für den Datenverkehr benötigt. Des Weiteren werden 2,57 J für den Sleep-Modus, $3,94 \cdot 10^{-3}$ J pro Datenübertragung für das E-Ink-Display und 0,52 J für den Deep-Sleep-Modus des Displays benötigt. Die elektrische Arbeit im Sleep-Modus des Transceivers und im Deep-Sleep-Modus des Displays werden als konstant angenommen, da sich die Werte mit der steigenden Anzahl der Materialanforderungen nur unwesentlich verändern. Die erreichbare Anzahl der Materialanforderungen in dieser Variante des Systems ist in der Tab. 19 zu finden.

$$W = 6 * n * W_{Datex} + n * W_{E-ink} + W_{Sleep} + W_{Deep} \quad (8.3)$$

W / J	Elektrische Arbeit
$n / 1$	Anzahl der Materialanforderungen
W_{Datex} / J	Elektrische Arbeit beim Datentransfer
W_{E-Ink} / J	Elektrische Arbeit für die Änderung am Display
W_{Sleep} / J	Elektrische Arbeit im Sleep-Modus
W_{Deep} / J	Elektrische Arbeit im Deep-Sleep-Modus des Displays

Auslegungstabelle für den Einsatz des Materialanforderungssystems

Beleuchtungsstärke	Generierte elektrische Arbeit in 24 Stunden	Anzahl der möglichen Anforderungsvorgänge in 24 Stunden bei Variante eins	Anzahl der möglichen Anforderungsvorgänge in 24 Stunden bei Variante zwei	Anzahl der möglichen Anforderungsvorgänge in 24 Stunden bei Variante drei
E_v / lux	W / J			
200	20,736	78	1	12
300	38,958	157	2	25
400	52,739	216	3	35
500	61,992	256	3	42
600	86,106	360	5	59
700	102,985	433	6	71
800	117,097	494	6	81
900	135,027	572	7	94
1000	150,232	637	8	105

Tab. 19: Auslegungstabelle für den Materialanforderungssender bei konstanter Fläche der PV-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie aus dieser Tabelle hervorgeht, kann die Forderung des Betreibers des Materialanforderungssystems, dass mit der Variante zwei des Systems vier Materialanforderungen in 24 Stunden getätigt werden bei 500 lux Beleuchtungsstärke, die mindestens zur Verfügung gestellt werden müssen, nicht erfüllt werden.

Die Anzahl der möglichen Anforderungsvorgänge in 24 Stunden, welche mit den Materialanforderungssendern in der Variante zwei durchgeführt werden können, sind in Abb. 43 als Diagramm dargestellt. Bei 500 lux Beleuchtungsstärke, die der Betreiber des Materialanforderungssystems mindestens bereitstellt, müsste die Beleuchtungsstärke um 59 lux erhöht werden, um einen weiteren Anforderungsvorgang in 24 Stunden tätigen zu können. Dieser und weitere Punkte, bei denen eine geringfügige Erhöhung der Beleuchtungsstärke einen zusätzlichen Anforderungsvorgang in 24 Stunden ermöglichen würde, sind ebenfalls in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

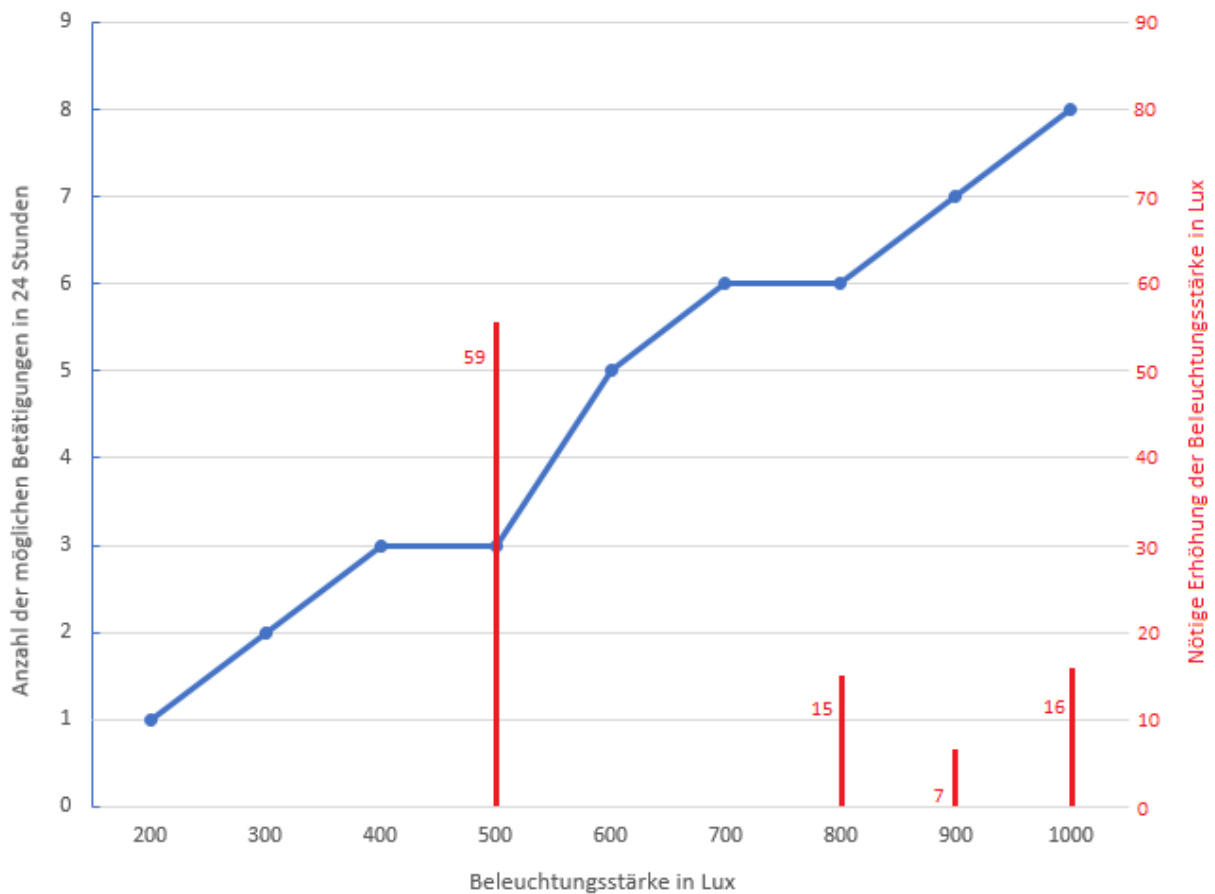


Abb. 43: Anzahl der möglichen Betätigungen abhängig von der Beleuchtungsstärke und der nötigen Erhöhung der Beleuchtungsstärke, um eine weitere Anforderung in 24 Stunden vornehmen zu können, Quelle: Eigene Darstellung.

