

Christian Viehweger

Modellbasiertes Energiemanagement für die intelligente Steuerung solarversorgter drahtloser Sensorsysteme

Scientific Reports on Measurement and Sensor Technology

Volume 4

Prof. Dr.-Ing. Olfa Kanoun (Editor)

Christian Viehweger

**Modellbasiertes Energiemanagement für die
intelligente Steuerung solarversorgter drahtloser
Sensorsysteme**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

**Universitätsverlag Chemnitz
2017**

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Titelgrafik: Chemnitz School of Metrology

Satz/Layout: Christian Viehweger

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Chemnitz

09107 Chemnitz

<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

ISSN 2509-5102 print - ISSN 2509-5110 online

ISBN 978-3-96100-022-7

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-224040>



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Modellbasiertes Energiemanagement für die
intelligente Steuerung solarversorgter drahtloser
Sensorsysteme

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz

von Dipl.-Ing. Christian Viehweger
geboren am 17. Juni 1984 in Schlema

Tag der Einreichung: 8. November 2016

Tag der Verleihung: 10. April 2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Olfa Kanoun
Prof. Dr. Leonhard Reindl

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mess- und Sensortechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Ich möchte mich bei den Menschen bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Allen voran bei meiner Familie, ohne die nichts davon möglich gewesen wäre, besonders bei meinen Eltern Andrea und Andreas. Bei Frau Prof. Dr.-Ing. Olfa Kanoun für die Betreuung und Unterstützung während der letzten Jahre und die vielen Gespräche die wir geführt haben. Bei meinen Kollegen an der Professur Mess- und Sensortechnik für die Anregungen, Diskussionen und Gespräche in dieser Zeit, speziell auch bei meiner Arbeitsgruppe, in der es zu jeder Zeit hilfsbereit und konstruktiv zugeht. Alle Kollegen namentlich zu benennen sprengt den Rahmen, es darf sich jeder angesprochen fühlen. Dazu zähle ich auch diejenigen, die den Lehrstuhl bereits verlassen haben. Ich möchte mich außerdem bei allen Studenten bedanken, welche die Arbeit unterstützt haben.

Ich bin dankbar für all die Erfahrungen, die ich während dieser Zeit sammeln durfte, in unterschiedlichsten Projekten, beim Halten verschiedenster Übungen, bei vielen Projektanträgen, bei der Betreuung von Abschlussarbeiten und bei Konferenzen in den (von der Technischen Universität Chemnitz aus gesehen) entlegensten Winkeln der Erde und möchte all jenen herzlich danken, die mich auf dieser Reise, egal ob kurz oder für länger, begleitet haben.

Kurzfassung

Die wechselhafte Energiebereitstellung für drahtlose Sensorknoten durch Solarzellen stellt das Energiemanagement dieser Systeme vor große Herausforderungen. Bedingt durch saisonale und kurzfristige Effekte treten kontinuierlich Schwankungen in der Eingangsleistung auf, gleichzeitig soll jedoch eine zuverlässige und konstante Systemfunktion realisiert werden. Um dies miteinander zu vereinbaren, wird ein Modell zur Beschreibung der erwarteten Eingangsleistung aufgestellt, mit welchem der planmäßige Energieverlauf bestimmt werden kann. Dieser kann wiederum mit der realen Eingangsleistung verglichen werden, um den tatsächlichen energetischen Zustand des Sensorknotens zu bestimmen. Daraus lassen sich beispielsweise Entscheidungskriterien für die Steuerung der Energieverteilung oder Betriebszustände ableiten.

Im Rahmen der Arbeit werden die physikalischen Hintergründe zur Modellierung der eingehenden Sonnenenergie beschrieben, der Stand der Technik zur Modellierung aufgezeigt und ein Modell als Basis für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Dieses wird auf die stark limitierte Hardware von drahtlosen Sensorknoten angepasst. Die Herausforderungen liegen dabei hauptsächlich in der geringen verfügbaren Rechenleistung, wenig Datenspeicher im System und dem Ziel, möglichst wenig Energie für die Berechnung zu verbrauchen.

Im Ergebnis zeigt sich, dass ein angepasstes Modell auf drahtlosen Sensorsystemen umgesetzt werden kann und trotz der starken Limitierungen lauffähig ist. Es wird eine deutliche Verbesserung in der Verteilung der Energie über den Tag ermöglicht, wodurch sich trotz wechselhafter Quelle eine konstante Systemfunktion ergibt. Nebenher wird die Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit erhöht und Überdimensionierungen in Energiespeicher und Solarzelle können verringert werden. Das modellbasierte Energiemanagement stellt somit einen wichtigen Baustein für eine gesicherte Energieversorgung drahtloser Sensorsysteme dar.

Abstract

The volatile energy supply by solar cells for wireless sensor nodes causes vast challenges for the energy management of such systems. Conditioned by seasonal and short time effects, the incoming power continuously varies. Simultaneously a reliable and constant function of the system has to be realized. To reconcile this, a model for the expected incoming solar power has been derived, which enables the estimation of the planned energy curve. This curve can be compared with the real progression of incoming power measured in parallel, to determine the current state of energy of a sensor node. This comparison is used to derive decision criteria for the control of the energy distribution or operating conditions.

Within this work, the physical backgrounds for the modelling of the incoming solar energy and the state of the art of modelling solar power are described. A model is chosen as basis for further investigations and adapted to the limited hardware of wireless sensor nodes. The main challenges are the reduced processing power, few data memory in the system and the objective to consume as few energy as possible for the calculation.

The results show that an adapted model can be implemented on wireless sensor systems and that it is executable despite the heavy limitations. This enables a distinct improvement of the distribution of energy across the day, which results in a constant systems function, despite the varying incoming power. At the same time the reliability and failure safety are being improved and the oversizing of the solar cell and the storage elements can be reduced. Therefore the model based energy management is an important component for a stable power supply of wireless sensor systems.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Struktur der Arbeit	4
2 Energiemanagement drahtloser Sensorknoten	7
2.1 Der Begriff Energiemanagement	7
2.2 Stand der Technik zum Energiemanagement drahtloser Sensorknoten	14
2.2.1 Optimierung auf Quellenseite	14
2.2.2 Optimierung auf Verbraucherseite	15
2.3 Anwendungsszenarien im Rahmen dieser Arbeit	17
2.4 Bedarf für ein Energiemodell	19
2.5 Vorteile eines modellbasierten Verfahrens	23
2.6 Abgrenzung zu anderen Energy Harvesting Quellen	24
3 Grundlagen des Energiemanagements für Solarzellen	27
3.1 Leistungsberechnung einer Solarzelle	27
3.2 Leistungsanpassungsstrategien für Solarzellen	29
3.2.1 Anforderungen an MPPT Systeme	30
3.2.2 Passive MPPT Verfahren	33
3.2.2.1 Konstantspannung/-strom	34
3.2.2.2 Optimalspannung	35
3.2.2.3 β -Verfahren	35
3.2.2.4 Pilotzelle	36
3.2.2.5 Lookup Table	36
3.2.3 Aktive MPPT Verfahren	37
3.2.3.1 Perturb & Observe	37

3.2.3.2	Hill Climbing	38
3.2.3.3	3-Punkt-Methode	39
3.2.3.4	Incremental Conductance	40
3.2.3.5	Parasitäre Kapazität	41
3.2.3.6	Verfahren mit künstlicher Intelligenz	42
3.3	Gleichspannungswandler für Solarzellen	44
3.3.1	Zielkriterien für den Schaltungsentwurf für drahtlose Sensorknoten	45
3.3.2	Topologische Übersicht	46
3.3.3	Umsetzung in Sensorknoten	48
4	Stand der Technik zur Bestimmung des Energieeintrags	51
4.1	Komponenten der Sonnenstrahlung	51
4.2	Berechnung des Zenitwinkels	53
4.3	Einfluss der optischen Luftmasse	55
4.4	Einflussfaktoren auf die Energieverfügbarkeit	58
4.4.1	Durchmischte Gase	61
4.4.2	Mie-Streuung	61
4.4.3	Rayleigh-Streuung	62
4.4.4	Ozongehalt	62
4.4.5	Wasserdampf	62
4.4.6	Ångström Trübung	63
4.4.7	Linke Trübung	64
4.5	Einfluss von Mehrfachreflexionen	64
4.6	Modellansätze zur Bestimmung der verfügbaren Energie	65
4.6.1	Übersicht zu den wichtigsten Solarstrahlungsmodellen	67
4.6.1.1	ASHRAE Modell	67
4.6.1.2	Hottel Modell	68
4.6.1.3	Hoyt Modell	68
4.6.1.4	MAC Modell	69
4.6.1.5	Bird Modell	69
4.6.1.6	Atwater Modell	70
4.6.1.7	CPCR2 Modell	70
4.6.1.8	Kumar Modell	71
4.6.1.9	METSTAT Modell	72
4.6.1.10	Fu & Rich Modell	72

4.6.1.11	ESRA Modell	73
4.6.1.12	Ineichen Modell	73
4.6.1.13	Simplified Solis Modell	74
4.6.1.14	REST2 Modell	74
4.6.1.15	MRM 5 Modell	75
4.6.2	Bewertung der Modellabweichungen	75
4.7	Umrechnung von horizontaler auf geneigte Ebene	76
4.8	Spektrale Empfindlichkeit und Vergleich zur Innenraumanwendung . .	78
5	Modellierung der eingehenden Energie	81
5.1	Ziele der Modellierung	82
5.2	Herausforderungen der Modellierung für drahtlose Sensorsysteme	83
5.3	Eignung der Modelle für den Einsatz in drahtlosen Sensorsystemen . .	86
5.4	Datenbasis und Datenanalyse	88
5.4.1	Vergleich der Kennlinien mit stündlicher Auflösung	88
5.4.2	Analyse der Kennlinien mit minütlicher Auflösung	89
5.4.3	Vergleich zwischen stündlicher und minütlicher Auflösung	97
5.5	Einfluss des Bedeckungsgrads	97
5.6	Modellierung des Globalstrahlungsverlaufs	100
5.7	Auswertung der Modellabweichung	104
5.8	Einfluss von Zwischenwerten auf die Modellabweichung	106
6	Integration der modellgestützten Diagnose in drahtlose Sensorknoten	111
6.1	Definition von Betriebszuständen	111
6.2	Anwendungsszenario	113
6.3	Hardwareumsetzung	117
6.4	Systemfunktion mit und ohne Energiemodell	120
7	Zusammenfassung	127
	Literatur	131
	Abbildungsverzeichnis	149
	Tabellenverzeichnis	153
A	Weitere Abbildungen	155

B Weitere Tabellen

161

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung
AM	Air Mass
CDC	Climate Data Center
DC/DC	Gleichspannungswandler
DWD	Deutscher Wetterdienst
IC	Integrierter Schaltkreis
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PWM	Pulsweitenmodulation
RSME	Quadratischer Fehler
μC	Mikrocontroller

Zeichen	Einheit	Beschreibung
E_B	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Direktstrahlung
E_D	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Diffusstrahlung
E_G	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Globalstrahlung
FF		Füllfaktor
I_K	A	Kurzschlussstrom
I_{ph}	A	Photostrom
P_{Licht}	W	Strahlungsleistung
R_P	Ω	Parallelwiderstand
R_S	Ω	Serienwiderstand
S_{rel}		Relative spektrale Empfindlichkeit
T	K	Temperatur
U_L	V	Leerlaufspannung
j_K	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$	Kurzschlussstromdichte

k_B	$\frac{\text{J}}{\text{K}}$	Boltzmann-Konstante
m_M		Optische Masse Partikelstreuung
m_O		Optische Masse Ozon
m_W		Optische Masse Wasserdampf
m_d		Diodenfaktor
p	Pa	Luftdruck
q	C	Elementarladung
r_e	m	Mittlerer Erdradius
Φ_{rel}		Relative spektrale Emission
Ψ	Grad	Azimutwinkel
Ω_0	sr	Raumwinkelement
α	Grad	Sonnenhöhenwinkel
α_A		Ångström Wellenlängenexponent
β_A		Ångström Trübung
γ		Streurrate
δ	Grad	Äquatorwinkel
ζ	Grad	Verkipfungswinkel Empfänger Oberfläche
θ_z	Grad	Zenitwinkel
κ		Optische Dicke
λ	nm	Wellenlänge
ρ		Albedo
σ		Absorptionskoeffizient
τ_G		Transmissionskoeffizient durchmischte Gase
τ_L		Linke Trübungsfaktor
τ_M		Transmissionskoeffizient Mie-Streuung
τ_O		Transmissionskoeffizient Ozon
τ_R		Transmissionskoeffizient Rayleigh-Streuung
τ_W		Transmissionskoeffizient Wasserdampf
ϕ	Grad	Breitengrad
ω	Grad	Zeitwinkel

1 Einleitung

Die messtechnische Erfassung verschiedenster Umweltparameter stellt heutzutage die Grundlage für viele Prozesse in Wissenschaft und Technik dar. Die Weiterentwicklungen im Bereich der Sensortechnik hin zu kleineren, energiesparenderen Sensoren sowie der Möglichkeit durch ständige Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Rechensystemen auch größere Datenmengen auswerten zu können, erschließen ein breites Anwendungsspektrum. Die durch hohe Produktionszahlen sinkenden Preise der Systeme ermöglichen dabei einen großzügig verteilten Einsatz. Die Verknüpfung von mehreren Sensoren zu einem Netzwerk erbringt verschiedene Vor- und Nachteile. So lassen sich Messwerte über größere Bereiche beobachten oder, durch die Anzahl von Sensoren, statistisch besser aufarbeiten, während gleichzeitig beispielsweise der Kommunikationsbedarf steigt.

Durch fortwährend steigende Speicher- und Rechenleistung und effiziente Algorithmen lassen sich große Datenmengen auswerten. Sensornetze bestehend aus einigen hundert oder mehreren tausend Knoten sind somit realisierbar. Die daraus entstehenden Informationen stellen die Basis für anschließende Prozesse dar. So können beispielsweise im Bereich der Landwirtschaft intelligente Bewässerungssysteme den Wassereinsatz ohne Nachteile für die Pflanzen minimieren [1] oder den Einsatz von Düngemitteln überwachen und steuern, sodass zum einen die Pflanzen ausreichend versorgt sind und zum anderen keine Überdosierung erfolgt, wodurch die Stoffe in das Grundwasser gespült werden [2]. Auch die Überwachung von Nutztieren durch Sensornetze hilft dabei, einen Überblick zum aktuellen Status einer Herde zu erhalten [3].

In industriellen Anwendungen können zum Beispiel Energieverbräuche beobachtet oder der Verschleiß an Maschinen und Anlagen überwacht werden, um effizientere Produktionsabläufe zu entwickeln [4] oder Wartungsintervalle zu planen [5]. Für Logistikprozesse kann eine effiziente Warenverfolgung sowohl für Außenanwendungen [6] als auch innerhalb von Gebäuden [7] die Lagerhaltung optimieren. Im Bereich der Gebäudeautomatisierung können drahtlose Sensornetze beispielsweise Beleuchtungsanlage, Heizung und Lüftung steuern [8] oder dazu genutzt werden, Personen im Haushalt zu

unterstützen und zu überwachen, was speziell für ältere und demenzkranke Menschen hilfreich sein kann [9].

Der Bereich Umweltüberwachungssysteme bietet ebenfalls viele Einsatzmöglichkeiten für drahtlose Sensornetze, besonders da hier in der Regel die Energieversorgung durch Solarzellen abgedeckt werden kann. So wird beispielsweise an Früherkennungssystemen für Waldbrandschutz [10], Messtechnik zur Erfassung der Wasserqualität [11], Katastrophenschutzsystemen [12] oder allgemeiner Klimaüberwachungstechnik [13] gearbeitet. Mittels einer Vielzahl von Sensorknoten lassen sich hierbei größere Gebiete abdecken als mit punktueller Messtechnik.

1.1 Motivation

Um den sinnvollen Einsatz eines Sensorsystems zu gewährleisten, wird dabei angestrebt den Verkabelungsaufwand minimal zu halten. Dies vereinfacht die Installation, ermöglicht es dem System sich unauffällig in die Umgebung zu integrieren und spart Kosten. Dazu ist sowohl eine drahtlose Kommunikation als auch eine autonome Energieversorgung notwendig. Als Alternativen zu einer kabelgebundenen Lösung stehen Batteriebetrieb und Energy Harvesting zur Verfügung. Der Einsatz von Batterien ist dabei jedoch weitestgehend zu vermeiden, u. a. um den Wartungsaufwand (Batteriewechsel) oder die Sondermüllbelastung zu umgehen.

Energy Harvesting bezeichnet die Wandlung von nichtelektrischer Energie in elektrische, beispielsweise aus Wärme oder Licht. Damit können Systeme dauerhaft versorgt werden, wodurch sich verschiedene Vorteile ergeben. Da eine Wartung nicht mehr notwendig ist, können sie unter anderem an schwer zugänglichen Orten eingesetzt werden. Der Betrieb über die gesamte Lebensdauer des Systems ist gewährleistet und sie weisen, im Vergleich zu Batteriesystemen mit ähnlicher Energiebereitstellung, geringere Abmessungen auf.

Die Solarenergieversorgung ist für Energy Harvesting Systeme ein wesentlicher Bestandteil, da die Forschung im Bereich der Zellen weit vorangeschritten und eine regelmäßige Energieverfügbarkeit gegeben ist. Die wesentliche Herausforderung für einen zuverlässigen Betrieb besteht in der Nutzbarmachung der Energie. Aufgrund der systemimmanenten Eigenschaften ist eine intelligente Verteilung/Nutzung der verfügbaren Leistung notwendig. Es müssen sowohl der Tag-/Nachtbetrieb als auch Schwankungen innerhalb eines Tages ausgeglichen werden.

Um die Energie sinnvoll zu verteilen, muss das System in Kenntnis über deren Verlauf gelangen. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze für Modelle und Prognosen. Speziell zur Berechnung von Solaranlagen und Kraftwerken, für welche das grundlegende Prinzip gleich ist, werden diese Verfahren eingesetzt. Ein Transfer dieser Lösungen auf drahtlose Sensorsysteme ist nicht ohne weiteres möglich, da bestimmte Umstände eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung erschweren. So ist beispielsweise die umfassende Verwendung von Wetterdaten oder Luftparametern, oder die Berechnung von komplexen Modellen auf der beschränkten Hardware eines Sensorknotens, nicht ohne weiteres möglich. Daher ergibt sich ein Bedarf für ein angepasstes Modell, welches zur Energieverteilung und Betriebszustandsauswahl herangezogen werden kann und im Rahmen von drahtlosen autarken Sensorsystemen einsetzbar ist.

1.2 Zielsetzung

Wie in Abschnitt 1.1 beschrieben, besteht der Bedarf für ein Modell zur Beschreibung des Verlaufs der eingehenden Energie an einem solarversorgten drahtlosen Sensorsystem. Dieses kann in der Folge vom System dafür genutzt werden, den eigenen energetischen Zustand zu detektieren und gegebenenfalls für einen bestimmten Prognosehorizont vorauszusagen.

Entsprechende Modelle werden in der Literatur häufig als „Clear Sky“ Modelle bezeichnet, zum Teil auch „Mean Sky“ oder „Cloud Sky“, je nachdem ob sie sich auf ideale und störungsfreie Wetterbedingungen beziehen oder auch für bewölkte/durchmischte Zustände konzipiert sind. Es existieren verschiedene Ansätze, die aufgrund ihrer Eigenschaften in der Regel für Großanlagen oder zur Berechnung der Sonnenstrahlung für größere Gebiete eingesetzt werden. Grund hierfür ist die Komplexität der Modelle, welche zum Teil erhebliche Kosten verursacht und damit einen Einsatz für Kleinanlagen nicht wirtschaftlich macht.

Weiterhin lassen sich die Modellansätze nicht ohne weiteres skalieren und auf drahtlosen Sensorsystemen einsetzen. Hierbei wirken Hardwarelimitierungen stark begrenzend. Ein Sensorknoten ist in der Regel nach dem Minimalprinzip ausgestattet, d. h. seine Hardware ist dimensioniert um die geforderte Funktionalität zu erfüllen, ohne dabei jedoch Ressourcen zu verschwenden. Nicht benutzte Hardwareteile können unerwünschte Energieverluste und höhere Kosten bedeuten.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Modell zu entwickeln, welches eine Bestimmung der eingehenden Leistung für drahtlose Sensorsysteme ermöglicht und damit alle sich daraus

ergebenden Vorteile auf diesen Systemen nutzbar macht. Hauptbetrachungskriterium dafür ist die Energiebilanz. Sie darf durch die zusätzlichen Aufwendungen des Modells nicht signifikant negativ beeinflusst werden und hat somit eine noch höhere Priorität als die Genauigkeit. Weiterhin ist es Ziel, die Anzahl der benötigten Parameter sowie den Fehler minimal werden zu lassen, ohne dabei die Umsetzbarkeit auf Systemen mit stark reduzierter Hardware zu gefährden. Zudem soll das Modell adaptiv sein, um eine Anpassung an verschiedene Umgebungen zu ermöglichen. Dies betrifft u. a. den Einbezug von Abschattungseffekten, welche aufgrund der Installationsposition auftreten können. Somit kann der Ansatz universell verwendet werden, ohne für jeden einzelnen Knoten neu angepasst werden zu müssen.

Das Modell soll als Entscheidungsgrundlage für das Energiemanagement bereitstellen und eine intelligente Verteilung der eingehenden Leistung ermöglichen, sodass diese möglichst ideal genutzt werden kann und weder Ausfallzeiten entstehen noch überschüssige Energie verschwendet wird. Dies erhöht die Zuverlässigkeit des gesamten Systems. Weiterhin soll das Modell eine Prognosefunktion ermöglichen, wodurch das Energiemanagement mit einer Voraussagemöglichkeit komplettiert wird.

1.3 Struktur der Arbeit

Der allgemeine Aufbau der Arbeit und das Zusammenwirken der einzelnen Kapitel ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Nach einer kurzen Einleitung in Kapitel 1 wird in Kapitel 2 zunächst das Energiemanagement betrachtet. Darin wird der Begriff abgegrenzt, der Stand der Technik aufgearbeitet und anhand von Beispielen und Einsatzszenarien auf Bedarf und Vorteile in Bezug auf ein modellbasiertes Energiemanagement eingegangen.

In Kapitel 3 werden die für das Energiemanagement eines solarversorgten drahtlosen Sensorknotens zu berücksichtigenden Komponenten erläutert. Dies betrifft hauptsächlich die unterschiedlichen MPPT Verfahren sowie die notwendige Schaltungstechnik zur Spannungsaufbereitung. Weiterhin ist die Leistungsberechnung anhand der nichtlinearen Kennlinie dargestellt.

Das Kapitel 4 befasst sich mit der eingehenden Solarenergie. Hierbei wird aufgezeigt, wie sich diese aus Diffus- und Direktstrahlungsanteilen zusammensetzt und wie die auf eine Fläche eingehende Leistung in Abhängigkeit von den geometrischen Eigenschaften der Empfängerfläche zu berechnen ist. Weiterhin wird aufgezeigt welche Umweltparameter einen Einfluss auf die verfügbare Energie haben und inwiefern sie diese abschwächen. Zusätzlich werden die nach Stand der Forschung gebräuchlichsten

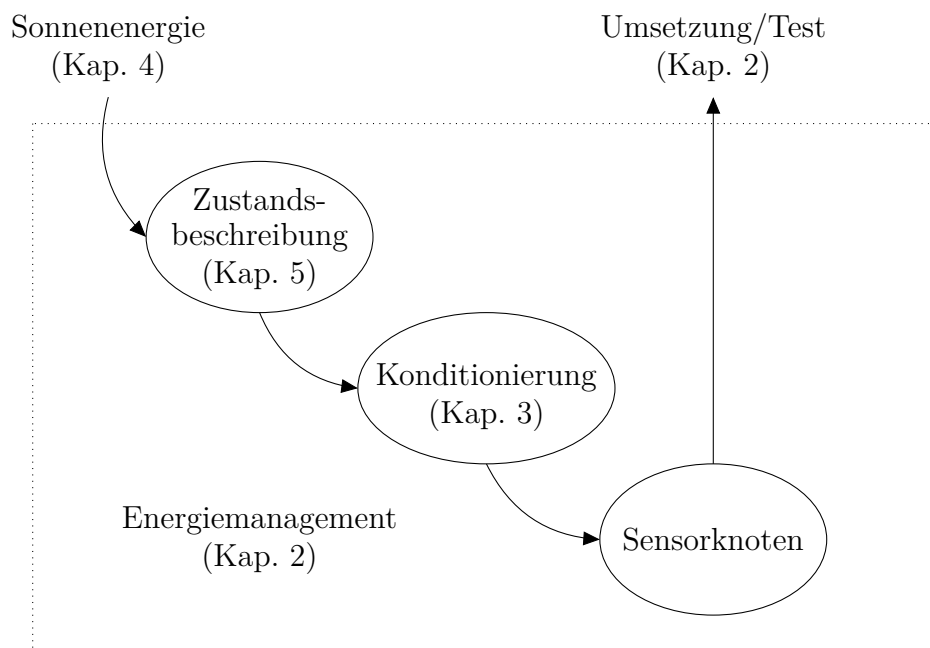


Abbildung 1.1: Struktur der Arbeit

Modellansätze dargestellt und beschrieben sowie deren Eignung für den Einsatz in drahtlosen Sensorknoten betrachtet. Im letzten Abschnitt erfolgt ein kurzer Vergleich zu solarzellenbasierten Systemen für Innenraumanwendungen.

In Kapitel 5 wird ein Modell abgeleitet und an die Umgebungsbedingungen in drahtlosen Sensorknoten angepasst, welches sowohl auf der limitierten Hardware eines solchen Systems lauffähig ist, als auch dessen energetischen Zustand mit hinreichender Genauigkeit beschreibt. Dazu werden Strahlungswerte des Deutschen Wetterdienstes aus den Jahren 2012 bis 2014 als Datenbasis verwendet. Diese werden zunächst charakterisiert und analysiert und dienen daraufhin der Anpassung der Modellparameter. Im Anschluss wird die Genauigkeit der Modellierung statistisch betrachtet.

Kapitel 6 befasst sich mit der praktischen Anwendung des Verfahrens und dessen Umsetzung in Hardware. Hierbei wird ein Szenario definiert, anhand dessen das modellbasierte Energiemanagement mit zwei weiteren, nach Stand der Technik üblichen, Methoden verglichen wird. Die Ergebnisse dieses Vergleichs lassen auf die Eignung und Umsetzbarkeit schließen.

Den Abschluss bildet eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit.

2 Energiemanagement drahtloser Sensorknoten

Im nachfolgenden Kapitel wird zunächst auf den Begriff Energiemanagement eingegangen. Dieser wird erläutert, seine Bestandteile werden aufgezeigt und es wird beschrieben, welche Aspekte erfüllt sein müssen, um von einem Energiemanagement zu sprechen. Im Anschluss werden anhand von Beispielen verschiedene, nach aktuellem Stand der Forschung gebräuchliche, Techniken beschrieben um ein intelligentes Energiemanagement auszulegen.

In Abschnitt 2.3 erfolgt eine Abgrenzung von Anwendungsszenarien, für welche die in dieser Arbeit beschriebene Modellierungstechnik anwendbar und sinnvoll ist. Die Abschnitte 2.4 und 2.5 beschreiben, wieso ein modellbasiertes Verfahren notwendig ist und welche Vorteile es bietet.

Den Abschluss des Kapitels stellt eine Abgrenzung des modellbasierten Vorgehens für Solarzellen von anderen Energy Harvesting Verfahren dar, da dieses nicht ohne weiteres auf andere Energiequellen übertragbar ist.

2.1 Der Begriff Energiemanagement

Ein wichtiger Bestandteil eines low-power Systems ist das Energiemanagement. Es verwaltet und transformiert sämtliche Leistungen und bestimmt, welcher Schaltungsteil wie eingebunden wird. Die Komplexität wird dabei vom jeweiligen Anwendungsfall vorgegeben. Je umfangreicher das Gesamtsystem ausfällt, desto komplexer darf auch die Steuerung sein. Speziell bei Lösungen die auf Funktechnologie zur Datenübermittlung setzen, ist durch die hohe Stromaufnahme selbiger ein intelligentes Management zweckmäßig. Je komplexer das System ist, desto unkomplizierter fällt auch die Integration der Steuerung aus. Bei Anwendungsfällen, bei welchen die Daten drahtlos übermittelt, zwischengespeichert oder vorverarbeitet werden, ist im Regelfall bereits ein Mikrocontroller vorhanden. Dieser kann zur Realisierung des Energiemanagements

genutzt werden, da die Anforderungen hinsichtlich Rechenleistung oder zeitgenauem Arbeiten für eine Steuerung von Leistungsverteilung und -verbrauch eher gering sind.

Eine schematische Darstellung eines typischen Energiemanagements für drahtlose Sensorsysteme ist in Abbildung 2.1 dargestellt (vergleiche [14, 15]). Die Leistungsbereitstellung erfolgt durch einen Energy Harvester, welcher ambiente nichtelektrische Energie in elektrische wandelt. Je nach System können hierfür auch mehrere Wandler zum Einsatz kommen, welche sich komplementär verhalten oder eine höhere Leistungsausbeute ermöglichen. In diesem Fall stellen sich, je nach Charakteristik der beiden Harvester, zusätzliche Herausforderungen an die Verknüpfung der beiden Quellen, beispielsweise hinsichtlich Leistungsbereich, Frequenzen oder ähnlichem. Weiterhin steht mindestens ein Speicher zur Verfügung, in welchem die Energie kumuliert wird, damit die Last, welche typischerweise kurzfristig einen höheren Verbrauch aufweist, als der Harvester bereitstellen kann, getaktet arbeiten kann. Häufig wird noch ein weiterer Speicher verwendet, welcher als Langzeitpuffer dient und überschüssige Energie aufnimmt und für Notfälle, Ausfälle des Harvesters oder zur Überbrückung von beispielsweise dem Tag-Nacht-Zyklus einer Solarzelle bereit steht. Besonders im Hinblick auf Selbstentladung werden dafür häufig Sekundärbatterien oder Doppelschichtkondensatoren verwendet.

Die Last in einem drahtlosen Sensorknoten besteht je nach Anwendung aus Sensor(en), einer Auswerteelektronik bzw. Mikrocontroller sowie einem Funksystem zur Datenübermittlung. Das Funksystem weist dabei typischerweise den größten Energieverbrauch auf und arbeitet daher zyklisch oder ereignisorientiert. Hinzu kommt der Energieaufwand für den Aufbau eines Funknetzwerks, Synchronisation oder Routingverfahren. Der als Energiemanagement selbst zu betitelnde Teil besteht aus Spannungswandlern, welche die unterschiedlichen Potentiale von Speichern und Harvester ausgleichen oder transformieren oder zur Gleichrichtung eines eingehenden Wechselsignals, beispielsweise falls kinetische Harvester verwendet werden, dienen. Weiterhin existiert eine zentrale Steuerung, welche den energetischen Zustand der Komponenten überwacht, Betriebszustände festlegt, Leistungen zwischen Last, Harvester und Speichern verteilt oder die Energieausbeute durch MPPT Verfahren optimiert.

In der Literatur existiert eine gemischte, größtenteils vereinfachte Ansicht über das zentrale Energiemanagement. Beispiele hierfür sind in [16–19] nachzulesen. In diesen Beiträgen werden Spannungswandler mit Leistungsanpassung benutzt, um die jeweiligen Quellen anzubinden. Eine solche Realisierung stellt zwar einen Teil des Komplexes Energiemanagement dar, jedoch nur dessen Grundfunktion. Die in diesen Beiträgen gewählte Bezeichnung ist somit als irreführend anzusehen. Eine Erweiterung dazu

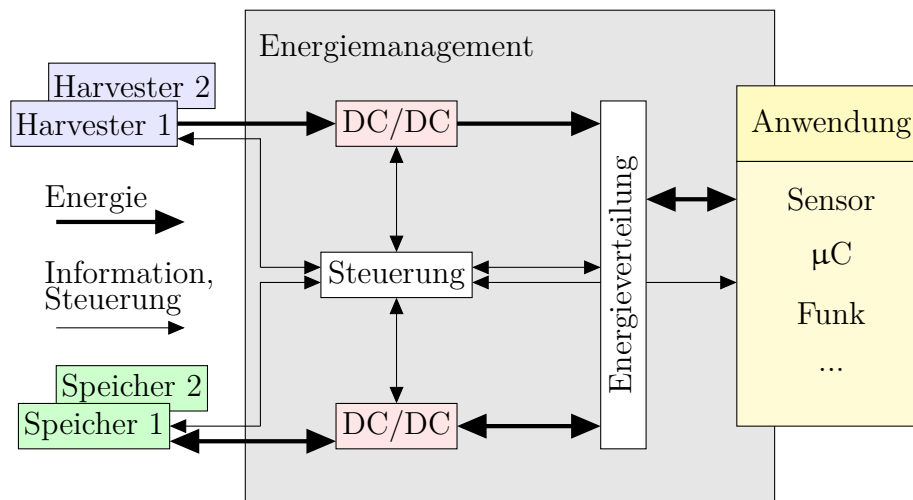


Abbildung 2.1: Aufbau des Energiemanagements in drahtlosen Sensorknoten bestehend aus einem oder mehreren Harvestern, Speichern, Steuerung und Last.

stellt [20] dar. Hier werden mehrere Spannungsstufen benutzt, um unterschiedliche Komponenten zu versorgen. Somit erweitert sich das Steuerungskonzept um eine spezielle Anpassung an mehrere Komponenten. Eine weitere Verbesserung ist in [21] zu sehen. In diesem Beitrag wird die Entwicklung einer integrierten spulenlosen DC/DC-Lösung für Solarzellen beschrieben. Die Spannungswandlung erfolgt dabei mit einer Ladungspumpe. Hinzu kommt die Modellierung der Solarzelle, mit der sich Aussagen über das Zusammenwirken mit dem DC/DC-Wandler treffen lassen. Es kann somit eine genauere Anpassung der Einzelkomponenten vorgenommen werden. Den nächsten Verbesserungsschritt hin zu einem vollständigen Energiemanagement stellt [22] dar. Hierbei wird ein piezoelektrischer Energy Harvester entwickelt, bei dem die Leistungsanpassung nicht mehr statisch sondern dynamisch per Mikrocontroller ausgeführt wird. Weiterhin wird ein Zusatzspeicher in Form einer wiederaufladbaren Batterie eingesetzt, welcher bei Ausfall des Piezowandlers aushelfen kann. Für eine umfassendere Beschreibung eines Energiemanagements für low-power Systeme genügt jedoch nicht nur die Betrachtung der Baugruppen wie Speicher oder Spannungswandler, es muss auch die Funktionsweise betrachtet werden. Hierzu beschreibt [23] den Begriff der „Energineutralität“, welcher in [24] im Bezug auf Solaranwendungen hergeleitet wird. Dieser Begriff bezeichnet die Tatsache, dass zum Beispiel ein autarkes Sensorsystem über einen bestimmten Zeitraum nur so viel Energie verbrauchen darf, wie es durch den Wandler regenerieren kann. Um diese Vorgabe einzuhalten, wird die Einführung eines Tastverhältnisses beschrieben, mit der das System zwischen hohem und niedrigem Energieverbrauch wechseln kann. Damit kann der Energieverbrauch bei gleichzeitiger Einschränkung

der Funktion gesenkt werden. Für welchen Zeitraum die Anforderung der Energieneutralität gilt, ist abhängig vom System. Bei Verwendung ausreichend dimensionierter Pufferspeicher lassen sich auch Zeiten überbrücken, in denen der Energy Harvester vollständig ausgefallen ist. Die Verwendung eines Tastverhältnisses ist gegebenenfalls ohnehin notwendig, da beispielsweise ein Funksystem meist mehr Energie verbraucht als ein gewöhnlich dimensionierter dazugehöriger Harvester bereitstellen kann. So muss vor einem Sendevorgang die für diesen benötigte Leistung zwischengespeichert werden.

Verwendet man kein statisches sondern ein dynamisches Tastverhältnis kann sich die Steuerung besser auf die energetischen Umstände einstellen. Beschrieben wird dies in [25]. Hier wird eine „ereignisbasierte“ mit einer „energiebasierten“ Systemfunktion verglichen. Während die ereignisbasierte lediglich auf Timer- und Sensorsignale reagiert, bezieht die energiebasierte ebenfalls den Ladezustand des Speichers sowie die aktuelle Energiebereitstellung mit ein. Durch diese Funktionalität wird die Steuerung erweitert und ein Ausfall im Falle nicht ausreichender Energie vermieden. Der Einsatz eines dynamischen Tastverhältnisses zur Beibehaltung der Energieneutralität wird ebenfalls in [26] beschrieben. Führt man diesen Ansatz weiter in Richtung zusätzlicher Intelligenz, ergeben sich außer den beiden Grundfunktionen (an/aus) noch weitere mögliche Zustände. In [27] werden Betriebszustände für einen Piezoharvester aufgeführt, beispielsweise „sleep“, „continous operation“ oder „duty-cycled operation“. Diese ermöglichen eine komplexere Anpassung an verschiedene Funktions- und Umgebungsbedingungen.

Eine detaillierte Ausarbeitung verschiedener Systemzustände findet sich in [28], jedoch ausschließlich auf das Leistungsmanagement bezogen. Eine Grafik daraus ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Hierbei befindet sich das System zu Beginn im Zustand „Turn Off State“, d. h. ausgeschaltet. Von diesem aus kann das Energiemanagement in den „Soft Start“ wechseln, jedoch nur wenn die Energiequelle ausreichend Leistung liefert. Sobald der interne Zwischenspeicher den energetischen Schwellwert E_{refBH} übersteigt, wird die Batterie geladen. In diesem Zustand („Battery Charge“) wird der Zwischenspeicher auf dem Level E_{refBC} gehalten. Falls sowohl Batterie als auch Pufferspeicher vollständig geladen sind und dieser den Wert E_{refOP} erreicht, geht das System in den Zustand „Over Power“ über. Hier wird die Eingangsleistung so reguliert und verringert, dass sie nur noch dem tatsächlichen Verbrauch entspricht. Sinkt die Leistung der Quelle ab, wird die Batterie zu Hilfe genommen („Battery Help“). Als Grenzwerte dienen jeweils die Schwellen E_{th1-3} . Wird E_{th1} unterschritten, geht das System wieder in den Zustand „Turn Off State“ über.