8.2 Auslegungstabelle bei vier Materialanforderungsvorgängen und variabler Fläche der PV-Zelle

Die folgende Tab. 20 gibt eine Übersicht darüber, welche Fläche der PV-Zelle CAMTOA für die jeweiligen Variante benötigt wird, um vier Materialanforderungen in 24 Stunden tätigen zu können. Dies ist insofern von Bedeutung, weil es nicht nötig sein wird, eine PV-Zelle mit derselben Fläche von 7700 mm², wie die in Kapitel 6.4 angeführte Zelle, zu verwenden, da auf Grund des geringeren Energiebedarfes in der Variante eins und in der Variante drei des Materialanforderungssystems deutlich weniger PV-Fläche benötigt wird.

Beleuchtungsstärke	Generierte elektrische Arbeit je mm ² in 24 Stunden	Benötigte Fläche der PV-Zelle für vier Datenübertragungsvorgänge in Variante eins	Benötigte Fläche der PV-Zelle für vier Datenübertragungsvorgänge in Variante zwei	Benötigte Fläche der PV-Zelle für vier Datenübertragungsvorgänge in Variante drei
E_v / lux	W / J	A / mm ²	A / mm ²	A / mm ²
200	$2,69 \cdot 10^{-3}$	1300	25743	3212
300	$5,06 \cdot 10^{-3}$	692	13702	1710
400	$6,85 \cdot 10^{-3}$	511	10122	1263
500	$8,05 \cdot 10^{-3}$	435	8611	1074
600	$11,2 \cdot 10^{-3}$	313	6199	774
700	$13,4 \cdot 10^{-3}$	262	5183	647
800	$15,2 \cdot 10^{-3}$	230	4559	569
900	$17,5 \cdot 10^{-3}$	200	3953	493
1000	$19,5 \cdot 10^{-3}$	179	3553	443

Tab. 20: Auslegungstabelle für den Materialanforderungssender bei vier Materialanforderungsvorgängen und variabler Fläche der PV-Zelle CAMTOA, Quelle: Eigene Darstellung.

9 TESTAUFBAU DER KONZEPTION

Um die Berechnungen des Energieverbrauches des Materialanforderungssenders und des Energieertrages des Energie Harvesters zu verifizieren, wird in diesem Kapitel ein Testaufbau realisiert. Mit Hilfe dieses Aufbaues wird eine Messung über 24 Stunden, was einem Arbeitstag entspricht, simuliert, um den Energieertrag und den Energieverbrauch des Systems gegenüberzustellen. Die Datenaufzeichnung der Langzeitmessung erfolgt mit dem graphischen Programmiersystem „Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench“ (LabVIEW). Als Ausgangspunkt des Testaufbaus dient die Variante zwei des Materialanforderungssenders. In dieser werden vier Materialanforderungen mit jeweils fünf Statusupdates in 24 Stunden getätigt. Der Status der Materialanforderung wird mit blinkenden Leuchtdioden dargestellt.

9.1 Mögliche Messmethoden

Es gibt mehrere Methoden, den Energieverbrauch des Materialanforderungssenders und den Energieertrag des Energy Harvesters zu messen:

- Messung des Verlaufs der Spannung des Akkumulators über die Zeit.
- Impedance Track am Akkumulator.
- Erfassen der eingespeisten und der entnommenen Energie.

Die Messungen können direkt am Akkumulator erfolgen oder unabhängig von diesem stattfinden. Diese Methoden haben gemeinsam, dass sie Aufzeichnungen über einen längeren Zeitraum benötigen um an Genauigkeit zu gewinnen. Nachfolgend werden die Methoden kurz erklärt.

9.1.1 Messung der Spannung über die Zeit

Bei abnehmender Kapazität des Lithium-Ionen Akkumulators sinkt auch die zu entnehmende Spannung. Die Akkumulatoren haben im vollständig geladenen Zustand eine maximale Spannung von 4,2 V. Wie aus Abb. 44 ersichtlich, ist die Geschwindigkeit, mit welcher die Spannung sinkt, abhängig von der Temperatur und der Entladerate (C), welche ein Maß für den maximal zulässigen Lade- und Entladestrom bezogen auf die Nennkapazität des Akkumulators darstellt. Auf Grund dieser Einflussfaktoren ist diese Methode nicht genau genug, um für diese Arbeit genutzt werden zu können.

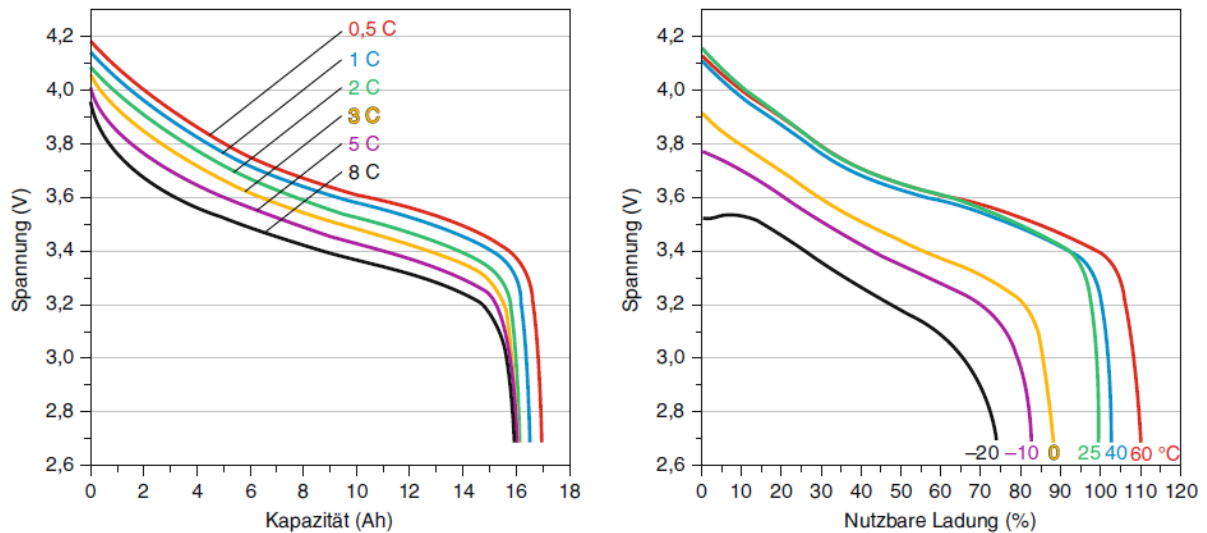


Abb. 44: Entladekurve eines 17 Ah / 3,7 V Lithium-Ionen Akkumulators bei unterschiedlichen Belastungen und Temperaturen, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 225.