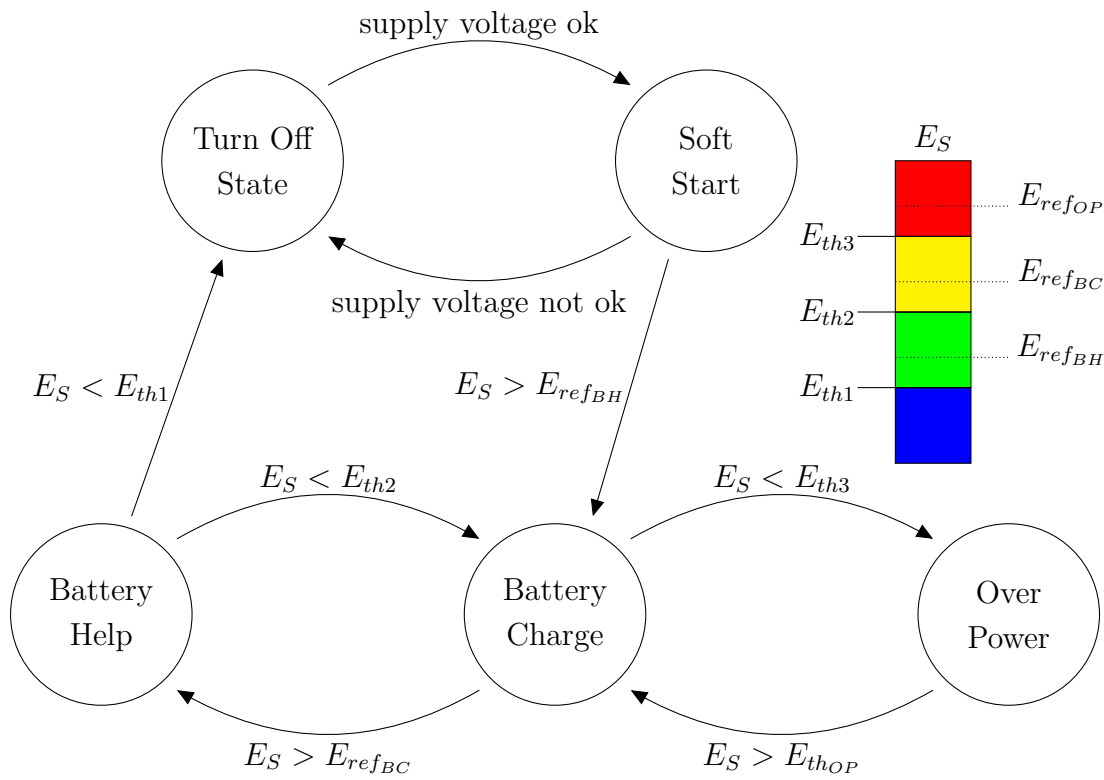


Abbildung 2.2: Betriebszustände für eine solarzellenbasierte Energieversorgung, Quelle: [28] (abgeändert).

In der Literatur wird der Begriff Energiemanagement somit in Abhängigkeit von der Komplexität des Gesamtaufbaus variabel verwendet. Er reicht dabei von einem einfachen DC/DC-Wandler Aufbau über Leistungsanpassung bis hin zur energieabhängigen intelligenten Steuerung. Betrachtet man das Energiemanagement allgemein lassen sich die folgenden Anforderungen feststellen. Das Energiemanagement sollte:

1. eine Regelung unterschiedlicher Spannungslevel ermöglichen, z. B. Quelle-Eingang, Speicher-Last oder Langzeitspeicher-Zwischenspeicher,
2. über eine Leistungsanpassung zur effizienten Ausnutzung der Quelle(n) verfügen,
3. die einzelnen Momentanzustände kennen, z. B. den Ladezustand der (des) Speicher(s) oder den Verbrauch der Last,
4. dazu in der Lage sein, Energieflüsse intelligent zu regeln (hierfür sind auch unterschiedliche Betriebszustände als Entscheidungskriterium notwendig),
5. speicherschonend arbeiten und
6. eine Funktionalität zur Vorausplanung besitzen.

Die einzelnen Anforderungen dieser Liste bauen aufeinander auf. So kann beispielsweise ein System nicht speicherschonend arbeiten, wenn es nicht dazu in der Lage ist, die Energieflüsse zu regeln. Gleichzeitig steigt mit aufsteigender Nummerierung auch die Komplexität des Systems. So ist für eine Vorausplanung unter Punkt 6 eine verarbeitende Logik mit ausreichend Datenspeicher notwendig, während das System für eine Leistungsanpassung unter Punkt 2 je nach Art und Umfang dieser nur um wenige Bauteile erweitert werden muss. Bezüglich der Notwendigkeit der Verfügbarkeit dieser Anforderungen lässt sich feststellen, dass Punkt 1 mindestens erfüllt sein muss, um überhaupt von einem Energiemanagement sprechen zu können. Mit aufsteigender Nummerierung sinkt die Notwendigkeit. Es bleibt weiterhin festzustellen, dass die allgemeinen Umstände hinsichtlich Energieverfügbarkeit die einzelnen Punkte einschränken. Eine Spannungsanpassung ist im Regelfall zweckmäßig, es ist jedoch in Frage zu stellen, ob bei Energiequellen mit Ausgangsleistungen unter 1 mW eine intelligente Regelung zweckmäßig ist, da diese einen großen Teil der verfügbaren Energie selbst verbrauchen könnte.

Die Erweiterung des Energiemanagements um diese Funktionalitäten ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Hierbei wird ein Modell in das System integriert, welches die

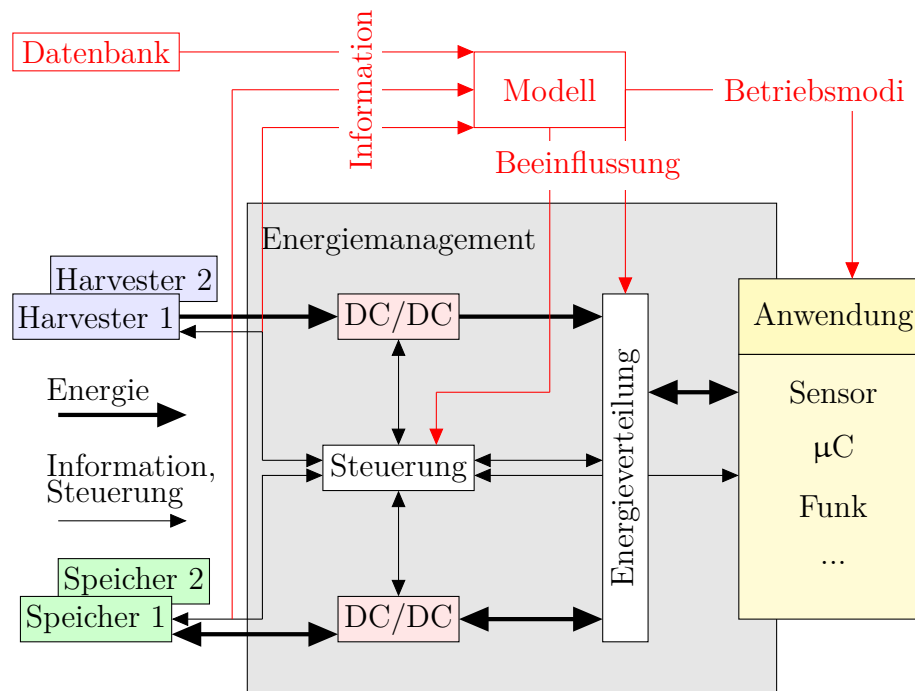


Abbildung 2.3: Aufbau des erweiterten Energiemanagements für drahtlose Sensorknoten (vergleiche Abbildung 2.1) mit Energiemodell zur Bewertung des eigenen Zustands.

Bewertung des eigenen aktuellen (mit Prognosefunktion auch des zukünftigen) energetischen Zustands ermöglicht und somit eine intelligente Steuerung der Energieflüsse ermöglicht. Hierbei fließen verschiedene Informationen in das Modell. Die aktuelle Leistungsbereitstellung der Energy Harvester und der Ladezustand von Kurz- und Langzeitspeicher zeigen den Ist-Zustand. Aus einer Datenbank mit entsprechend hinterlegten Kurven oder Messwerten wird der Soll-Zustand ermittelt. Diese Daten müssen zuvor über einen markanten Zeitraum beobachtet, gemessen und analysiert werden.

Auf Basis dieser Informationen kann das Modell die Energieverteilung und Steuerung der Systemkomponenten beeinflussen. Ziel dabei ist eine möglichst ideale Anpassung der Funktionalität an den aktuellen Zustand. In Bezug auf die Anwendung bedeutet dies das Einstellen verschiedener Betriebsmodi, um den Energieverbrauch anzupassen und gleichzeitig die Funktionalität über einen langfristigen Zeitraum sicherzustellen.

2.2 Stand der Technik zum Energiemanagement drahtloser Sensorknoten

Die zur Verfügung stehende Energie begrenzt die Funktions- und Einsatzfähigkeit sowie die Lebensdauer eines drahtlosen Sensorsystems. Grundsätzlich existieren zwei Optimierungsansätze: die Energiegewinnung zu maximieren und den Verbrauch zu reduzieren [29]. In Abhängigkeit von den Umständen (Einsatzszenario, erlaubte Baugröße, Kosten, usw.), müssen beide Ansätze verfolgt werden, um ein Sensorsystem robust und dauerhaft einsatzfähig auszuliegen. Von Vorteil sind dabei die ständigen Weiterentwicklungen in den Bereichen Elektronik/Mikroelektronik, Energiewandler und Energiespeicher. Prinzipiell kann ein System über dessen Dimensionierung so ausgelegt werden, dass zu jeder Zeit die minimal erwartbare Leistung ausreicht, um den maximal einstellbaren Verbrauch zu sichern. Ein solches Vorgehen ist jedoch in den meisten Fällen nicht zweckmäßig, da hierdurch das System in der Regel unnötig groß, schwer und teuer wird.

Der Aufbau eines geeigneten Energiemanagements stellt einen kontinuierlichen Optimierungsprozess dar, wobei beispielsweise durch Einsparungen im Verbrauch die Größe des benötigten Energiewandlers verringert werden kann oder durch eine verbesserte Energieeffizienz des Knotens zusätzliche Funktionen realisiert werden können. Für die Entwicklung eines Sensornetzwerks werden Knoten in der Regel nach dem Minimalprinzip entwickelt, d. h. geringstmögliche Kosten, minimaler Energieverbrauch, geringe Baugröße, geringer Kommunikationsbedarf und geringe Schaltungskomplexität. Dies erlaubt den Einsatz einer Vielzahl von Systemen, womit sich Bereiche großflächig überwachen lassen.

2.2.1 Optimierung auf Quellenseite

Die Auswahl eines geeigneten Energiewandlers stellt die Grundlage für autonome Sensorsysteme dar. Speziell im Bereich Solarzellen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Typen, welche sich beispielsweise in Wirkungsgrad, spektrale Empfindlichkeit, der Fähigkeit Streulicht einzufangen oder der Robustheit unterscheiden. Die Art der Energiequelle, Kunstlicht oder Sonnenenergie, bestimmt dabei im Wesentlichen die Auswahl. Neben dem Typ der Zelle ist die Dimensionierung von deren Größe ein zentrales Kriterium [30]. Als Grundlage dienen hierfür der nominelle Verbrauch, der Einsatzort sowie die Wirkungsgrade der Einzelkomponenten. So muss beispielsweise

ausreichend Energie gesammelt werden, um den Nachtbetrieb zu gewährleisten. Für Außenanwendungen stehen weiterhin in der Regel umfassende Datensätze zur Verfügung, welche das Energieaufkommen am Einsatzort beschreiben. Diese können, im Rahmen einer Simulation, ebenfalls zur Dimensionierung herangezogen werden [31].

Zur weiteren Optimierung des Wandlers und der damit bereitstehenden Leistung, ist ebenfalls der Einsatz eines MPPT Verfahrens zweckmäßig. Besonders durch die nichtlineare Kennlinie von Solarzellen bietet sich hierbei ein großes Verbesserungspotential. Die Zweckmäßigkeit der unterschiedlichen, in der Literatur verfügbaren Verfahren ist dabei jeweils vom konkreten Szenario abhängig.

Neben der besseren Nutzung der Energiequelle ist zusätzlich der Einsatz eines weiteren (oder mehrerer) Wandlers möglich. So können sich unterschiedliche Wandler beispielsweise gegenseitig unterstützen. Durch die Kombination einer Solarzelle mit, zum Beispiel einem thermoelektrischen Wandler oder einem Windgenerator, kann neben der Erhöhung der verfügbaren Gesamtenergie auch die Zuverlässigkeit erhöht werden, indem der Ausfall einer Quelle von der jeweils anderen überbrückt wird [32].

Neben Energiewandlern stellen außerdem Energiespeicher einen wesentlichen Teil der Versorgung von Sensorsystemen dar. Hierbei werden, fallabhängig, sowohl Sekundärbatterien als auch Kondensatoren eingesetzt. Sie dienen dazu Ausfallzeiten der primären Quelle, beispielsweise der Nachtbetrieb bei Solarzellen oder Schwankungen in der Energiebereitstellung, zu überbrücken. Hierfür ist eine geeignete Dimensionierung unter Beachtung von Verlusten und Selbstentladung notwendig, besonders im Hinblick auf den z. T. geringen Wirkungsgrad, wenn für die Speicherung zusätzlich unterschiedliche Spannungslevel aneinander angeglichen werden müssen [33]. Die ständige Entwicklung im Bereich der Speichertechnologien ermöglicht fortwährend höhere Leistungsdichten, beispielsweise durch den Einsatz von Superkondensatoren.

2.2.2 Optimierung auf Verbraucherseite

Die neuesten Entwicklungen im Bereich der integrierten Elektronik verringern den Schaltungsaufwand und damit den Verbrauch von Sensorsystemen immer weiter. Aktuell sind beispielsweise Systeme, welche durch eine Leistung im Bereich zweistelliger Mikrowatt versorgt werden, umsetzbar [34]. Neben den Bauteilen selbst ist ebenfalls die Schaltungsauswahl maßgeblich für die Verluste verantwortlich. So existieren beispielsweise verschiedene Möglichkeiten über Spannungswandler unterschiedliche Pegel (z. B. Quelle - Speicher) aneinander anzugleichen. Diese unterscheiden sich in ihren Eigenschaften. So ist beispielsweise ein hoher Wirkungsgrad in der Regel mit dem

Bedarf für ein Steuersignal verbunden, wofür dementsprechend ein Signalgeber (IC, Mikrocontroller) benötigt wird. Dieser Signalgeber muss seinerseits versorgt werden, bevor die Steuerung für einen Spannungswandler zur Verfügung steht. Passive Wandler, welche ein solches Signal nicht erfordern, weisen wiederum in der Regel einen geringen Wirkungsgrad auf, sind jedoch selbststartfähig.

Für das Energiemanagement von zentraler Bedeutung sind neben dem Gesamtsystem auch die Einzelkomponenten. So lässt sich der Verbrauch der Sensorik senken, indem nicht kontinuierlich, sondern ereignisgesteuert gemessen wird. Verändert sich der aktuelle Messwert beispielsweise nur innerhalb vordefinierter Grenzen, kann das Messintervall erhöht werden oder es kann auf eine Funkübertragung des Wertes verzichtet werden und der Empfänger geht dabei vom letzten Messwert aus [35]. Ähnliche Vorgehensweisen existieren auch für das Funksystem, indem der Verbrauch desselben an die verfügbare Leistung angepasst wird [36]. Gemeinsam mit intelligenten Routing Strategien, Datenvorverarbeitung zur Minimierung der Datenmenge und einer Anpassung der Sendeleistung kann der Verbrauch auf diese Weise gesenkt werden.

Neben energiesparender Schaltungsauswahl und Elektronik lassen sich weitere Einsparungen durch eine intelligente Nutzung der verfügbaren Leistung erreichen. Hierzu ist angestrebt, das System zwischen zwei Mess-/Sendevorgängen in einen Schlafmodus zu versetzen, in welchem der Verbrauch stark reduziert ist. Durch ein an die verfügbare Energie angepasstes Arbeitsintervall wird die Ausfallwahrscheinlichkeit stark gesenkt [37]. Um gleichzeitig die eigentliche Systemfunktion nicht zu vernachlässigen, ist dabei eine Zeitplanung mit Priorisierung einzelner Vorgänge sinnvoll [38].

Zusätzlich zu Hard- und Softwareoptimierungen ist für die bestmögliche Ausnutzung der verfügbaren Energie auch die Kenntnis über die Eingangsleistung notwendig. Durch die Kenntnis dieser, können Zustände vermieden werden, in welchen die Energie unzureichend für eine normale Funktion ist oder überschüssige Energie nicht genutzt werden kann. Für die Prognose der Eingangsleistung stehen in der Literatur verschiedene Verfahren zur Verfügung, welche beispielsweise auf digitalen Filtern basieren, Fuzzy-Logik oder neuronale Netze verwenden oder gespeicherte Energieprofile aus der Vergangenheit zur Berechnung der erwartbaren Leistung benutzen [39–42]. Auf Basis dieser kann, über geeignete Betriebszustände und eine Planung der Mess-/Sendevorgänge, das Energiemanagement die Systemfunktion dauerhaft sicherstellen [43].

2.3 Anwendungsszenarien im Rahmen dieser Arbeit

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell stellt eine zentrale Informationsquelle für das Energiemanagement eines drahtlosen Sensorknotens dar. Einzelne dieser Knoten sind in einem festgelegten Areal verteilt und mittels Funkkommunikation miteinander beziehungsweise mit einer Basisstation verbunden. Die Entfernungen zwischen den einzelnen Messsystemen bestimmen sich durch Reichweitenbeschränkungen des Kommunikationssystems, applikationsspezifische oder räumliche Anforderungen und können typischerweise im Bereich von 10 bis 200 Metern liegen. Die Anzahl der eingesetzten Systeme ist dabei fallabhängig.

Das Einsatzszenario ist charakterisiert durch einen zyklischen Betrieb, welcher möglichst konstant und damit planbar erfolgen soll. Dieser soll auch nachts aufrecht erhalten werden, wodurch eine definierte Energiemenge tagsüber gespeichert und vorgehalten werden muss. Grundsätzlich soll für ein solches System gelten, dass eine bestimmte Grundfunktionalität als Minimum gesichert werden muss, darüber hinaus jedoch zusätzliche Messungen bzw. Datenübermittlungen, sofern dies der energetische Zustand zulässt, erwünscht sind. Weiterhin soll eine Notfallenergie vorgehalten werden, damit im Fall des Auftretens von besonderen Ereignissen in jedem Fall eine Warnung bzw. ein Alarm ausgelöst werden kann. Je nach Anwendung ist zudem eine Benutzerabfrage nach dem aktuellen Momentanwert erforderlich, welche für die Energiebilanz ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Die Installation des Sensornetzes kann dabei in verschiedenen Umgebungen erfolgen, sowohl auf Freiflächen als auch in Bereichen mit Hindernissen, welche Abschattungseffekte bei den verwendeten Solarzellen hervorrufen, beispielsweise Gebäude oder Bäume. Hierbei ist zu beachten, dass die Installation eines solchen drahtlosen Sensornetzes nicht zwingend durch Experten erfolgt, sondern, beispielsweise im landwirtschaftlichen Bereich, auch durch den Endanwender erfolgen kann, welcher über Expertenwissen zu den Messwerten, jedoch nicht zwingend zur verwendeten Technik verfügt. In diesen Fällen ist davon auszugehen, dass eine Installation nicht optimal erfolgt. Die Positionierung der Solarzelle kann deutlich von der Idealposition abweichen und weiterhin ist eine technische Anpassung bzw. Programmierung des Energiemanagements nicht zumutbar. Das System muss somit dazu in der Lage sein, seinen Zustand eigenständig zu erkennen und anzupassen bzw. zu optimieren.

Die Zugänglichkeit der Einzelknoten stellt ebenfalls eine anwendungsspezifische Herausforderung dar. Zum Teil werden die Systeme in unzugänglichen Arealen installiert,

sind nur mit Spezialausrüstung erreichbar oder im Extremfall aus Kosten- oder Sicherheitsgründen nachträglich nicht mehr zugänglich. In diesen Fällen ist hardwareseitig keine weitere Beeinflussung möglich, weshalb das Energiemanagement selbstständig dazu in der Lage sein muss, seine Versorgung über einen langen Zeitraum bestmöglich und fehlerfrei aufrechtzuerhalten.

Konkrete Szenarien stellen die informationsgestützte Landwirtschaft, Gewässerüberwachung, Lawinenschutz, Gebäude- und Verkehrsüberwachung sowie der Objektschutz dar. Im landwirtschaftlichen Bereich betrifft dies beispielsweise die Überwachung von Plantagen und Feldern, die Bestimmung der Bodenfeuchte zur optimalen Bewässerung oder die Überwachung des Düngemiteleinsatzes. Mit einem optimierten Einsatz von Wasser können Kosten reduziert werden. Gleichzeitig sinkt durch die Informationsvielfalt die Gefahr, Düngemittel nach anschließender Bewässerung wirkungslos in das Grundwasser zu spülen. Die Momentanzustandsüberwachung eines Feldes hilft somit der Umwelt und ist für Unternehmen gleichzeitig rentabel. Hierbei sind häufige Messwerte zur genaueren Beobachtung sowie Zuverlässigkeit, Stabilität und Langzeiteinsatzfähigkeit von großer Bedeutung.

Im Bereich der Gewässerüberwachung sind Systeme von Interesse, welche beispielsweise kontinuierlich die Wasserqualität überwachen, sodass Grenzwerte kontrolliert werden können oder bei Bedarf Alarm ausgelöst werden kann. Weitere Einsatzfelder sind Pegelstandsmessungen oder die Beobachtung von Wellenausbreitungen zum Hochwasserschutz an Flüssen. Hierbei müssen unter Umständen große Gebiete abgedeckt werden, welche nicht direkt zugänglich sind.

Für Lawinenschutzszenarien ist ebenfalls eine große Informationsvielfalt wünschenswert, um aus Messdaten wie Temperatur, Feuchte oder Schneehöhe in einer zentralen Basisstation Rückschlüsse auf Zustand und Gefährdungsgrad einzelner Böschungen treffen zu können. Hier ist ebenfalls eine Notfallwarnfunktion von großem Interesse. Dies gilt auch für die Bereiche Objekt-, Verkehrs-, oder Gebäudeüberwachung, wobei die Zykluszeiten im Normalbetrieb vom Szenario abhängen.

Zusammenfassend zeichnen sich die Anforderungen an die Energieversorgung nach den oben genannten Szenarien wie folgt aus:

- Das System ist durchgängig im Einsatz.
- Der Betrieb erfolgt zyklisch.
- Die Zyklen sind nicht zeitkritisch, sollen aber im Zeitverlauf gleichmäßig verteilt sein und regelmäßig erfolgen.

- Eine hohe Dichte an Messwerten ist wünschenswert.
- Zuverlässigkeit und Langzeitfunktionalität sollen gesichert sein.
- Eine Umsetzung mit hohem Sicherheitsfaktor (größere Solarzelle/Speicher) soll aus Kosten- und Platzgründen vermieden werden.
- Das Energiemanagement soll sich eigenständig an die Umgebung anpassen.
- Notfall- und Bedarfsabfragen müssen abgedeckt sein.

2.4 Bedarf für ein Energiemodell

Die Energieversorgung herkömmlicher Sensorsysteme wird bedarfsgerecht ausgelegt, d. h. je nach Leistungsanforderung wird eine entsprechende Quelle zur Verfügung gestellt. Dies kann ein für das System dimensioniertes Netzteil sein oder auch ein Akkupack bzw. Batterien für die geforderte Leistung. Grundsätzlich wird dabei die vom System für eine definierte Funktionalität benötigte Energie als gegeben betrachtet. Ausnahmen stellen lediglich bauartbedingte Beschränkungen oder Maximalleistungen dar, welche jedoch mit typischen Sensorsystemen nicht erreicht werden.

Für autarke drahtlose Systeme gilt diese Beschreibung nicht, da hierbei die zur Verfügung stehende Energie stark begrenzt ist und ebenfalls bauartbedingt stark beschränkt wird. Daher sind diese Systeme energiegesteuert. Bei der Verwendung von Solarzellen zur Versorgung steht für Außenanwendungen jahreszeit- und wetterabhängig typischerweise eine dreistellige Wattzahl pro Quadratmeter (unter sehr guten Bedingungen wird auch 1 kW überschritten) zur Verfügung, wobei die für Sensoranwendungen verwendeten Solarzellgrößen in der Regel sehr viel kleiner sind. Weiterhin wirken sich der Wirkungsgrad der Zellen sowie der Wirkungsgrad der Spannungswandlung negativ auf die Gesamtbilanz aus, sodass die reell für Messaufgabe und Funkkommunikation zur Verfügung stehende Energie stark beschränkt ist. Daher stellt das Energiemanagement wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, das zentrale Element für eine zuverlässige Systemfunktion, Ausfallsicherheit, die Einstellung von Betriebszuständen, weitere Steuerungsaufgaben und damit auch für die Auslegung der übrigen Systemkomponenten dar.

Ziel eines jeden Energiemanagements ist, eine gesicherte Funktionalität zu gewährleisten, dabei auch auf unvorhergesehene Zustände reagieren zu können, einen energetischen Sicherheitspuffer aufrecht zu erhalten und eine optimale Ausnutzung der verfügbaren

Leistung zu ermöglichen. Um diese Aufgaben erfüllen zu können, muss es über eine programmierte Intelligenz verfügen. Hierfür sind verschiedene Informationen unabdingbar, wobei die grundsätzlich zur Verfügung stehende Energie ein zentrales Element ist. Ein Energiemanagement welches lediglich den aktuellen Ist-Zustand kennt, ist nicht dazu in der Lage eine intelligente Steuerung vorzunehmen.

Die aus energetischer Sicht typischerweise auftretenden Probleme bei der Verwendung eines Energiemanagements ohne Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Eingangsleistung sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Sie zeigt eine reale Kennlinie eines solaren Leistungsverlaufs für einen Tag im Zeitraum von 06:00 Uhr bis 18:00 Uhr. Für den Betrieb des Systems muss eine definierte Energiemenge für die Funktion bei Nacht bzw. ohne verfügbare Sonnenleistung zwischengespeichert werden. Wird hierfür konstant ein prozentualer Anteil der Eingangsleistung zu einem Zwischenspeicher geleitet (grau dargestellter Bereich), wird die eingehende Energie nicht gleichmäßig genutzt. So wird beispielsweise im Bereich A, in welchem die Eingangsleistung niedrig ausfällt, prozentual der gleiche Betrag zwischengespeichert wie in C. Damit steht in A im Vergleich zu C eine geringere Leistung zur Verfügung, von der zusätzlich ein Teil gespeichert wird, wohingegen in C eine absolut größere Energiemenge bereit steht. Somit können in C im Vergleich deutlich mehr Mess- oder Sendevorgänge durchgeführt werden als in A, d. h. die Systemfunktion schwankt deutlich über den Tag. Ein intelligentes Energiemanagement ist dazu in der Lage, in C prozentual mehr Energie zwischenzuspeichern, dafür jedoch in A den Großteil bzw. sämtliche Energie für die Funktion zu nutzen. Dabei würden Mess- und Sendevorgänge über einen Tag verteilt gleichmäßiger und damit planbarer ablaufen. Im Idealfall kennt die Steuerung den exakten Eingangsverlauf und ist dazu in der Lage, die Energie gleichmäßig bzw. den Anforderungen entsprechend zu verteilen.

Weiterhin kann es durch die Variabilität der zur Verfügung stehenden Sonnenleistung jederzeit zu Einbrüchen in der Versorgung kommen, siehe Bereich B. Ein intelligentes Management ist dazu in der Lage, diese Problemzeiten zu erkennen und entsprechend zu reagieren.

Eine weitere Herausforderung sind die saisonalen Abhängigkeiten des Leistungsverlaufs sowie dessen Variabilität, vergleiche Abbildung 2.5. Die Kennlinien können, wie in a) dargestellt, sowohl gleichmäßig als auch wechselhaft verlaufen. Ein gleichmäßiger Verlauf entspricht dabei entweder sehr guten Wetterbedingungen oder einer homogenen Bewölkung, welche lediglich die absolute Menge der verfügbaren Energie herabsetzt. Ein wechselhafter Verlauf zeigt schwankende Umgebungsbedingungen an. Gleichzeitig

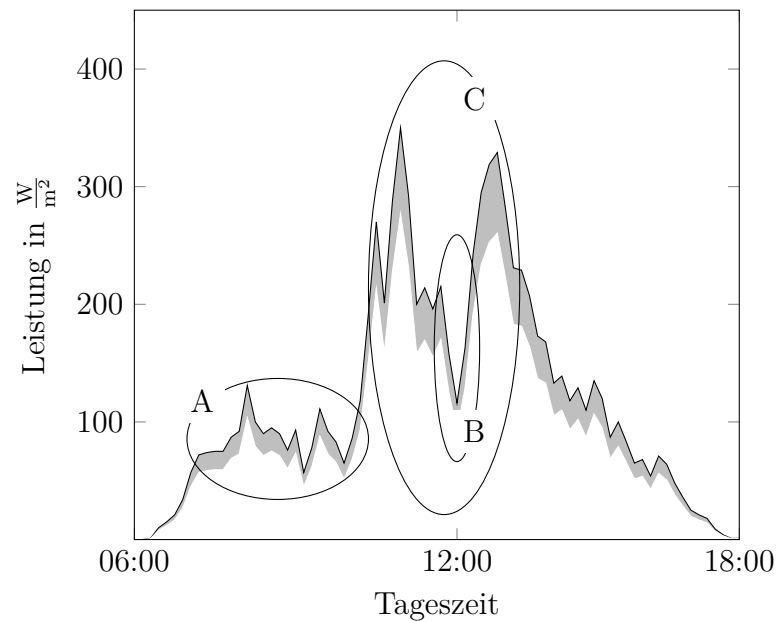


Abbildung 2.4: Typischerweise auftretende Probleme bei Verwendung eines Energiemanagements ohne die Fähigkeit zur Erkennung des zeitlichen Verlaufs des eigenen energetischen Zustands.

verändert sich die insgesamt über einen Tag zur Verfügung stehende Energie über das Jahr, siehe b). Durch die längere Sonnenscheindauer im Sommer und die, absolut betrachtet, geringere Leistung im Winter, verändert sich die Charakteristik der Energieversorgung. Ein intelligentes Energiemanagement muss dazu in der Lage, sein diese Zustände ebenfalls zu berücksichtigen und die Systemfunktion unter allen Umständen zu gewährleisten.

Damit diese Gewährleistung erfüllt ist, ist es zwingend notwendig, den Verlauf der Eingangsenergie in zeitlicher Abhängigkeit zu betrachten, sowohl für einen Tag als auch auf die Saison bezogen. Durch verschiedene Beschränkungen hinsichtlich Hardware des Sensorsystems (hierauf wird in Abschnitt 5.2 näher eingegangen) und Wirtschaftlichkeit sind die typischerweise hierzu verwendeten Betrachtungs- und Berechnungsmöglichkeiten nicht geeignet. Um einem Sensorknoten die zeitliche Betrachtung zu ermöglichen ist die Überführung in ein Modell notwendig. Die nach Stand der Technik üblichen Modellansätze sind aufgrund der Hardwarebeschränkungen nicht anwendbar, daher ergibt sich der Bedarf für ein an die Umgebung von drahtlosen Sensorsystemen angepasstes Modell. Damit wird sowohl die Betrachtung des Ist-Zustands, als auch, mit Hilfe einer Prognosefunktionalität, die vorausschauende Betrachtung des Leistungsverlaufs möglich.

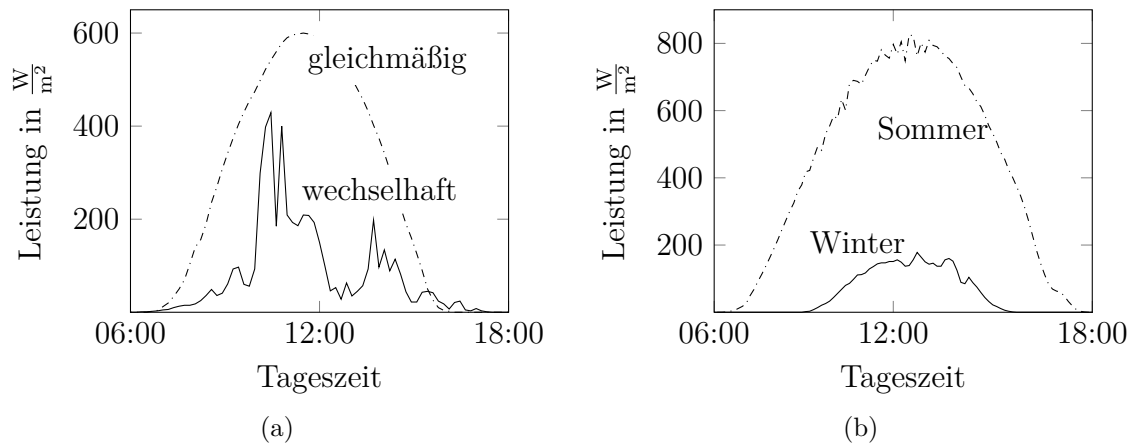


Abbildung 2.5: Vergleich zwischen stark wechselhaftem und gleichmäßigem Verlauf (a) sowie eine exemplarische Sommerkennlinie im Vergleich mit einem Winterverlauf (b).

Durch die sich daraus ergebende bessere Planbarkeit von Betriebszuständen und Energieverbrauch wird eine Optimierung der Dimensionierung möglich. Speziell bei autarken Systemen ist der Zustand zu vermeiden, dass Zwischen- oder Langzeitspeicher vollständig geladen sind, die Mess- bzw. Sendeintervalle minimal sind und dennoch überschüssige Energie bereit steht. Jede Form von Energieverschwendung ist wider dem Idealbild eines autarken Systems. Bei Verwendung einer Prognosefunktionalität können Kurz- oder Langzeitspeicher entsprechend kleiner dimensioniert werden, wodurch sich gegebenenfalls Größen- oder Kostenvorteile ergeben.

Für ein vollständiges Energiemanagement ist weiterhin die Unabhängigkeit von der Umgebung von zentraler Bedeutung, da speziell bei verteilten Systemen mit einer großen Anzahl an Einzelknoten nicht für jeden eine individuelle Programmierung vorgenommen werden kann. Daher muss das Modell die Anforderung der Flexibilität erfüllen, d. h. das Energiemanagement muss dazu in der Lage sein, sich an verschiedene Bedingungen anzupassen. Hierfür ist es erforderlich, einen Modellansatz zu entwickeln, welcher auf einem entsprechenden System eigenständig abgeändert und nachgeführt werden kann.

Aus der Literatur sind Ansätze, welche alle oben genannten Kriterien erfüllen und gleichzeitig auf drahtlosen Sensorsystemen einsetzbar sind, nicht bekannt.

2.5 Vorteile eines modellbasierten Verfahrens

Grundsätzlich ist die modellbasierte Herangehensweise im Vergleich zum Heranziehen aller aktuellen Momentanwerte zur Bestimmung des Leistungsverlaufs weniger verbrauchsintensiv bezüglich Ressourcen und Energie und ermöglicht damit einen sinnvollen Kosten-Nutzen-Faktor. Durch die Kenntnis des Verlaufs und die sich daraus ergebende Möglichkeit zur Verteilung und Planung des Energieverbrauchs kann ein gleichmäßiges Mess-Sende-Intervall realisiert werden, wodurch die Entwicklung einzelner Messwerte beobachtet werden kann. Dabei sind kleinere zeitliche Verschiebungen im Sekunden- oder Minutenintervall für die Einsatzszenarien nach Abschnitt 2.3 durchaus zulässig und vertretbar, jedoch sollte vermieden werden, dass sich Beobachtungspunkte zu bestimmten Zeiten häufen und zu anderen Zeiten wenig Informationen zur Verfügung stehen. Unterschiede in den Informationsdichten können zwar beim Auftreten von bestimmten Ereignissen sinnvoll sein, beispielsweise zur wiederholten Überprüfung von Werten, sollten im Normalbetrieb jedoch vermieden werden, um eine gleichmäßige Aussage zu Werteverläufen treffen zu können, ohne diese vorab zu wichten. Hierzu genügt die Prädiktion der Gesamtenergie eines Tages nicht. Um eine konstant zyklische Systemfunktion zu erhalten, muss der genauere Verlauf bekannt sein. Aus diesem lassen sich beispielsweise die optimalen Zeitpunkte zur Vorhaltung der für den Betrieb bei Nacht benötigten Energiemenge bestimmen oder Ausfallzeiten erkennen und überbrücken.

Weiterhin zeigen sich bei der Verwendung eines Verlaufsmodells deutliche Vorteile im Bereich der Dimensionierung. Wird auf eine Prognosefunktionalität verzichtet und lediglich ein größerer Speicher eingesetzt, können neben Konflikten bezüglich Baugröße und Kosten auch Nachteile im Bereich der Effizienz entstehen. Hinsichtlich Verlusten und Selbstentladung sind kleinere, ausreichend dimensionierte Speicher vorzuziehen. Die bessere Ausnutzung der Eingangsleistung durch deren Kenntnis über das Modell ermöglicht die Verwendung kleinerer angepasster Speicherelemente. Zudem gilt, je größer der Speicher ausfällt, desto größer wird der benötigte Zeitraum, um im Einschaltfall einen für die restliche Hardware nutzbaren Spannungspegel zu erreichen. Bei Benutzung eines Langzeitspeichers entstehen zudem zusätzliche Umladeverluste. Ähnliches gilt für die Verwendung größerer Solarzellen, für welche bei typischen Anwendungen im Freien prinzipiell ausreichend Platz zur Verfügung steht. Zwar kann sich auf diese Weise durch zusätzliche Leistung eine genaue Betrachtung des Energieverlaufs erübrigen, jedoch erhöhen sich die Kosten eines Einzelknotens, es entsteht ein größerer Diebstahlanreiz

und die baulichen Anforderungen steigen zusätzlich, da sich beispielsweise eine größere Angriffsfläche für Wind bietet. Aufgrund dieser Nachteile ist eine Überdimensionierung der Zellen generell zu vermeiden.

Die ausschließliche Nutzung der täglichen Energiebilanz ermöglicht ebenfalls die Vorausplanung von Zuständen. Dabei kann jedoch auf kleinere Zeitabschnitte mit wechselhaftem Verhalten oder kritische Zustände nicht reagiert werden. Hierfür ist eine zeitlich detailliertere Betrachtung notwendig, wie sie durch ein Verlaufsmodell gegeben ist.

Ist der Verlauf der Eingangsenergie durch ein Modell hinreichend bestimmt, besteht zudem die Möglichkeit, für das Energiemanagement diesen über Korrekturen anzupassen. Damit erhält das System die Funktionalität der adaptiven Anpassung an die Umgebung, wodurch die absolute Positionierung des Knoten nicht mehr vorab für den Ertrag berücksichtigt werden muss, Veränderungen der Umgebung während der Einsatzzeit können ausgeglichen werden und der Endbenutzer muss nicht selbst zur Konfiguration in das System eingreifen. Damit wird eine Installation ohne Expertenwissen möglich.

Ein weiterer Vorteil der Modellierung besteht darin erkennen zu können, wann energiekritische Zeiträume auftreten. Dies ermöglicht rechtzeitige Warnmeldungen oder die Vorhersage von Ausfallzeiten, welche daraufhin in der Basisstation gemeldet und berücksichtigt werden können. Speziell für sicherheits- oder betriebsrelevante Systeme stellt dies einen Fortschritt dar, weil früher auf Ausfälle reagiert werden kann, das System nicht als defekt betrachtet wird und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.

2.6 Abgrenzung zu anderen Energy Harvesting Quellen

Für die Versorgung von energieautarken Sensorsystemen existieren je nach Anwendungsfall verschiedene Möglichkeiten. Aufgrund der Verfügbarkeit der Quellen stellen Solarzellen, thermoelektrische Wandler, kinetische Energiewandler oder Systeme, welche elektromagnetische Wellen nutzen können, im Vordergrund. Die Bereiche der Energieausbeute schwanken dabei stark von einigen Mikrowatt bis zwei- oder dreistelligen Milliwatt [44–46]. Zusätzlich existieren Speziallösungen, beispielsweise zur Nutzbarmachung von Strömungen [47]. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell hat keine Allgemeingültigkeit und lässt sich nicht ohne weiteres auf andere Quellen übertragen.

Das in dieser Arbeit dargestellte Modellierungsverfahren betrifft Solarzellen als Energiewandler mit der zusätzlichen Einschränkung auf Systeme im Außenbereich.

Grund hierfür ist die Charakteristik der Energieausbeute mit der Abhängigkeit vom Sonnenverlauf. Dieser gibt den grundsätzlichen Verlauf der eingehenden Leistung vor und kann daher als Referenz herangezogen werden. Auf Innenanwendungen lässt sich dies gegebenenfalls übertragen, falls das System in Fensternähe appliziert wird. Bei typischen Kunstlichtszenarien bestimmen beispielsweise die Anwesenheit von Personen oder Arbeitszeiten über die Dauer der Energieverfügbarkeit sowie der Typ der Lichtquelle und die Solarzelle über die Energiemenge. Eine Modellierung und Vorausberechnung des Tagesverlaufs ist daher in der Regel nicht notwendig, da dieser meist direkt bestimmt werden kann.

Bei thermischen Wandlern bestimmt die Einsatzdauer der Energiequelle, beispielsweise die Laufzeit einer Maschine, über den Energieverlauf. Dieser ist somit ebenfalls applikationsspezifisch und typischerweise, aufgrund verschiedener thermischer Kapazitäten, keinen schnellen Schwankungen unterworfen. Ähnliches gilt für kinetische Wandler, beispielsweise zur Nutzung von Vibrationen. Hierfür ist eine Anpassung der Empfindlichkeit zwischen Quelle und Wandler notwendig, damit der Resonanzfall und somit die maximale Energieausbeute erzielt werden kann. Da sich die Charakteristik von Schwingungen schnell ändern kann und systemabhängig ist, wird auch hier eine angepasste Betrachtung des Eingangsenergieverlaufs notwendig. Ein universelles Modell ist aufgrund des Spektrums an möglichen Szenarien nicht abzuleiten. Die Nutzung von Sonnenenergie zur Versorgung von drahtlosen Sensorsystemen stellt somit bezüglich ihrer günstigen Vorhersagbarkeit eine Ausnahme dar.

3 Grundlagen des Energiemanagements für Solarzellen

Im Folgenden werden die Bestandteile beschrieben, welche Teil jedes Energiemanagements eines solarzellenbasierten autonomen drahtlosen Sensorsystems sind. Dazu gehören sowohl die Betrachtung der Solarzelle, die Arbeitspunktanpassung zur Optimierung der Leistungsausbeute sowie die Spannungsanpassung mittels Gleichspannungswandler. Diese Komponenten stellen die Grundlage eines Sensorsystems dar und haben die Aufgabe, über einen hohen Wirkungsgrad und bestmögliche Anpassung die Zuverlässigkeit und Funktionalität des Systems zu maximieren.

In diesem Abschnitt nicht betrachtet werden Speicher bzw. das generelle Speicherkonzept. In der Regel werden Kurz- und Langzeitspeicher eingesetzt, um Fehlbeträge in der Energie zu ersetzen bzw. für die Nacht Energie bereitzustellen. Die Auswahl der Speicher ist jedoch stark von den Einsatzbedingungen und Funktionsanforderungen abhängig, sodass hierzu keine allgemeinen Empfehlungen abgeleitet werden können, abgesehen von hoher Effizienz und sinnvoller Dimensionierung.

3.1 Leistungsberechnung einer Solarzelle

Das Ersatzschaltbild einer Solarzelle besteht aus einer Stromquelle, einem Parallelwiderstand zur Abbildung der Leckströme, einem Serienwiderstand zur Abbildung der unterschiedlichen Leitfähigkeiten einzelner Bereiche der Zelle sowie eine (Eindiodenmodell) oder zwei (Zweidiodenmodell) Dioden [48, S. 97]. Im Falle des Zweidiodenmodells (vergleiche Abbildung 3.1) wird zur idealen Diode eine weitere parallel geschaltet, welche das nichtideale Verhalten abbildet.

Als Basis für die Betrachtung von Strom und Spannung dient die Shockley-Gleichung:

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_{pv}}{U_T}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

mit der Temperaturspannung

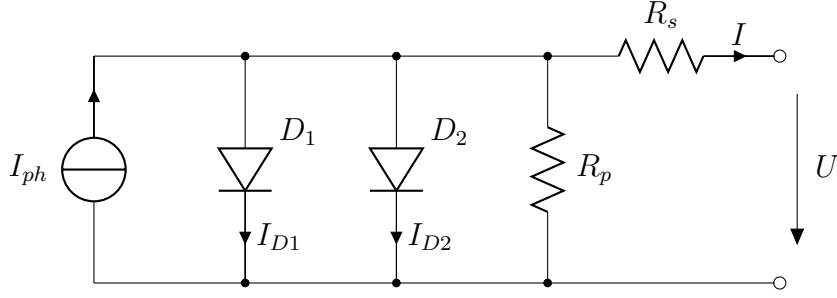


Abbildung 3.1: 2-Dioden Ersatzschaltbild einer Solarzelle.

$$U_T = \frac{k_B \cdot T}{q}, \quad (3.2)$$

deren Temperatur T , der Boltzmann-Konstante k_B und der Elementarladung q . Der Sperrstrom I_0 wird für das Zweidiodenmodell zu

$$I_{01} = c_{S1} \cdot T^3 \cdot e^{\left(-\frac{U_{bl}}{U_T}\right)} \quad (3.3)$$

und

$$I_{02} = c_{S2} \cdot T^{5/2} \cdot e^{\left(-\frac{U_{bl}}{2 \cdot U_T}\right)} \quad (3.4)$$

mit Einführung der Temperaturabhängigkeit durch die Koeffizienten c_{S1} und c_{S2} in $A \cdot K^{-3}$ bzw. $A \cdot K^{-5/2}$ und der Bandlücke U_{bl} [49, S. 33]. Daraus ergibt sich die Gesamtgleichung für ein Zweidiodenmodell zu

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_S}{m_{d1} \cdot U_T}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left(e^{\frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_S}{m_{d2} \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_S}{R_P}. \quad (3.5)$$

Die Diodenfaktoren werden in diesem Modell typischerweise $m_{d1} = 1$ (ideal) und $m_{d2} = 2$ (real) gesetzt [49, S. 31]. Im Anhang unter A.1 sind die Auswirkungen von Veränderungen der einzelnen Parameter auf die Kennlinie dargestellt. So steigt mit zunehmender Temperatur der Kurzschlussstrom an, gleichzeitig verringert sich die Leerlaufspannung. Durch die nichtideale Diode wird die Kennlinie bei höherem Diodenfaktor in sich gestaucht, wohingegen sich der Parallelwiderstand auf den Anstieg

der Kennlinie im niedrigen Spannungsbereich und der Serienwiderstand auf den Anstieg im Bereich unterhalb der Leerlaufspannung auswirkt.

Entsprechend der Annahme, dass in einem Solarmodul, welches für den Einsatz in drahtlosen Sensorsystemen geeignet ist, mehrere Einzelzellen intern miteinander verschaltet sind, um beispielsweise die Spannung zu erhöhen, können die Faktoren n_p und n_s zur Abbildung der Anzahl der parallel bzw. seriell geschalteten Zellen eingeführt werden [50]:

$$I = n_p \cdot I_{ph} - n_p \cdot I_{01} \cdot \left(e^{\frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_S}{m_{d1} \cdot U_T \cdot n_s}} - 1 \right) - n_p \cdot I_{02} \cdot \left(e^{\frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_S}{m_{d2} \cdot U_T \cdot n_s}} - 1 \right) - \frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_S}{R_P}. \quad (3.6)$$

Über Gleichung 3.6 lässt sich die Ausgangsleistung einer Solarzelle bestimmen. Weil es sich dabei um eine implizite Gleichung handelt, sind numerische Lösungsverfahren zur Berechnung notwendig. Eine Übersicht zu verschiedenen Verfahren, wie die Sekantenmethode, Regula Falsi oder das Bisektionsverfahren gibt [51]. Aufgrund des vergleichsweise linearen Abfalls der Strom-Spannungs-Kennlinie im niedrigen Spannungsbereich (vergleiche Abbildung 3.2) erreicht das Newton-Verfahren eine hohe Konvergenzgeschwindigkeit, wobei für den Folgewert der aktuelle Strom mit einem Korrekturfaktor verrechnet wird:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}. \quad (3.7)$$

Dafür wird der Stromanstieg

$$I' = -\frac{n_p \cdot I_{01} \cdot R_S}{m_{d1} \cdot U_T \cdot n_s} \cdot \left(e^{\frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_S}{m_{d1} \cdot U_T \cdot n_s}} \right) - \frac{n_p \cdot I_{02} \cdot R_S}{m_{d2} \cdot U_T \cdot n_s} \cdot \left(e^{\frac{U_{pv} + I_{pv} \cdot R_S}{m_{d2} \cdot U_T \cdot n_s}} \right) - \frac{R_S}{R_P} \quad (3.8)$$

mit Gleichung 3.6 ins Verhältnis gesetzt und eine schrittweise Näherung erreicht. Verfahren zur Ermittlung des optimalen Startwerts können die Rechengeschwindigkeit dabei weiter erhöhen.

3.2 Leistungsanpassungsstrategien für Solarzellen

Die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle, vergleiche Abbildung 3.2, verläuft nichtlinear, weshalb die Leistungskurve ebenfalls nichtlinear verläuft. Wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, existiert exakt ein Punkt an dem die maximale Leistung abgerufen

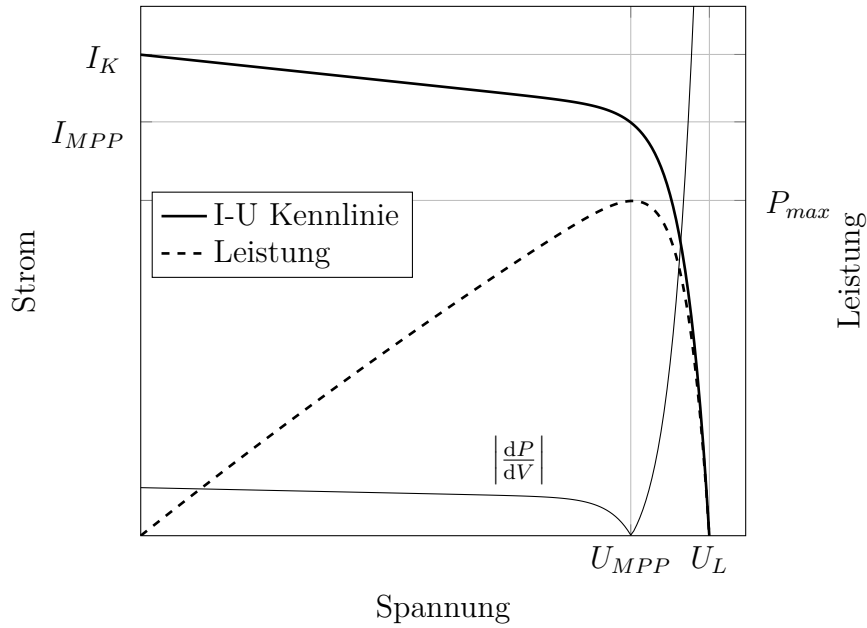


Abbildung 3.2: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle.

werden kann. Der Zusammenhang zwischen Leerlaufspannung (U_L) und Kurzschlussstrom (I_K) mit dem Punkt der maximalen Leistung lässt sich über den Füllfaktor ausdrücken:

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_L \cdot I_K} = \frac{P_{MPP}}{U_L \cdot I_K}. \quad (3.9)$$

Da sich die Kennlinie im Betrieb verändern kann, beispielsweise durch Schwankungen in der Beleuchtung, Temperatureinflüsse oder Abschattungen, muss der Arbeitspunkt in regelmäßigen Abständen angepasst und neu eingestellt werden. Um dies zu erreichen, existieren verschiedene MPPT Verfahren, die sich in der Art und Weise wie der MPP ermittelt wird, in den dazu erforderlichen Parametern und in der erforderlichen Rechenleistung bzw. Speicherkapazität unterscheiden.

3.2.1 Anforderungen an MPPT Systeme

Die Eignung von MPPT Verfahren zur Arbeitspunktbestimmung hängt von verschiedenen Parametern ab. Je kleiner die zur Verfügung stehende Leistung ist, desto stärker wirken sich der Verbrauch bzw. die Anforderungen, die das MPPT System stellt, aus. Für Großanlagen ist es wichtig, eine möglichst genaue Bestimmung zu erreichen. Je

kleiner die Anlage wird, desto stärker verschiebt sich der Fokus auf ungenauere, aber energiesparendere Methoden.

Für Energy Harvesting und ultra-low-power Systeme, welche im Bereich weniger Milliwatt arbeiten, können sich bestimmte MPPT Verfahren unter Umständen aus energetischer Sicht nicht lohnen. Beispielsweise wird in [52] ein verbessertes Perturb & Observe Verfahren beschrieben, welches eine Verbesserung der Energieausbeute um 10,3% bewirkt und gleichzeitig $350\text{ }\mu\text{W}$ verbraucht. Der drahtlose Sensorknoten müsste in diesem Fall von einer Quelle mit mehr als $3,5\text{ mW}$ versorgt werden, damit sich das MPPT Verfahren positiv auswirkt. Selbst wenn das MPPT System unter diesem Verbrauch liegt, kann der Mehraufwand hinsichtlich erforderlicher Bauteile aus Kostengründen nicht gerechtfertigt sein, da drahtlose Sensorsysteme in der Regel das Ziel haben, im low-cost Bereich angesiedelt zu sein.

Folgende Faktoren spielen bei der Auswahl eines geeigneten MPPT Verfahrens eine Rolle (die Reihenfolge der Aufzählung entspricht nicht der Bedeutung):

- Rechenleistung

Je nach verfügbarem Mikrocontroller stehen unterschiedlich potente Rechenkerne zur Verfügung. Je nach Taktfrequenz und Befehlssatz lassen sich unterschiedlich komplexe Berechnungen realisieren. Dies spielt vor allem bei Verfahren der künstlichen Intelligenz sowie nichtlinearen Berechnungen eine Rolle.

- Rechenzeit

Die für eine Berechnung erforderliche Zeit schlägt sich direkt im Energieverbrauch nieder. Die Rechenzeit hängt von der Komplexität des Verfahrens und der Rechenleistung des Mikrocontrollers ab.

- Speicherbedarf

Besonders Verfahren der künstlichen Intelligenz sowie Lookup Table basierte Verfahren benötigen große Datenmengen, um hinreichend genau arbeiten zu können. Die für drahtlose Sensorsysteme verwendeten Mikrocontroller weisen derzeit Speicherkapazitäten im Bereich zwei- bis dreistelliger kByte auf, daher kann dies einen limitierenden Faktor für die Auswahl eines MPPT Verfahrens darstellen.

- Häufigkeit der Berechnung

In der Regel kann von Programmierer festgelegt werden, wie oft die Berechnung wiederholt wird. Dies hat eine lineare Auswirkung auf den Energieverbrauch des MPPT Systems.

- Annäherungsgeschwindigkeit

Die Annäherungsgeschwindigkeit wird bestimmt durch die Anzahl an Iterationen, die notwendig sind, um eine bestimmte Genauigkeit des MPPs zu erreichen. Verfahren die eine schnellere Annäherung an den MPP erlauben, können bevorzugt werden.

- Genauigkeit

Idealerweise sollte ein MPPT Verfahren den Arbeitspunkt exakt bestimmen. In der Regel hängt die Genauigkeit direkt mit dem Energieverbrauch zusammen. Je exakter die Bestimmung, desto höher der Verbrauch. Es sollte demnach ein Ausgleich zwischen Genauigkeit und Verbrauch stattfinden.

- Erforderliche Parameter

Die verschiedenen aus der Literatur bekannten Methoden erfordern unterschiedliche Eingangsparameter. Speziell spielen dabei Strom- und Spannungsmessung eine Rolle. Während Spannungsmessungen meistens mit den in drahtlosen Sensorknoten verbauten Mikrocontrollern hinreichend genau durchgeführt werden können, sind Strommessungen aufgrund der kleinen Ströme mit mehr Aufwand verbunden. Dabei können externe Stromsensoren notwendig sein, welche die Eignung eines MPPT Verfahrens beeinflussen und unter Umständen nicht zweckmäßig werden lassen.

- Schaltungsaufwand

Die unterschiedlichen MPPT Verfahren lassen sich direkt in Software, in Hardware oder einer Kombination aus beiden realisieren. Im Hinblick auf low-cost Systeme kann ein zusätzlicher Bauteilaufwand nicht gerechtfertigt sein. Sowohl Software als auch Hardware verursachen einen zusätzlichen Energieverbrauch. Je nach Gesamtsystem ist der Schaltungsaufwand zu berücksichtigen.

Eine Übersicht zu den wichtigsten Verfahren gibt Tabelle 3.1. Sie zeigt, welche Methoden einen exakten MPP berechnen können, welche Parameter dafür notwendig

Verfahren	Klassifizierung	Zellabhängigkeit	Exakter MPP	Benötigte Parameter	Genauigkeit
Konstantspannung	P	ja	nein	U	N
Konstantstrom	P	ja	nein	I	N
Optimalspannung	P	ja	nein	-	N
β -Verfahren	P	ja	nein	U, I	H
Pilotzelle	P	ja	ja	-	H
Lookup Table	P	ja	ja	$U, I, T, \dots$	N
Perturb & Observe	A	nein	ja	U, I	M
Hill Climbing	A	nein	ja	U, I	M
3-Punkt Methode	A	nein	ja	U, I	H
Incremental Conductance	A	nein	ja	U, I	H
Parasitäre Kapazität	A	ja	ja	U, I	SH
KI-Verfahren	A	ja	ja	$U, I, \dots$	SH
Weitere Verfahren					
Temperatur	A	ja	ja	U, T	H
Veränderliche Spule	A	nein	ja	U, I	M
Slide Control	A	nein	ja	U, I	M
Ripple Correlation	A	nein	ja	U, I	H

Tabelle 3.1: Vergleich unterschiedlicher MPPT Verfahren [53–56]. P = Passiv, A = Aktiv, N = Niedrig, M = Mittel, H = Hoch, SH = Sehr Hoch.

sind, wie genau die Berechnung ist und ob eine Abhängigkeit von der verwendeten Solarzelle existiert. Die in der Literatur meistbeschriebenen Verfahren werden in den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 näher erläutert.

3.2.2 Passive MPPT Verfahren

Als passive Verfahren werden im Folgenden Arbeitspunktanpassungen bezeichnet, welche den MPP nicht direkt und exakt ermitteln, sondern über ausgesuchte Parameter annähern. Daraus resultiert eine Abweichung vom optimalen Leistungspunkt, welche jedoch durch Zufall, sofern die Umweltparameter dies zulassen, in seltenen Fällen gegen Null gehen kann. Passive MPPT Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass wenige Parameter und eine geringe Rechenleistung benötigt werden, in der Regel jedoch nicht

der exakte MPP erreicht wird. Passive Verfahren sollten daher die Mindestlösung darstellen, können jedoch aus energetischer Sicht suboptimal sein.

3.2.2.1 Konstantspannung/-strom

Grundlegende Beobachtung für dieses Verfahren ist, dass das Verhältnis zwischen der Leerlaufspannung und der Spannung am Punkt der maximalen Leistung etwa linear ist und dem Faktor k_{cv} entspricht. Dies gilt analog für den Kurzschlussstrom und die Stromstärke am Punkt maximaler Leistung. Daraus lassen sich die Gleichungen

$$\frac{U_{MPP}}{U_L} \approx k_{cv} \quad (3.10)$$

und

$$\frac{I_{MPP}}{I_K} \approx k_{cc} \quad (3.11)$$

ableiten. Nach [57, S. 88] liegt k_{cv} etwa im Bereich 0,75..0,9 und k_{cc} im Bereich von etwa 0,85..0,95.

Damit dieses Verfahren sinnvoll angewendet werden kann, müssen zunächst unter variierenden Bedingungen (hauptsächlich Beleuchtung und Temperatur) Kennlinien aufzeichnet werden, mit deren Hilfe die jeweiligen Parameter für eine bestimmte Solarzelle abgeleitet werden können. Der MPPT Schaltkreis schaltet während des Betriebs in regelmäßigen Abständen die Solarzelle auf Leerlauf bzw. Kurzschluss, misst die jeweiligen Größen und stellt den MPP Wert über die Parameter neu ein.

Die wichtigsten Nachteile dieses Verfahrens sind, dass während der Messung keine Energie für das Sensorsystem zur Verfügung steht bzw. dass die Verhältnisse der jeweiligen beiden Werte nur in guter Näherung linear sind, womit die Verfahren nicht den exakten MPP liefern und im Vergleich zu anderen eine größere Ungenauigkeit aufweisen. Weiterhin ist die Strommessung, z. B. über Strom-Spannungswandler oder Shuntwiderstand aufwendiger und fehlerbehafteter als die Spannungsmessung, weshalb diese zu bevorzugen ist. Das Konstantspannungsverfahren wiederum lässt sich verhältnismäßig einfach in ein Sensorsystem integrieren, da die Messung selbst über den ohnehin vorhandenen Mikrocontroller erfolgen kann und somit lediglich die Funktionlität zum Auftrennen der Verbindung zwischen Solarzelle und nachfolgender Schaltung realisiert werden muss.

Die Methode kann optimiert werden, indem für unterschiedliche Tageszeiten unterschiedliche k -Faktoren verwendet werden, welche an die sich bei wechselnden Umgebungsbedingungen verändernde Kennlinie angepasst sind.

3.2.2.2 Optimalspannung

Das Optimalspannungsverfahren (auch als Best Fixed Voltage bezeichnet) stellt eine Vereinfachung des Konstantspannungsverfahrens dar. Dabei wird aus empirischen Daten und a-priori Wissen eine Spannung ermittelt, bei der das System im Durchschnitt die beste Leistung erreicht. Diese Spannung wird fest eingestellt. Dabei wird der exakte MPP in der Regel nicht erreicht. Je mehr Vorwissen über Einsatzort, Umgebungsbedingungen und Charakteristik der Zellen vorliegt, desto besser kann die Zielspannung bestimmt werden.

Wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass keine Sensorinformationen bzw. Messungen notwendig sind und die Energieversorgung zu keiner Zeit vom System getrennt werden muss. Daher bestehen grundsätzlich keine technischen Hinderungsgründe für den Einsatz der Optimalspannung. Nachteilig ist der gegebenenfalls hohe Fehler. Aus diesen Gründen sollte das Optimalspannungsverfahren, sofern genauere Methoden für eine bestimmte Applikation nicht in Frage kommen, als Mindestlösung eingesetzt werden. Eine Verbesserungsmöglichkeit stellt der Einsatz mehrerer, auf die Tageszeit angepasster, Spannungswerte dar, so zum Beispiel Werte für früh, mittags und abends.

3.2.2.3 β -Verfahren

Das β -Verfahren dient der Annäherung an den MPP durch die Berechnung von

$$\beta = \ln \left(\frac{I_{pv}}{U_{pv}} \right) - c \cdot U_{pv} \quad (3.12)$$

mit der Konstanten

$$c = \frac{q}{m_d k_B T n_s}, \quad (3.13)$$

sowie dem Diodenfaktor m_d , der Boltzmann-Konstante k_B , der Temperatur T und der Anzahl der in Reihe geschalteten Solarmodule n_s . β bleibt in der Nähe des MPP in guter Näherung konstant. Ziel der Methode ist, mit der β -Berechnung eine schnelle aber grobe Annäherung an die MPP Spannung zu erreichen und im Anschluss entweder mit kleinerer Schrittweite eine genauere Einstellung zu erreichen oder aber ein zweites MPPT Verfahren anzuwenden, mit dem der exakte MPP eingestellt wird.

Für den Einsatz dieser Methode in drahtlosen Sensornetzen spricht die einfache und ressourcenschonende Berechnung, nachteilig sind jedoch die erforderliche Strommessung sowie die notwendige Kenntnis über die Zellparameter, womit eine individuelle Anpassung an unterschiedliche Systeme notwendig wird.

3.2.2.4 Pilotzelle

Das Pilotzellenverfahren entspricht in ähnlicher Weise dem Konstantspannung/-strom-Vorgehen, jedoch wird die Messung der Leerlaufspannung bzw. des Kurzschlussstroms dabei an einer externen Zelle vorgenommen, welche lediglich dem Einstellen des MPP dient. Dies bietet den Vorteil, dass bei den für die Systemleistung verantwortlichen Zellen keine Trennung zum Zwecke der Messung notwendig wird. Gleichzeitig muss eine exakte Anpassung der Pilotzelle erfolgen, damit die Ergebnisse allgemein verwendbar sind. Für die Berechnung und Weitergabe der I_{SC} bzw. U_{OC} Werte ist außerdem eine zentrale Steuerung notwendig.

Der Einsatz einer Pilotzelle in drahtlosen Sensorsystemen ist nicht zweckmäßig, da hierbei in der Regel nur eine Solarzelle zum Einsatz kommt. Der Zusatzaufwand steht in keinem Verhältnis zu den Vorteilen für die Berechnung des MPP.

3.2.2.5 Lookup Table

Im Rahmen dieses Verfahrens werden Strom- und Spannungswerte gemessen und mit einer Datenbank verglichen. Die Datenbank enthält eine Liste mit optimalen MPP Werten unter bestimmten Umgebungsbedingungen. Die Einstellung des Leistungspunkts wird somit auf empirischen Werten basierend vorgenommen. Je mehr Kurven in der Datenbank vorhanden sind und je mehr unterschiedliche klimatische Bedingungen damit abgedeckt werden, desto genauer kann der Arbeitspunkt eingestellt werden. Gleichzeitig steigt damit auch der Speicherbedarf für die Tabelle. Für Messung und Vergleich werden dabei nicht nur die elektrischen Parameter herangezogen, sondern beispielsweise auch Temperatur oder Windgeschwindigkeit. Dies erhöht die Anzahl der notwendigen Kennlinien ebenso wie die Anzahl der Messwerte, die zusätzlich zu Strom und Spannung aufgenommen werden müssen.

Da diese Methode an Genauigkeit gewinnt, je höher die Anzahl an einbezogenen Sensoren und Kennlinien ist, steigt mit der Genauigkeit ebenfalls der Ressourceneinsatz. Dies spricht gegen einen Einsatz in drahtlosen Sensorsystemen.

3.2.3 Aktive MPPT Verfahren

Als aktive Verfahren werden im Folgenden Arbeitspunktanpassungen bezeichnet, welche den MPP direkt und aktiv ermitteln, also das Ziel haben, die Abweichung vom MPP gegen Null gehen zu lassen. Sie zeichnen sich im Allgemeinen durch eine höhere Genauigkeit aus, stellen jedoch größere Anforderungen, beispielsweise an Rechenleistung oder benötigte Parameter. Daher geht mit der besseren Anpassung auch ein höherer Energieverbrauch bzw. Schaltungsaufwand einher. Gegebenenfalls kann sich ein aktives MPPT Verfahren daher aus energetischer Sicht nicht rechnen.

3.2.3.1 Perturb & Observe

Perturb & Observe, zu deutsch stören und beobachten, stellt das in der Literatur gebräuchlichste Verfahren zur Ermittlung des MPP dar. Dabei wird zunächst die Spannung des Systems variiert, dessen Leistung ermittelt und mit der Leistung am vorhergehenden Punkt verglichen. Steigt die Leistung, wird die Zielspannung im nächsten Schritt um ein vorgegebenes ΔU weiter in die gleiche Richtung (auf der I-U-Kennlinie) verändert. Dies wiederholt sich in einem festgelegten Intervall Δt bis der maximale Leistungspunkt erreicht ist.

Das Verfahren bricht nicht ab, wenn Leistungsanpassung vorliegt, sondern wird dauerhaft fortgesetzt und schwingt daher um den MPP. Zum Teil werden variable Schrittweiten eingesetzt, um zu Beginn eine schnelle Annäherung und im weiteren Verlauf eine höhere Genauigkeit zu erreichen.

Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Unabhängigkeit vom System, es werden keine a-priori Informationen z. B. über Zelltypen benötigt. Nachteilig ist, dass durch die Schrittweite nicht flexibel auf schnelle Veränderungen reagiert werden kann und dass das System bei wechselhaften Einstrahlungen unter Umständen einen falschen MPP ansteuern kann. Diese Problematik ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Die Zielspannung des Systems sei zunächst auf A eingestellt und wird im nächsten Schritt auf B variiert. Während der Spannungsänderung von A auf B steigt jedoch die Beleuchtung an, wodurch der Steuerschaltkreis nach Variation der Spannung von A nach B die Leistung im Punkt C misst. Da die Leistung von A nach C zunimmt, wird die Zielspannung im nachfolgenden Schritt weiter in diese Richtung verändert und entfernt sich somit vom MPP. Steigt die Beleuchtung weiter, hält dieser Zustand an bis zum Punkt F. Befindet sich das System in diesem Punkt, ohne dass die Beleuchtung weiter ansteigt, wird im nachfolgenden Schritt erkannt, dass sich die Leistung verringert, wenn

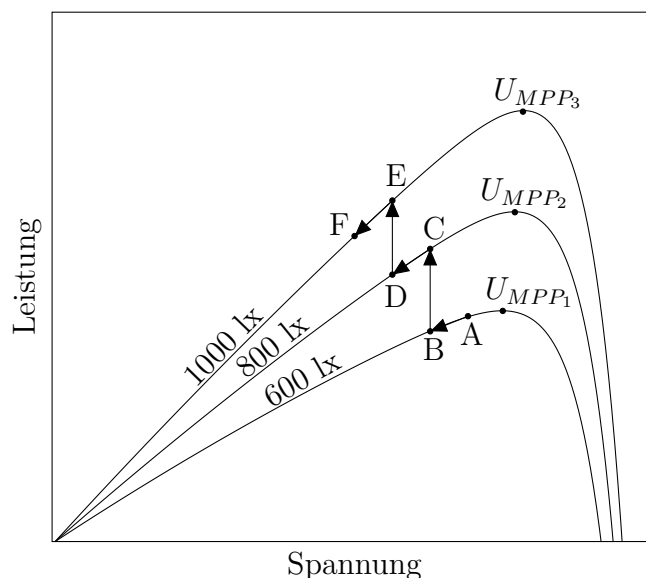


Abbildung 3.3: Fehlerhaftes Trackingverhalten des Perturb & Observe Verfahrens: Zielspannung entfernt sich vom MPP. Abwandlung aus [58].

weiter in diese Richtung angepasst wird und die Zielrichtung der Spannungsanpassung kehrt sich um. Erst dann arbeitet das System auf den eigentlichen MPP hin. Die Leistungsausbeute in der vorhergehenden Zeit ist jedoch unter dem Optimum geblieben.

Für sehr schnelle Veränderungen der Umgebungsbedingungen kann ein solches Verfahren zu träge sein. Weiterhin ist ein Stromsensor für die Leistungsmessung erforderlich, woraus sich für die Umsetzung in einem ultra-low-power System besondere Herausforderungen ergeben. Da die Ströme in einem Sensorsystem in der Regel sehr gering ausfallen, ist eine kostengünstige Strommessung nicht ohne weiteres realisierbar.

Eine Lösungsmöglichkeit dazu stellen abgeänderte MPPT Verfahren dar, welche ohne Strommessung auskommen. So wird beispielsweise in [59] der Einsatz eines Flyback-Inverters beschrieben, mit dessen Hilfe eine Spannungsmessung für die Einstellung des Arbeitspunkts genügt. Die Ströme im Inverter lassen sich bei bekannten Bauteilparametern in guter Näherung ableiten. Ein auf die Spannungsmessung reduziertes Perturb & Observe Verfahren stellt eine sinnvolle Möglichkeit zur Einstellung des Leistungspunkts für die Versorgung eines Sensorsystems dar.

3.2.3.2 Hill Climbing

Hill Climbing entspricht dem Perturb & Observe Verfahren, jedoch wird nicht die Spannung sondern das Tastverhältnis eines DC/DC-Wandlers eingestellt. In der Regel

werden für solarbetriebene Sensorsysteme Schaltwandler eingesetzt, welche aus der variierenden Spannung einer Solarzelle eine stabile Versorgung für die Elektronik bereitstellen. Über die Einstellung der Schaltfrequenz kann indirekt die Zielspannung eingestellt werden. Je nach Aufbau des Systems kann gegebenenfalls eines der beiden Verfahren von Vorteil sein, beispielsweise wenn die Schaltfrequenz von einem Mikrocontroller vorgegeben wird, da eine Variation der Frequenz dann zum Beispiel über eine Umkonfiguration eines Timers erfolgen kann. Davon abgesehen gelten die gleichen Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile wie für das Perturb & Observe Verfahren.

3.2.3.3 3-Punkt-Methode

Hill Climbing bzw. Perturb & Observe betrachten die Leistung an zwei Punkten, um zu entscheiden in welche Richtung eine Spannungsänderung erfolgen muss. Das 3-Punkt-Verfahren fügt einen weiteren Messpunkt hinzu, um eine höhere Genauigkeit und schnellere Konvergenz zu erreichen.

Ausgehend vom aktuell eingestellten Spannungspunkt U (und der damit verbundenen Leistung) wird der Zielwert sowohl positiv als auch negativ um den Wert ΔU verändert und die jeweils verfügbare Leistung gemessen. Danach wird der jeweils zwischen Ausgangspunkt U und $U + \Delta U$ bzw. $U - \Delta U$ auftretende Anstieg der Leistung dP/dU berechnet. Weisen beide Anstiege unterschiedliche Vorzeichen auf, befindet sich der aktuell eingestellte Punkt auf der positiven bzw. negativen Flanke der Leistungskurve. Sind beide Anstiege negativ, d. h. sowohl eine positive als auch eine negative Spannungsänderung bewirkt eine Verminderung der Eingangsleistung, befindet sich das System aktuell im MPP.

Die Genauigkeit der Anpassung ist abhängig von der Schrittweite ΔU . Damit kann, anders als bei Perturb & Observe und Hill Climbing, direkt die korrekte Richtung für die Spannungsänderung bestimmt werden. Gleichzeitig erkennt das System, wenn es sich im MPP befindet, d. h. es oszilliert nicht um diesen. Da im Vergleich mit den o. g. Verfahren eine zusätzliche Messung pro Anpassungsschritt notwendig ist, erhöht sich die Anpassungsdauer pro Schritt. Je nach Intervallzeit der MPPT Steuerung kann das Verfahren dennoch schneller konvergieren, da pro Schritt in jedem Fall eine Anpassung in Richtung maximalem Leistungspunkt erfolgt (bzw. dieser gehalten wird). Davon abgesehen gelten für diese Methode die gleichen Vor- und Nachteile bzw. die gleiche Eignung für drahtlose Sensorsysteme wie für Hill Climbing/Perturb & Observe.

3.2.3.4 Incremental Conductance

Das Verfahren der schrittweisen Leitwertberechnung zählt zu den am häufigsten verwendeten und basiert auf dem Verlauf der maximalen Leistung über der Spannung (vergleiche Abbildung 3.2). Entscheidungsbasis für die Regelung der MPP Spannung ist die Änderung der Leistung in einem Zeitabschnitt Δt . Dazu wird zunächst die Leistung nach der Spannung differenziert [53]:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0 \quad (3.14)$$

woraus sich durch Umstellen

$$\frac{I}{U} = -\frac{dI}{dU} \quad (3.15)$$

ergibt. Die linke Seite von 3.15 repräsentiert die schrittweise Leitwertberechnung, welche namensgebend für das Verfahren ist. Aus der Berechnung von 3.15 lässt sich auf die aktuelle Position auf der Leistungskennlinie schließen. Dazu wird mit den Gleichungen:

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad \left(\frac{dP}{dU} = 0 \right) \quad (3.16)$$

$$\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U} \quad \left(\frac{dP}{dU} > 0 \right) \quad (3.17)$$

$$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U} \quad \left(\frac{dP}{dU} < 0 \right) \quad (3.18)$$

überprüft, ob sich der aktuell eingestellte Spannungswert links davon, rechts davon oder auf dem MPP Wert befindet. Ist die Ableitung der Leistung nach der Spannung positiv, befindet sich der aktuell eingestellte Arbeitspunkt auf der Kennlinie links des MPP, ist sie negativ rechts des MPP. Ist der Anstieg gleich Null, liegt Leistungsanpassung vor.

Der prinzipielle Ablauf einer MPPT Steuerung nach dem inkrementellen Leitwertverfahren ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Eingangsparameter sind Strom und Spannung bzw. deren Änderungen. Mit diesen werden die Bestimmungsgleichungen 3.17 - 3.18 schrittweise überprüft, um zu dem Ergebnis zu kommen, dass entweder die Steuerspannung erhöht oder verringert werden muss oder aber unangetastet bleiben soll, da der passende Arbeitspunkt bereits eingestellt ist. Der Ablauf wird in einem bestimmten Zeitintervall wiederholt. Je kleiner das Intervall, desto genauer wird das Verfahren, gleichzeitig beansprucht es mehr Zeit und Energie.