9.1.2 Messung mit Impedance Track

Impedance Track ist ein Algorithmus, welcher von Texas Instruments (TI) zum Überwachen von Lithium-Ionen Akkumulatoren entwickelt wurde. Der Impedance Track Algorithmus verwendet drei verschiedene Arten von Informationen von dem zu überwachenden Akkumulator:

- chemisch: Entladungstiefe und chemische Gesamtkapazität Q_{max} .
- elektrisch: interner Widerstand der Batterie abhängig von der Entladungstiefe.
- extern: Last und Temperatur.

Mit Hilfe dieser Informationen und einer geeigneten integrierten Schaltung (Integrated Circuit, IC) von Texas Instruments können der Ladezustand und die Alterung der Zellen berechnet werden. Die kostenlose Software von TI ermöglicht eine Visualisierung des Ladezustandes des Akkumulators. Die Nachteile dieses Systems sind die hohen Anschaffungskosten und der aufwändige Algorithmus im Hintergrund.⁵³

9.1.3 Erfassen der eingespeisten und der entnommenen Energie

Bei dieser Methode wird die zugeführte Energie mittels Voltmeter und Amperemeter gemessen und die entnommene Energie, die ebenfalls mit Volt- und Amperemeter gemessen wird, gegenübergestellt. Bei dieser Art der Messung können die Batteriealterung und externe Einflüsse, wie zum Beispiel die Temperatur, vernachlässigt werden, weil die Messung den Akkumulator nicht direkt miteinbezieht. Mit Hilfe dieser Methode und des Programms LabVIEW kann eine Langzeitmessung realisiert werden.

⁵³ Vgl. (Tex06), S. 1 ff.

9.2 Darstellung des Messaufbaues

Wie aus Abb. 45 ersichtlich, wurde für den Messaufbau das Energy Harvesting Modul, das in Kapitel 6.1 beschrieben wird, verwendet. An dieses Modul wurden die Solarzelle, welche als Energiequelle dient, der Akkumulator und der Materialanforderungssender, der den Verbraucher darstellt, angeschlossen.

Da der Innenwiderstand und der Ausgangsstrom der Solarzelle sehr gering sind, werden die Messgeräte hier in einer Stromfehlerschaltung angeordnet. Der Innenwiderstand der Solarzelle und des Amperemeters sind in Serie geschaltet. Das Voltmeter, welches sich nach dem Amperemeter befindet, wird auf Grund der Anordnung der Geräte von einem geringen Strom durchflossen und verfälscht daher die Spannungsmessung. Da dieser Strom durch den hohen Innenwiderstand des Voltmeters sehr klein ausfallen wird, kann dies vernachlässigt werden. Der Innenwiderstand des Materialanforderungssenders ist sehr hoch, weshalb die Messgeräte zu einer Spannungsfehlerschaltung angeordnet werden. Es ergibt sich ein Spannungsteiler aus dem Innenwiderstand des Amperemeters und dem Innenwiderstand des Materialanforderungssenders. Der daraus resultierende Spannungsabfall im Amperemeter verfälscht das Messergebnis des Voltmeters. Da der Innenwiderstand des Amperemeters sehr klein ist, kann dieser Messfehler vernachlässigt werden.⁵⁴

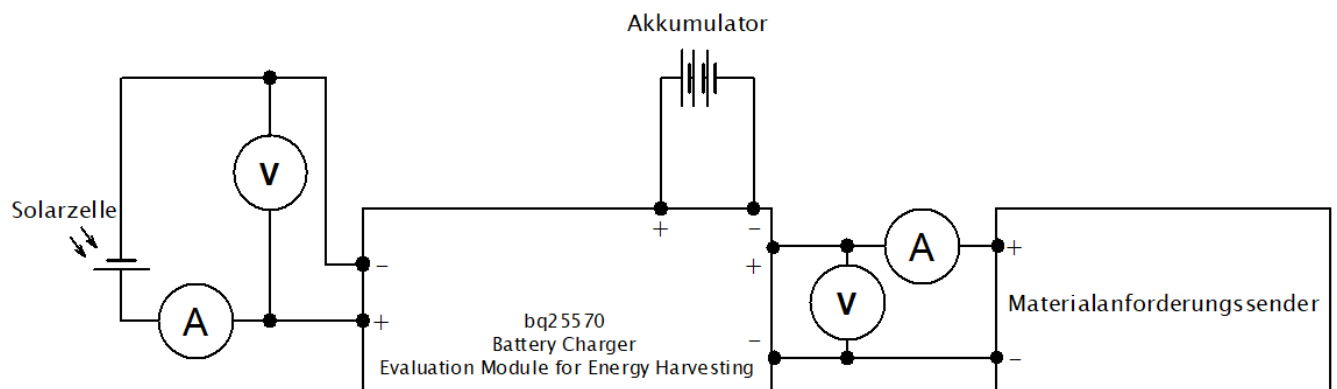


Abb. 45: Darstellung des Messaufbaus, Quelle: Eigene Darstellung.

⁵⁴ Vgl. Schrüfer (2007), S. 208 f.

In folgender Tab. 21 sind alle Messegeräte, die für die Langzeitmessung verwendet wurden, aufgelistet.

Name	Typ	Seriennummer
Hewlett-Packard 34404A	Digitales Multimeter	US36067985
Hewlett-Packard 34404A	Digitales Multimeter	US36060990
Hewlett-Packard 34404A	Digitales Multimeter	US36061016
Hewlett-Packard 34404A	Digitales Multimeter	US36060996
EXTECH-Instruments 45170	Luxmeter	

Tab. 21: Liste der verwendeten Messgeräte, Quelle: Eigene Darstellung.