Die wesentlichen Vorteile des Incremental Conductance MPPT liegen in der hohen erzielbaren Genauigkeit, in der Tatsache, dass direkt bekannt ist, in welche Richtung

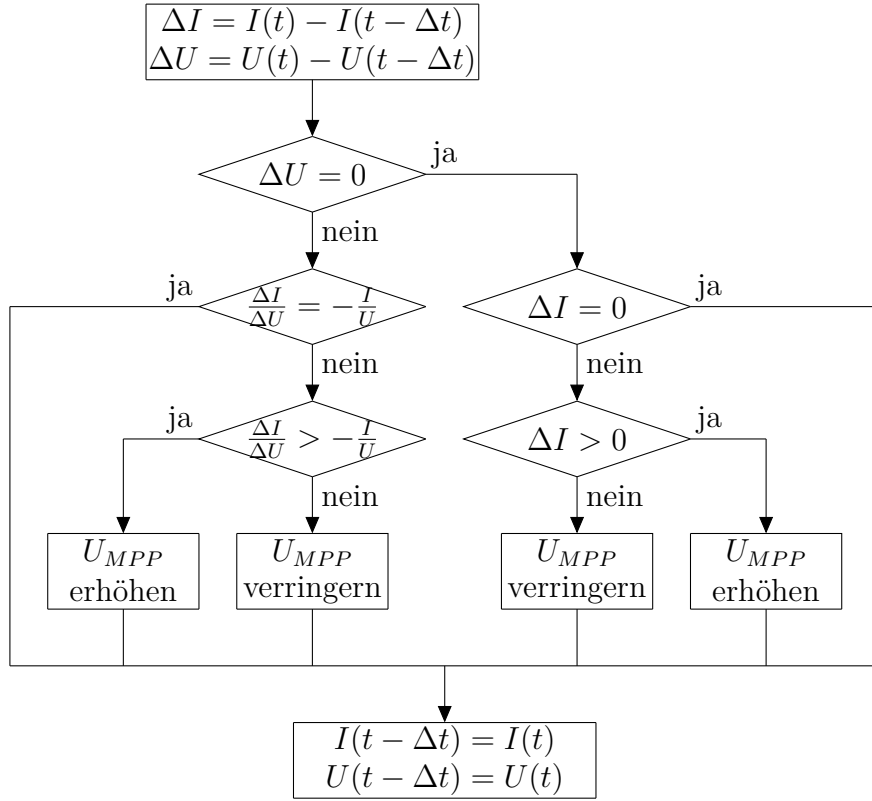


Abbildung 3.4: Blockschaltbild einer MPPT Steuerung nach dem Incremental Conductance Verfahren. Abwandlung aus [53, 60].

die MPP Spannung verschoben werden muss und darin, dass der exakte MPP Wert (im Rahmen der Ungenauigkeit) erreicht werden kann, ohne dass eine Oszillation um denselben stattfindet. Nachteilig ist der hohe Aufwand an Schaltung bzw. Berechnung, wodurch mit steigender Genauigkeit der Energieverbrauch steigt, sowie die Tatsache, dass sowohl eine Spannungs- als auch eine Strommessung erfolgen muss.

3.2.3.5 Parasitäre Kapazität

Die Methode der parasitären Kapazität (Parasitic Capacitance) stellt eine Erweiterung zum Incremental Conductance Verfahren dar. Dabei wird die Sperrschichtkapazität C_P in Gleichung 3.14 eingefügt, wodurch sich die Genauigkeit erhöht. Nach [61, S. 134] lässt sich der Strom in die Sperrschichtkapazität über

$$I_{pc}(t) = C_P \cdot \frac{dU_{pv}}{dt} \quad (3.19)$$

berechnen, wodurch sich der Gesamtstrom

$$I_{ges} = I_{ph} - I_S \left[e^{\left(\frac{U_{pv} + I_{pv} R_S}{m_d U_T} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{U_{pv} + I_{pv} R_S}{R_P} \right) - C_P \frac{dU}{dt} = F(U_{pv}) - C_P \frac{dU_{pv}}{dt} \quad (3.20)$$

einstellt. Der MPP ist erreicht, wenn die Ableitung der Leistung nach der Spannung Null wird, daher wird der Gesamtstrom aus 3.20 mit der Modulspannung U_{pv} multipliziert. Die maximale Leistung kann dann nach [61, S. 134] über:

$$\frac{dF(U_{pv})}{dU_{pv}} + \frac{F(U_{pv})}{U_{pv}} = \frac{dI_{ges}}{dU_{pv}} + C_P \left(\frac{\dot{U}_{pv}}{U_{pv}} + \frac{\ddot{U}_{pv}}{\dot{U}_{pv}} \right) = 0 \quad (3.21)$$

bestimmt werden. Ohne C_P entspricht das Verfahren damit der Incremental Conductance. Die Betrachtung der parasitären Kapazität erhöht die Genauigkeit bei minimal höherem Rechenaufwand und spielt insbesondere bei Systemen mit mehreren Solarzellen eine Rolle. Für drahtlose Sensorsysteme sollte dieses Verfahren gegenüber dem Incremental Conductance MPPT bevorzugt werden, da die Genauigkeit bei gleichen Vor- und Nachteilen und ähnlichen Ressourcenanforderungen steigt. Grundvoraussetzung ist jedoch die Kenntnis der Sperrschichtkapazität.

3.2.3.6 Verfahren mit künstlicher Intelligenz

Da Speicher- und Rechenkapazität moderner Mikrocontroller stetig ansteigen, werden in der Literatur immer öfter automatische Anpassmethoden diskutiert. Für MPPT betrifft dies besonders Fuzzy und neuronale Netze. Fuzzybasierte Methoden setzen auf die Berechnung des Fehlers E sowie der Veränderung des Fehlers ΔE [55]:

$$E(n) = \frac{P_{pv}(n) - P_{pv}(n-1)}{U_{pv}(n) - U_{pv}(n-1)} \quad (3.22)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1). \quad (3.23)$$

Der Fehler E wird bei Erreichen des MPP zu Null und entspricht der Abweichung der Momentanleistung von der MPP Leistung bzw. deren Spannungsableitung. Der Leistungsanstieg pro Spannung wird bei Maximalleistung Null. Aus der Veränderung des Fehlers kann auf die Lage bzw. Entfernung des aktuellen Arbeitspunkts vom MPP geschlossen werden. Es wird daher möglich, Richtung und Betrag einer notwendigen Spannungsänderung zu bestimmen.

ΔE	NB	NS	Z0	PS	PB
E					
NB	Z0	Z0	NB	NB	NB
NS	Z0	Z0	NS	NS	NS
Z0	NS	Z0	Z0	Z0	PS
PS	PS	PS	PS	Z0	Z0
PB	PB	PB	PB	Z0	Z0

Tabelle 3.2: Beispiel für eine Entscheidungstabelle eines Fuzzy-basierten MPPT Systems. Aus [62].

Tabelle 3.2 zeigt ein Beispiel für die logische Steuerung der Zielspannung. Die Einteilung erfolgt in NB (negative big, große negative Änderung), NS (negative small, kleine negative Änderung), Z0 (zero, keine Änderung), PS (positive small, kleine positive Änderung) und PB (positive big, große positive Änderung). Befindet sich der aktuell eingestellte Punkt beispielsweise weit entfernt vom Arbeitspunkt und der Anstieg zwischen beiden Betrachtungspunkten ändert sich nicht, sollte im folgenden Schritt eine starke Änderung der Zielspannung vorgenommen werden.

Die Begriffe *stark*, *schwach* oder *große/kleine Änderung* müssen je nach System vom Fuzzy-Controller in konkrete Werte umgesetzt werden. Der Fuzzy-Ansatz für MPPT bietet eine schnelle Annäherung an den Arbeitspunkt, erfordert jedoch eine Anpassung an das System. Die Mitgliedsfunktionen, die beispielsweise bestimmen, in welchem Bereich eine große Änderung vorliegt, müssen korrekt gesetzt werden, damit die Regelung wie gewünscht arbeitet. Je genauer die Abgrenzung stattfindet, desto genauer kann der Arbeitspunkt eingestellt werden. Die Anpassung und das damit verbundene notwendige Vorwissen können, je nach System, einen Hinderungsgrund für den Einsatz in drahtlosen Sensorsystemen darstellen.

Eine weitere Möglichkeit der intelligenten Arbeitspunktanpassung stellen künstliche neuronale Netze dar. Einen Überblick zu diesem Verfahren gibt Abbildung 3.5. Das neuronale Netz erhält dabei eine Reihe von Eingangsparametern, beispielsweise Strom und Spannung der Zelle oder Temperatur und berechnet daraus die optimale Zielspannung. Das Netz muss dafür mit einer möglichst hohen Anzahl an Trainingsdatensätzen eingestellt werden. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt ebenfalls von der Anzahl der Eingangsparameter ab. Je mehr Daten zur Verfügung stehen, desto besser können einzelne Zustände voneinander abgegrenzt werden.

Für den Einsatz in drahtlosen Sensorsystemen spricht, dass die Methode auch ohne Strommessung arbeiten kann, dann jedoch neben der Spannung auf andere

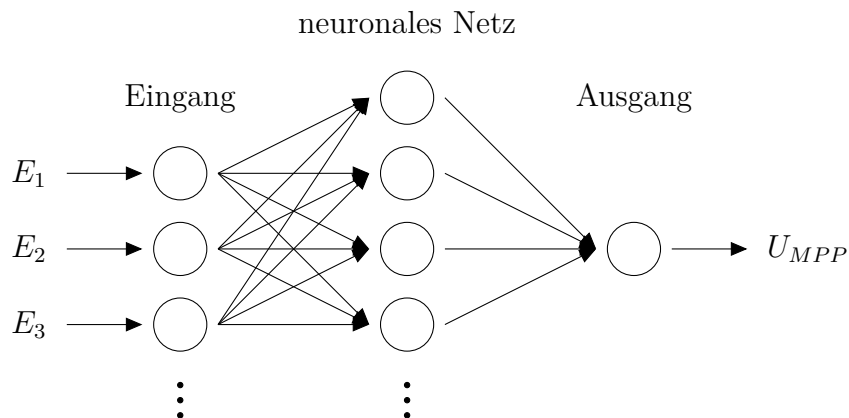


Abbildung 3.5: Schematischer Überblick zum Einsatz neuronaler Netze für MPPT.

Parameter angewiesen ist. Nachteilig wirkt sich aus, dass in der Regel die Anzahl an verfügbaren Parametern stark begrenzt ist, womit auch die Genauigkeit gering ausfällt. Weiterhin ist das Trainieren des Netzes von zentraler Bedeutung und bedingt die a-priori Verfügbarkeit von Messdaten. Eine Anpassung des Systems im laufenden Betrieb ist mit hohen Anforderungen an das Rechensystem verbunden und damit, je nach Hardware, nicht ohne weiteres möglich.

3.3 Gleichspannungswandler für Solarzellen

Mikrocontroller und Funksystem benötigen für ihren Betrieb Nennspannungen von beispielsweise 3,3 V oder 5 V, wobei ersteres für stromsparende Versionen die Regel bedeutet. Die Spannung an einer Solarzelle ist abhängig von deren Aufbau sowie der eingehenden Beleuchtung, daher kann die Quellspannung oberhalb oder unterhalb der geforderten Spannung liegen und außerdem schwanken. Um den Betrieb des Sensorknotens zu ermöglichen, ist daher eine Spannungsanpassung notwendig, welche eine stabile Versorgung bereitstellt.

Gegebenenfalls kann eine Schaltung direkt, d. h. ohne Spannungswandlung versorgt werden, dafür muss jedoch die Solarzelle auf das System angepasst sein und der Ausgangsstrom sollte, u. a. auch mit Zwischenspeicher, den Verbrauch der Last abdecken können. Da besonders das Funksystem im Sendebetrieb Stromspitzen fordert, ist ein System ohne Spannungsstabilisierung in der Regel nicht zweckmäßig. Durch den Einsatz eines DC/DC Wandlers kann die Solarzelle kleiner dimensioniert werden, ohne die Funktion zu beeinträchtigen.

3.3.1 Zielkriterien für den Schaltungsentwurf für drahtlose Sensorknoten

Für die Auswahl eines geeigneten Wandlungsprinzips sind verschiedene Kriterien von Belang, die je nach Zielsystem andere Lösungen erfordern.

- Wirkungsgrad/Verluste

Generell stellt der Wirkungsgrad eines Wandlers eines der wichtigsten Optimierungskriterien dar.

- MPPT Steuerung

Die in Abschnitt 3.2 dargestellten MPPT Verfahren beeinflussen die Wahl des Spannungswandlers. So kann etwa das Tastverhältnis bei Schaltwandlern zur Arbeitspunktanpassung genutzt werden.

- Impedanzanpassung

Eingangsseitige Kapazitäten oder Induktivitäten sollten auf die Solarzelle angepasst werden, um die Leistung zu maximieren.

- Selbststartend

Der Spannungswandler sollte in der Lage sein, ohne Hilfsspannung oder Steuersignal zu starten. Ein Steuersignal von einem Mikrocontroller steht erst bei stabilem Betrieb von selbigem zur Verfügung, nicht jedoch zu Beginn. Eine zusätzliche Spannungsquelle, beispielsweise in Form einer Primärbatterie, ist im Hinblick auf Bauform, Schaltungs- und Wartungsaufwand in der Regel nicht zweckmäßig.

- Hysteresesteuersignal

Für den sicheren Betrieb der nachfolgenden Last ist es sinnvoll, wenn der Spannungskonverter ein Steuersignal zur Verfügung stellt, welches das Erreichen der Zielspannung anzeigt und damit die Last einschaltet. Da aktuelle Mikrocontroller mit Spannungen unterhalb ihrer Nennspannung arbeiten können, dabei jedoch für den Betrieb einen höheren Strombedarf aufweisen, kann ein solches Steuersignal die Verluste begrenzen.

- Eingangsspannungsbereich

Der DC/DC Wandler sollte eine geringe Startspannung aufweisen. Gleichzeitig kann es, je nach System und Umgebungsbedingungen, sinnvoll sein, einen Betrieb $U_{Eingang} > U_{Ausgang}$ zu ermöglichen. Dies ist besonders durch die tageszeitabhängige Spannung der Solarzellen von Bedeutung.

- Ausgangsseitiger Speicher

Die Dimensionierung des Primärspeichers bzw. dessen Typ beeinflussen die Arbeitsweise des Wandlers. Je nach Speicher kann es sinnvoll sein, mit kurzen oder längeren Stromimpulsen zu laden.

- Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen beeinflussen die Ausgangsspannung der Solarzelle und damit auch den Eingangsspannungsbereich des Wandlers.

- Zusätzliche Speicher

Es kann unter Umständen zweckmäßig sein, einen oder mehrere zusätzliche Speicher vorzusehen. Speziell Langzeitspeicher mit geringer Selbstentladung, beispielsweise auch Sekundärbatterien, können von Interesse sein. Der DC/DC Wandler muss schaltungstechnisch dazu in der Lage sein, diese als Ziel oder Quelle zu verwenden. Die Steuerung kann mikrocontrollergestützt erfolgen oder in Hardware, beispielsweise durch ein Umschalten bei Erreichen der Zielspannung am Primärspeicher, realisiert werden.

3.3.2 Topologische Übersicht

In der Literatur existieren verschiedene Varianten der Einteilung von Gleichspannungswandlern. So kann beispielsweise nach der Art der Speicherung der Energie, d. h. elektrisch (Kapazität) oder magnetisch (Induktivität), unterschieden werden [63, S. 3]. Ein weiterer Ansatz ist die Betrachtung der Entwicklungsgeschichte der Konverter, siehe Abbildung 3.6.

Hier wird nach der Art der Ansteuerung unterschieden. Die in der Grafik dargestellten Wandler stellen zugleich die für aktuelle Systeme gebräuchlichsten dar. Abhängig von den durch die Solarzelle und den Umgebungsbedingungen gegebenen Umständen, ist eine Auf- oder Abwärtswandlung der Spannung notwendig. Bei Berücksichtigung wechselhafter Bedingungen beides. Der (derzeit) gebräuchlichste Betriebsspannungswert

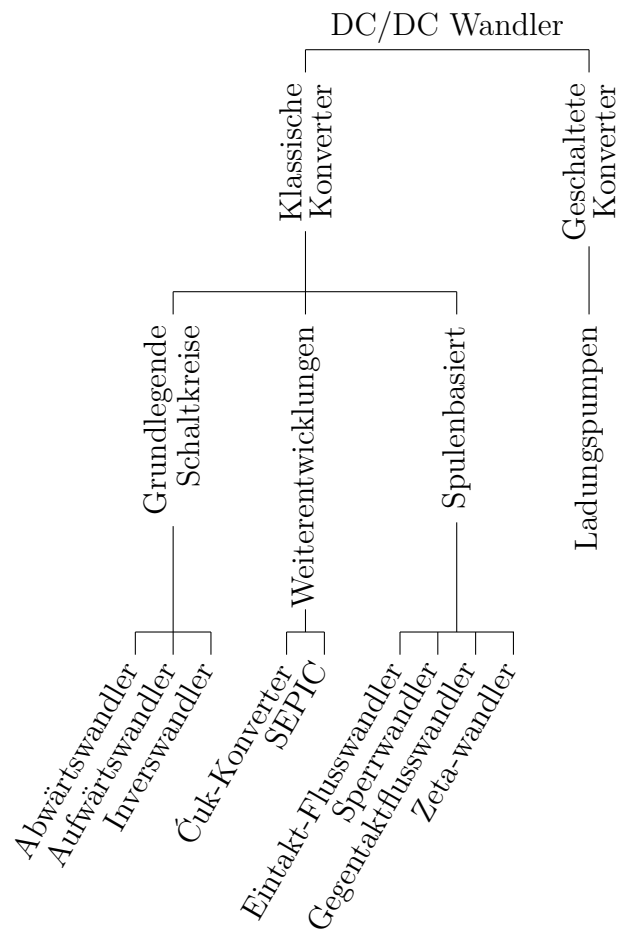


Abbildung 3.6: Topologische Übersicht zu typischen DC/DC-Wandlern für Sensorknoten. Ausschnitt aus [64].

für effiziente drahtlose Sensorsysteme liegt bei 3,3 V. Durch den Tagesverlauf der solarbasierten Energieversorgung und der Segmentzahl der Zelle kann die Spannung zur Tagesmitte den benötigten Wert übersteigen, in den Bereichen Sonnenauf- und Sonnenuntergang jedoch darunter liegen.

Da die Quellspannung als Gleichspannung vorliegt, ist speziell für ein Hochsetzen dieser ein geschalteter Zwischenspeicher notwendig. Kapazitive Speicher sind dabei effizienter als magnetische, jedoch sind beispielsweise spulenbasierte Lösungen in Bezug auf die Anzahl der erforderlichen Schaltvorgänge, welche einen erheblichen Teil der Verluste ausmachen, im Vorteil. Somit hängt die Auswahl und Auslegung der Konverter von den Anforderungen der Elektronik und den technischen Umständen ab.

3.3.3 Umsetzung in Sensorknoten

Grundsätzlich ist der Wirkungsgrad das Hauptoptimierungskriterium für die Entwicklung eines Spannungswandlers für ein energieautarkes System. Aufgrund der Komplexität der Anforderungen ergeben sich jedoch noch weitere Randbedingungen und Ziele. So muss eine MPPT Regelung (siehe Abschnitt 3.2) dazu in der Lage sein, in die Spannungswandlung einzugreifen. Gleichzeitig muss der Wandler auch ohne MPPT Signal voll funktionstüchtig sein, da zu Beginn noch keine Informationen über die Lage des Arbeitspunkts vorliegen.

Weiterhin muss eine Integration in das Speicherkonzept erfolgen. Weil in vielen Fällen der Einsatz sowohl eines Kurzzeit- als auch eines Langzeitspeichers sinnvoll ist, muss eine geeignete Umschaltfunktion zwischen beiden erfolgen. Dies kann beispielsweise durch ein Schaltsignal des Mikrocontrollers erfolgen. Es ist außerdem möglich, dass in Abhängigkeit vom verwendeten Langzeitspeicher unterschiedliche Spannungsschienen benötigt werden. Dies betrifft beispielsweise den Einsatz von Sekundärbatterien oder die Verwendung spezieller Doppelschichtkondensatoren.

Von den in Abschnitt 3.3.1 genannten Zielkriterien für Entwurf und Auslegung des Spannungswandlers, stellt die Fähigkeit zum autonomen Anlauf die größte Herausforderung dar. Bei einem vollständig autonomen System steht keine Hilfsspannungsquelle (z. B. Primärbatterie) zur Verfügung. Zum Einschaltzeitpunkt kann der Wandler daher weder auf eine Schaltspannung für elektrische Schalter noch auf ein Steuersignal für eine Arbeitspunktanpassung zurückgreifen. Der Mikrocontroller steht erst ab einer definierten Spannungsschwelle und ausreichender Energie zum Hochfahren zur Verfügung. Zum Anlaufen des DC/DC-Wandlers kann dieser daher ebenfalls keinen Beitrag leisten. Unter der Annahme, dass die Solarzelle nicht so dimensioniert wird, dass ihr Ausgangssignal direkt zur Versorgung genutzt werden kann (wodurch der Spannungswandler ohnehin irrelevant werden würde), muss der Wandler dazu in der Lage sein, eigenständig mit dem Hochsetzen der Spannung zu beginnen. Dies betrifft den Zeitpunkt des erstmaligen Anlaufens sowie einen erneuten Startvorgang nach vorangegangenem Ausfall der Energiequelle.

Die Startfunktionalität wird bei kommerziell verfügbaren Spannungswandlern in der Regel durch eine vorangestellte Oszillatorschaltung realisiert, deren Wechselsignal im Anschluss als Schaltsignal für einen Feldeffekttransistor dient. Die minimale Schaltspannung des Transistors definiert dabei die minimale Eingangsspannung des Systems (unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Oszillators). Typischerweise stehen

sich minimale Startspannung und hoher Wirkungsgrad konträr gegenüber, d. h. eine niedrige Eingangsspannung geht mit schlechtem Wirkungsgrad einher und umgekehrt.

Ein Ansatzpunkt für eine Verbindung zwischen hoher Effizienz und kleiner Startspannung ist die Kombination zweier Wandler, von denen jeweils einer für die Startphase bzw. die Phase mit niedriger Eingangsenergie und einer für den Normalbetrieb zuständig ist [65]. Der schematische Ablauf dieses Verfahrens ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Zur Versorgung des Mikrocontrollers (und der restlichen Elektronik) steht ein Hauptspeicher bereit. Dieser wird, im Normalbetrieb, von einem Auf-/Abwärtswandler geladen. Das Ansteuersignal, in der Regel eine PWM, wird von einem Mikrocontroller geliefert. Diese Kette ist im Wesentlichen effizienzoptimiert. Es soll ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden.

Für die Anlaufphase steht ein zweiter Wandler zur Verfügung, bei welchem der Fokus nicht auf Effizienz, sondern auf minimaler Startspannung liegt. Im vorliegenden Fall wird dies durch eine Kombination aus Meißner-Oszillator und Dickson-Ladungspumpe erreicht. Sobald dieser Wandler den Hauptspeicher auf ein festgelegtes Maß aufgeladen hat, startet der Mikrocontroller. Dieser beginnt daraufhin damit, ein Ansteuersignal für den effizienteren Wandler bereitzustellen und schaltet den Startwandler ab. Auf diese Weise kann eine minimale Anlaufspannung erreicht werden, ohne im Normalbetrieb mit einem schlechten Wirkungsgrad auskommen zu müssen.

Die wesentlichen Herausforderungen in diesem Fall sind in der Integration und Kombination der beiden Wandler (zur Bauteilminimierung) sowie im Wechsel der Quelle für den Hauptspeicher zu suchen. Es muss ein energetischer Sicherheitsfaktor für den Startvorgang des Mikrocontrollers vorhanden sein, da dieser zu Beginn noch nicht im energieoptimierten Zustand ist. Weiterhin muss für den Wechsel zwischen beiden DC/DCs mit einer Übergangszeit bis zum Anlaufen des Hauptwandlers gerechnet werden, d. h. es muss eine Energiereserve für diese Zeit vorhanden sein.

Die Wirkungsgrade aktueller Schaltungslösungen sind stark von der Eingangsspannung, einer eventuell verwendeten Hilfsspannung sowie den Bauteilen abhängig. So beschreibt beispielsweise [66], dass für die Verwendung eines einzelnen DC/DC Wandlers für sehr kleine Leistungen ausschließlich Schaltungen mit nur einem Schalter in Frage kommen, wobei für sehr kleine Anlaufspannungen der Sperrschwinger besonders geeignet ist. Ist ein Selbstanlaufen der Schaltung erforderlich und der Spannungseingangsbereich liegt unter 150 mV, sind nach aktuellem Stand der Technik Wirkungsgrade im Bereich von etwa 30 % und darunter zu erwarten [67–70].

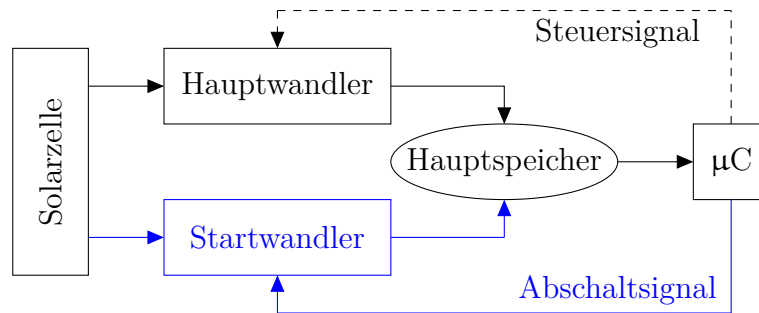


Abbildung 3.7: Schematischer Aufbau eines Dual-DC/DC-Wandlers zum Anlauf ohne Hilfsspannung und zur Nutzung geringer Spannungswerte an der Solarzelle [65].

4 Stand der Technik zur Bestimmung des Energieeintrags

Das folgende Kapitel beschreibt die allgemeine Bestimmung der auf eine Fläche eingehenden Solarleistung. Dazu wird zunächst eine Übersicht zu den Bestandteilen und geometrischen Zusammenhängen gegeben. Im Weiteren wird auf verschiedene Faktoren eingegangen, welche die Leistung beeinträchtigen. Die grundsätzlich zur Verfügung stehende Energie der Sonne wird innerhalb der Atmosphäre durch diverse Absorptions-, Reflexions- und Transmissionskoeffizienten abgeschwächt. Die dazu betrachteten Faktoren orientieren sich an den entsprechenden VDI-Richtlinien.

Im Anschluss werden verschiedene Modelle beschrieben, welche nach Stand der Technik zu den meist verwendeten gehören. Die Übersicht soll eine prinzipielle Vergleichbarkeit ermöglichen, wobei je nach Modell unterschiedliche Parameter verwendet werden und auch empirische Einflüsse zum Tragen kommen. Sie unterscheiden sich außerdem hinsichtlich Aufwand der Implementierung und Komplexität, wodurch sie mehr oder minder für eine Umsetzung auf autarken Sensorsystemen geeignet sind. Die Modelle werden hinsichtlich Genauigkeit und Eignung miteinander verglichen.

Am Ende des Kapitels wird zum Vergleich die Bestimmung der zur Verfügung stehenden Energie für Innenraumanwendungen erläutert, welche sich grundsätzlich von Außenanwendungen unterscheidet. Hier kommt insbesondere die spektrale Abhängigkeit von Solarzellen zum Tragen. Ein generelles Modell ist, aufgrund der Abhängigkeit vom Einsatzszenario, nicht ohne weiteres ableitbar.

4.1 Komponenten der Sonnenstrahlung

Die auf eine Fläche eingehende Globalstrahlung E_G entspricht der Summe der eingehenden Strahlung über den gesamten Wellenlängenbereich. Sie setzt sich zusammen aus

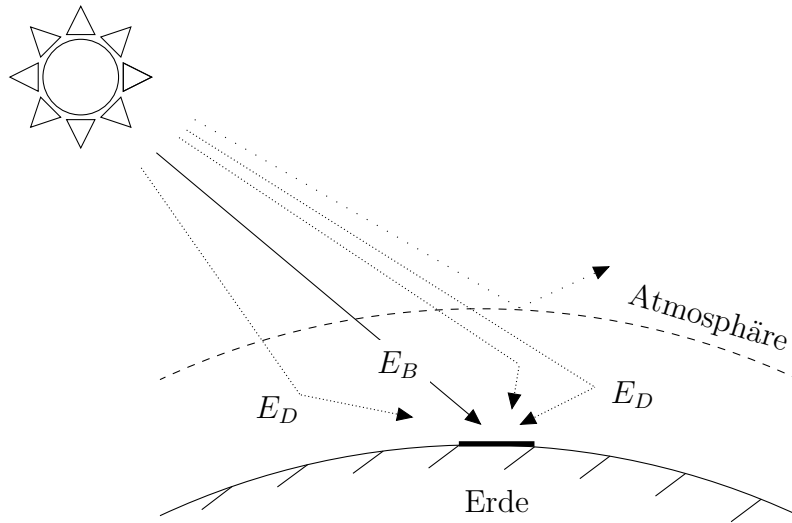


Abbildung 4.1: Direkt- und Diffusstrahlung innerhalb der Erdatmosphäre.

der Diffusstrahlung E_D und der Direktstrahlung E_B [71]:

$$E_G = E_D + E_B \cdot \cos \theta_z. \quad (4.1)$$

Die Diffusstrahlung durch Reflexionen und Streuungen berechnet sich über:

$$E_D = c \cdot E_B, \quad (4.2)$$

wohingegen die Direktstrahlung durch den Strahlenverlauf der Sonne gegeben ist.

Die Zusammenhänge sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Unter dem Begriff Diffusstrahlung sind sämtliche Anteile zu verstehen, welche indirekt, d. h. durch (Mehrfach-)Reflexionen und Streuungen, auf eine Empfängerfläche auftreffen. Diese Faktoren werden in den Abschnitten 4.3 und 4.4 näher betrachtet. Die Direktstrahlung entspricht der ungehindert eingehenden Sonnenenergie. Durch den Tagesverlauf des Sonnenstands wird sie mit den Zenitwinkel θ_z verrechnet. Der Direktstrahlungsanteil sinkt auf Null, wenn der Winkel 90° erreicht.

Zwei Beispiele für Tagesverläufe der Strahlungen sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Direktstrahlung entspricht, wie in Abschnitt 4.1 gezeigt, der Differenz aus Global- und Diffusstrahlung und zeigt sich somit im grau markierten Bereich der Kurven. Auf der linken Seite ist ein Tag mit hohem Diffusstrahlungsanteil abgebildet. Für Verläufe dieser Art ist in der Regel eine starke Bewölkung verantwortlich, bei welcher der Direktstrahlungsanteil lediglich einen kleinen Faktor ausmacht. Im rechten Beispiel ist ein Tag mit geringem Einfluss der Streueffekte zu sehen. Dies lässt auf einen

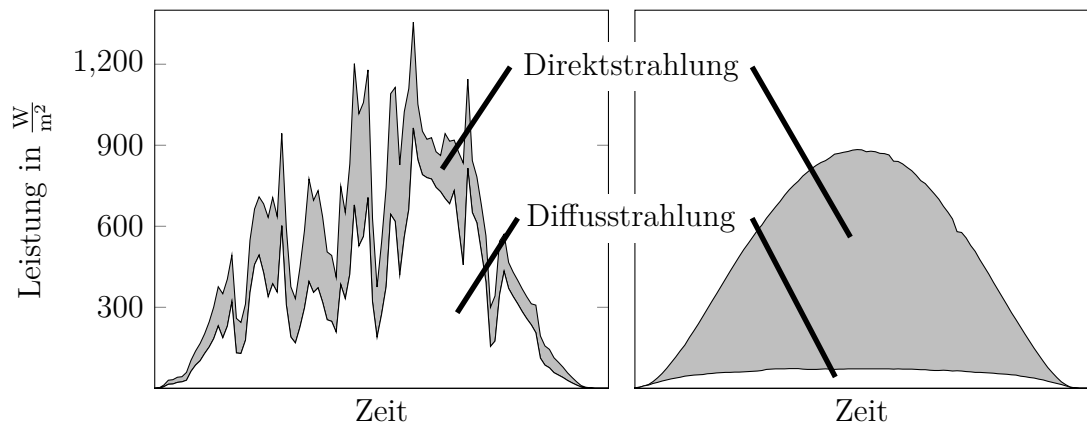


Abbildung 4.2: Gegenüberstellung von Global- und Diffusstrahlung. Der ausschließlich graue Bereich entspricht der Direktstrahlung.

klaren wolkenfreien Himmel schließen. Ebenfalls ersichtlich wird, dass innerhalb der Zeitbereiche solarer Tagesbeginn bzw. solares Tagesende die Diffusstrahlung prozentual an Einfluss gewinnt und letztlich die vollständige Globalstrahlung ausmacht. Dies erklärt sich durch den Zenitwinkel und die Dämmerungshelligkeit vor bzw. nach Sonnenaufgang/-untergang.

Die Messung der eingehenden Strahlung erfolgt in der Regel mit hochpräzisen Pyranometern. Diese erfassen die Werte im Bereich von 180° des vor ihnen liegenden Raumes. Eine Thermosäule im Inneren der Geräte wandelt die eingehende Strahlungsleistung über die Temperatur in elektrische Leistung um. Über die sich einstellende Thermospannung kann im Anschluss auf die eingehende Strahlung zurückgerechnet werden. Je nach Aufbau wird entweder nur die Global- oder Global- und Diffusstrahlung gemessen. Letzteres wird erreicht, indem die Sonne über eine automatisierte Abschattungseinrichtung ausgeblendet wird. Diese wird dem Sonnenverlauf nachgeführt, der Fehler durch die Apparatur (die Diffusstrahlung wird ebenfalls verringert) wird im Anschluss über einen Korrekturfaktor berichtigt.

4.2 Berechnung des Zenitwinkels

Der Sonnenverlauf und die sich daraus ergebenden Winkelbeziehungen sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Der Zenitwinkel der Sonne liegt zwischen dem Zenit der Betrachtungsfläche und der Sonne. Er wird mit θ_z angegeben. Ψ bezeichnet den Azimutwinkel, α gibt den Höhenwinkel an, ϕ entspricht dem geographischen Breitengrad, δ beschreibt

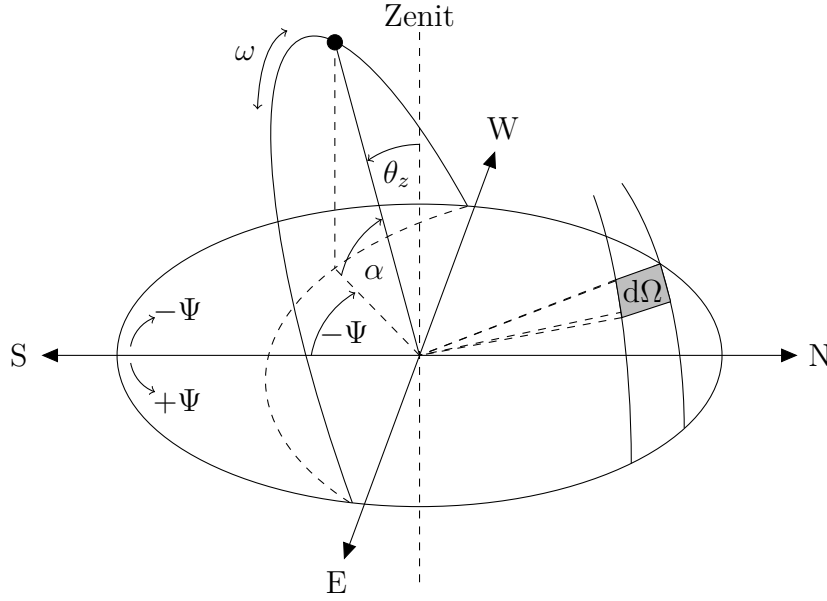


Abbildung 4.3: Winkelbeziehungen des solaren Tagesverlaufs. [72, 73]

den Winkel zwischen dem täglichen Sonnenhöchststand und der Äquatorebene und ω beschreibt den Winkel des Zeitverlaufs.

Daraus lassen sich der Zenitwinkel mit

$$\cos \theta_z = \sin \alpha \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha \quad (4.3)$$

sowie der Azimutwinkel

$$\cos \Psi = \frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \quad (4.4)$$

angeben [72, S. 15]. Aus diesen Gleichungen kann die solare Höhe bestimmt werden, welche ausschlaggebend für den Direktstrahlungsanteil der Globalstrahlung ist. Die wirkende Strahlung lässt sich aus der Strahlungsdichte und dem Raumwinkel bestimmen. Nach [73] berechnet sich die auf das Empfängererelement eingehende Strahlungsdichte $L_E(\theta, \Psi)$ über das Raumwinkelement

$$d\Omega = \sin \theta_z \cdot d\theta_z \cdot d\Psi \cdot \Omega_0 \quad (4.5)$$

mit $\Omega_0 = 1 \text{ sr}$ nach

$$\begin{aligned} E_D &= \int L_E(\theta_z \Psi) \cdot \cos \theta_z \cdot d\Omega \\ &= \int_{\Psi=0}^{2\pi} \int_{\theta_z=0}^{2\pi} L_E(\theta_z \Psi) \cdot \cos \theta_z \cdot \sin \theta_z \cdot d\theta_z \cdot d\Psi \cdot \Omega_0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Aus den vorangegangenen Gleichungen lässt sich der Verlauf des solaren Tages berechnen, womit sich ebenfalls der relative Verlauf der eingehenden Energie bestimmen lässt. Ohne Berücksichtigung weiterer Einflüsseffekte, ist der Leistungsverlauf einer Solarzelle rein geometrisch bestimmt und verläuft annähernd harmonisch. Damit ist es bei Vernachlässigung weiterer Effekte möglich, den Energieverlauf für die Zukunft vorherzusagen, weil als Eingangsparameter lediglich die Zeit benötigt wird.

4.3 Einfluss der optischen Luftmasse

Die Berücksichtigung der Luftmasse, Air Mass (AM), stellt die grundlegendste Betrachtungsweise der eingehenden Strahlung dar. Basis ist die Solarkonstante, welche der im Jahresmittel eingehenden Strahlungsleistung außerhalb der Erdatmosphäre entspricht. Sie wird typischerweise angegeben mit $1.367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Entsprechend Abbildung 4.4 kann die elektromagnetische Strahlung dabei senkrecht auf eine Empfängerfläche auftreffen oder in einem bestimmten Winkel, dem Zenitwinkel. Je größer der Winkel ist, desto größer ist die Weglänge, welche die Strahlung innerhalb der Erdatmosphäre zurücklegt. Mit einem größeren Weg in der Atmosphäre, fällt auch die Dämpfung der eingehenden Strahlung stärker aus. Daher ist die optische Luftmasse ein Maß für die Menge der eintreffenden Strahlungsleistung. Bei einem Verkippungswinkel von Null wird die Luftmasse einmal durchlaufen. Dies entspricht AM 1. Bei einem Winkel von $48,2^\circ$ erhöht sich die Weglänge in der Luftmasse auf das 1,5-fache, dies entspricht daher AM 1,5. Die Position direkt oberhalb der Atmosphäre wird als AM 0 bezeichnet, für AM 2 würde ein Winkel von $60,1^\circ$ und für AM 3 70° gelten.