9.3 LabVIEW zur Datenaufzeichnung

LabVIEW ist eine Entwicklungsumgebung und grafische Programmiersprache für Mess-, Regel- und Automatisierungsaufgaben von National Instruments. Mit Hilfe dieser Software können virtuelle Messinstrumente (Virtual Instrument, VI) erzeugt werden, welche in Funktionsblöcken in einem Blockdiagramm dargestellt sind. Ein VI besteht immer aus einem Frontpanel, welches die Benutzeroberfläche des Programms darstellt, und einem Blockdiagramm, welches das eigentliche Programm beinhaltet. Die Messgeräte aller gängigen Hersteller lassen sich in dieses Programm miteinbinden und dienen als Schnittstelle zu Messaufbauten. Die serielle Kommunikation zwischen dem Programm und den Messgeräten erfolgt über den byte-seriellen General Purpose Interface Bus (GPIB).⁵⁵

Wie aus Abb. 50 ersichtlich, können die GPIB-Adressen der Messgeräte im Frontpanel des Programms konfiguriert werden. Des Weiteren können die Messdaten bei Bedarf angezeigt werden und der Ablauf des Programms kann in dieser Ansicht gestoppt werden.

⁵⁵ Vgl. Georgi/Metin (2009), S. 19 f.

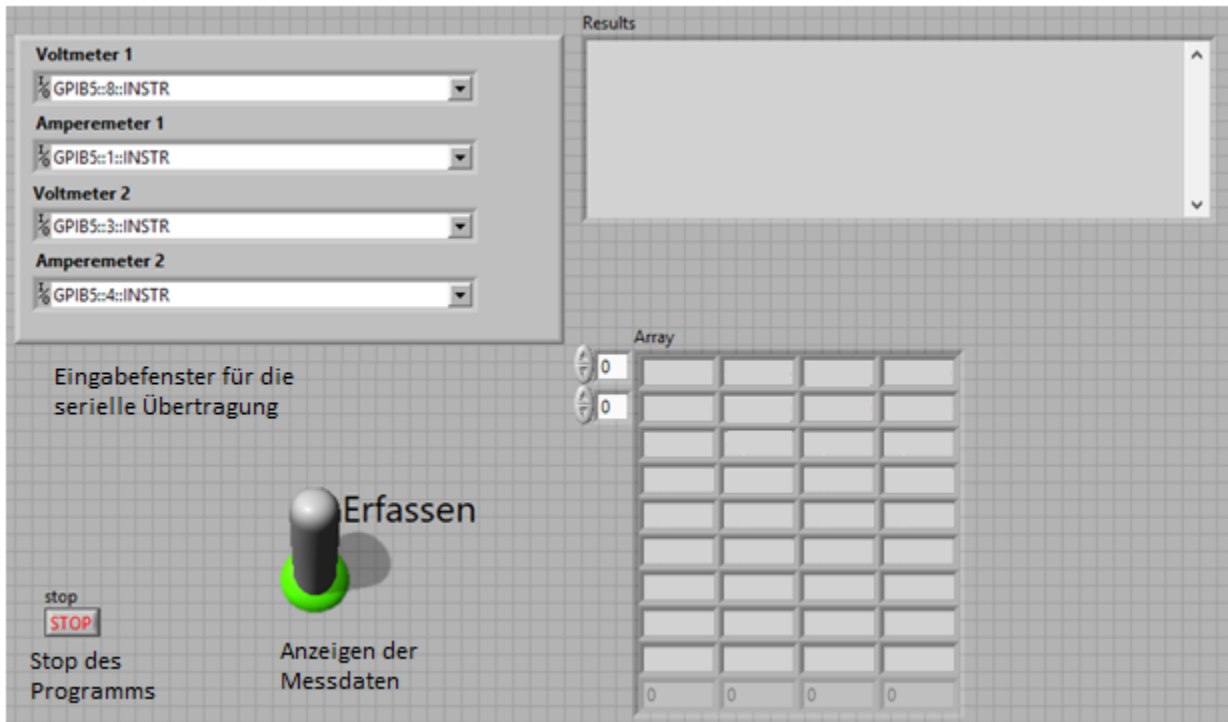


Abb. 46: Darstellung des erstellten Frontpanels, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Blockdiagramm wurde, wie aus Abb. 47 ersichtlich, in mehrere Kategorien unterteilt. Im Bereich der GPIB-Kommunikation werden die Messgeräte initialisiert, gestartet und die Messdaten übertragen. Zur Visualisierung und zur weiteren Verarbeitung der Messdaten werden diese im nächsten Abschnitt des Programms umgewandelt. Der Bereich der Datenausgabe ermöglicht die Visualisierung der Messdaten am Frontpanel und die Ausgabe der Messdaten in einer Excel-Datei, welche zur Langzeitaufzeichnung und zur weiteren Berechnung der Daten dient. Das Programm besteht aus einer While-Schleife, die so lange wiederholt wird, bis ein Stopp-Befehl im Frontpanel aktiviert wird. Die Dauer des Messintervalls, in Millisekunden, lässt sich ebenfalls hier einrichten.

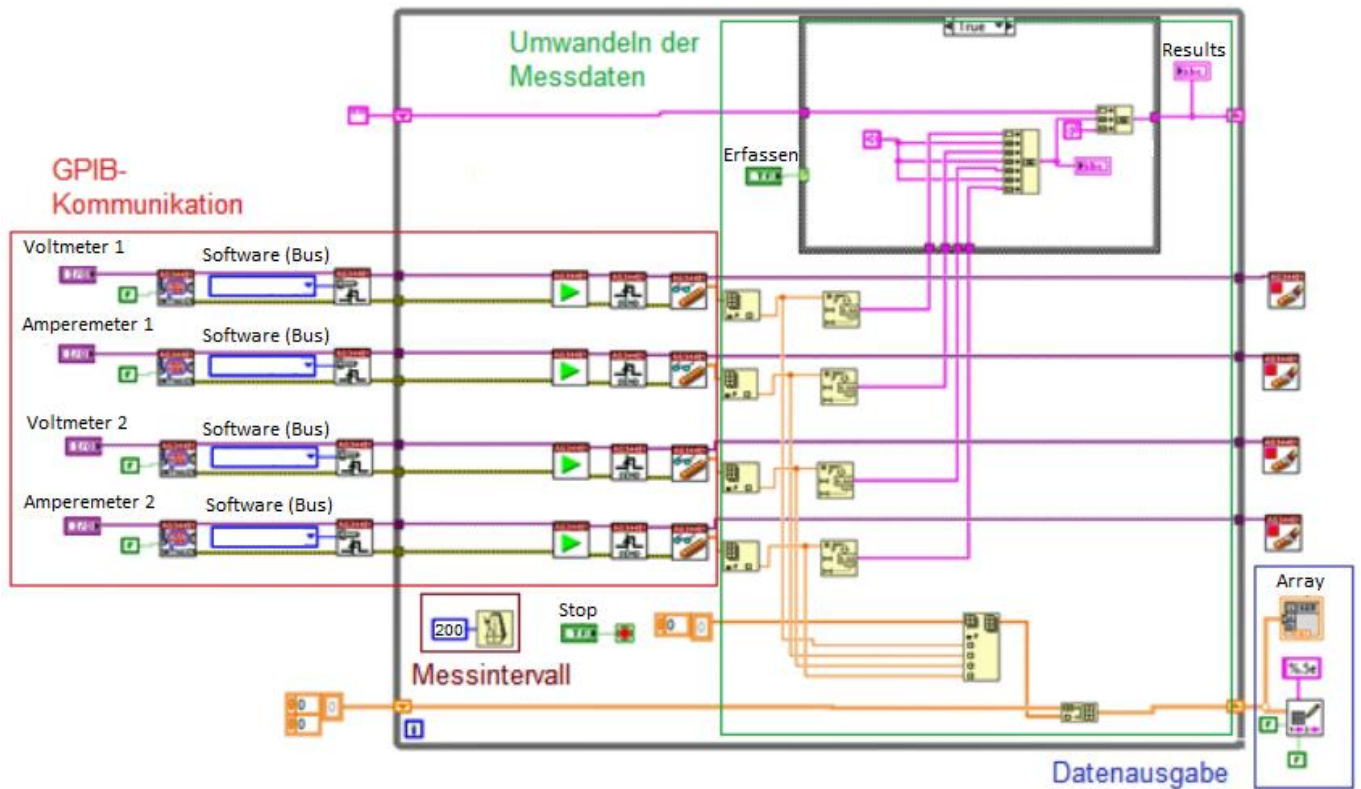


Abb. 47: Darstellung des erstellten Blockdiagramms, Quelle: Eigene Darstellung.

9.4 Ergebnis der Messung

Für die Berechnungen der einzelnen Messpunkte wurde das Tabellenkalkulationsprogramm Excel verwendet. Die Messgeräte lieferten alle 200 ms ein gemittelt Messergebnis, dadurch konnten in 24 Stunden (86400 Sekunden) 432000 Messpunkte pro Messgerät generiert werden. Aus diesen Werten wurde mit Hilfe der nachfolgenden Formel der arithmetische Mittelwert berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (9.1)$$

\bar{x} / V Arithmetischer Mittelwert

$n / 1$ Anzahl der Messungen

x_i / V Summe der Messungen

Daraus ergeben sich Mittelwerte aus den Messpunkten von jedem Messgerät, die in der folgenden Tab. 22 dargestellt werden.

Mittelwert der Spannung der PV-Zelle	Mittelwert des Stromes der PV-Zelle	Mittelwert der Spannung des Materialanforderungssenders	Mittelwert des Stromes des Materialanforderungssenders
U / V	I / A	U / V	I / A
2,887	256,18*10 ⁻⁶	3,304	244,3*10 ⁻⁶

Tab. 22: Arithmetische Mittelwerte aus den Messungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Mit Hilfe dieser Mittelwerte und der Formel (1.1), die auf Seite 6 dargestellt ist, können die generierte elektrische Arbeit der PV-Zelle und die benötigte elektrische Arbeit des Materialanforderungssenders ermittelt werden.

Generierte elektrische Arbeit der PV-Zelle CAMTOA in 24 Stunden:

$$W = 2,887 \text{ V} * 256,18 * 10^{-6} \text{ A} * 86400 \text{ s} = 63,89 \text{ J}$$

Benötigte elektrische Arbeit des Materialanforderungssenders in 24 Stunden:

$$W = 3,306 \text{ V} * 244,3 * 10^{-6} \text{ A} * 86400 \text{ s} = 69,79 \text{ J}$$

Die PV-Zelle konnte bei dieser Langzeitmessung mit 500 lux Beleuchtungsstärke den Messwert der elektrischen Arbeit, welcher in Kapitel 6.4 in Tab. 13 zu finden ist, um 1,9 J übertreffen. Der gemessene Energieverbrauch von 69,79 J ist nur um 0,46 J größer als der berechnete Energieverbrauch, welcher in Kapitel 1.4.6 beschrieben wird. Dennoch ist der Energiebedarf des Materialanforderungssenders mit LoRaWAN in der Variante zwei bei vier Materialanforderungen in 24 Stunden zu hoch, um das System dauerhaft mit der PV-Zelle betreiben zu können. In 24 Stunden verbraucht der Materialanforderungssender um 5,9 J mehr an elektrischer Arbeit, als die PV-Zelle generieren kann. Da der verwendete Lithium-Ionen Akkumulator, welcher in Kapitel 4.4 beschrieben wird, 3063,6 J an elektrischer Arbeit speichern kann, ist es möglich, den Materialanforderungssender 519 Tage zu betreiben, bis die in dem Akkumulator gespeicherte elektrische Arbeit verbraucht ist.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Masterarbeit rekapituliert und zusammengestellt.

Zielsetzung dieser Masterarbeit war es, ein Konzept zu erstellen, das einen bestehenden, kabellosen Materialanforderungssender, welcher vier Mal täglich betätigt wird, mit Hilfe einer Energy Harvesting Einheit mit Energie versorgt, um diesen dauerhaft ohne Versorgungsleitung oder Batterien betreiben zu können. Zu diesem Zweck wurde LoRaWAN als geeignete, energiesparende Funkübertragungstechnologie ausgewählt und der zu erwartende Energiebedarf laut Datenblättern ermittelt. Des Weiteren wurden PV-Zellen als geeignete Methode erwogen, um den Materialanforderungssender dauerhaft mit Energie zu versorgen. Damit die Übertragungssicherheit der Daten gewährleistet ist, wurde ein Lithium-Ionen Akkumulator als Zwischenspeicher ausgewählt. Durch die Zusammenstellung geeigneter Komponenten konnte ein Testaufbau der Konzeption und eine Auslegungstabelle für den Einsatz des Materialanforderungssenders erstellt werden.