Die Berechnung der Luftmasse erfolgt dabei über [75]:

$$AM = \sec \theta_z. \quad (4.7)$$

Die Basisgleichung 4.7 wurde im Lauf der Zeit mehrfach verändert und an verschiedene Positionen auf der Erde angepasst. Die aktuell am häufigsten verwendete Form [76], stammt von Kasten und Young [77] aus dem Jahr 1989:

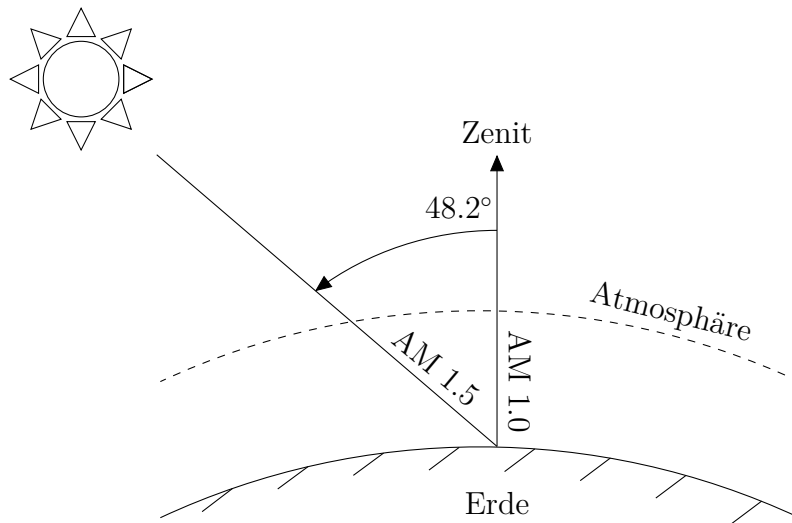


Abbildung 4.4: Zusammenhang zwischen AM-Modell und Weglänge des Sonnenlichts innerhalb der Erdatmosphäre. Abwandlung aus [74]

$$AM = \frac{1}{\sin \alpha + a (\alpha + b)^c} \quad (4.8)$$

Hierbei repräsentiert γ den Sonnenhöhenwinkel und für die Parameter a , b und c ergeben sich für einen minimalen Fehler die Werte $a = 0,50572$, $b = 6,07995^\circ$ und $c = 1,6364$. Der relative Fehler dieser Näherung wird mit unter 0,5 % angegeben. Für die weiteren Berechnungen in den folgenden Kapiteln wird zur Vereinfachung:

$$AM = m. \quad (4.9)$$

Die Betrachtung der Luftmasse ist von grundlegender Bedeutung, weil die Solarstrahlung innerhalb der Atmosphäre verschiedenen wellenlängenabhängigen Abschwächungseffekten ausgesetzt ist. Je größer die zurückgelegte Weglänge ist, desto stärker wirkt sich die Abschwächung aus.

Abbildung 4.5 zeigt das AM 0 Spektrum, welches ohne Atmosphäreneinwirkung keinem Abschwächungseffekt unterliegt, sowie das AM 1,5 Spektrum mit einem Winkel von $48,2^\circ$ zwischen Normale der Empfängerfläche und eingehender Strahlung. Das AM 1,5 ist von besonderer Bedeutung, weil es nach einheitlichen Standardtestbedingungen zur Überprüfung, Leistungsbestimmung und zum Vergleichen von Solarmodulen genutzt wird.

Aus der Grafik wird ersichtlich, dass einzelne Wellenlängenbereiche des Sonnenlichts nahezu vollständig ausgeblendet, andere stark abgeschwächt werden. Das Maximum im

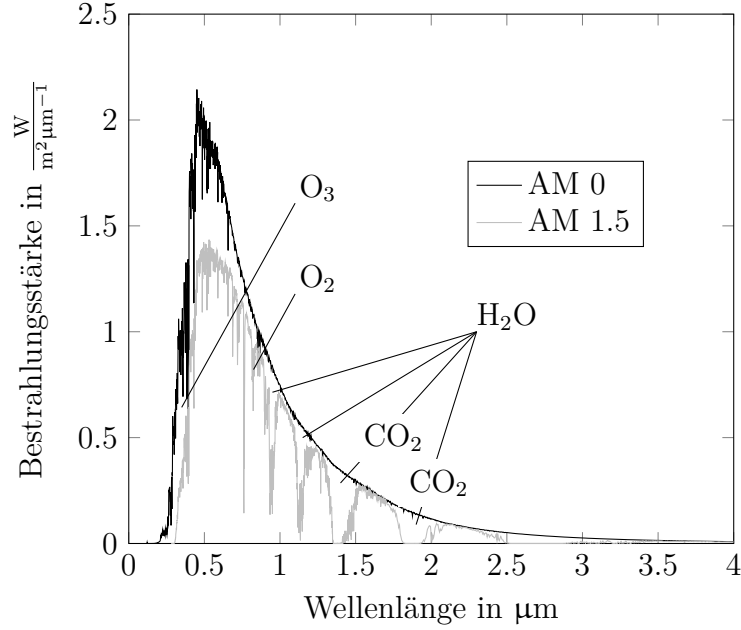


Abbildung 4.5: AM 0 und AM 1,5 Spektrum [78].

sichtbaren Bereich für AM 1,5 liegt im Vergleich zu AM 0 bereits um etwa ein Drittel geringer. Weitere wesentliche Einflussfaktoren sind in der Grafik gezeigt. So hat im kurzwelligen Bereich hauptsächlich Ozon einen Einfluss, Sauerstoff, Kohlendioxid und vor allem Wasser spielen eher im niederfrequenten Bereich des sichtbaren Lichts eine Rolle.

Die optische Masse des Wasserdampfs in der Atmosphäre m_W sowie der den Einfluss durch Partikelstreuung m_M (siehe Abschnitte 4.4.5 bzw. 4.4.2) kann entsprechend [79] mit

$$m_W = m_M = \csc \alpha \quad (4.10)$$

angeben werden. Die Berechnung der optischen Masse des Ozons unterscheidet sich von den oben genannten, weil angenommen wird, dass sich der wesentliche, optisch wirksame Teil innerhalb einer Atmosphärenschicht befindet. Nach [72, S. 101] lässt diese sich über

$$m_O = \frac{1 + \frac{z_O}{r_e}}{\sqrt{\cos^2 \theta_z + 2 \left(\frac{z_O}{r_e} \right)}}, \quad (4.11)$$

mit der Höhe z_O , in der sich das Ozon konzentriert, sowie dem mittleren Erdradius r_e , berechnen.

Zu beachten ist, dass sich die optisch wirksame Luftmasse ändert, wenn die Betrachtungsfläche nicht senkrecht zur Erde liegt, sondern selbst verkippt ist. In diesem Fall ist der zusätzliche Winkeleinfluss der Empfängerfläche zu berücksichtigen.

4.4 Einflussfaktoren auf die Energieverfügbarkeit

Auf die Direktstrahlung entsprechend Abschnitt 4.1 haben verschiedene Faktoren einen abschwächenden Einfluss (vergleiche Abbildung 4.5). Die VDI-Richtlinie 3789-3 nennt hier insbesondere durchmischte Gase, Mie- und Rayleigh-Streuung, Ozon sowie Wasserdampf. Diese Einflussfaktoren weisen jeweils die Transmissionskoeffizienten $\tau_G(\lambda)$, $\tau_M(\lambda)$, $\tau_R(\lambda)$, $\tau_O(\lambda)$ sowie $\tau_W(\lambda)$ auf und lassen sich entsprechend [79] zu einem gemeinsamen Koeffizienten $\tau(\lambda)$ zusammenfassen:

$$\tau(\lambda) = \tau_G(\lambda) \cdot \tau_M(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda) \cdot \tau_O(\lambda) \cdot \tau_W(\lambda). \quad (4.12)$$

Dieser wirkt proportional auf die Direktstrahlung:

$$E_{B_\lambda} = E_B \cdot \tau(\lambda) \quad (4.13)$$

und verringert somit die zur Verfügung stehende Leistung. Zum Teil wird in der Literatur zusätzlich der Transmissionskoeffizient für Stickstoffdioxid verwendet [80]. Dieser kann jedoch, wie in Gleichung 4.12, auch über $\tau_O(\lambda)$ abgebildet werden. Auf die einzelnen Faktoren und deren Berechnung entsprechend dem Lambert-Beerschen-Gesetz wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen.

Eine grafische Darstellung der Transmittanzen der wichtigsten Stoffe in Abhängigkeit vom Zenitwinkel ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Für einen größeren Zenitwinkel wird der Raumwinkel, in welchem die Direktstrahlung wirkt, kleiner, wodurch sich dieser in hohem Umfang auf die Eingangsleistung auswirkt. Die Werte beziehen sich auf die Normatmosphäre (siehe Tabelle 4.2), Konzentrationsschwankungen der einzelnen Stoffe infolge von Wettereffekten werden nicht berücksichtigt.

Wie zu erkennen ist, wirken sich sowohl Sauerstoffverbindungen als auch Kohlendioxid nur in geringem Maß auf die verfügbare Leistung aus. In stärkerem Umfang kommt der Einfluss des Wassers zum Tragen, wobei eine Durchlässigkeit von 0,8 nicht unterschritten wird. Da der Anteil von Wasser in der Luft wetterbedingt stark schwankt, kann sich daraus dennoch ein hoher Einfluss ergeben. Als hauptsächliche Einflussfaktoren lassen sich Rayleigh- und Molekülstreuungen, sowie die Streuung an Aerosolen

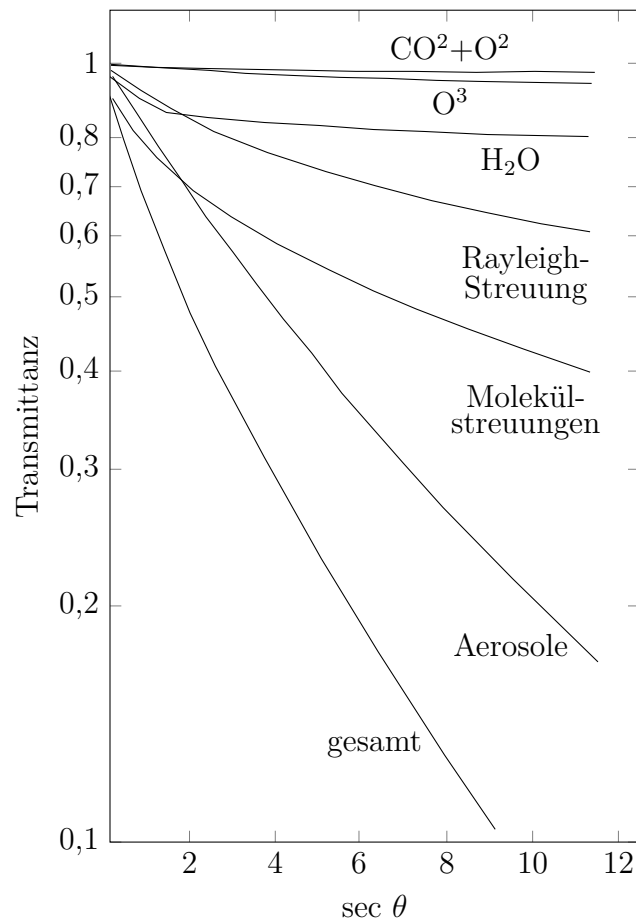


Abbildung 4.6: Transmittanzen der für die Beeinflussung des Leistungsverlaufs wichtigsten Stoffanteile in der Luft über dem Zenitwinkel [81, abgeändert].

identifizieren. Speziell bei geringerem Zenitwinkel tritt durch diese eine hohe Minderung des Direktstrahlungsanteils auf, die Transmittanzen sinken zum Teil auf unter 0,2 ab. Die Gesamtdurchlässigkeit der Atmosphäre sinkt bei hohen Zenitwinkeln auf Werte nahe 0,1 ab.

Aufgrund der unterschiedlich hohen Auswirkungen dieser Einflussfaktoren, werden die einzelnen Stoffe für die Modellierung verschieden stark gewichtet oder, je nach Modellansatz, für die Bestimmung der auf eine Fläche eingehenden Leistung nicht berücksichtigt. Dies ist speziell für Kohlendioxid und Ozon gebräuchlich.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Parametern für die Direktstrahlung werden für den Verlauf und die Modellierung der Globalstrahlung in der Literatur eine Vielzahl weiterer Parameter verwendet, welche sich zum Teil besonders auf den Anteil der Diffusstrahlung auswirken. Die Einflussfaktoren auf deren Verlauf sind zum Teil abhängig von den am Betrachtungsort vorherrschenden Bedingungen. Als Beispiel sei das

Symbol	Bedeutung
z	Zenitwinkel (Grad)
m	Luftmasse
ρ_g	Albedo (Grund)
p	Luftdruck (hPa)
T	Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
U	Luftfeuchtigkeit (%)
W	Windgeschwindigkeit (m/s)
vis	Sichtweite (km)
w	Niederschlagswasser (cm)
u_o	Menge Ozon
u_n	Menge NO_2
α_A	Ångström Wellenlängenexponent
β_A	Ångström Trübung
τ_a	Unsworth-Monteith Trübungskoeffizient
T_L	Linke Trübungsfaktor
γ	Streurate

Tabelle 4.1: Übersicht zu den in der Literatur meist verwendeten Parametern für Globalstrahlungsmodelle [82].

unterschiedlich starke Auftreten von Rußpartikeln in ländlichen sowie im städtischen Bereich genannt. Auch die geografische Lage (Nähe zum Wasser/Meer, Inlandslage, Höhen-, Breitengrad) verändert die Bedingungen. Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht zu den für die Modellierung der Globalstrahlung meist verwendeten Parametern [82]. Im Anhang unter B.1 sind 54 Modelle aufgelistet, für welche die in der Tabelle gezeigten Faktoren Eingangsgrößen sind.

Für die verfügbare Diffusstrahlung hat insbesondere die Albedo (Reflektivität der Oberfläche) eine große Bedeutung. Eine hohe Albedo in der Umgebung ermöglicht einen höheren Anteil dieser Strahlung an der Globalstrahlung. Tabellen dazu sind beispielsweise in [73] zu finden. Parameter wie die Sichtweite oder die Oberflächenreflektivität sind als Eingangsgrößen für Energieprognosemodelle für drahtlose Sensorsysteme schwer handhabbar und bezüglich Kosten-Nutzen-Faktor in der Regel nicht geeignet. Luftdruck, -temperatur und -feuchtigkeit stehen je nach Applikation als Messwerte bereit und können für das Modell genutzt werden.

Gas	Chem. Zeichen	Volumengehalt in %
Stickstoff	N ₂	78,084
Sauerstoff	O ₂	20,9476
Argon	Ar	0,934
Kohlendioxid	CO ₂	0,0314
Neon	Ne	1,818·10 ⁻³
Methan	CH ₄	0,2·10 ⁻³
Schwefeldioxid	SO ₂	0,1·10 ⁻³
Helium	He	524·10 ⁻⁶
Krypton	Kr	114·10 ⁻⁶
Wasserstoff	H ₂	50·10 ⁻⁶
Distickstoffmonoxid	N ₂ O	50·10 ⁻⁶
Xenon	Xe	8,7·10 ⁻⁶
Ozon (Sommer)	O ₃	7·10 ⁻⁶
Ozon (Winter)	O ₃	2·10 ⁻⁶
Stickstoffdioxid	NO ₂	2·10 ⁻⁶
Jod	J ₂	1·10 ⁻⁶

Tabelle 4.2: Zusammensetzung der Normatmosphäre auf Höhe des Meeresspiegels [83].

4.4.1 Durchmischte Gase

Unter diesem Punkt sind unterschiedliche, in der Luft vorkommende Gase zusammengefasst. Tabelle 4.2 zeigt die Zusammensetzung der Normatmosphäre mit prozentualen Volumengehalt, entsprechend ISO 2533. Die Stoffkonzentration der durchmischten Gase nimmt mit zunehmender Höhe ab. Der Transmissionskoeffizient lässt sich über

$$\tau_G(\lambda) = \exp\left(\frac{-1,41 \cdot \sigma_G(\lambda) \cdot m \cdot \frac{p}{p_0}}{\left[1 + 118,93 \cdot \sigma_G(\lambda) \cdot m \cdot \frac{p}{p_0}\right]^{0,45}}\right) \quad (4.14)$$

bestimmen [79]. Der spektrale Absorptionskoeffizient $\sigma_G(\lambda)$ kann beispielsweise der VDI-Richtlinie 3789-3 oder ähnlichen Tabellenbüchern entnommen werden. p entspricht dem Luftdruck und p_0 dem Normluftdruck der Normatmosphäre auf Meeresniveau.

4.4.2 Mie-Streuung

Der Mie-Transmissionskoeffizient beschreibt die wellenlängenabhängige Streuung und Absorption an Aerosolen und Partikeln. Mit zunehmender Schadstoffbelastung der Umgebung beispielsweise in Städten (z. B. Feinstaub, Rußpartikel) oder durch Staub-, Salz oder Sandpartikel in meeresnahen Gebieten nimmt die Bedeutung dieses Koef-

fizienten zu. Die Partikelgrößen liegen im Bereich von 0,001 bis 100 μm , wobei die verschiedenen Aggregatzustände von Wasser nicht als Aerosole klassifiziert sind. Somit zählen Regentropfen, Eiskristalle, Hagel oder Nebel nicht dazu [84, S. 71].

Die Berechnung erfolgt über [79]:

$$\tau_M(\lambda) = \exp\left(-\beta_A \cdot \left[\frac{\lambda}{1000 \text{ nm}}\right]^{-\alpha_A} \cdot m_M\right). \quad (4.15)$$

α_A und β_A entsprechen den Ångström-Koeffizienten.

4.4.3 Rayleigh-Streuung

Der Rayleigh-Transmissionskoeffizient beschreibt die Streuung an Luftmolekülen. Diese Form der Streuung tritt bei Partikeln mit einer Größe kleiner der Wellenlänge auf. Die allgemeine Berechnungsvorschrift lautet [79]:

$$\tau_R(\lambda) = \exp\left(-0,008735 \cdot \left[\frac{\lambda}{1000 \text{ nm}}\right]^{-4,08} \cdot m \cdot \frac{p}{p_0}\right). \quad (4.16)$$

Die Rayleigh-Streuung zeigt eine starke Wellenlängenabhängigkeit um den Faktor λ^{-4} [85] und ist daher eher im niedrigeren Wellenlängenbereich der Strahlung wirksam.

4.4.4 Ozongehalt

Die Absorption der Direktstrahlung durch den Ozongehalt der Atmosphäre spiegelt sich im Transmissionskoeffizienten

$$\tau_O(\lambda) = \exp(-\sigma_O(\lambda) \cdot l \cdot m_O) \quad (4.17)$$

wider [79]. Der Absorptionskoeffizient $\sigma_O(\lambda)$ kann Tabellenbüchern entnommen werden, l entspricht dem saisonalen Ozongehalt der Luft, m_O entspricht der optischen Masse des Ozons. Aus Stickstoffoxiden kann sich unter dem Einfluss von Sonnenlicht bodennahes Ozon bilden, daher wird teilweise der Transmissionskoeffizient von NO_2 ebenfalls angegeben. Ozon absorbiert hauptsächlich im UV-Bereich.

4.4.5 Wasserdampf

Wasserdampf ist im höheren Wellenlängenbereich die Hauptursache für Absorption [86]. Der Transmissionskoeffizient bildet sich aus dem Wasserdampfgehalt der Atmosphä-

Atmosphäre	β_A	α_A	Sichtweite (km)
sauber	0,00	1,3	340
klar	0,10	1,3	28
trüb	0,20	1,3	11
sehr trüb	0,40	1,3	< 5

Tabelle 4.3: β_A und α_A Koeffizienten der Ångström-Trübung für verschiedene qualitative Atmosphärenzustände [90].

re w , dem spektralen Absorptionskoeffizienten $\sigma_W(\lambda)$ und der relativen optischen Wasserdampfmasse m_W [79]:

$$\tau_W(\lambda) = \exp\left(\frac{-0,2385 \cdot \sigma_W(\lambda) \cdot w \cdot m_W}{[1 + 118,93 \cdot \sigma_W(\lambda) \cdot w \cdot m_W]^{0,45}}\right). \quad (4.18)$$

4.4.6 Ångström Trübung

Bei klaren Wetterbedingungen ist die Streuung an Aerosolen der Hauptgrund für die Verringerung der eingehenden Strahlung [87]. Daher kann dieser Einfluss in einer Gleichung zusammengefasst werden [88]:

$$\tau_A = \beta_A \lambda^{-\alpha_A}, \quad (4.19)$$

wobei β_A den Auslöschungskoeffizienten beschreibt und α_A für die Partikelgröße steht. In der Regel liegt β_A im Bereich von 0..0,5, teilweise auch leicht darüber, α_A liegt im Bereich von 0..4 [89]. In Tabelle 4.3 werden die Parameter beispielhaft für vier verschiedene Atmosphärenzustände angegeben. Ein α_A von $1,3 \pm 0,5$ stellt dabei den Durchschnittswert für den Korrekturfaktor der Partikelgröße dar. Je größer die Partikel werden, desto stärker nähert sich der Faktor 0 an. Der vollständig partikelfreie Zustand ist als Idealwert anzusehen.

Der Hauptvorteil dieser Methode liegt in der einfachen Anwendung und Umsetzung. Nachteilig ist, dass häufig keine Informationen über die Partikelgrößen der Aerosole verfügbar sind, wodurch diese lediglich angenähert werden können. Zur Erhöhung der Genauigkeit werden in der Regel Wellenlängen genutzt, in denen die Absorption nur eine untergeordnete Rolle spielt, beispielsweise 380 und 500 nm. Weiterhin kann der Einfluss von Wasser die Berechnung stören [91].

4.4.7 Linke Trübung

Der Linke Trübungsfaktor stellt einen für die Berechnung der eingehenden Solarstrahlung häufig genutzten Faktor dar, welcher die Anzahl der idealen Atmosphären beschreibt, die notwendig wären, um die gleiche Abschwächung der Strahlung zu erreichen, wie sie in der (aktuellen) realen Atmosphäre vorliegt [87]. Der Faktor schwankt dabei zwischen 1 und 10, wobei 1 die ideale Atmosphäre darstellt, welche in der Realität nicht erreicht wird. Die ideale Atmosphäre, auch Rayleigh Atmosphäre bezeichnet, ist trocken und frei von Aerosolen. Ein Trübungsfaktor von 2 kommt diesem Idealwert sehr nah und liegt in klaren, kalten Nächten in großen Höhen vor [90].

Die Berechnung des Linke Trübungsfaktors erfolgt mit der Solarkonstante E_S und der optischen Rayleigh-Dicke κ_R über [88]:

$$\tau_L = \frac{1}{\kappa_R m} \ln \left(\frac{E_S}{E_B} \right). \quad (4.20)$$

Im Gegensatz zur Ångström-Trübung betrachtet der Linke-Faktor nicht nur den Einfluss von Aerosolen, sondern bezieht sich auf das gesamte Spektrum, womit auch die Absorption von Wasser einbezogen wird. Daher wird sich in der Regel eine im Vergleich höhere Genauigkeit einstellen, gleichzeitig lassen sich jedoch die Einflüsse von Wasser und Aerosolen nicht voneinander trennen. Die Bestimmung des Linke Trübungskoeffizienten ist im Vergleich zu Ångström aufwändiger [91].

Da die Aerosolstreuung den größten Einfluss auf die atmosphärische Trübung hat und sowohl im Linke- als auch im Ångström Faktor enthalten ist, existiert ein Zusammenhang zwischen beiden Größen. Entsprechend [87] lässt sich dieser linear annähern und über die Koeffizienten a und b mittels

$$\beta_A = a + b\tau_L \quad (4.21)$$

ausdrücken. Durch den Einfluss der optischen Masse ist der Linke Trübungsfaktor ortsabhängig und muss für den Einsatz entsprechend angepasst werden.

4.5 Einfluss von Mehrfachreflexionen

Sowohl Direkt- als auch Diffusstrahlung können (Mehrfach-)Reflexionen hervorrufen, welche zur Gesamtbilanz beitragen. Der Anteil, welcher durch die Direktstrahlung

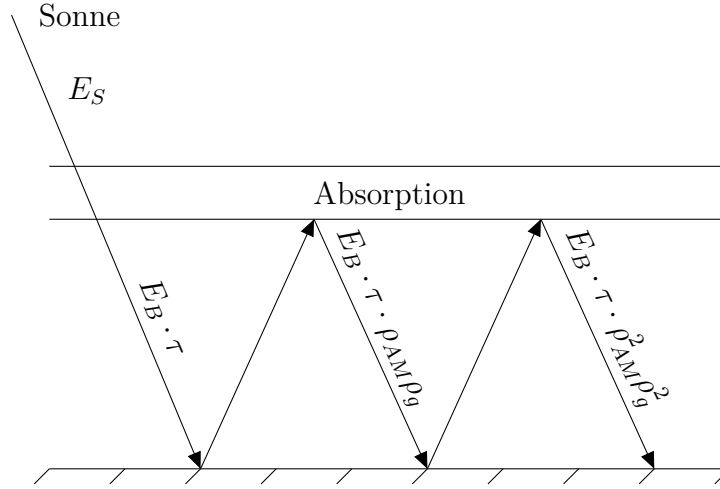


Abbildung 4.7: Einfluss von Mehrfachreflexionen zwischen Oberfläche und Atmosphäre auf die eingehende Strahlung.

hervorgerufen wird, lässt sich über die Albedos ρ_{AM} und ρ_g und die Anzahl der Reflexionsvorgänge bestimmen [72, S. 156]:

$$\begin{aligned} R &= E_S \cdot \tau (1 + \rho_{AM} \rho_g + \rho_{AM}^2 \rho_g^2 + \dots + \rho_{AM}^n \rho_g^n) \\ &= E_S \cdot \tau \left(\frac{\rho_{AM} \rho_g}{1 - \rho_{AM} \rho_g} \right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Die Wirkungsweise ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die eingehende Leistung wird zunächst über den Transmissionskoeffizienten abgeschwächt und mit den Reflexionskoeffizienten verrechnet. Damit verringert sie sich bei jedem Durchlauf.

Die Zusammenhänge für die Diffusstrahlung sind weitaus komplexer, da es sich hierbei um eine, je nach Betrachtungsweise, isotrope oder anisotrope Verteilung handelt. Der reflektierte Anteil wird daher in der Regel lediglich über einen Faktor angegeben.

4.6 Modellansätze zur Bestimmung der verfügbaren Energie

Für die Klassifizierung von Solarstrahlungsmodellen existieren verschiedene Ansätze. Grundlegendste Betrachtungsweise ist die Unterscheidung von spektralen und breitbandigen Modellen. Erstere beschreiben das Verhalten nur für eine oder mehrere (typischerweise zwei) markante Wellenlängen, wohingegen letztere keine Unterschiede im Spektrum machen (vergleiche [92, 93]).

In Abhängigkeit der Parameter, kann weiterhin eine Trennung in Modelle für klare Wetterbedingungen und solche, die Wolken und Verschmutzungsparameter berücksichtigen, vorgenommen werden. Dies entspricht dem Vergleich zwischen Ideal- und Realbedingungen.

Eine Übersicht zu den Unterteilungsmöglichkeiten gibt [94], dort werden die folgenden sechs verschiedenen Kategorien aufgestellt und zur Klassifizierung genutzt.

- Modelle für wolkenfreien Himmel
- Wolkenschichtbasierte Modelle
- Vollständig wolkenbasierte Modelle
- Sonnenscheinmodelle
- Satellitenmodelle
- Verhältnismodelle

Modelle für wolkenfreien Himmel zeigen eine hohe Genauigkeit in Situationen ohne einen hohen Wasser- oder Partikelgehalt in der Luft bis hin zur Abschattung, wohingegen wolkenschichtbasierte Modelle die Einwirkung durch die qualitative Wolkenmenge C berücksichtigen [94]:

$$E_G = E_0(1 - C). \quad (4.23)$$

Vollständig wolkenbasierte Modelle fassen Trübungs- und Auslöschungseffekte der Solarstrahlung in einem oder mehreren Faktoren zusammen, ohne Daten über deren genaue Zusammensetzung zu erfordern. Dies erleichtert die Handhabung.

Sonnenscheinmodelle verwenden die extraterrestrische Einstrahlung anstatt der bei wolkenfreiem Himmel, womit sich die Berechnung vereinfachen lässt, da hierbei nicht mehr Basiseinstrahlung E_0 benötigt wird.

Satellitenmodelle ermöglichen die Verwendung von Informationen über die Atmosphärenschichten oberhalb von einer Bewölkungszone sowie großflächige Beobachtungen, gleichzeitig sind sie in der Umsetzung sehr aufwendig.

Verhältnismodelle (in [94] entsprechend den maßgeblichen Personen als Liu und Jordan Modelle bezeichnet) nutzen die typischerweise verfügbare Globalstrahlung um daraus die Diffusstrahlung abzuleiten. Die Anwendung solcher Methoden ist daher vergleichsweise aufwandsarm, erfordert jedoch in der Regel Anpassungen an die Umgebung und Erfahrungswerte.

Weitere Unterteilungsmöglichkeiten ergeben sich anhand der verwendeten Parameter, der Komplexität, Hardware- und Informationsanforderungen oder der Genauigkeitsbereiche. Bestimmt werden müssen jeweils zwei Strahlungskomponenten, die dritte Komponente kann abgeleitet werden.

4.6.1 Übersicht zu den wichtigsten Solarstrahlungsmodellen

Im Folgenden wird eine Übersicht zu den meist verwendeten Modellen zur Abbildung des Strahlungsverlaufs gegeben. Es existiert in der Literatur eine Vielzahl an Beiträgen, in denen die Eignung und Genauigkeit verschiedener Ansätze für bestimmte Anwendungsgebiete miteinander verglichen werden. Die Auswahl, ob ein Modell zu den wichtigsten und meist verwendeten gehört, wird anhand dieser Beiträge getroffen. Beispiele dafür sind [75, 82, 92–99]. Die Modelle sind im Folgenden chronologisch geordnet, weil sie zum Teil aufeinander aufbauen, verbessert wurden oder Erkenntnisse von einem Modell Einfluss auf ein anderes hatten.

4.6.1.1 ASHRAE Modell

Bei dem Solarstrahlungsmodell der ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers) handelt es sich um einen empirisch ermittelten Zusammenhang, welcher lediglich vom Zenitwinkel abhängt. Über die Parameter E_0 , κ und θ lässt sich der Kurvenverlauf für Direkt- und Diffusstrahlung anpassen mit [100]:

$$E_B = E_0 \cdot e^{-\frac{\kappa}{\cos \theta}} \quad (4.24)$$

und

$$E_D = c \cdot E_B. \quad (4.25)$$

Damit ist es auf verschiedene Umgebungsbedingungen anpassbar und liefert bei klaren Wetterbedingungen den Tagesverlauf der Strahlung. Für bewölkte Zustände oder wechselhafte Bedingungen ist es weniger geeignet.

Das Modell selbst wurde im Verlauf der Zeit mehrfach angepasst, zuletzt in der Version von 2013 [101].

4.6.1.2 Hottel Modell

Das Hottel-Modell aus dem Jahr 1976 berechnet die eingehende Solarstrahlung über den wellenlängenabhängigen Transmissionskoeffizienten τ . Die Leistung wird dabei im Wesentlichen höhenabhängig betrachtet.

Die Berechnung der Direktstrahlung erfolgt über [102]:

$$E_B \cdot \tau = E_B \left(a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\cos \theta}} \right) \quad (4.26)$$

mit den Koeffizienten a_0 , a_1 und k . Die Anpassung erfolgte in Bezug auf die Normatmosphäre. Es handelt sich dabei um einen empirischen Ansatz, welcher sowohl auf die geografische Höhe und Breite als auch vertikale Höhe angepasst werden muss. Die Anwendung ist dagegen vergleichsweise unkompliziert. Die Diffusstrahlung kann entsprechend Gleichung 4.2 berechnet werden.

4.6.1.3 Hoyt Modell

Das Modell nach Hoyt bezieht die Transmissionskoeffizienten für Wasser, Kohlendioxid, Ozon, Staub und Sauerstoff, zusammengefasst als τ_i , in die Berechnung ein. Außerdem werden die Streuraten für Luft und Staub (γ_G und γ_M) getrennt betrachtet. Daraus ergibt sich nach [103] für die Direktstrahlung:

$$E_B = E_S \cos \theta \left(1 - \sum \tau_i \right) (1 - \gamma_G) (1 - \gamma_M) \quad (4.27)$$

sowie für die Diffusstrahlung

$$E_D = E_S \cos \theta \left(1 - \sum \tau_i \right) (0,5\gamma_G + 0,75\gamma_M). \quad (4.28)$$

Weiterhin wird die reflektierte Strahlung R einbezogen, welche sich aus dem in Richtung Atmosphäre reflektierten Anteil E_x zusammensetzt:

$$R = E_x \left(1 - \sum \tau'_i \right) (0,5\gamma'_G + 0,75\gamma'_M). \quad (4.29)$$

Die Globalstrahlung ergibt sich damit zu:

$$E_G = E_B + E_D + R \quad (4.30)$$

und der Gesamttransmissionskoeffizient der Atmosphäre lässt sich als:

$$\tau_{AM} = \frac{E_G}{E_S \cos \theta} \quad (4.31)$$

ausdrücken. Zusätzlich dazu beschreibt Hoyt ein weiteres Modell, welches speziell für den bedeckten Himmel gedacht ist. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Direktstrahlungsanteil bei vollständiger Bewölkung zu Null wird und ausschließlich Diffusstrahlung auftritt.

4.6.1.4 MAC Modell

Das MAC-Modell bezieht die Transmittanzen von Ozon und Wasser sowie die Rayleigh-Streuung ein. Partikelstreuungseffekte werden nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, dass eine höhere Streuung ohnehin zu einer höheren Diffusstrahlung führt, wodurch dieser Faktor wieder korrigiert wird.

Die Berechnung der Direktstrahlung wird angegeben mit [104]:

$$E_B = E_S \cos \theta (\tau_O [\kappa_O \cdot m] \cdot \tau_R - \tau_W [\kappa_W \cdot m]), \quad (4.32)$$

mit der Wassersäule κ_W und der Ozonsäule κ_O . Der Diffusstrahlungsanteil wird ausschließlich über die Rayleigh-Streuung modelliert und angegeben mit

$$E_D = E_S \cos \theta (1 - \rho_R(\theta)) (1 + \rho_g \rho_{Rx}) - E_R \cos \theta. \quad (4.33)$$

Dabei entsprechen ρ_R und ρ_{Rx} den Rayleigh Albedos, ρ_g der Oberflächenalbedo und E_R der auf die Rayleigh-Atmosphäre auftreffenden Strahlung.

Für den Einsatz unter wolkigen tropischen Bedingungen gibt [104] eine Abweichung zwischen Modell und Messwerten von unter 25 % an. Dieser Wert kann durch statistische Methoden und Durchschnittsbildung über mehrere Tage weiter gesenkt werden. Für einen 5-Tage Durchschnitt liegt der Fehler bei unter 10 % bzw. für 80 % der Werte unter 5 %.

4.6.1.5 Bird Modell

Das Bird Modell aus dem Jahr 1981 zählt zu den verbreitetsten und meist verwendeten, weil es zu den ersten allgemeinen Ansätzen zählt, die auf die Verwendung von Tabellenwerten verzichten. Die Globalstrahlung wird mittels [81]:

$$E_G = \frac{E_B + E_D}{1 - \rho_{AM}\rho_g} \quad (4.34)$$

unter Verwendung der Albedos der Oberfläche und der Atmosphäre (ρ_g und ρ_{AM}) berechnet, wobei die Näherung der Direktstrahlung über:

$$E_B = E_S \cdot 0,9662 \cos \theta \cdot \tau_R \tau_O \tau_G \tau_W \tau_M \quad (4.35)$$

und die Bestimmung des Diffusanteils über:

$$E_D = E_S \cdot 0,79 \cos \theta \cdot \tau_O \tau_W \tau_G \tau_M \frac{0,5(1 - \tau_R) + B_M(1 - \tau_M)}{1 - m + m^{1.02}} \quad (4.36)$$

vorgenommen wird. B_M entspricht in der Formel einem Faktor zur Beschreibung des Verhaltens der Mie-Streuung und charakterisiert deren Verhalten. In Abhängigkeit von der Wellenlänge erfolgt die Streuung eher rückwärtsgerichtet, vorwärtsgerichtet oder isotroph.

4.6.1.6 Atwater Modell

Atwater bezieht 1981 in sein Modell für die Globalstrahlung die Absorption und Streuung an Wolken über den Faktor τ_C mit ein [105]:

$$E_G = E_S \cos \theta f \tau_R \tau_G \tau_W \tau_C \tau_M \left(\frac{1}{1 - \rho_g \rho_{AM}} \right). \quad (4.37)$$

Der Faktor f beschreibt die jährliche Abweichung im Abstand zwischen Sonne und Erde.

In seinen Untersuchungen bringt Atwater dem Einfluss von Wolken im Allgemeinen, sowie den Wolkentypen und deren Zusammensetzung eine große Bedeutung bei. Als Begründung bezieht er sich u. a. auf die Arbeit von Tarpley, welcher feststellt, dass die Abweichung zwischen berechnetem Wert und Mittelwert der Beobachtung, von 10 % unter freien wolkenfreien Bedingungen bis auf 30 % bei Teilbewölkung und 50 % bei voller Bewölkung ansteigt [106]. Die Diffusstrahlung kann hier ebenfalls über Gleichung 4.2 berechnet werden.

4.6.1.7 CPC2 Modell

Gueymard stellt 1989 ein 2-Band Modell zu Berechnung der Solarstrahlung auf. Dabei berechnet er die Direktstrahlung über [107]:

$$E_{B_i} = E_{S_i} \tau_{O_i} \tau_{R_i} \tau_{G_i} \tau_{W_i} \tau_{M_i} \quad (4.38)$$

wobei der Index i jeweils die Wellenlänge angibt. Die Diffusstrahlung setzt sich aus den Anteilen durch Mie und Rayleigh (E_{M_i}, E_{R_i}) sowie durch die atmosphärische Reflexion R zusammen:

$$E_{D_i} = E_{R_i} + E_{M_i} + R_i. \quad (4.39)$$

Die Einzelkomponenten werden in [108] aufgeschlüsselt:

$$E_{R_i} = B_R \tau_{O_i} \tau_{G_i} \tau_{W_i} \tau_{M_{a_i}} (1 - \tau_{R_i}) E_{S_i} \sin \alpha, \quad (4.40)$$

$$E_{M_i} = B_M \tau_{O_i} \tau_{G_i} \tau_{W_i} \tau_{M_{a_i}} \tau_{R_i} (1 - \tau_{M_{s_i}}), \quad (4.41)$$

$$R_i = \rho_g \rho_{AM_i} \left(\frac{E_{B_i} \sin \alpha + E_{R_i} + E_{M_i}}{1 - \rho_g \rho_{AM_i}} \right). \quad (4.42)$$

Dabei dienen die Faktoren B_R und B_M zur Beschreibung des in Richtung Oberfläche gestreuten Anteils von Rayleigh- und Mie-Streuung. Der Transmissionskoeffizient τ_M ist aufgeteilt in Absorption und Streuung (τ_{Ma}, τ_{Ms}).

4.6.1.8 Kumar Modell

Kumar beschreibt, dass die eingehende Solarstrahlung auf ebenen Flächen annähernd homogen ist, d. h. es genügt die Messung bzw. Berechnung für eine Position. Die Werte sind dann auf den gesamten umliegenden Bereich anwendbar. In bergigem Gebiet gilt diese Annahme nicht mehr, weil es durch ein wechselhaftes Terrain zu lokalen Minima und Maxima in der Einstrahlung kommen kann [109]. Grund hierfür sind besonders Abschattungseffekte.

Das von Kumar entwickelte Modell setzt sich zum Ziel, diese Einflüsse zu berücksichtigen und dabei dennoch unkompliziert in der Handhabung zu sein und eine hohe Rechengeschwindigkeit zu ermöglichen. Die Direktstrahlung wird dabei über:

$$E_B = E'_S e^{\left(-k \frac{p}{p_0} m_0\right)} \quad (4.43)$$

berechnet, wobei p , p_0 und m_0 jeweils den Luftdruck bzw. Luftdruck auf Meeresniveau und Luftmasse auf Meeresniveau abbilden. E'_S gibt den Anteil der eingehenden Leistung über dem Raumwinkel an. Die Diffusstrahlung berechnet sich mittels

$$E_D = E'_S A_D \frac{\cos^2 \zeta}{2 \sin \alpha}, \quad (4.44)$$

wobei ζ den Verkipfungswinkel der Oberfläche darstellt und A_D den Anteil der Diffusstrahlung angibt. Dieser entspricht laut [109] 8 - 11 %.

4.6.1.9 METSTAT Modell

Das METSTAT (Meteorological/Statistical) Modell ist das amerikanische Gegenstück zu ESRA und berücksichtigt sämtliche Transmittanzen der einzelnen Atmosphärenschichten. Direkt- und Diffusstrahlung werden mittels [110]:

$$E_B = 0,9751 \cdot \tau_R \tau_O \tau_G \tau_W \tau_M \tau_{OPQ} \tau_{TRN} \quad (4.45)$$

und

$$E_D = (f(AM)(K_{s_R} + K_{s_a}) + K_{s_{OPQ}} + K_{s_{TRN}}) PSW + K_{s_{GRFL}} \quad (4.46)$$

berechnet. Dabei entsprechen die Indizes OPQ und TRN den Einflüssen durch Wolken, PSW verringert die diffuse Strahlung bei Regen, die K_{s_i} entsprechen den normalisierten Anteilen der jeweiligen Transmissionseffekte und der Index $GRFL$ beschreibt Reflexionen durch den Boden. Aufgrund der Eingangsparameter zum Wolkeneinfluss ist das Modell nicht für alle Gebiete anwendbar, da diese Information nicht überall verfügbar ist.

4.6.1.10 Fu & Rich Modell

Die Softwareumgebung Solar Analyst von Fu & Rich aus dem Jahr 1999 macht es sich zur Aufgabe topografische Einflüsse in die Berechnung der Strahlungsanteile einzubeziehen [111]. Damit wird es möglich, die Strahlungsverteilung nicht nur an einzelnen Positionen, sondern für ein größeres Gebiet zu berechnen. Dabei wird die Direktstrahlung bestimmt durch [92]:

$$E_B = E_S \tau_{AM}^{m_h} \quad (4.47)$$

mit der atmosphärischen Transmittanz $\tau_{AM}^{m_h}$, welche mit der höhenkorrigierten Luftmasse angepasst wird. Die Diffusstrahlung entspricht

$$E_D = E_B \cos \theta \left(\frac{A_D}{1 - A_D} \right) \quad (4.48)$$

mit dem prozentualen Anteil der Diffusstrahlung A_D , welcher mit 0,3 empfohlen wird.

4.6.1.11 ESRA Modell

Das ESRA Modell (European Solar Radiation Atlas) von Rigollier ist das europäische Pendant zu METSTAT. Die Direktstrahlung wird mittels [112]:

$$E_B = E_S f \sin \alpha e^{-0,8662 \cdot \tau_{LAM2} m \kappa_R} \quad (4.49)$$

angegeben, wobei f die Abweichung im Abstand zwischen Sonne und Erde angibt, κ_R der optischen Rayleighdicke entspricht und der Linke-Trübungs faktor für eine Luftmasse von 2 verwendet wird. Die Diffusstrahlung berechnet Rigollier über:

$$E_D = E_S f T_{rd}(\tau_{LAM2}) F_d(\alpha, \tau_{LAM2}). \quad (4.50)$$

Die Faktoren T_{rd} und F_d , welche jeweils von Höhenwinkel bzw. Höhenwinkel und Trübungs faktor abhängig sind, entsprechen der Transmissionsfunktion für einen Zenitwinkel von 90° sowie deren winkelabhängigen Äquivalent.

4.6.1.12 Ineichen Modell

Ineichen führt für sein Modell von 2002 den multiplikativen Faktor b ein, welcher die Höhe des Beobachtungsorts mit einbezieht. Damit erhöht sich die Genauigkeit des früheren Ineichen-Modells, es bleibt jedoch einfach anwendbar, da die Transmission durch den Linke-Trübungs faktor für eine Luftmasse von 2 repräsentiert wird. Die Globalstrahlung berechnet sich über [113]:

$$E_G = a_1 \cdot E_S \sin h \cdot e^{(-a_2 \cdot m(f_{h1} + f_{h2} - (\tau_L - 1)))} \quad (4.51)$$

mit den empirisch bestimmten Faktoren a_1 , a_2 , f_{h1} und f_{h2} , welche lediglich die Höhe als Eingangsparameter haben. Die Direktstrahlung wird bestimmt durch

$$E_B = b \cdot E_S e^{(-0,09 \cdot m(\tau_L - 1))}. \quad (4.52)$$

4.6.1.13 Simplified Solis Modell

Das vereinfachte Solis-Modell entfernt spektrale Eingangsparameter aus dem ursprünglichen Modell. Damit wird es zugänglicher und die Berechnungsgeschwindigkeit erhöht sich zugleich deutlich. Hierbei wird die Globalstrahlung mit [114]:

$$E_G = E'_S e^{\left(-\frac{\tau_a}{\sin^a \alpha}\right) \sin \alpha}, \quad (4.53)$$

die Direktstrahlung über

$$E_B = E'_S e^{\left(-\frac{\tau_b}{\sin^b \alpha}\right)} \quad (4.54)$$

sowie die Diffusstrahlung mit

$$E_D = E'_S e^{\left(-\frac{\tau_c}{\sin^c \alpha}\right)} \quad (4.55)$$

angegeben. a , b und c sind empirische Anpassungsparameter, τ_a , τ_b und τ_c entsprechen den optischen Dicken von Global-, Direkt- und Diffusstrahlung. E'_S gibt den Anteil der eingehenden Leistung über dem Raumwinkel an.

Durch die Verallgemeinerungen verschlechtert sich die Genauigkeit im Vergleich zum ursprünglichen Modell um 1 - 5 %.

4.6.1.14 REST2 Modell

REST2 stellt eine Verbesserung des CPC2-Modells dar, insbesondere im Bereich der Aerosole. Die Berechnung der Direktstrahlung erfolgt identisch zu Gleichung 4.38, jedoch wurde die Berechnung der Aerosoltransmittanz, welche bei klaren Bedingungen den größten Einfluss auf die Rechnung hat, angepasst. Dazu werden unter anderem die Ångström-Koeffizienten genutzt. Es werden weiterhin zwei Wellenlängen betrachtet, welche mit den Indizes i angegeben werden.

Die Diffusstrahlung ohne Bodenreflexion wird über [115]:

$$E_{D_i} = \tau_{O_i} \tau_{G_i} \tau_{N_i} \tau_{W_i} \left(B_{R_i} (1 - \tau_{R_i}) \tau_{M_i}^{0,25} + B_M F_i \tau_{R_i} (1 - \tau_{M_{Si}}^{0,25}) \right) E_{S_i} \quad (4.56)$$

berechnet. τ_N stellt dabei den Transmissionskoeffizienten von NO_2 dar, F_i ist ein Korrekturfaktor, um Mehrfachstreuungen zu auszublenzen. Die Berechnung von Global- bzw. Direktstrahlung erfolgt analog zu CPC2.

4.6.1.15 MRM 5 Modell

Das MRM (Meteorological Radiation Model) wurde von vielen Seiten beeinflusst und liegt aktuell in der Version 5 vor. Ziel dieses Modells ist die Bestimmung der Solarenergie an Orten, zu denen keine Daten vorliegen, um dennoch eine Abschätzung treffen zu können [116].

Die Direktstrahlung ist dabei über [117, S. 362]:

$$E_B = E_S \sin \alpha \cdot \tau_M \tau_R \tau_O \tau_W \tau_G \quad (4.57)$$

bestimmt (MRM 2). Die Berechnung der Transmittanzen wurde in MRM 5 für die Berechnung der atmosphärischen Gase angepasst. Der Anteil der Diffusstrahlung wird mit [117, S. 374]:

$$E_D = E_S \cos \theta \tau_{Ma} \tau_O \tau_W \tau_G \cdot 0,5(1 - \tau_{Ms} \tau_R) \quad (4.58)$$

berechnet (MRM 5). Zusätzlich wird im Modell eine Komponente für Mehrfachreflexion angegeben, welche hier nicht betrachtet werden soll. Über die verschiedenen Evolutionsschritte finden sich auch weitere Komponenten zur Bestimmung der Leistung bei Bewölkung.

4.6.2 Bewertung der Modellabweichungen

Der Vergleich verschiedener Modellansätze ist generell nichttrivial. Einzelne Modelle unterscheiden sich in der Anzahl der benötigten Parameter, wobei die These gilt, je mehr Parameter, desto genauer kann der Verlauf beschrieben werden. Weiterhin existiert, besonders bei empirisch beeinflussten Modellen, eine Ortsabhängigkeit, welche einen Vergleich behindert. Weil verschiedene Ansätze weiterhin für definierte Einsatzzwecke bestimmt sind, finden sich in der Literatur u. a. auch solche, die beispielsweise für numerische Berechnung optimiert sind, damit schneller zu einer Lösung führen, wobei jedoch die Rechengeschwindigkeit und nicht die Genauigkeit Zielkriterium sind. Zusätzlich sind Genauigkeitsangaben abhängig von den verwendeten Testparametern und deren Ungenauigkeit.

Durch die Verkettung dieser Umstände ist ein numerischer Vergleich in der Regel nicht möglich. Die Betrachtung der Angaben zu prozentualen Fehlern bzw. Fehlerbereichen ermöglicht jedoch ein qualitatives Einordnen eines Modells. Abbildung 4.8 zeigt eine Literaturübersicht zu verschiedenen Globalstrahlungsmodellen und gibt deren

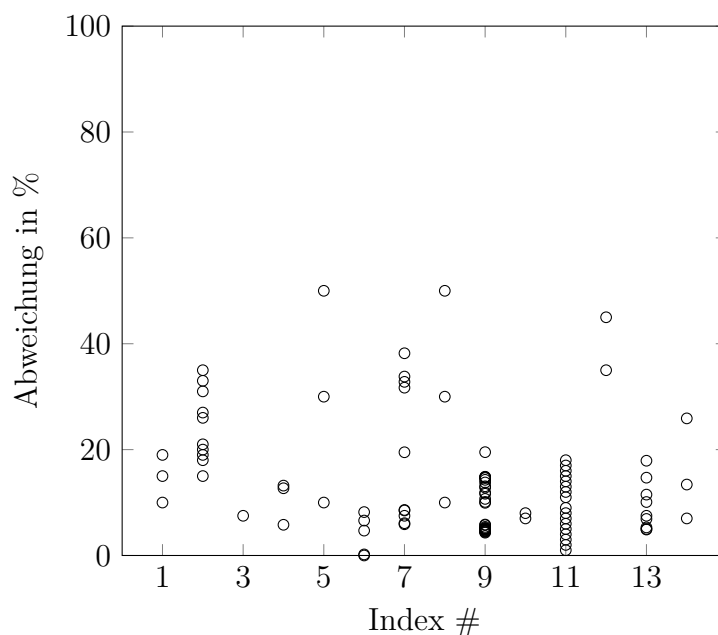


Abbildung 4.8: Vergleich der Modellabweichungen verschiedener Quellen in Prozent. Der Index entspricht folgender Reihenfolge der Quellen: [75, 81, 92, 93, 96, 97, 99, 99, 103, 105, 110, 112, 128, 129].

quadratische Modellabweichung in Prozent an. Dargestellt sind, je nach Angabe in der Quelle, ein einzelner Fehler, ein Fehlerbereich oder, im Fall von Übersichtsbeiträgen, mehrere Fehlerwerte.

Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Werte stark. In Einzelfällen, unter besonders günstigen Bedingungen, ergibt sich ein Fehler nahe Null. Dies tritt für klare Wetterbedingungen und eine hohe Eingangsparameteranzahl auf. Unter schlechten Bedingungen kann der Fehler zudem auf 50 % oder höher steigen, dies bestätigt ebenfalls [130]. Weiterhin ist in den Fehlerbereichen die Streubreite einzelner bzw. unterschiedlicher Modelle bei gleichen Eingangsdaten zu erkennen. Diese kann zwischen 10 und 20 % liegen.

4.7 Umrechnung von horizontaler auf geneigte Ebene

Die in Abschnitt 4.6.1 gezeigten Modelle erlauben die Bestimmung der eingehenden Leistung auf horizontale Flächen. In realen Anwendungen sind die Solarzellen häufig verkippt, wodurch der Verlauf der eingehenden Leistung verändert wird. So spielt zum Beispiel die Bodenreflexion eine große Rolle, weil abhängig von der Albedo der

Diffusstrahlungsanteil zunimmt. So beschreibt u. a. [118], dass die eingehende diffuse Strahlungsleistung durch diesen Effekt um bis zu 20 % gesteigert wird.

Für die Berechnung der Direktstrahlung ist der Einfluss einer verkippten Ebene geometrisch bestimmt. Für einen gedachten Neigungswinkel ζ lässt sie sich über

$$E_{B\zeta} = \frac{E_B}{\cos \theta} \cos \zeta \quad (4.59)$$

bestimmen [119]. Die Herleitung der Diffusstrahlung ist dagegen nicht eindeutig, sondern davon abhängig, inwiefern einzelne Komponenten wie Mehrfachreflexion, die Albedo des Bodens sowie des Himmels oder die Richtungsabhängigkeit der Streufaktoren betrachtet werden. Die Umrechnung von E_D auf $E_{D\zeta}$ erfolgt in der Literatur auf verschiedenen Wegen. Eine der ursprünglichsten Betrachtungen stammt von Temps-Coulsen [120], welche die Formel

$$E_{D\zeta} = E_D \cos^2 \left(\frac{\zeta}{2} \right) \quad (4.60)$$

verwenden. Hierbei werden isotrope Bedingungen angenommen, d. h. die Diffusstrahlungsverteilung ist aus allen Bereichen gleich und die Umrechnung erfolgt daher geometrisch.

Dass die isotrope Betrachtung nicht ausreichend sei, folgert Reindl [121]. Dieser erweitert die rein geometrische Berechnung daher mit einem Anisotropieindex A_i :

$$E_{D\zeta} = E_D (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \zeta}{2} \right), \quad (4.61)$$

welcher das Verhältnis zwischen eingehender Strahlung aus der Atmosphäre und isotropem Anteil bestimmt. Badescu steigert diese Betrachtung noch um eine weitere Neigungsachse, wodurch eine 3-D-Verkipfung simuliert werden kann, verwendet jedoch ebenfalls einen isotropen Ansatz [122].

Einen anderen Weg geht Willmott, er betrachtet die Umrechnung lediglich als Faktor c_ζ , welcher sich über

$$c_\zeta = 1,0115 - 0,20293\zeta - 0,080823\zeta^2 \quad (4.62)$$

bestimmen lässt [123]. Damit vereinfacht sich die Berechnung, wohingegen die Genauigkeit sinkt. Weitere Ansätze sind in [124–127] zu finden.

4.8 Spektrale Empfindlichkeit und Vergleich zur Innenraumanwendung

Abgesehen von der solaren Einstrahlung spielt für die Energie, welche der Elektronik zur Verfügung steht, auch die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Solarzelle bzw. des Solarmoduls eine Rolle. Dieser Wert beschreibt, wie hoch die Reaktion der Zelle in Abhängigkeit von der Wellenlänge ausfällt. Im normierten Fall beschreibt er, wann der Wirkungsgrad maximal oder minimal wird. Die spektrale Empfindlichkeit $S(\lambda)$ einer Solarzelle lässt sich über [131]

$$S(\lambda) = \frac{\frac{dI_{ph}(\lambda)}{d\lambda}}{\frac{dP_{Licht}(\lambda)}{d\lambda}} = \frac{|j_K|}{E(\lambda)} \quad (4.63)$$

berechnen, d. h. es wird der generierte Photostrom ins Verhältnis zur eingehenden Strahlungsleistung gesetzt.

Im Innenraumbereich liegt, je nach konkretem Anwendungsfall, ein abgeschwächter, geringer oder kein Einfluss durch die solare Einstrahlung vor. Hierfür sind besonders Fenster interessant, wobei der Beitrag von Sonnenlicht stark winkelabhängig ist und durch die geometrische Ausrichtung eine gegebenenfalls starke Veränderung des Tagesverlaufs vorliegt. Aus diesem Grund ist für Innenanwendungen der Beitrag von Kunstlicht von erheblicher Bedeutung.

Das solare Spektrum ist klar definiert und kann zum Vergleich der Eignung bzw. zur Leistungsbestimmung verwendet werden. Im Innenraum hängt die spektrale Verteilung von den installierten Lichtquellen ab. Abbildung 4.9 (a) zeigt beispielhaft Spektren von drei verschiedenen Lichtquellen, einer Leuchtdiode, einer Leuchtstoffröhre und einer Halogenlampe. Die jeweiligen Kurven wurden mit einem Spektrometer aufgezeichnet und sind zur besseren Übersicht auf sich selbst normiert.

Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Verläufe grundlegend. Die Halogenlampe erzeugt eine über den gesamten Bereich des sichtbaren Lichts bis in den Nahinfrarotbereich wirkende Strahlung.

Das Spektrum der LED-Lampe fällt deutlich schmaler aus und hängt im Detail vom Aufbau und den einzelnen Dioden ab, welche zusammengesetzt das Leuchtmittel ergeben. Wie in der Abbildung sichtbar wird, ist im vorliegenden Fall zusätzlich zum roten Bereich eine blaue LED verbaut, um die Lichtfarbe in den kaltweißen Bereich zu korrigieren. Aufgrund des Wellenlängenabstands tritt dieser Anteil als eigenständiger Peak auf.

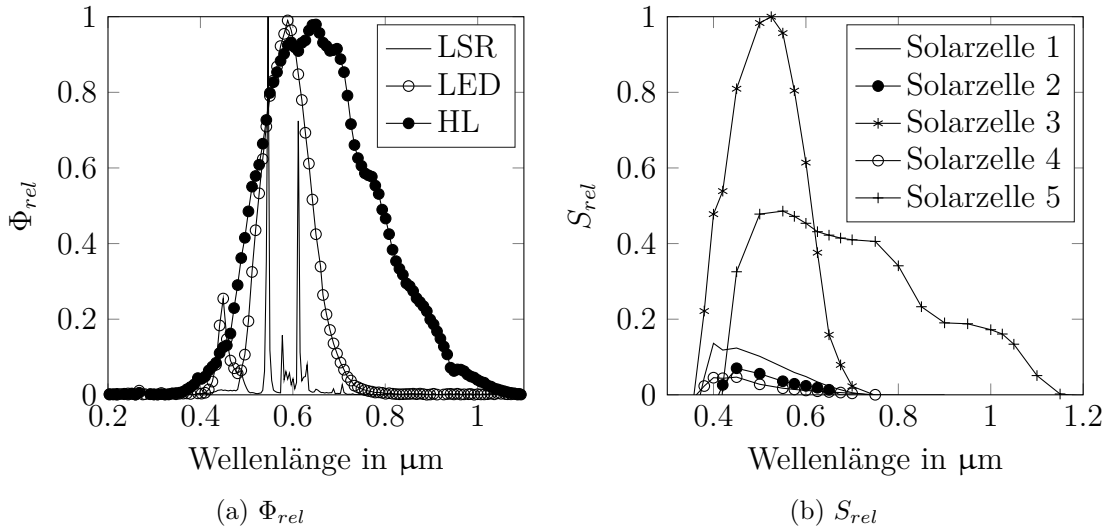


Abbildung 4.9: Normierte Emissionsspektren von LED, Leuchtstoffröhre und Halogenlampe (a) sowie normierte spektrale Empfindlichkeit von fünf verschiedenen Solarzellen (b) [132].

Die ausgehende Strahlung der Leuchtstoffröhre zeigt im Vergleich zu den anderen Leuchtmitteln nur geringe bereichswirksame Anteile im Lichtspektrum. Hier werden definierte Anteile im Gas schmalbandig angeregt, woraus sich die einzelnen Peaks ergeben. Eine vergleichbare Strahlungsleistung ergibt sich, weil die Absolutwerte der Einzelpeaks im Vergleich zu LED und Halogenlampe höher liegen.

Für eine optimale Auslegung einer photovoltaischen Energieversorgung für ein drahtloses Sensorsystem ist es notwendig, die spektrale Emission der Lichtquelle mit der spektralen Empfindlichkeit der Solarzelle zu vergleichen [133]. In Abbildung 4.9 (b) sind beispielhaft die spektralen Empfindlichkeiten von fünf verschiedenen Zellen unterschiedlicher Hersteller dargestellt. Sie wurden mit einem Monochromator beleuchtet und ihre Reaktion aufgezeichnet. Die entsprechenden Kennlinien sind aufeinander normiert. Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Empfindlichkeiten sowohl im Wellenlängenbereich als auch im Wert. Hierbei spiegeln sich vor allem Materialparameter wider, so handelt es sich z. B. bei Zelle 3 um amorphes Silizium und bei Zelle 5 um kristallines Silizium.

Mit einer solchen Charakterisierung wird es möglich, für das Emissionsspektrum einer Quelle die, bezüglich ihrer Empfindlichkeit, geeignete Solarzelle auszuwählen. Dazu sollte sich der Bereich, in dem sich die jeweiligen Kennlinien überschneiden, maximal

werden. Speziell bei Leuchtstoffröhren ist es, aufgrund der Schmalbandigkeit, weiterhin wichtig, dass die entsprechenden Maxima beieinander liegen.

Zusätzlich zur Betrachtung der spektralen Verteilung, ist für die Energieverfügbarkeit im Innenraum die Dauer der Einstrahlung zu berücksichtigen. Weil dies in der Regel von der Raumnutzung abhängt, sind Aussagen hierzu vom konkreten Fall abhängig.

5 Modellierung der eingehenden Energie

Im folgenden Kapitel wird die Berechnung und Optimierung eines Modellansatzes zur Ermittlung der erwarteten Eingangsleistung an einer Solarzelle zur Versorgung eines drahtlosen Sensorsystems beschrieben. Dazu wird zunächst aufgezeigt, welche Anforderungen an das Modell gestellt werden, damit es für den Bereich der drahtlosen Sensornetze einsetzbar wird. Dies betrifft im Wesentlichen Limitierungen seitens der verfügbaren Hardware sowie die Zweckmäßigkeit von benötigten Parametern und den Kommunikationsaufwand.

Der Abschnitt 5.4 gibt über die für die Untersuchung verwendeten Daten Aufschluss und beschreibt deren Eigenschaften und Charakteristika. Daraus ergeben sich grundlegende Anforderungen an die Genauigkeit und Auflösung des Modells. In 5.5 wird der Einfluss des Bedeckungsgrads auf den Verlauf der Kennlinien untersucht, da das ASHRAE-Modell, welches in Abschnitt 5.3 als das für die Anforderungen geeignetste hervorgeht, lediglich einen allgemeinen Auslöschungsfaktor beschreibt und dieser im Bedeckungsgrad zusammengefasst werden kann.

Im darauf folgenden Abschnitt wird beschrieben, inwiefern das ASHRAE-Modell angepasst werden kann, damit es die verwendeten Kennlinien insgesamt betrachtet bestmöglich, d. h. mit minimalem Fehler, beschreibt. In Abschnitt 5.7 wird das Modell anschließend unter Zuhilfenahme unabhängiger Daten überprüft. Für die Auswertung und Modellierung wird zunächst auf eine Normalisierung der Daten verzichtet. Dies spielt erst für die Umsetzung des Verfahrens in eine reale Funktionsumgebung eine Rolle. Im letzten Abschnitt wird untersucht, inwiefern eine höhere Modellauflösung zu einer Fehlerminimierung beiträgt.

5.1 Ziele der Modellierung

Für die Steuerung der Betriebszustände in einem energieautarken System durch das Energiemanagement ist für eine zuverlässige Funktion die Vorausplanung von Energieerträgen notwendig. Um die dafür notwendige Leistungsvorhersage treffen zu können, stehen verschiedene Verfahren aus der Literatur zur Verfügung (vergleiche Kapitel 4). Aufgrund der speziellen Eigenschaften, welche ein drahtloses Sensorsystem charakterisieren, so zum Beispiel Speicher- und Rechenleistungslimitierung, lassen sich die herkömmlichen, für die Ertragsprognose von Solarkraftanlagen verwendeten Modellansätze nicht für ein drahtloses Sensorsystem umsetzen. Ziel ist daher, einen Ansatz zu finden, welcher sich an die Hardwarebeschränkungen von Sensorknoten anpassen lässt und dabei dennoch über eine ausreichende Aussagekraft verfügt, um eine sinnvolle Steuerung und Prognose zu ermöglichen.

Aus dem vorhergehenden Kapitel gehen Modelle mit geringen Parameteranforderungen leichter handhabbar und weniger ressourcenfordernd hervor. Damit verlieren sie an Genauigkeit im Vergleich zu umfassenderen Modellansätzen, erfordern jedoch keine Messgrößen welche, die Zweckmäßigkeit des Verfahrens in Frage stellen. In Abbildung 5.1 ist der prinzipielle Ablauf der Bestimmung der eingehenden Energie dargestellt. Mit Hilfe statistischer Methoden und Parameteroptimierungsfunktionen werden zunächst Modellparameter aus einer Datenbank extrahiert, welche zum Startzeitpunkt als Initialwerte bereitstehen. Sie dienen als Eingangsparemeter für das Modell und den daraus erhaltenen Idealverlauf der eingehenden Energie für einen bestimmten Tag. Gleichzeitig wird der Realverlauf gemessen und festgehalten. Da es hierbei unerheblich ist, ob die Informationsquelle für den Verlauf die Leistung selbst ist oder eine direkt damit in Verbindung stehende Größe, kann hierfür beispielsweise eine Strom-Spannungsmessung oder aber eine Messung der Beleuchtung erfolgen. Real- und Modellverlauf werden normiert und miteinander verglichen. Die sich daraus ergebende Abweichung dient als Information über die Charakteristik der aktuell eingehenden Energie. So kann eine Überprüfung erfolgen, ob die eingehende Energie den Erwartungen entspricht bzw. darüber oder darunter liegt. Damit kann die für den Gesamttag eingeplante Energie korrigiert werden und es können Sollwerte für die Energiespeicherverwaltung angepasst werden. Gleichzeitig kann aus der Volatilität des Verlaufs auf den Prognosehorizont geschlossen werden. Mit diesen Informationen kann der aktuelle und zukunftsmaÙige energetische Zustand des Systems bestimmt werden, woraus sich wiederum die für einen gesicherten Betrieb notwendigen Betriebszustände ableiten lassen bzw. womit

sich präventive Maßnahmen zur Absicherung der Funktion und zur Vermeidung von Stillstandszeiten einleiten lassen. Weiterhin kann die Systemfunktion über einen Tag betrachtet geglättet werden, wodurch eine möglichst konstante und damit planbare Funktionalität erreicht wird. Die Kenntnis des aktuellen und zukünftigen energetischen Zustands des Systems ermöglicht damit eine intelligente Steuerung von Funktion und Energie.

Der Vorteil dieses Vorgehens besteht darin, dass lediglich der aktuelle Tagesverlauf, die Modellparameter und je nach Umsetzung des Parameterupdates ein zeitlich begrenzter Verlauf der dafür notwendigen Werte im Speicher des Mikrocontrollers bereitgehalten werden müssen. Somit lässt sich der benötigte Speicherplatz minimieren und das Verfahren wird auch auf hardware- und speicherlimitierten, für drahtlose Sensorknoten besonders interessanten, Mikrocontrollern einsetzbar.

5.2 Herausforderungen der Modellierung für drahtlose Sensorsysteme

Durch die Besonderheiten von Mikrocontroller und low-power Umgebung ergeben sich spezielle Anforderungen an das Modell des Energieverlaufs der Solarzelle, die zum Teil streng limitierend sind. Das Energieverfügbarkeitsmodell soll folgende Aspekte erfüllen:

- Die kleinstmögliche Anzahl an Daten zur Zustandsbestimmung benötigen

Der in einem low-power System zur Verfügung stehende Speicher wird durch den verwendeten Mikrocontroller bestimmt. Typische Größenordnungen sind 2, 4, 8, ... kB. Dabei ist festzustellen, dass der Komplexitätsgrad des Controllers mit dem verfügbaren Speicher korreliert. Je umfangreicher die Ausstattung eines Mikrocontrollers ausfällt, desto mehr Programmcode wird benötigt. Komplexe Controller mit mehreren Kommunikationsports, Timern oder Analog-/Digitalwandlern sind jedoch für die meist geringen Umfänge der Anwendungen in drahtlosen Sensorsystemen überdimensioniert, würden zu viel Energie verbrauchen und sind allgemein teurer. Deshalb kommen in solchen Systemen in der Regel einfachere, für die Aufgabe gerade ausreichende, Mikrocontroller zum Einsatz, welche aus den oben genannten Gründen weniger Speicherplatz mit sich bringen. Da ein Teil dieses Speichers für den Programmcode reserviert ist, bleibt für einen Datenspeicher je nach Anwendung wenig Platz. Das Modell muss daher bereits mit einem möglichst geringen Datenumfang gültige Prognosen zulassen.

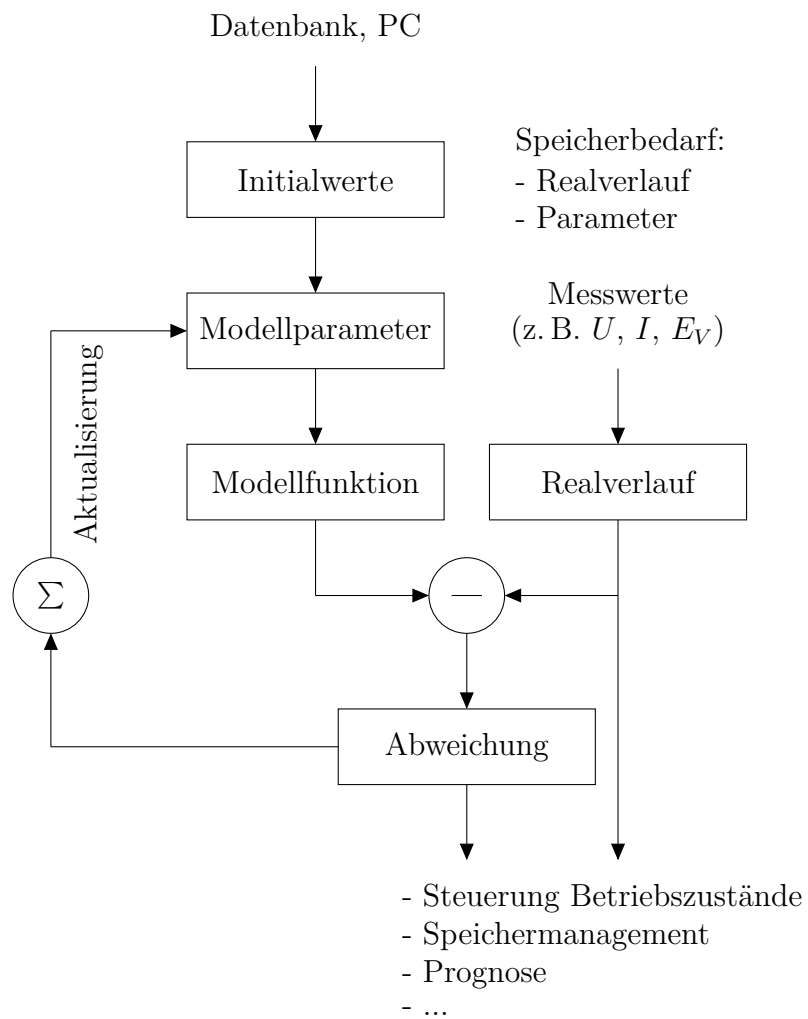


Abbildung 5.1: Übersicht zum Ablauf der Bestimmung des Energieertrags für einen solarbasierten drahtlosen Sensorknoten mit Verwendung eines abgewandelten Ertragsmodells.

- Einen geringen Rechenaufwand erfordern

Neben dem Datenaufkommen ist die notwendige Rechenleistung für ein Modell der zweitwichtigste Faktor. Die in Sensornetzen eingesetzten Mikrocontroller verfügen in der Regel über eine Stromsparfunktion, das heißt sie gehen in einen Ruhezustand über, in welchem sie weniger Energie verbrauchen. Gegenüber der Leistungsaufnahme im Normalbetrieb ist dieser Verbrauch vernachlässigbar. Je geringer der Rechenaufwand für das Modell ausfällt, desto schneller ist die Berechnung beendet und der Controller kann wieder in den Ruhezustand übergehen. Dies spart Energie und verbessert den Wirkungsgrad des Gesamtsystems.

- Die Funktions- und Energiebilanz nicht verschlechtern

Das Modell soll eine sicherere Funktion und eine verbesserte Planung der Betriebszustände ermöglichen. Wichtig dabei ist, dass durch die Zusatzfunktionalität ein Mehrwert für das System entsteht. Wird mit der Implementierung deutlich mehr Energie verbraucht als ohne oder steht der Zuwachs an Funktionalität in keinem Verhältnis zum Zusatzverbrauch, ist die Lösung als unbrauchbar anzusehen. Trotz des zusätzlichen Verbrauchs ist es auch möglich, dass dem System durch die Prognosefähigkeit mehr Energie zur Verfügung steht als ohne, wenn zum Beispiel rechtzeitig erkannt wird, wann ein Speicher 100 % Ladezustand erreicht und daraufhin die Zeit zwischen den Arbeitspunkten des Knotens verkürzt wird.

- Eine geringe Anzahl an Parametern aufweisen (Komplexität)

Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Rechenzeit und den Speicherbedarf für die Berechnung aus.

- Den Verlauf bestmöglich abbilden

Der Gesamtfehler zwischen realem Verlauf und Berechnung soll minimal werden. Rechen- und Datenaufwand haben jedoch Vorrang, denn sie sind streng limitiert.

- Dynamisch anpassbar sein

Die Saisonschwankungen bezüglich Breite und Höhe der Kennlinie müssen berücksichtigt werden. Aus diesem Grund müssen die Parameter, die für eine Abbildung dieses Verhaltens genutzt werden, dynamisch sein. Sie dürfen nicht als feste Werte

betrachtet werden, sondern müssen als Funktion realisiert werden. Diese Eigenschaft ist ebenfalls wichtig, um externe Störungen auszugleichen, beispielsweise eine regelmäßige Abschattung in einem bestimmaren Zeitbereich.

5.3 Eignung der Modelle für den Einsatz in drahtlosen Sensorsystemen

Für die grundsätzliche Umsetzbarkeit eines Modells auf einem drahtlosen Sensorsystem ist dessen Komplexität, Rechenaufwand und die Anzahl der benötigten Parameter von zentraler Bedeutung. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Anforderungen findet sich in Abschnitt 5.2.

Wie aus Abschnitt 4.6.2 hervorgeht, streuen die Abweichungen typischerweise im Bereich bis 20 %, bzw. liegen je nach Umgebungsbedingungen auch darüber. Da eine hohe Genauigkeit mit erheblichen Anforderungen an Hardware und Informationen verbunden ist, stellt diese nicht das wichtigste Zielkriterium dar. Vielmehr liegt das Hauptaugenmerk auf der Umsetzbarkeit und Handhabbarkeit. In der Regel erweisen sich weniger komplexe Modellansätze unter klaren Wetterbedingungen gegenüber komplizierteren hinsichtlich der Genauigkeit als vergleichbar [96].

Hinsichtlich dieser Aspekte als kritisch erweisen sich die Modelle MAC, Bird, Atwater, CPC2, METSTAT, REST2 und MRM5, da sie von der Verfügbarkeit der Transmissionskoeffizienten abhängig sind. Ähnlich verhält es sich mit dem ESRA Modell und dessen Verwendung der Trübungsfaktoren.

Die Modelle von Hottel und Ineichen beinhalten empirische Faktoren zur Solarstrahlungsbestimmung und sind daher nicht universell anwendbar. Der Ansatz von Fu & Rich ist hinsichtlich seiner Komplexität für Sensorsysteme geeignet, benötigt jedoch Informationen über die topographischen Bedingungen am Einsatzort und muss daher ebenfalls individuell angepasst werden. Das Modell von Hoyt stützt sich im Wesentlichen auf bekannte Reflexions- und Streuparameter, welche in der Regel nicht zur Verfügung stehen.

Als besonders geeignet ist der Ansatz von Kumar, das Simplified Solis und das ASHRAE Modell anzusehen. Erstere verwenden die optischen Dicken bzw. den Luftdruck, sind davon abgesehen in Bezug auf die Komplexität ähnlich. Das ASHRAE Modell verwendet lediglich drei Parameter zur Bestimmung des Leistungsverlaufs und ist weiterhin der im Vergleich beste Ansatz hinsichtlich Rechenleistung und Umsetzbarkeit.

	ASHRAE	Hottel	Hoyt	MAC	Bird	Atwater	CPCR2	Kumar	METSTAT	Fu & Rich	ESRA	Ineichen	Simplified Solis	REST2	MRM5
Parameteranzahl	+	+	o	-	-	-	-	+	-	o	o	+	+	-	o
Rechenaufwand	+	+	o	-	o	o	o	-	+	o	-	o	o	+	o
Komplexität	+	o	-	-	o	o	-	+	-	+	-	o	+	o	o
Parameterupdate	+	+	o	-	o	o	-	o	-	+	o	+	+	+	o

Tabelle 5.1: Vergleich der wichtigsten Eigenschaften der Modelle aus Abschnitt 4.6.1 in Bezug zu ihrer Einsatzfähigkeit in drahtlosen Sensorsystemen (+/-/o entsprechen positiv/negativ/neutral).