10.1 Energieverbrauch des Materialanforderungssenders

In der Variante zwei des Materialanforderungssystems mit LoRaWAN zur Datenübertragung, welche Leuchtdioden zur Statusanzeige nutzt, werden maximal vier Anforderungen in 24 Stunden getätigt. Während einer Materialanforderung kann es zu fünf Statusupdates kommen. Der Energiebedarf pro 24 Stunden des Senders setzt sich somit aus mehreren Teilen zusammen:

- 5,56 J für die Datenübertragungen.
- 2,57 J für die inaktive Zeit im Sleep Modus.
- 61,2 J für die blinkende LED während der Anforderungsvorgänge.

Der Gesamtenergieverbrauch von 69,33 J konnte durch eine Energiebedarfsmessung, welche 24 Stunden andauerte, verifiziert werden.

10.2 Energy Harvesting Konzept

Als geeignete Energy Harvesting Methode für den Materialanforderungssender wurde die Photovoltaik-Zellen Technologie ausgewählt. Hier erwies sich vor allem die monokristalline PV-Zelle von CAMTOA bei einer Beleuchtungsstärke von 500 lux, welche der Betreiber des Materialanforderungssystems bereitzustellen hat, als besonders geeignet. In der 24 Stunden andauernden Messung konnten mit dieser PV-Zelle 63,89 J an Energie, bei 500 lux Beleuchtungsstärke, lukriert werden.

Zur Abdeckung von Energiebedarfsspitzen und zur Stabilisierung des Systems wurde ein Energiespeicher in Form eines Lithium-Ionen Akkumulators, welcher 3063,6 J an elektrischer Energie speichern kann, ausgewählt. Da der Energiebedarf in der geforderten Variante zwei des Materialanforderungssystems mit LoRaWAN zur Datenübertragung den Energieertrag der PV-Zelle übersteigt, kann der Materialanforderungssender nicht dauerhaft mit der PV-Zelle als Energielieferant betrieben werden. Die PV-Zelle dient hier vielmehr zur Verlängerung der Laufzeit des Akkumulators.

10.3 Ausblick und Veränderungsvorschläge

Die verwendete Datenübertragungstechnologie LoRaWAN kann sehr energieeffizient genutzt werden. In weiteren Versuchen ist zu klären, ob der Einsatz von mehreren Materialanforderungssendern, welche auf denselben drahtlosen Zugangspunkt senden, Kollisionen und darauffolgende neue Übertragungen verursachen. Kollisionen im Datenverkehr entstehen, wenn mehrere Systemteilnehmer gleichzeitig senden, und der LoRaWAN Zugangspunkt dies nicht auswerten und zuordnen kann. Dadurch wird an die betroffenen Materialanforderungssender ein Befehl zur neuerlichen Datenübertragung erteilt, was zu einer Erhöhung des Energiebedarfs führt

Um den Energieverbrauch des Materialanforderungssenders so gering wie möglich zu halten, sollten nach Möglichkeit keine Leuchtdioden zur Anzeige des Anforderungsstatus verwendet werden. Vielmehr sollte die Variante drei des Materialanforderungssenders zum Einsatz kommen, weil diese ein energiesparendes E-Ink Display zur Visualisierung verwendet. Wird an der Produktionslinie ein zusätzliches Kleinteil benötigt oder durch ein anderes ersetzt, müssen keine neuen Etiketten zur Kennzeichnung gefertigt werden, da diese Displays den zusätzlichen Vorteil bieten, dass Informationen mit der Beschreibung der Kleinteile sehr einfach auf die Materialanforderungssender geladen werden können. Dies erhöht die Flexibilität des Systems zusätzlich.

Zur Steigerung des Energieertrags der verwendeten PV-Zellen könnten Beleuchtungsmittel ausgewählt werden, welche auch in dem für die Zelle ertragreichen Bereich des elektromagnetischen Spektrums bis 1100 nm Wellenlänge abstrahlen.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (27)

- Bührke, Thomas; Wengenmayr, Roland (2007): *Erneuerbare Energie*, WILEY-VCH Verlag, Weinheim
- Carvalho, Carlos; Paulino, Nuno (2016): *CMOS Indoor Light Energy Harvesting Systems for Wireless Sensing Applications*, Springer
- Dahn, Jeff; Ehrlich, Grant (2011): Lithium-Ion Batteries, in: *Linden`s Handbook of Batteries*, The McGraw-Hill Companies, United States, S. 816 - 894
- Dohlus, Rainer (2010): *Photonik; Physikalisch-technische Grundlagen der Lichtquellen, der Optik und des Lasers*, Oldenbourg Verlag, München
- Georgi, Wolfgang; Metin, Ergun (2009): *Einführung in LabView*, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig
- Gessler, Ralf; Krause, Thomas (2015): *Wireless-Netzwerke für den Nahbereich; Eingebettete Funksysteme: Vergleich von standardisierten und proprietären Verfahren*, Springer Vieweg, Wiesbaden
- IXYS (Hrsg.) (2016): *IXOLARTM High Efficiency SolarMD*, IXYS, Milpitas CA
- Kauffels, Franz-Joachim (2008): *Lokale Netzwerke*, REDLINE GMBH, Heidelberg
- Korthauer, Reiner (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Frankfurt
- Kurzweil, Peter; Dietlmeier, Otto (2015): *Elektrochemische Speicher; Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*, Springer Fachmedien, Wiesbaden
- Linden, David; Reddy, Thomas (2011): Basic Concept, in: *Linden`s Handbook of Batteries*, The McGraw-Hill Companies, United States, S. 26 - 40
- LoRa Alliance (Hrsg.) (2016): *LoRaWAN Specification*, LoRa Alliance, San Ramon
- Meissner, Dieter (1993): *Solarzellen Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Photovoltaik*, Vieweg , Hannover
- Mertens, Konrad (2015): *Photovoltaik; Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, Carl Hanser Verlag, München
- Phillips, Jeffrey; Mohanta, Samaresh (2011): Nickel-Zinc Batteries, in: *Linden`s Handbook of Batteries*, The McGraw-Hill Companies, United States, S. 732 - 756
- Salomon, Mark (2011): Electrochemical Principles and Reactions, in: *Linden`s Handbook of Batteries*, The McGraw-Hill Companies, United States, 42 - 78
- Sauter, Martin (2015): *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*, Springer, Köln
- Schrüfer, Elmar (2007): *Elektrische Messtechnik*, Carl Hanser Verlag, München
- Spies, Peter; Mateu, Loreto; Pollak, Markus (2013): *Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications*, CRC Press, Boca Raton
- Sterner, Michael; Stadler, Ingo (2014): *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*, Springer Vieweg, Regensburg