Einen qualitativen Vergleich der einzelnen Modelle findet sich in Tabelle 5.1. Hierbei werden die Eigenschaften 'Parameteranzahl', in welcher sich die Anzahl der erforderlichen Eingangsparameter ausdrückt, 'Rechenaufwand', welcher die Komplexität der mathematischen Funktionen im Hinblick auf eine Umsetzung in Mikrocontrollern sowie deren Rechenzeit bewertet, 'Komplexität', welche beinhaltet, inwiefern exakte Daten oder empirische Werte verwendet werden und Umweltbedingungen insgesamt abgedeckt sind sowie 'Parameterupdate' für die in Kapitel 4 behandelten Modelle verglichen. Der letzte Aspekt bezieht sich hierbei auf die Notwendigkeit, externe Parameter in quasi Echtzeit zu aktualisieren, sodass keine in einer Datenbank hinterlegten Werte verwendet werden können. Als besonders kritisch sind hierbei Rechenaufwand und Parameterupdate anzusehen, da eine Aufrüstung der Hardware für die Modellberechnung unerwünscht ist und die kontinuierliche Aktualisierung von Daten Dritter aus wirtschaftlicher Sicht nicht zweckmäßig ist.

In Bezug auf die Einsatzfähigkeit in drahtlosen Sensorsystemen fallen hauptsächlich die detailreichen, in der Regel genaueren Modellansätze negativ auf. Der Einbezug von mehr Umgebungsparametern verbessert die Qualität, erfordert jedoch wesentlich mehr Ressourcen. Weniger komplexe Verfahren wie ASHRAE, Simplified Solis oder Hottel lassen sich besser umsetzen, zeigen jedoch Abstriche bei der Genauigkeit. Im Sinne der Akzeptanz und im Hinblick auf eine realistische Umsetzung sind die Verfahren mit im Vergleich geringeren Anforderungen zu bevorzugen.

Aus dem Vergleich der Modelle geht der ASHRAE Ansatz in Bezug auf einen Einsatz in Sensorsystemen als bestgeeignet hervor, wenngleich er sich hinsichtlich Genauigkeit nicht als optimal erweist. Die Umsetzbarkeit mit lediglich drei Parametern ermöglicht

eine systeminterne online-Aktualisierung und damit eine automatische Anpassung des Sensorknotens an seine Umgebung. Die weiteren untersuchten Modelle stellen hinsichtlich ihrer jeweiligen Anforderungen an Messwerte und Rechenaufwand keine geeignete Alternative dar.

5.4 Datenbasis und Datenanalyse

Für die Untersuchungen stehen Zeitverläufe verschiedener Parameter aus Messungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Verfügung. Dies betrifft sowohl öffentlich verfügbare als auch höher aufgelöste kommerziell erwerbbare Daten. Als Messstation für die Untersuchung wurde Chemnitz ausgewählt (DWD-interne Bezeichnung: Station 853). Die Aufzeichnung der Daten erfolgte mit einem Pyranometer CM21 (Kipp&Zonen) nach ISO 9060 Klassifizierung „Secondary Standard“ (Hohe Qualität). Zur Verfügung stehen:

- Sonnenscheindauer pro Stunde in Minuten
- Durchschnittliche Globalstrahlung und Diffusstrahlung pro Stunde in $\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$
- Durchschnittliche Globalstrahlung und Diffusstrahlung pro Minute in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Global- und Diffusstrahlung in minütlicher Auflösung liegen für die Jahre 2012 - 2014 vor; die verwendeten Stundenwerte für den Zeitraum 05.08.1988 - 30.06.2015. Weitere Daten des Climate Data Centers (CDC) des DWD, wie beispielsweise Bedeckungsgrad oder Temperatur, fließen an geeigneter Stelle in die Betrachtung ein. Fehlerhafte Kennlinien, welche seitens des DWD auch als solche gekennzeichnet sind, wurden im Vorhinein aussortiert.

5.4.1 Vergleich der Kennlinien mit stündlicher Auflösung

Durch das CDC stehen 9.300 Global-, Diffusstrahlungs- und Sonnenscheindauerkennlinien aus den Jahren 1988 - 2015 mit stündlicher Auflösung zur Verfügung. In Abbildung 5.2 ist das Dichtespektrum der stündlichen Globalstrahlungskennlinien dargestellt. Wie zu erkennen ist, bewegt sich das tägliche Maximum der stündlichen Durchschnittswerte der eingehenden Leistung im Bereich bis 350 J/cm^2 (abhängig von der Jahreszeit). Zusätzlich ist ein klarer Dichte- bzw. Hüllverlauf erkennbar, welcher der Glockenkurvenform einer Normalverteilung ähnlich scheint.

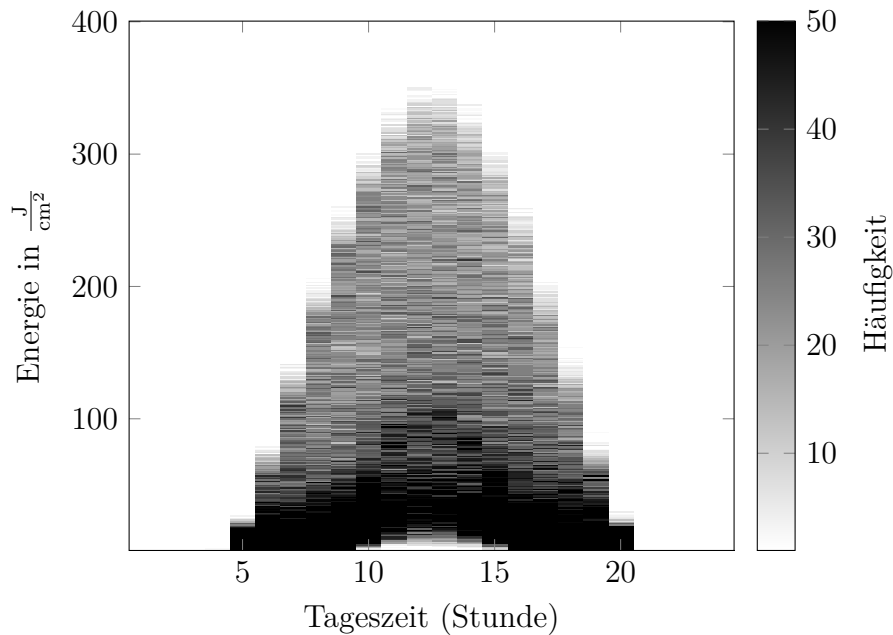


Abbildung 5.2: Dichtespektrum der Kennlinien der stündlichen Durchschnittswerte des Globalstrahlungsverlaufs in den Jahren 1988 bis 2014.

In Abbildung 5.3 ist der Verlauf der Sonnenscheindauer pro Stunde in Minuten zu sehen. Wie zu erwarten ist, liegt die Sonnenscheindauer im Durchschnitt in der Mittagszeit am höchsten, wobei jedoch der Anteil der Direktstrahlung bei weniger als der Hälfte liegt.

Das Dichtespektrum der Diffusstrahlung, vergleiche Abbildung 5.4, entspricht dieser Beobachtung. Vergleicht man die Abbildungen 5.2 und 5.4, wird ersichtlich, dass der Direktstrahlungsanteil im Durchschnitt etwa der Hälfte des Globalstrahlungsanteils entspricht. Gleichzeitig ist die Form des Verlaufs ähnlich.

Die Veränderung der durchschnittlichen Globalstrahlung ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Es wird ersichtlich, dass der gemittelte Jahresverlauf schwankt und keinem steigenden oder fallenden Trend folgt. Daher ist ein solcher für das Modell nicht zu berücksichtigen.

5.4.2 Analyse der Kennlinien mit minütlicher Auflösung

Zur Verfügung stehen jeweils 1.088 Kennlinien mit minütlicher Auflösung für die Global- und Diffusstrahlung aus den Jahren 2012 - 2014. Abbildung 5.6 zeigt den Zeitraum pro Tag, zu welchem Energie zur Verfügung steht. Darin lassen sich die Saisoneinflüsse durch Sommer und Winter erkennen. Prinzipiell ist die Dauer durch den solaren

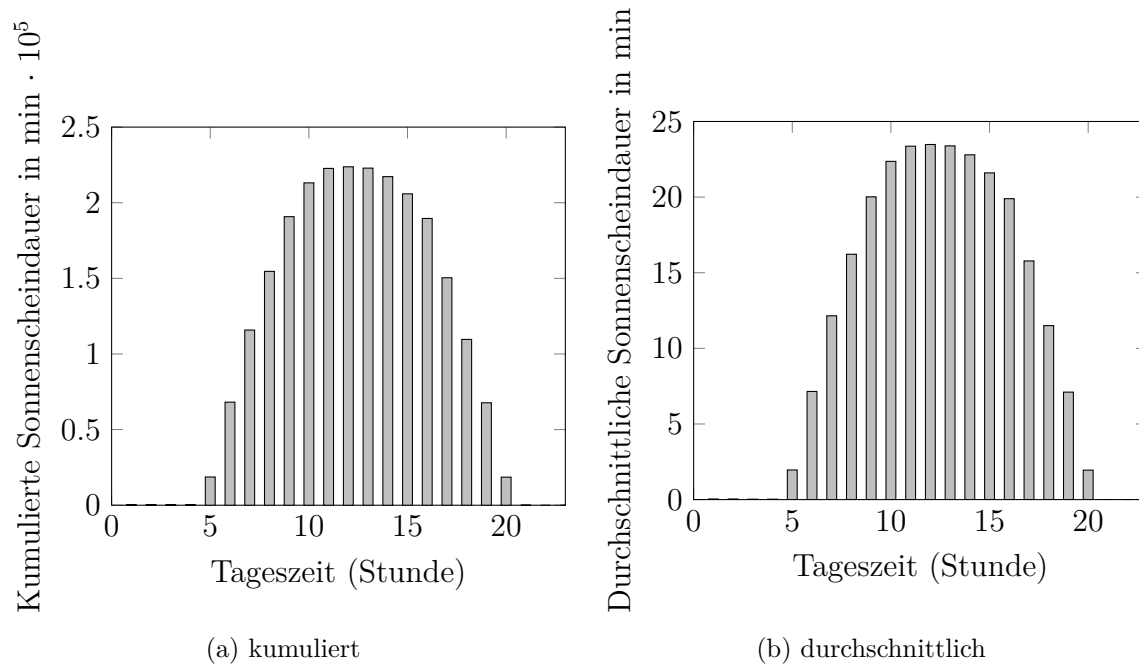


Abbildung 5.3: Kumulierte Sonnenscheindauer (a) bzw. durchschnittliche Sonnenscheindauer (b) pro Stunde in den Jahren 1988 bis 2014.

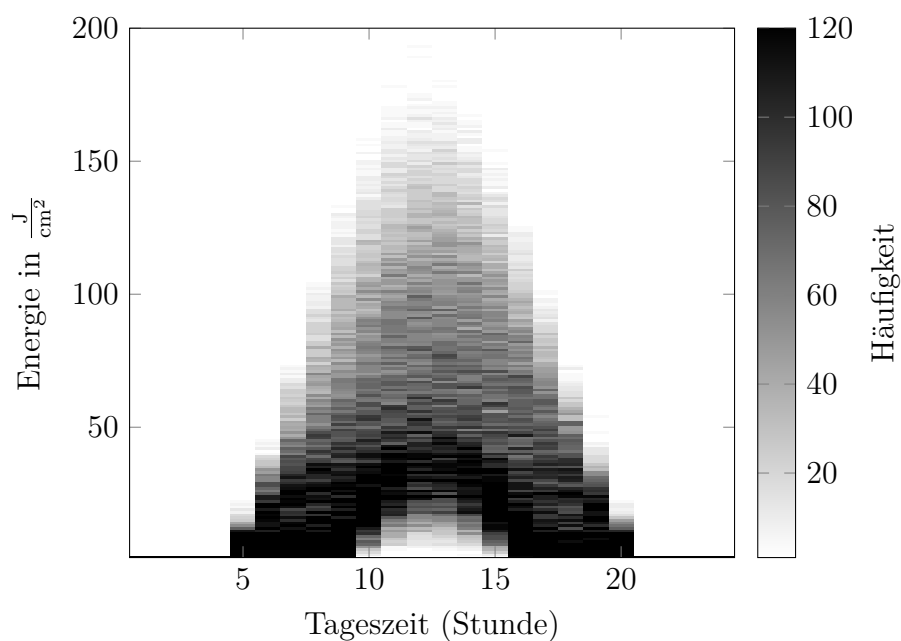


Abbildung 5.4: Dichtespektrum der Kennlinien der stündlichen Durchschnittswerte des Diffusstrahlungsverlaufs in den Jahren 1988 bis 2014.

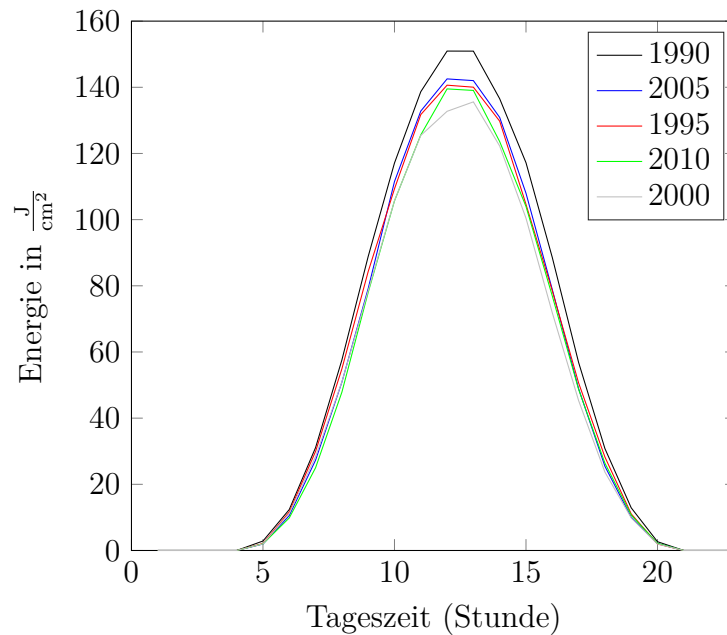


Abbildung 5.5: Jahresdurchschnitt der Globalstrahlung. Veränderung im Zeitraum 1990 - 2010.

Tagesgang sowie durch die Diffusstrahlung, welche jeweils vor und nach selbigem wirkt, begrenzt. Da die Zeitpunkte geometrisch vorbestimmt sind, zeigt die Kennlinie einen erwartungsgemäß glatten Verlauf. Kleinere Schwankungen treten jeweils wetterbedingt auf.

Aus den Maximalwerten für Diffus- und Globalstrahlung (vergleiche Abbildung 5.7) ergibt sich wiederholt, dass der Direktstrahlungsanteil bei etwa der Hälfte vom Gesamtwert liegt. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Saisonabhängigkeit mit einer hohen Energiedichte im Sommer und einer geringeren im Winter gegeben ist. Gleichzeitig zeigen sich in den Sommermonaten absolut betrachtet stärkere Schwankungen als im Winter. Zurückzuführen ist dies auf den Einfluss von Abschattungseffekten durch Wolken und Wetter, welche sich in den Absolutwerten der Maxima stärker auswirken. Besser sichtbar wird dieses Verhalten in der Darstellung der Korrelationen untereinander, vergleiche Abbildung 5.8. Sie zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den Einzelkennlinien der verschiedenen Tage im Zeitraum 2012 - 2014. Je heller der Bereich dargestellt ist, desto besser korrelieren die Kennlinien. Es wird ersichtlich, dass jeweils in den Wintermonaten eine deutlich bessere Übereinstimmung beobachtet werden kann als in den Sommerbereichen. Betrachtet man die detailliertere Darstellung der Einzeljahre im Anhang (Abbildungen A.2 - A.4), wird dieses Verhalten ebenfalls sichtbar.

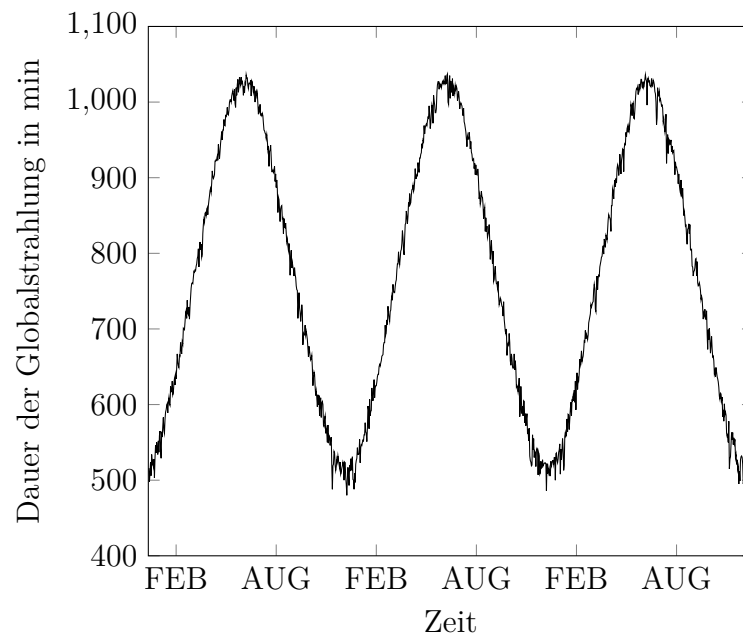


Abbildung 5.6: Dauer der Globalstrahlung pro Tag in Minuten. Jahre 2012 - 2014. Die Monatsangabe der Abszisse bezieht sich auf die Mitte des jeweiligen Monats.

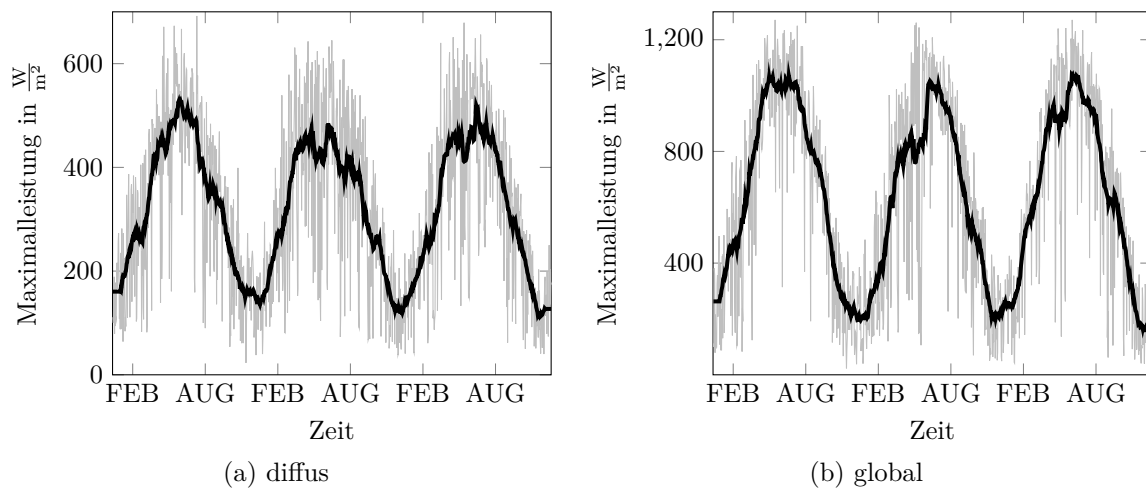


Abbildung 5.7: Verlauf der maximal eingehenden Energie: (a) Diffusstrahlung (b) Globalstrahlung. Jahre 2012 - 2014. Die Monatsangabe der Abszisse bezieht sich auf die Mitte des jeweiligen Monats. Eingezeichnet sind jeweils die Realwerte sowie der gleitende Durchschnitt aus 31 Werten.

Um die notwendige Auflösung für eine Modellierung der Kennlinien abzuschätzen, ist weiterhin die Betrachtung einzelner Monate notwendig, um zu erkennen, wie weit das Zeitfenster reicht, in dem die Kennlinien gut korrelieren. Abbildung 5.9 zeigt beispielhaft die Monate Februar, Juni, Juli und November aus verschiedenen Jahren. Bei einem direkten Zusammenhang benachbarter Tage, würde sich in der Matrix ein höherer Korrelationskoeffizient im Bereich der Hauptdiagonale zeigen. Da dies erkennbar nicht der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass für die Auflösung des Modells keine Ein-Tages-Schrittweite benötigt wird und daher mit monatlicher Auflösung gearbeitet werden kann.

Die Berechnung der angegebenen Korrelationswerte zwischen zwei Tageskennlinien $\mathbf{a}$ und $\mathbf{b}$ erfolgt über die Kovarianzen

$$c(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_i - \mu_a) (b_i - \mu_b) \quad (5.1)$$

beider Vektoren, welche in der Matrix

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c(\mathbf{a}, \mathbf{a}) & c(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \\ c(\mathbf{b}, \mathbf{a}) & c(\mathbf{b}, \mathbf{b}) \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

zusammengefasst werden. Die Matrix der Korrelationskoeffizienten $\mathbf{R}$, welche in den Abbildungen 5.8, 5.9 sowie A.2 - A.4 dargestellt ist, basiert auf der normalisierten Korrelationsmatrix:

$$\mathbf{R}(i, j) = \frac{\mathbf{C}(i, j)}{\sqrt{\mathbf{C}(i, i) \mathbf{C}(j, j)}}. \quad (5.3)$$

Die zahlenmäßigen Ergebnisse sind in Tabelle 5.2, mit den Korrelationskoeffizienten zwischen gleichen Monaten der Jahre 2012 - 2014 sowie innerhalb eines Monats eines Jahres (vergleiche zur Vollständigkeit dazu auch Tabelle B.2 im Anhang), dargestellt. Hierbei bestätigt sich weiterhin, dass die Kennlinien innerhalb eines Monats von Winter zu Sommer an Ähnlichkeit verlieren und breiter streuen. Dies wird durch den Medianwert bestärkt. Das Auftreten von Minima und Maxima dagegen erfolgt eher zufällig, wobei die Minimalwerte der Korrelationen insgesamt betrachtet im Winter eine Tendenz dazu aufweisen, höher zu liegen.

Für die Betrachtung der Regelmäßigkeit und damit der Gültigkeit einer Modellierung über mehrere Jahre sind in Abbildung 5.10 sowie weiterführend im Anhang in den Abbildungen A.5 und A.6 die Streudiagramme gezeigt, in welchen die Monatsdurchschnittswerte unterschiedlicher Jahre verglichen werden können. Hierbei wird

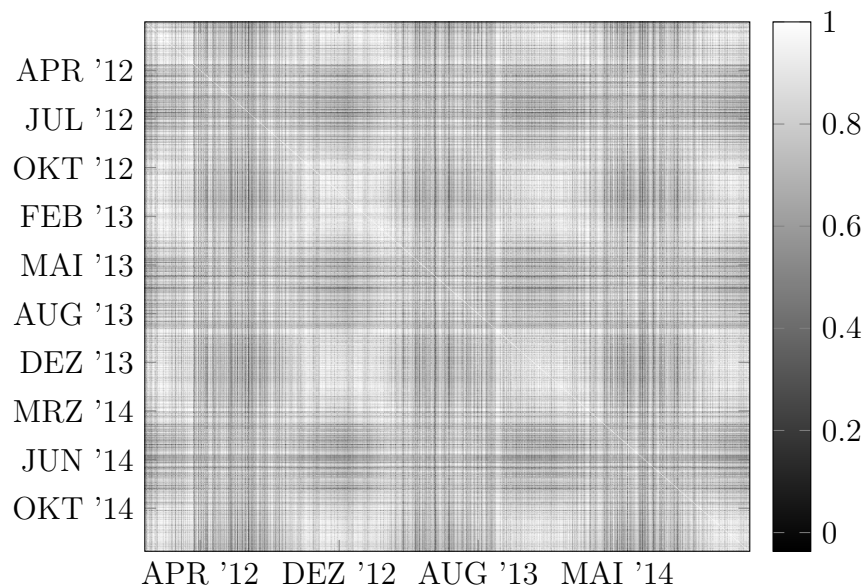


Abbildung 5.8: Korrelation der Globalstrahlungskennlinien aus 2012 - 2014.

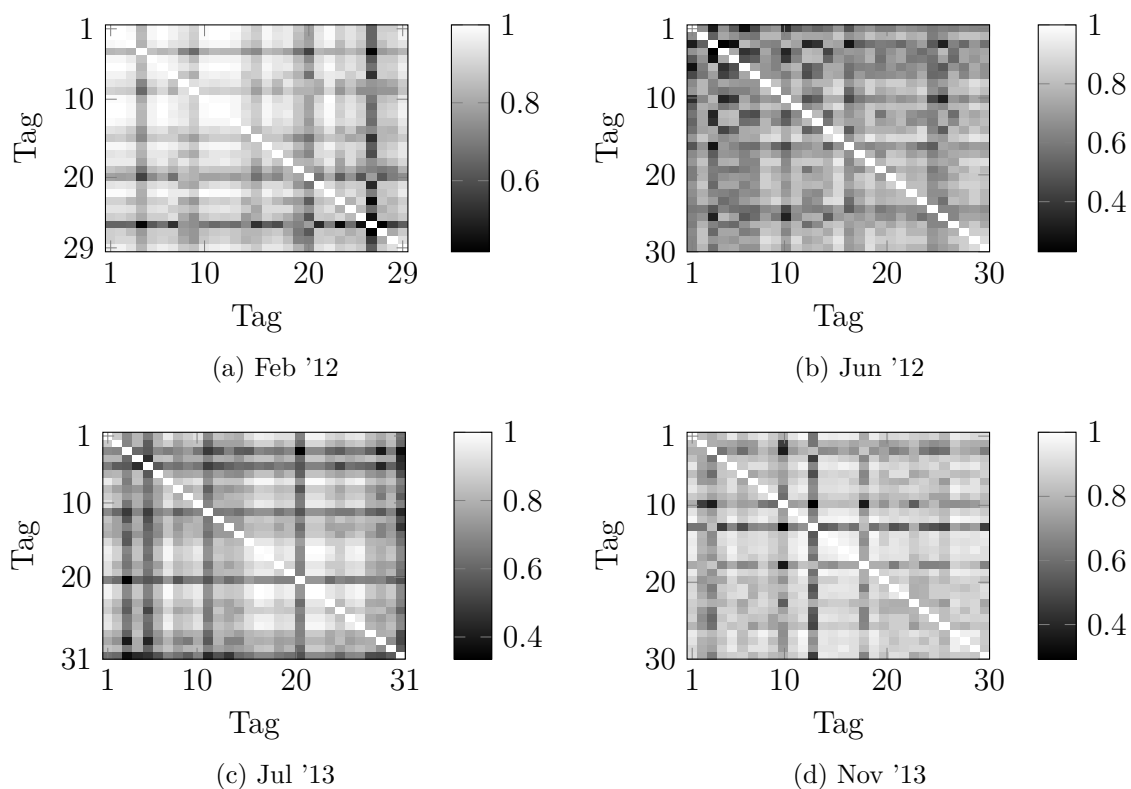


Abbildung 5.9: Detaillierte Korrelation der Einzelmonate (a) Februar 2012, (b) Juni 2012, (c) Juli 2013, (d) November 2013.

	$\varnothing$	σ	Median	Min	Max
Januar	0,848	0,095	0,864	0,354	0,998
Januar '14	0,866	0,091	0,886	0,425	0,993
Februar	0,856	0,087	0,874	0,384	0,999
Februar '14	0,827	0,088	0,841	0,478	0,999
März	0,847	0,119	0,879	0,262	1,000
März '14	0,819	0,134	0,832	0,262	1,000
April	0,759	0,115	0,769	0,238	0,991
April '14	0,748	0,106	0,753	0,427	0,965
Mai	0,731	0,120	0,741	0,178	0,996
Mai '14	0,722	0,112	0,732	0,365	0,980
Juni	0,714	0,125	0,729	0,127	0,999
Juni '14	0,716	0,116	0,719	0,349	0,999
Juli	0,727	0,137	0,746	0,037	1,000
Juli '14	0,728	0,140	0,749	0,146	0,987
August	0,758	0,107	0,764	0,268	0,999
August '14	0,727	0,097	0,738	0,402	0,924
September	0,780	0,118	0,791	0,214	0,791
September '14	0,789	0,105	0,798	0,416	0,988
Oktober	0,846	0,086	0,860	0,284	0,999
Oktober '14	0,849	0,084	0,865	0,502	0,993
November	0,852	0,097	0,870	0,292	1,000
November '14	0,884	0,078	0,904	0,510	0,994
Dezember	0,870	0,067	0,880	0,486	1,000
Dezember '14	0,862	0,067	0,874	0,590	0,977

Tabelle 5.2: Übersicht der Korrelationswerte der Jahre 2012 - 2014. Angegeben sind die Korrelationen zwischen den jeweiligen Monaten der drei Jahre sowie, für den Vergleich, innerhalb eines Monats eines Jahres.

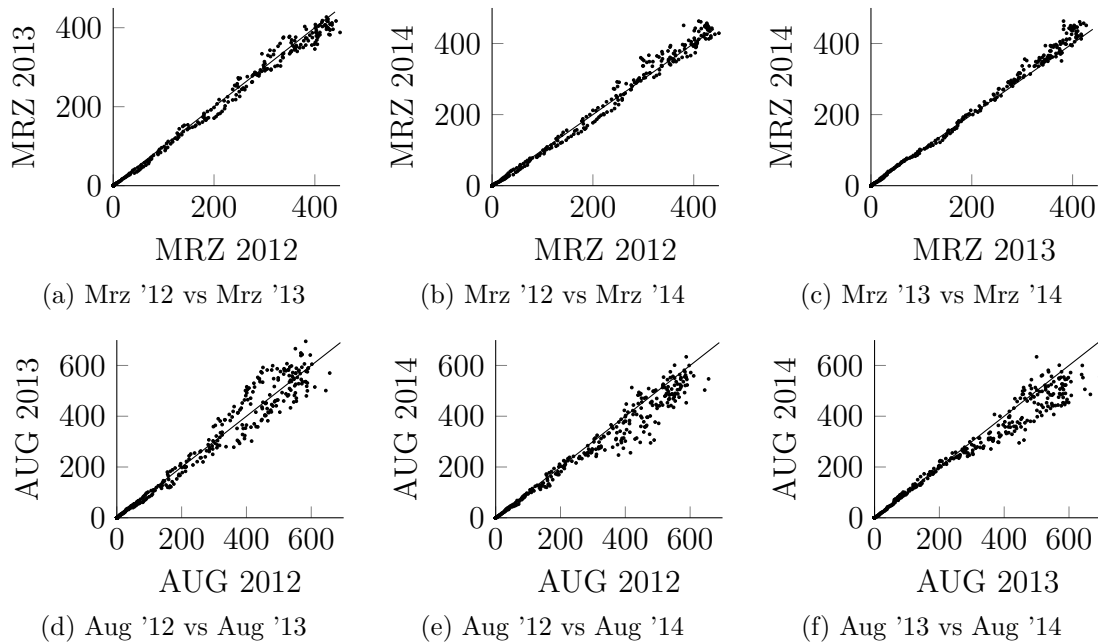


Abbildung 5.10: Streudiagramme der Globalstrahlungsdurchschnittswerte des jeweils selben Monats verschiedener Jahre im Vergleich. März und August aus den Jahren 2012 - 2014.

ersichtlich, dass insbesondere zur Tagesmitte größere Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren auftreten, sich die Kennlinien in den Bereichen Sonnenauf- und Sonnenuntergang jedoch gleichen. Dies ist damit zu erklären, dass sich insbesondere die Zeitpunkte Beginn und Ende der Direktstrahlung, bis auf eine geringe Abweichung (Schaltjahr, Schaltsekunde zur Korrektur der Universalzeit) unter Vernachlässigung potentieller Abschattungseffekte durch die Umgebung, gleichen und sich prozentuale wetterbedingte Abschattungseffekte auf die Absolutwerte der Globalstrahlung zur mittleren Tageszeit stärker auswirken. Die Schwankungen im oberen Wertebereich der Streudiagramme lassen sich, in Unkenntnis der Einflüsseffekte, als stochastische Abweichungen betrachten.

Die vorangehenden Erkenntnisse zeigen, dass für den Verlauf der Globalstrahlung eine deutlich erkennbare Grundfunktion in Form einer Glockenkurve vorliegt. Diese entspricht dem ASHRAE Modell. Eine modellbasierte Analyse und Vorhersage ist prinzipiell möglich. Durch Regelmäßigkeit der Kurven lassen sich die Modellparameter entweder in tabellarischer Form, beispielsweise mit einer Auflösung von zwölf Werten um einen Monatsdurchschnittswert zu erhalten, oder als Funktion darstellen und in ein Energiemanagement implementieren. Über das Modell kann damit der zu erwar-

tende Verlauf der Globalstrahlung für einen bestimmten Zeitpunkt errechnet werden. Das aus den Daten hervorgehende Rauschen kann, ohne Zusatzwissen über weitere Einflüsseffekte, als zufällig angesehen werden.

5.4.3 Vergleich zwischen stündlicher und minütlicher Auflösung

Für die Modellierung ist sowohl die Verwendung der stündlich aufgelösten Datensätze möglich als auch die Nutzung der minütlichen Werte. In Abbildung 5.11 ist beispielhaft ein Vergleich beider Datensätze für einen Tag dargestellt. Die Stundenwerte entsprechen dem Durchschnitt der jeweils in 60 Minuten auftretenden Leistung, die Minutenwerte zeigen den Durchschnitt aus 60 Sekunden. Wie zu erwarten ist, zeigt die Kennlinie der Minutenwerte deutlich mehr Fluktuationen und spiegelt somit den Gesamtverlauf detaillierter wider. Dies ist insbesondere für kritische Anwendungen wichtig, da die Eingangsleistung für ein System für eine bestimmte Zeit minimal werden kann und somit auf zuvor zwischengespeicherte Energie zur Versorgung zurückgegriffen werden muss.

Die Minutenwerte streuen durchschnittlich 48,9 % um den jeweilig zugehörigen Stundenwert, wobei sich die durchschnittliche Gesamtenergie aus beiden Kennlinien zu 99,9 % gleicht. Dies zeigt, dass zwischen beiden Kurven keine wesentlichen Messunterschiede vorliegen und prinzipiell beide Datensätze zur Modellierung geeignet sind. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, werden für die Modellierung die Minutenwerte betrachtet. Verwendet wurden die Messdaten aus dem Jahr 2014.

5.5 Einfluss des Bedeckungsgrads

Das ASHRAE Modell stellt einen Ansatz zur Modellierung der Globalstrahlungskennlinien dar, welcher keine Messparameter aus den Bereichen Luftzusammensetzung, Albedo oder Verschmutzungsgrad. Aus diesem Grund ist eine empirisch abgeleitete Verwendung möglich. Ohne Kenntnis konkreter Parameter stellen Abschattungseffekte durch Wolken den größten Einfluss auf die eingehende Leistung, speziell die Direktstrahlung, dar.

Der Deutsche Wetterdienst bietet dafür Informationen über den Bedeckungsgrad des Himmels an. Auf einer Skala von 0 bis 8, wobei 0 wolkenfrei bedeutet und 8 einen vollständig bedeckten Himmel darstellt, wird der Zustand im Halbraum um einen

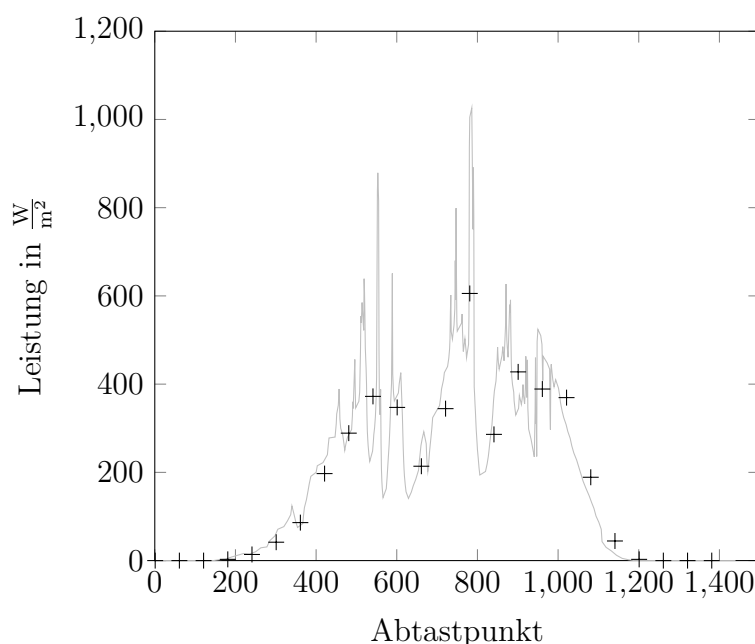


Abbildung 5.11: Vergleich zwischen stündlicher und minütlicher Abtastung der Sonnenleistung.

Beobachtungsposten beschrieben. Daraus wird ein stündlicher Mittelwert bestimmt. Der Durchschnittswert aus den Jahren 2012 bis 2014 liegt bei 6,2.

In Abbildung 5.12 ist der Zusammenhang zwischen Bedeckungsgrad und Leistungsverlauf beispielhaft für vier Tage angegeben. Wie zu erkennen ist, treten größere Leistungsschwankungen besonders bei mittlerer Bedeckung auf. Für niedrige Werte von 1 oder 2 verläuft die Leistung homogen, während mit zunehmender Bewölkung erwartungsgemäß ebenfalls die Schwankungen zunehmen.

Eine statistische Auswertung dazu ist in Tabelle 5.3 gegeben. In dieser wird jedem Wert des Bedeckungsgrads die prozentuale Schwankung der Leistungskennlinie zugeordnet, welche durch diesen hervorgerufen wird. Berechnet wird sie über die durchschnittliche Differenz aus Abtastpunkt und gleitendem Mittelwert des Verlaufs für eine Stunde. Hierbei zeigt sich ebenfalls, dass sowohl geringere Werte des Bedeckungsgrads geringere Schwankungen in der Kennlinie verursachen, als auch eine starke Bewölkung zu einem gleichmäßigeren Verlauf führt. Dies ist damit zu erklären, dass eine vollständige Bedeckung die Gesamtleistung gleichmäßig abschwächt, wohingegen bei teilweiser Bedeckung ein ständiger Wechsel zwischen Wolkenabschattung und freier Direktstrahlung auftritt. Die Berechnung der Werte erfolgte mit den Datensätzen aus dem Jahr 2012.