Texas Instruments, Texas (Hrsg.) (2015): *bq25570 Nano Power Boost Charger and Buck Converter*, Texas Instruments, Dallas

Theiß, Erik (2000): *Beleuchtungstechnik; Neue Technologien der Innen- und Außenbeleuchtung*, Oldenbourg Industrieverlag, München

Tkocz, Klaus (2009): *Fachkunde Elektrotechnik*, Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten

Trueb, Luden; Rüetschi, Paul (1998): *Batterien und Akkumulatoren, Mobile Energiequellen für heute und morgen*, Springer Verlag, Heidelberg

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2012): *Batterien und Akkus*, Umweltbundesamt Fachgebiet III 1.2 „Rechtsangelegenheiten, Vollzug ElektroG und BattG“, Dessau

Wagemann, Hans-Günther; Eschrich, Heinz (2010): *Photovoltaik; Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften*, Vieweg+Teubner, Wiesbaden

Watter, Holger (2015): *Regenerative Energiesysteme*, Springer Vieweg, Flenburg

Online-Quellen (9)

Boisseau, S.; Despesse, G.; Seddik, B. *INTECH*

<https://www.intechopen.com/books/small-scale-energy-harvesting/electrostatic-conversion-for-vibration-energy-harvesting> [Stand: 19.04.2017]

energy-mag (2015): *energy-mag*

<http://www.energy-mag.com/solarzelle-mit-rekord-wirkungsgrad-von-46-prozent/> [Stand: 06.07.2017]

Läderach, Felix (2013): *weltderphysik.de*

<http://www.weltderphysik.de/detektor/physik-pur/die-graetzelzelle-eine-solarzelle-fuer-die-zukunft/> [Stand:

NREL (2017): *National Renewable Energy Laboratory*

<https://www.nrel.gov/pv/> [Stand: 06.07.2017]

Paschotta, Dr. (2017): *RP-Energie-Lexikon*

<https://www.energie-lexikon.info/leuchtstofflampe.html> [Stand: 06.07.17]

Solar Energy Explorer (2014): *Solar Energy Explorer*

<http://www.solarenergyexplorer.com/maximum-power-point-tracking.html> [Stand: 28.08.2017]

Solarify (2013): *Solarify*

<https://www.solarify.eu/2013/05/02/379-prozent-wirkungsgrad-fur-pv-zelle/> [Stand: 06.07.2017]

Universität Leipzig (2017): *Energie-Grundlagen*

<http://home.uni-leipzig.de/energy/eg/10.html> [Stand: 02.08.2017]

Wirelessdesignmag *Wirelessdesignmag*

www.wirelessdesignmag.com [Stand: 03.07.2017]

Normen (2)

IEEE (Hrsg.) (2012): *IEEE Std 802.11: IEEE Std 802.11™-2012*

ON (Hrsg.) (2011): *ÖNORM EN 12464-1: Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen*

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Varianten des Materialanforderungssenders, Quelle: Eigene Darstellung.....	2
Abb. 2: Drahtlose Netzwerktechnologien abhängig von der Datenrate (Data Rate) und der Reichweite (Range), Quelle: Wirellessdesignmag, Online-Quelle [03.07.2017] (geringfügig modifiziert).	4
Abb. 3: Sende- und Empfangsvorgang der Klasse A; Quelle: LoRa Alliance (Hrsg.) (2016), S. 12.	10
Abb. 4: Schema des Messaufbaues, Quelle: Eigene Darstellung.....	10
Abb. 5: Energiebedarfsmessung in der LoRa-Klasse A, Quelle: Eigene Darstellung.....	11
Abb. 6: Leistungsdichte von Energiequellen vor der Umwandlung, Quelle: Boisseau/Despesse/Seddik, Online-Quelle [19.04.2017].....	14
Abb. 7: Struktur eines thermoelektrischen Generators auf Halbleiterbasis, Quelle: Carvalho/Paulino (2016), S. 13.....	16
Abb. 8: Piezoelektrisches Material unterschiedlich belastet, Quelle: Boisseau/Despesse/Seddik, Online-Quelle [19.04.2017].	17
Abb. 9: Model eines piezoelektrischen Harvesters, Quelle: Carvalho/Paulino (2016), S. 10.	18
Abb. 10: Grundlegende Elemente einer drahtlosen Energieübertragung, Quelle: Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 443.....	18
Abb. 11: Bausteine der Energiequelle, Quelle: Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 444.	19
Abb. 12: Bausteine des Empfängers, Quelle: Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 445.	19
Abb. 13: Effizienz einer niederfrequenten, kabellosen Energieübertragung bei 13,56 MHz, Quelle: Spies/Mateu/Pollak (2013), S. 457 (geringfügig modifiziert).	20
Abb. 14: Photovoltaischer Effekt, Quelle: Watter (2015), S. 18.	23
Abb. 15: Wirkungsgrade von PV-Zellen unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs, Quelle: NREL (2017), Online-Quelle [06.07.2017].	25
Abb. 16: Darstellung einer Hochleistungs-PV-Zelle, $\mu\text{g-PESC-Solarzelle /Gre85/}$, $\eta_{AM1,5} = 21,5\%$, Quelle: Wagemann/Eschrich (2010), S. 84.....	26
Abb. 17: Für GaAs-PV-Zellen nutzbare spektrale Einstrahlung des Sonnenlichtes, Quelle: Solarify (2013), Online-Quelle [06.07.2017].....	27
Abb. 18: Funktionsweise einer Grätzel-Zelle, Quelle: Läderach (2013), Online-Quelle [07.07.2017].	28
Abb. 19: Für PV-Zellen nutzbare spektrale Einstrahlung des Sonnenlichts, Quelle: energy-mag (2015), Online-Quelle [06.07.2017].....	29
Abb. 20: Emissionsspektrum einer Leuchtstofflampe von Osram (Farbtemperatur 6500 K), Quelle: Paschotta (2017), Online-Quelle [06.07.17] (leicht modifiziert).....	30
Abb. 21: Aufbau einer Quecksilberdampf-Hochdrucklampe, Quelle: Tkotz (2009), S. 361.....	31

Abb. 22: Emissionsspektrum einer Quecksilberdampf Hochdrucklampe, Quelle: Tkotz (2009), S. 361... 31	31
Abb. 23: Leistungsdichte als Funktion der Energiedichte von Sekundärzellen, Quelle: Universität Leipzig (2017), Online-Quelle [02.08.2017].	33
Abb. 24: Schematischer Schnitt durch eine Nickel-Metallhydrid-Batterie, Quelle: Trueb/Rüetschi (1998), S. 101 (leicht modifiziert).	34
Abb. 25: Aufbau eines Lithium-Polymer-Akkumulators, Quelle: Dahn/Ehrlich (2011), S. 860.	35
Abb. 26: Vergleich zwischen dem Aufbau eines klassischen Kondensators und dem eines Doppelschichtkondensators, Quelle: Sterner/Stadler (2014), S. 167 (leicht modifiziert).	37
Abb. 27: Spektrale Empfindlichkeit von Luxmetern, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abb. 28: Darstellung des Maximum Power Point Tracking, Quelle: Solar Energy Explorer (2014), Online-Quelle [28.08.2017] (leicht modifiziert).	49
Abb. 29: Blockdiagramm des Energy Harvesting Moduls, Quelle: Texas Instruments (Hrsg.) (2015), S. 14.	50
Abb. 30: Leerlaufspannung V_{oc} in Abhängigkeit der Strahlungsintensität E , Quelle: IXYS (Hrsg.) (2016), S. 2 (leicht modifiziert).	51
Abb. 31: Effizienz der PV-Zelle (EQE) in Abhängigkeit der Wellenlänge (λ): Quelle: IXYS (Hrsg.) (2016), S. 2 (leicht modifiziert).	52
Abb. 32: Strom-Spannungskennlinie (blaue Kurve) und Spannungs-Leistungskennlinie (rote Kurve) der PV-Zelle, Quelle: IXYS (Hrsg.) (2016), S. 2.	52
Abb. 33: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung.	55
Abb. 34: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung.	58
Abb. 35: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung.	61
Abb. 36: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, Quelle: Eigene Darstellung.	64
Abb. 37: Gegenüberstellung der elektrischen Leistung der verschiedenen PV-Zellen bei künstlicher Beleuchtung, Quelle: Eigene Darstellung.	65
Abb. 38: Ort der praktischen Messung, Quelle: Eigene Darstellung.	70
Abb. 39: Reichweitenmessung mittels WLAN, Quelle: Eigene Darstellung.	71
Abb. 40: Farblich hinterlegte Darstellung der Reichweite mittels WLAN, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Abb. 41: Szenario 1 Reichweitenmessung mittels LoRaWAN, Quelle: Eigene Darstellung.	73
Abb. 42: farblich hinterlegte Darstellung der Reichweite mittels LoRaWAN, Quelle: Eigene Darstellung.	74
Abb. 43: Anzahl der möglichen Betätigungen abhängig von der Beleuchtungsstärke und der nötigen Erhöhung der Beleuchtungsstärke, um eine weitere Anforderung in 24 Stunden vornehmen zu können, Quelle: Eigene Darstellung.	78

Abb. 44: Entladekurve eines 17 Ah / 3,7 V Lithium-Ionen Akkumulators bei unterschiedlichen Belastungen und Temperaturen, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 225.....	81
Abb. 45: Darstellung des Messaufbaus, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Abb. 46: Darstellung des erstellten Frontpanels, Quelle: Eigene Darstellung.	84
Abb. 47: Darstellung des erstellten Blockdiagramms, Quelle: Eigene Darstellung.....	85

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Frequenzbereich, Quelle: IEEE Std 802.11 (2012), S. 1468.	4
Tab. 2: Energiebedarfsvergleich zwischen WLAN und LoRaWAN, Quelle: Eigene Darstellung.	13
Tab. 3: Minimale Energie um ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband zu heben von verschiedenen Halbleiterwerkstoffen, Quelle: Meissner (1993), S. 16.	22
Tab. 4: Vergleich der Speichertechnologien, Quelle: Eigene Darstellung.	39
Tab. 5: Ausgewählte Beleuchtungsstärken nach ÖNORM EN 12464-1, Quelle: ÖNORM EN 12464-1 (2011).	43
Tab. 6: Messung der Innenraumbelichtung im Rohbau, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Tab. 7: Messung der Innenraumbelichtung in der Montagehalle, Quelle: Eigene Darstellung.	45
Tab. 8: Messung der Innenraumbelichtung im Zwischenlager, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Tab. 9: Messung der Innenraumbelichtung in der Montagehalle des Interieurs, Quelle: Eigene Darstellung.	47
Tab. 10: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Tab. 11 : Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.	54
Tab. 12: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Tab. 13: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Tab. 14: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.	59
Tab. 15: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.	60
Tab. 16: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei indirektem Tageslicht und künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Tab. 17: Spannung, Strom, Leistung und elektrische Arbeit der PV-Zelle im Verhältnis zur Beleuchtungsstärke bei künstlichem Licht, Quelle: Eigene Darstellung.	63
Tab. 18: Pfadverlustexponenten für unterschiedliche Umgebungen, Quelle: Gessler/Krause (2015), S. 82.	68
Tab. 19: Auslegungstabelle für den Materialanforderungssender bei konstanter Fläche der PV-Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.	77

Tab. 20: Auslegungstabelle für den Materialanforderungssender bei vier Materialanforderungsvorgängen und variabler Fläche der PV-Zelle CAMTOA, Quelle: Eigene Darstellung.	79
Tab. 21: Liste der verwendeten Messgeräte, Quelle: Eigene Darstellung.	83
Tab. 22: Arithmetische Mittelwerte aus den Messungen, Quelle: Eigene Darstellung.	86

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADR	-	Adaptives Datenratenschema
AES	-	Advanced Encryption Standard
EMK	-	Elektromotorische Kraft
ERP	-	Enterprise Resource Planning
GaAs	-	Gallium-Arsenid
GPIB	-	General Purpose Interface
IC	-	Integrated Circuit
IoT	-	Internet of Things
IP	-	Internet Protokoll
LED	-	Light Emitting Diode
LoRaWAN	-	Long Range Wide Area Network
MAC	-	Media-Access-Control
MPPT	-	Maximum Power Point Tracking
PV	-	Photovoltaik
PZT	-	Blei-Zirkonat-Titanium
Redox	-	Oxidations-Reduktion
RSSI	-	Received Signal Strength Indication
TI	-	Texas Instruments
VI	-	Virtual Instrument
WEP	-	Wired Equivalent Privacy
WLAN	-	Wireless Local Area Network