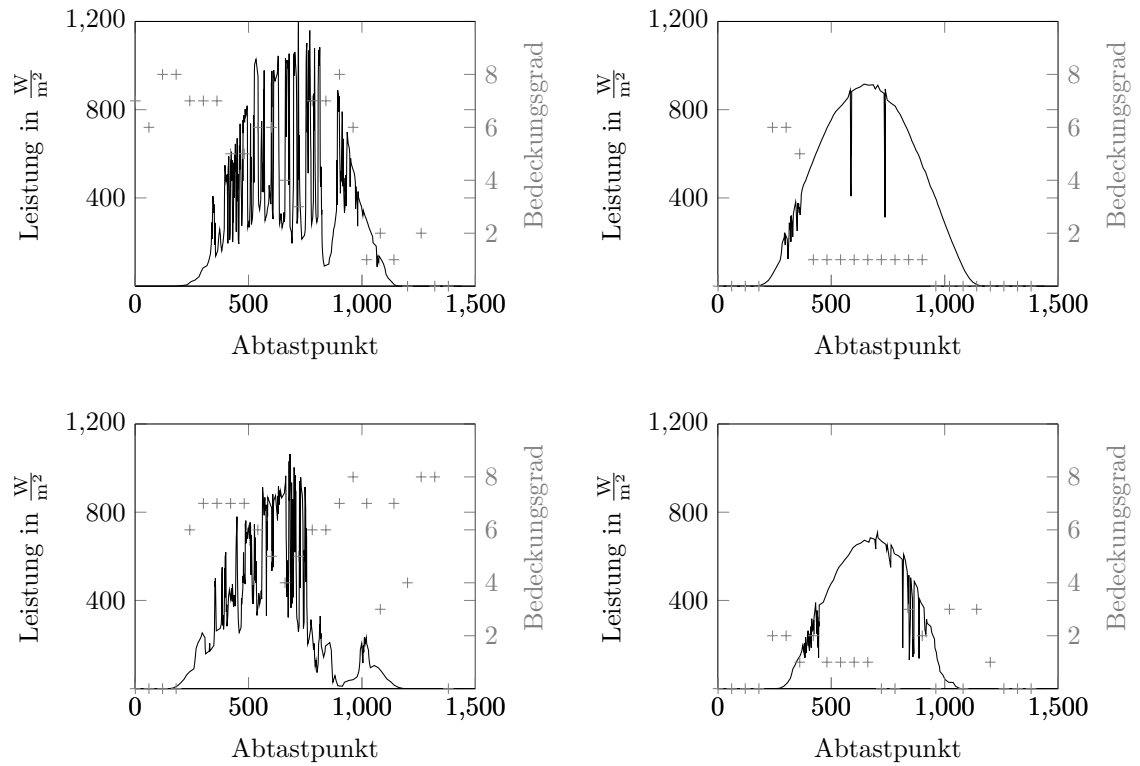


Abbildung 5.12: Vergleich zwischen Bedeckungsgrad und Leistungsverlauf ausgewählter Kennlinien.

Bedeckungsgrad	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Schwankung in %	4,3	7,3	10,1	11,2	10,6	12,8	11,8	9,4	7

Tabelle 5.3: Bedeckungsgrad im Vergleich zu prozentualen Schwankungen der Kennlinien.

5.6 Modellierung des Globalstrahlungsverlaufs

Wie aus Abschnitt 5.3 hervorgeht, stellt das ASHRAE-Modell den bestgeeignetsten Ansatz zur Modellierung des Solarstrahlungsverlaufs für drahtlose Sensorsysteme dar. Neben der Handhabbarkeit in der Anwendung und der Minimalzahl der benötigten Parameter sowie den damit verbundenen geringen Anforderungen an Ressourcen, bietet das Verfahren den Vorteil, dass es sich durch die mathematischen Methoden der Normalverteilung annähern lässt. Grundsätzlich gilt für das ASHRAE-Modell die Direktstrahlung

$$E_B = E_0 \cdot e^{\left(-\frac{\kappa}{\cos \theta}\right)} \quad (5.4)$$

mit der Einstrahlung E_0 , dem empirisch ermittelten Auslöschungsfaktor κ sowie dem Zenitwinkel θ . Da die Werte der Parameter nicht allgemein gültig sind, kann nicht auf Standardparameter zurückgegriffen werden. Das Modell muss an eine Datenbasis angeglichen werden. Durch Anpassung der Dichtefunktion der Normalverteilung

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5.5)$$

mit

$$f(x) = A e^{-\left(\frac{x-B}{C}\right)^2} \quad (5.6)$$

lässt sich die Gauß-Funktion an den Kurvenverlauf der Globalstrahlung des ASHRAE Modells über die Parameter A, B und C anpassen. Abbildung 5.13 zeigt die Auswirkung einer Änderung einzelner Werte. Mit A wird der Auslöschungsfaktor und damit das absolute Maximum der Kennlinie beschrieben, B bewirkt eine zeitliche Verschiebung und mittels des Parameters C werden die Anstiege der steigenden und fallenden Flanke angepasst. Somit lässt sich der Idealverlauf ohne den Einfluss von Störungseffekten beschreiben.

Optimierungskriterien für die Parameter A, B und C sind die Minimierung der mittleren quadratischen Abweichung

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (KL_i - M_i)^2}{n}} \mapsto \min, \quad (5.7)$$

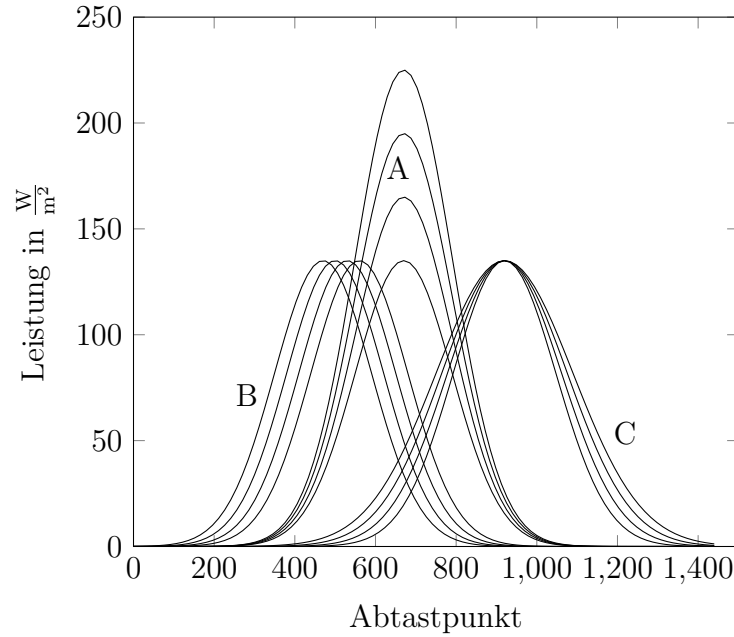


Abbildung 5.13: Einfluss der Modellparameter A, B und C.

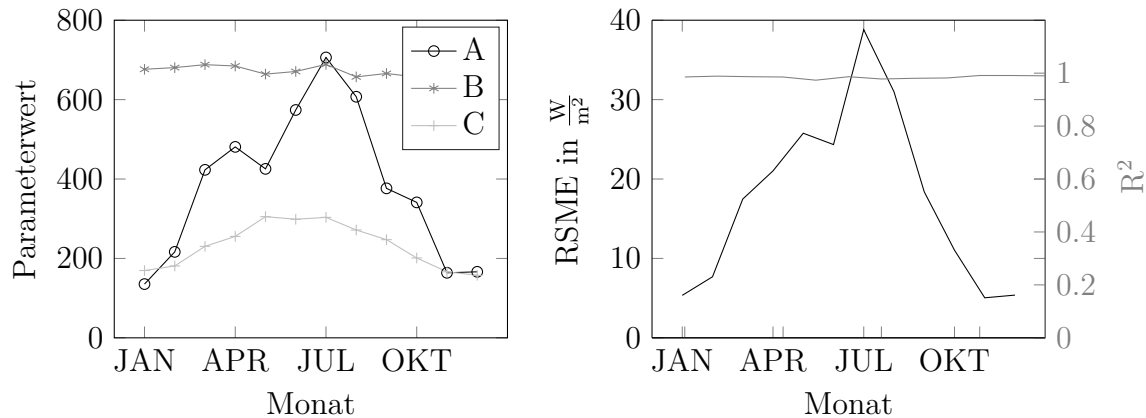
welche der Standardabweichung der Differenz zwischen Modell und Kennlinie entspricht, sowie die Maximierung des einheitslosen Bestimmtheitsmaßes

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (KL_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (KL_i - \overline{KL})^2} \rightarrow \max \quad (5.8)$$

zwischen Kennlinie KL und Modell M . Für die Modellanpassung im Folgenden, wird auf den Globalstrahlungsdatensatz des Jahres 2013 zurückgegriffen. Die Jahre 2012 und 2014 dienen im Anschluss der Validierung. Für die Berechnungen werden die monatlichen Durchschnittskennlinien verwendet, da sich in den Abschnitten 5.4.1 und 5.4.2 gezeigt hat, dass eine monatliche Auflösung für das Modell hinreichend ist und weiterhin angestrebt wird, das Modell bezüglich Ressourcenanforderungen minimal zu halten. Zwischenwerte lassen sich durch Interpolation bestimmen. Abbildung 5.14 (a) zeigt die Entwicklung der Modellparameter A, B und C für das Gesamtjahr 2013 nach Anpassung an die Monatsverläufe. A entspricht dabei dem Maximum des Kurvenverlaufs und zeigt erwartungsgemäß einen Anstieg zum Sommer hin bzw. einen Abfall hin zum Winter. Eine Glockenkurvenform ist erkennbar. Der Parameter B entspricht dem universellen Auslöschungsfaktor, welcher die Störeffekte und Trübungskoeffizienten wiedergibt. Unter der Annahme dass sich die Bedingungen am Messstandort nicht wesentlich ändern, ist hierfür ein konstanter Wert zu erwarten. Dies spiegelt sich auch im Kurvenverlauf mit

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
A	135	217	423	481	426	574	706	607	377	341	164	166
B	677	681	688	685	664	671	689	657	666	657	659	670
C	170	181	230	256	305	299	303	272	247	201	166	158

Tabelle 5.4: Ergebnisparameter der Modellanpassung für die jeweiligen Monate in 2013



(a) Entwicklung der Modellparameter über ein Jahr.

(b) Modellfehler und Bestimmtheitsmaß.

Abbildung 5.14: Anpassung des Modells an den Datensatz für das Jahr 2013.

nur geringen Schwankungen wieder. C entspricht im ASHRAE-Modell dem Zenitwinkel. Der Verlauf des Parameters lässt sich durch den Sonnenstand, welcher sich mit der Saison ändert und dessen Winkel daher zyklisch schwankt, erklären. Tabelle 5.4 listet die numerischen Werte der Parameter in Abhängigkeit des jeweiligen Monats auf.

In Abbildung 5.14 (b) sind der RSME Wert sowie das Bestimmtheitsmaß dargestellt. Letzteres weist einen Durchschnittswert von 0,985 bei einem Minimum von 0,973 auf. Die Streuung der Modellabweichung nimmt erwartungsgemäß im Sommer zu, da die Messwerte in diesem Bereich ebenfalls breiter streuen. Die dargestellte Abweichung liegt dabei jeweils im Bereich von 2,8 - 5,5 % vom Maximalwert des Monatsverlaufs.

Für eine weitere Verbesserung bzw. Minimierung des Fehlers kann die Ordnung des Modells erhöht werden:

$$f(x) = A_1 e^{\left(-\frac{x-B_1}{C_1}\right)^2} + A_2 e^{\left(-\frac{x-B_2}{C_2}\right)^2} + \dots + A_n e^{\left(-\frac{x-B_n}{C_n}\right)^2}. \quad (5.9)$$

Dies ermöglicht eine bessere Anpassung und die genauere Wiedergabe des Monatsdurchschnittsverlaufs. Abbildung 5.15 zeigt die sich durch verschiedene Ordnungszahlen

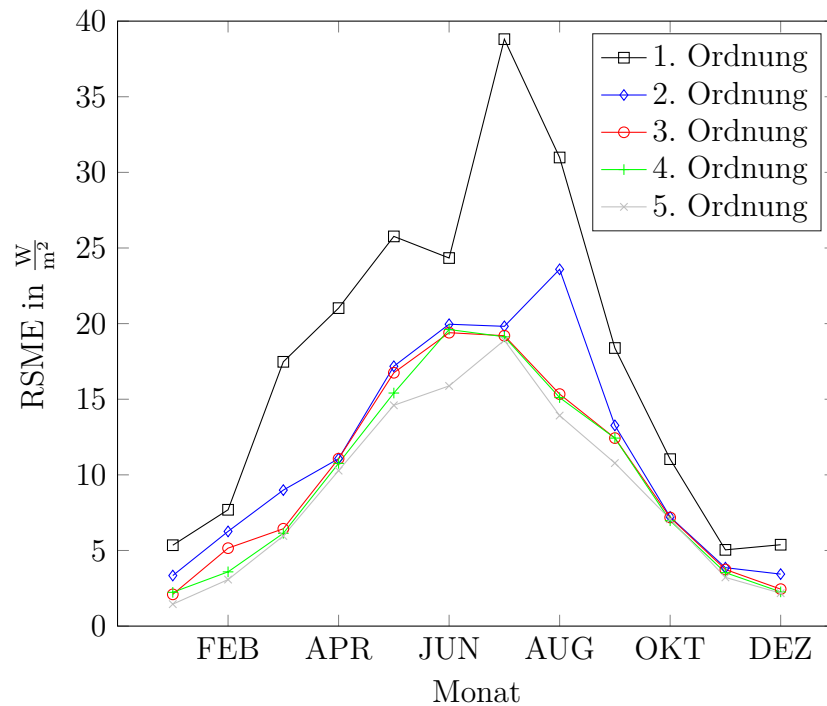


Abbildung 5.15: Übersicht der RSME-Werte über ein Jahr für verschiedene Ordnungen der Modellfunktion.

einstellende Verbesserung der Modellabweichung. Wie zu erkennen ist, verringert sich diese für einen zusätzlichen Gaußkoeffizienten deutlich, bei einer weiteren Erhöhung kommt es jedoch zu keiner signifikanten weiteren Verbesserung. Für eine Verdopplung der Ordnung liegt der RSME bei 2 - 3,7 %, bei fünf Kernfunktionen im Bereich 1 - 3,1 %. Das Bestimmtheitsmaß ändert sich in allen Fällen nur gering und liegt durchschnittlich bei 0,993/0,996 (2./5. Ordnung). Die Erhöhung der Ordnungszahl des Modells bewirkt neben der höheren Genauigkeit vor allem einen höheren Rechenaufwand sowie eine Abkehr des Funktionsverlaufs von der ursprünglichen Glockenkurvenform. Damit stellen höhere Ordnungen größere Anforderungen an Hardware und Rechenzeit (Energieverbrauch) und entfernen sich vom ursprünglichen ASHRAE-Modell, weil durch die zusätzlichen Parameter besonders Schwankungen im Strahlungsverlauf ausgeglichen werden. Dies bewirkt eine bessere Anpassung an eine vorgegebene Kennlinie, verringert aber die Eignung der resultierenden Funktion für weitere Kennlinien. Je mehr Parameter verwendet werden, desto spezifischer angepasst an einen bestimmten Kurvenverlauf ist das Modell in der Praxis. Da ein wesentliches Ziel bei der Suche nach einem geeigneten Modell darin besteht, einen möglichst universellen Ansatz zu finden, ist eine Erhöhung der Parameterzahl zur Erhöhung der Genauigkeit nicht ohne weiteres sinnvoll.

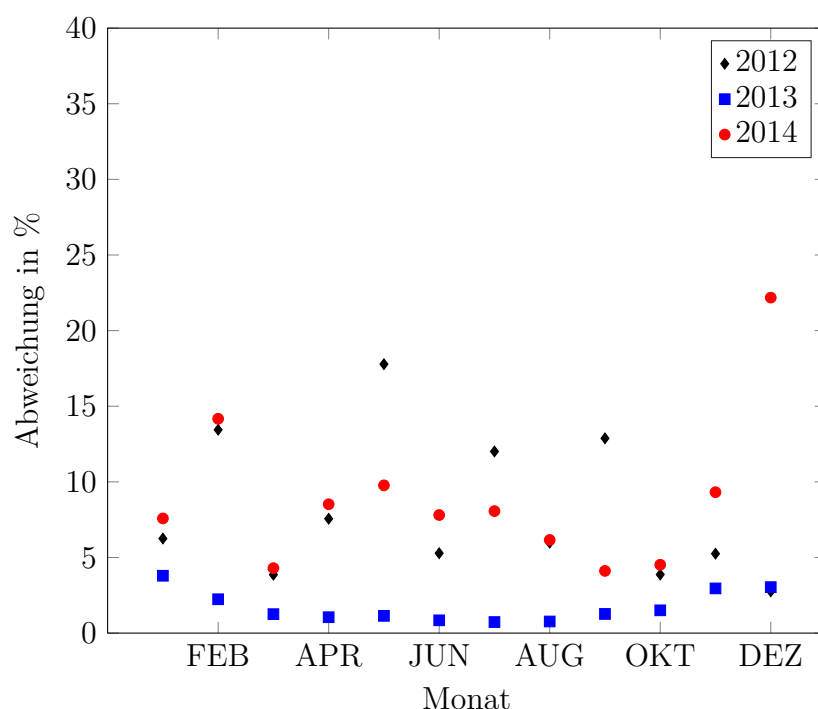


Abbildung 5.16: Übersicht der RSME-Werte für einzelne Monate der Jahre 2012 - 2014.

5.7 Auswertung der Modellabweichung

Um eine unabhängige Überprüfung der Eignung des Modells zu ermöglichen, werden im Folgenden die Datensätze der Jahre 2012 und 2014 zur Validierung für das Modell, welches an die Globalstrahlungsdaten des Jahres 2013 angepasst wurde, verwendet. Die Differenz zwischen dem, für die jeweiligen Monate, mit Gleichung 5.6 und den Parametern aus Tabelle 5.4 errechneten Modell sowie dem entsprechenden Betrachtungszeitpunkt ist in Abbildung 5.16 dargestellt. Sie zeigt den RSME-Wert zwischen Modell und Messdaten in Prozent.

Wie darin zu erkennen ist, liegen die Fehler für die vom Parameterfit unabhängigen Monate im Bereich von etwa 5 - 15 %, mit zwei Ausreißern für Mai 2012 und Dezember 2014. Für das Jahr 2013, welches zur Parameterberechnung herangezogen wurde, liegen die Fehler erwartungsgemäß niedriger im Bereich von 1 - 3 %. Die Modellabweichung für monatliche Durchschnittswerte liegt damit im Bereich der aus der Literatur bekannten Werte (vergleiche Abschnitt 4.6.2 bzw. Abbildung 4.8), d. h. die Berechnung eines erwarteten täglichen Energieeintrags kann über den hier gezeigten Modellansatz mit einer im Vergleich zur Literatur akzeptablen Genauigkeit erfolgen. Eine detaillierte Übersicht

Jahr \ Monat	Monat											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2012 in %	6,3	13,4	3,9	7,56	17,8	5,3	12	6	12,9	3,9	5,3	2,8
2013 in %	3,8	2,2	1,3	1,1	1,1	0,9	0,7	0,8	1,3	1,5	3	3
2014 in %	7,6	14,2	4,3	8,5	9,8	7,8	8,1	6,2	4,1	4,5	9,3	22,2

Tabelle 5.5: Errechnete durchschnittliche RSME-Werte für die einzelnen Monate der Jahre 2012 - 2014.

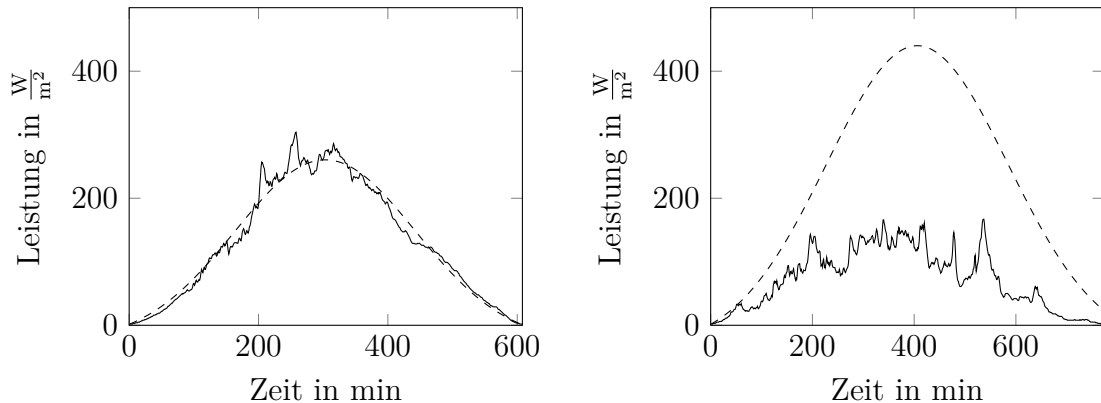


Abbildung 5.17: Realverlauf und Modellprognose bei hoher (links) und niedriger (rechts) Anpassungsgenauigkeit.

zu den berechneten prozentualen Abweichungen zwischen Modell und monatlichem Durchschnitt für die Jahre 2012 bis 2014 gibt Tabelle 5.5.

Die Anpassung zwischen Modell und Realverlauf ist in Abbildung 5.17 anhand von zwei Beispielen dargestellt. Für Tage mit hoher Modellgenauigkeit gleichen sich beide Kurven an, im Detail betrachtet bestehen lediglich kleinere Unterschiede durch den Wettereinfluss. Für Tage mit niedriger Anpassung kann eine große Abweichung infolge der aktuellen Bedingungen auftreten. Dies kann sich für einen oder auch mehrere Tage in Folge zeigen. Durch die Wetterumstände kann dabei im Vergleich zu günstigen Bedingungen eine Abweichung zwischen Realverlauf und Modell auftreten, welche eine Vorhersage des Leistungsverlaufs nicht mehr ermöglicht. Diese Sonderfälle können durch Vergleich zwischen Modell- und Realverlauf erkannt werden und es kann eine Rückfalllösung eingeleitet werden.

Für die Umsetzung von wesentlicher Bedeutung ist der Vergleich zwischen Modell und realem Tagesverlauf. Da der erwartete Verlauf für einen Tag aus dem Monatsdurchschnitt ermittelt wurde und dem Idealverlauf entspricht, nicht jedoch versucht die Tageskennlinie exakt zu beschreiben, sind hierbei größere Abweichungen zu erwarten

als für den Vergleich der monatlichen Durchschnittswerte. In Abbildung 5.18 sind in aufsteigender Reihenfolge sortiert die relativen Standardabweichungen zwischen einzelner Tageskennlinie in minütlicher Auflösung und dem zum jeweiligen Monat gehörenden Erwartungsverlauf für die Jahre 2012 - 2014 dargestellt. Die Verläufe sind dabei nach prozentualer Abweichung geordnet, d. h. benachbarte Werte haben nicht zwingend eine zeitliche Verbindung. In der Darstellung ist zu erkennen, dass durch das Modell jahresunabhängig etwa 75 % aller Tage mit annähernd identischer Genauigkeit repräsentiert werden können. Gleichzeitig zeigt die Hälfte aller Kennlinien einen Modellfehler von unter 16 %, das 75 %-Quantil weist einen Fehler von etwa 21 % auf. Der deutliche Anstieg im hinteren Bereich ist damit zu erklären, dass je nach Umwelt- und Umgebungsbedingungen Globalstrahlungsverläufe auftreten, welche sich in der Form ihres Verlaufs grundsätzlich vom verwendeten Modell unterscheiden und daher mit diesem nicht zu vereinbaren sind. Statistisch gesehen betrifft dies etwa 15 - 20 Tage pro Jahr. Das Auftreten solcher Bedingungen kann von einem Energiemanagement erkannt werden, wodurch Sicherheitsmaßnahmen einleitbar sind. Das System würde in einem entsprechenden Fall die Funktionalität reduzieren, um einen Ausfall zu vermeiden.

Die chronologische Verteilung von Tagen mit hoher Abweichung ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Wie darin zu erkennen ist, liegen die Tage mit hohem Fehler verteilt über das jeweilige Jahr, es gibt zu keiner Saison besondere Häufungen von Tagen mit hohem Fehler. In der Abbildung zeigt sich lediglich eine schwache Tendenz zu höherer Streuung in den Randbereichen (Winter), was durch die wechselhaften Wetterbedingungen in den entsprechenden Monaten zu erklären ist.

5.8 Einfluss von Zwischenwerten auf die Modellabweichung

Das in Abschnitt 5.6 beschriebene Modell bezieht sich auf monatliche Durchschnittswerte für die Berechnung des Idealverlaufs. Mit der Einführung von Zwischenwerten wird es möglich, den Parameterverlauf genauer zu beschreiben und das Leistungsmodell auf einzelne Tage anzupassen. Ziel ist die Verfeinerung der Modellauflösung zur Fehleroptimierung. Entsprechend des Verlaufs der Parameter aus Abbildung 5.14 ist dafür ein gleichmäßiger Übergang der Werte sinnvoll, d. h. eine Überblendung zwischen den einzelnen Monaten.

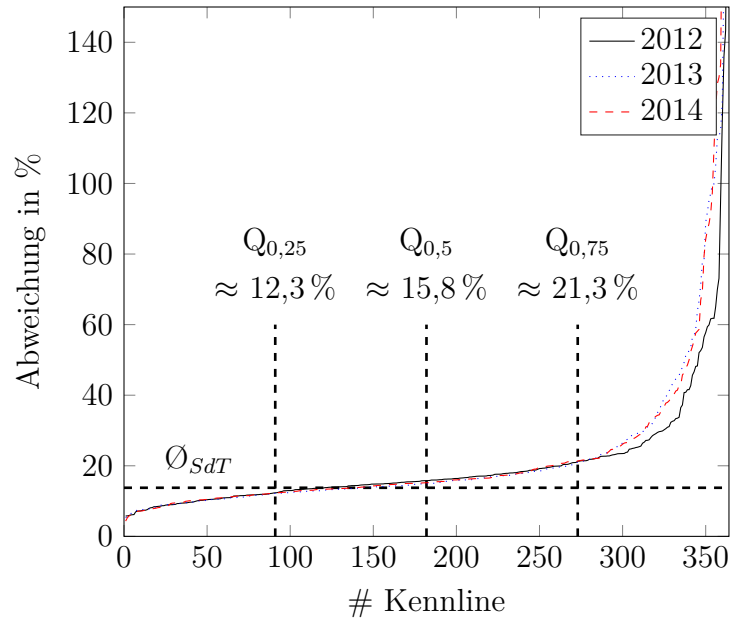


Abbildung 5.18: Prozentuale Abweichung zwischen Tagesverlauf und dazugehörigem (monatlichen) Modell der Jahre 2012 - 2014. Zur besseren Übersicht wurden die Werte verbunden gezeichnet. $\bar{\sigma}_{SdT}$ gibt den Durchschnittswert aus dem Stand der Technik an (vergleiche Abschnitt 4.6.2).

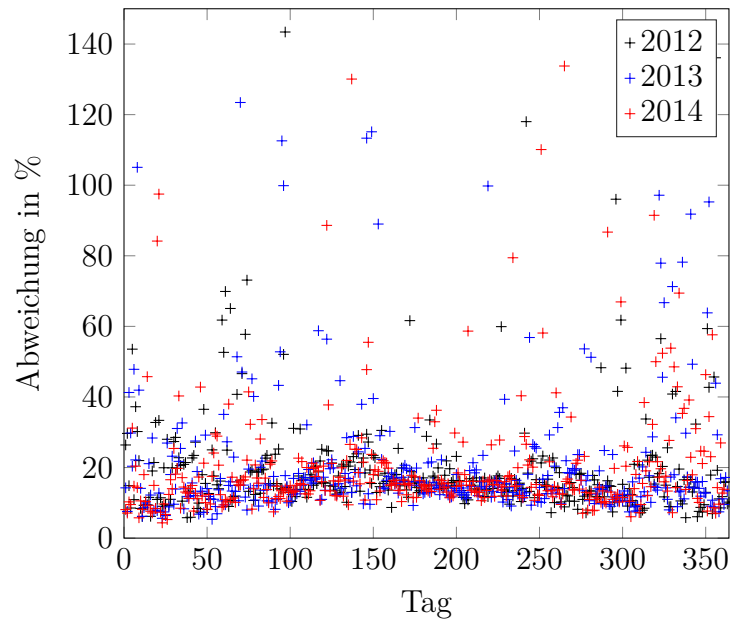


Abbildung 5.19: Prozentuale Abweichung zwischen Tagesverlauf und dazugehörigem (monatlichen) Modell der Jahre 2012 - 2014. Chronologische Reihenfolge zur Verdeutlichung der Fehlerverteilung über das jeweilige Jahr.

Betrachtet man den Durchschnittswert eines Parameters x_m als gesetzt für die Mitte eines Monats, ergeben sich die Zwischenwerte linear interpoliert über

$$x = x_{m-1} \cdot a(t) + x_m \cdot b(t) \quad (5.10)$$

für das Ausblenden des vorhergehenden Monats bzw. das Einblenden des aktuellen Monats sowie

$$x = x_m \cdot a(t) + x_{m+1} \cdot b(t) \quad (5.11)$$

für die Verknüpfung des aktuellen mit dem folgenden Monat. $a(t)$ und $b(t)$ repräsentieren hierbei Wichtungsfaktoren und beziehen sich auf die Anzahl der Tage zwischen zwei festen monatlichen Durchschnittswerten.

Als Ergebnis der Untersuchung zeigt sich, dass durch die höhere Auflösung der jeweiligen Parameter keine signifikante Verbesserung des Modellfehlers festgestellt werden kann. Der durchschnittliche Fehler verbessert sich maximal um 1 %. Der damit verbundene höhere Rechenaufwand rechtfertigt somit keine weitere Interpolation der Modellwerte. Eine Gegenüberstellung der Modellabweichung mit und ohne interpolierten Werten ist in Abbildung 5.20 dargestellt. Wie darin zu erkennen ist, stellt sich für beide Kurven ein sehr ähnlicher Verlauf ein, d. h. dass sowohl Tage, welche durch das Modell gut wiedergegeben werden können als auch Tage, die aufgrund ihres Verlauf nicht durch ein Clear Sky Modell repräsentiert werden können, keine deutliche Verbesserung der Modellanpassung aufweisen.

Ursächlich hierfür sind die stark schwankenden Umwelteinflüsse, welche sich bereits negativ auf die Korrelation der Werte innerhalb eines Monats auswirken (vergleiche Abschnitt 5.4.2). Die für sich betrachtet wechselhaften Verläufe werden bei monatlicher Berechnung geglättet und schwankende Umwelteinflüsse auf diese Weise herausgefiltert. Daraus ergibt sich eine bessere Anpassung zwischen Modell und geglättetem Verlauf, welche durch eine tagesgenaue Modellberechnung aufgrund des größeren Schwankungsbereichs nicht signifikant weiter optimiert werden kann.

In Anbetracht des Schwankungsbereichs der Kennlinien und der berechneten Fehler stellt die Verfeinerung der Parameterauflösung keine sinnvolle Modelloptimierung dar. Bezieht man Rechen- und Speicheranforderungen für eine Umsetzung auf drahtlosen Sensorknoten in die Betrachtung ein, rechtfertigt die Verbesserung den Aufwand nicht. In Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen kann sich eine Detaillierung der Parameter dennoch als sinnvoll erweisen, zum Beispiel im Falle des Auftretens von Abschattungseffekten durch Gebäude, welche sich infolge des datumsabhängigen Sonnenhöhenwinkels

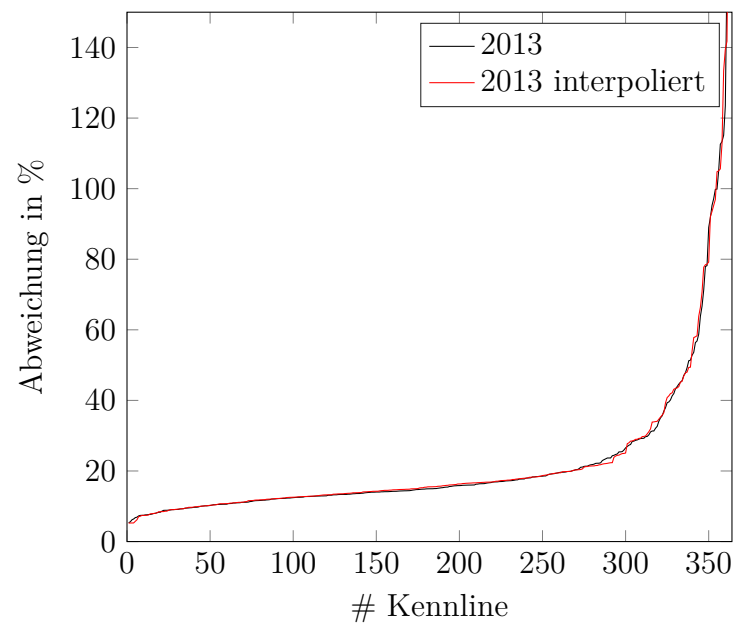


Abbildung 5.20: Vergleich zwischen den durchschnittlichen Abweichungen zwischen Modell und Kennlinie für einzelne Tage des Jahres 2013 mit monatlichem Parameterupdate und interpolierten Zwischenwerten für einzelne Tage. Zur besseren Übersicht wurden die Werte verbunden dargestellt.

ergeben können. Die hierbei auftretenden Sprünge im Leistungsverlauf würden sich durch eine höhere Modellauflösung besser wiedergeben lassen.

6 Integration der modellgestützten Diagnose in drahtlose Sensorknoten

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie sich das modellgestützte Energiemanagement in einem Sensorknoten umsetzen lässt und wie es sich auf das Gesamtsystem auswirkt.

Dazu werden zunächst Betriebszustände definiert, in welchem ein drahtloses Sensorsystem, abhängig von der zur Verfügung stehenden Energie, arbeiten kann. Das Spektrum verläuft hierbei von 'abgeschaltet' bis 'Dauerbetrieb'. Im Anschluss wird ein Beispielszenario beschrieben, welches als Grundlage für die weitere Anwendung dient. Hierzu wird aus verschiedenen kommerziell verfügbaren Sensorknoten der Energieverbrauch bestimmt, welcher dazu genutzt wird, unterschiedliche Energiemanagementstrategien miteinander zu vergleichen.

Abschnitt 6.3 beschreibt die Integration des modellbasierten Energiemanagements in Hardware und zeigt dessen Verbrauch sowie die Dauer für einen vollständigen Modellierungsvorgang auf dem Mikrocontroller. Dieses System wird anschließend mit dem Modell aus Kapitel 5 programmiert und mit den Leistungsdaten aus Abschnitt 5.4 gespeist. Die Systemfunktion wird aufgezeichnet und ausgewertet.

Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse des Vergleichs zwischen modellbasiertem Energiemanagement und herkömmlichen Regelstrategien präsentiert und diskutiert und die Vorteile des Modellverfahrens aufgezeigt.

6.1 Definition von Betriebszuständen

Mit steigender Intelligenz des Systems wird die Einführung von Betriebszuständen notwendig, zwischen denen die Regelung wechseln und somit eine optimale Funktion über einen langen Zeitraum ermöglichen kann. In autarken low-power Systemen besteht weniger der Bedarf die Energieversorgung zu regeln als vielmehr den Verbrauch. Der Energieeintrag von der Quelle kann im Normalfall nicht beeinflusst werden. Das

Energiemanagement muss also mit der ihm zur Verfügung stehenden Leistung zurecht kommen. Als Grundsatz hierfür kann die in [24] beschriebene Energieneutralität dienen, wobei der Zeitraum, für den diese gilt, unbestimmt und system- bzw. funktionsabhängig ist. Für die Steuerung ist die wichtige Stellgröße der Energieverbrauch V . Im Normalfall sollte der Verbrauch $V = V_n$, also dem Nennverbrauch entsprechen. Sinkt die zur Verfügung stehende Energie ab, muss der Verbrauch reduziert werden und entspricht damit $V_{min} < V < V_n$, wobei er im Ausnahmefall bis auf V_{min} , also dem minimalen Verbrauch, bei welchem gerade noch eine Systemfunktion gewährleistet ist, gesenkt werden kann. Genügt diese Absenkung nicht, ist ein letzter Schritt mit einer Absenkung auf $V = V_0$ möglich, wobei V_0 dem Grundverbrauch, d. h. der Lebenserhaltung entspricht. Eine weitere Absenkung auf $V = 0$ bedeutet das Abschalten des Systems. Im Umkehrfall kann, falls mehr Energie zur Verfügung steht, als für V_n notwendig ist, die Funktionalität und damit der Verbrauch auf $V_n < V < V_{max}$ erhöht werden. V_{max} , bei dem das System gerade noch innerhalb der Spezifikationen arbeitet, stellt den zweithöchsten Verbrauchswert dar. Es ist ein weiterer Zustand möglich, als $V = P_Q$ bezeichnet, bei dem der Verbrauch der gesamten von der Quelle zur Verfügung stehenden Leistung entspricht. Dieser Zustand ist eher theoretisch und würde bei einem Funksystem beispielsweise einem dauerhaften Sendevorgang entsprechen, welcher unter Umständen so nicht vorgesehen ist und damit vom Empfänger ignoriert wird. Dieser Zustand ist erforderlich, um die restliche Schaltung zu schützen, falls die Quelle mehr Energie liefert als vorgesehen.

Erweitert man diese Betrachtung durch den Einbezug eines Zwischenspeichers, lassen sich die Betriebszustände allgemeiner ausdrücken. Es setze sich die Energie im Speicher

$$E_K = E_{K_0} + (P_Q - V) \cdot t \quad (6.1)$$

zusammen aus dem Grundzustand sowie der Differenz zwischen Verbrauch und Quelle. Führt man eine Zeitabhängigkeit ein und betrachtet einzelne Zeitschritte, lässt sich das Verhältnis angeben als

$$E_K(t_{i+1}) = E_K(t_{i-1}) + (P_Q(t_i) - V(t_i)) \cdot \Delta t = E_K(t_{i-1}) + x. \quad (6.2)$$

Somit lässt sich für jeden zukünftigen Zeitschritt t_{i+1} der Ausgangszustand des Speichers berechnen. Dies kann einem Energiemanagement als Information dienen, welcher Betriebszustand im Folgeschritt einzustellen ist. Zieht man in Betracht dass der Speicher nicht unbegrenzt gefüllt werden kann, sondern ein maximales Energielevel besitzt, erhält

man für diesen Ausdruck

$$E_K(t_{i+1}) = \begin{cases} E_{K_{max}} & | E_K(t_{i-1}) + x \geq E_{K_{max}} \\ E_K(t_{i-1}) + x & | E_K(t_{i-1}) + x < E_{K_{max}} \end{cases} \quad (6.3)$$

Um den Ladezustand mit dem Energieverbrauch in Verbindung zu bringen, wird außerdem eine Regelgröße notwendig, bezeichnet als Tastverhältnis d . Da sich aus Gleichung 6.3 die zur Verfügung stehende Energie bestimmen lässt, kann der Verbrauch über

$$V(t_{i+1}) = d \cdot \left(\frac{E_K(t_{i+1})}{\Delta t} \right) \quad (6.4)$$

angepasst werden. Das jeweilige Tastverhältnis erhält man demnach durch die Kombination mit den verschiedenen Verbrauchszuständen. Im Normalbetrieb wird es vom Energiemanagement auf $d_{n_{t_{i+1}}}$ festgesetzt. Steigt oder sinkt die verfügbare Energie bis hin zum maximalen oder minimalen Grenzwert, ist das allgemein Tastverhältnis auf $d_{t_{i+1}} = f(E_K(t_{i+1}))$ einzustellen. Der Fall Dauerbetrieb oder Lebenserhaltung entspricht einem Verhältnis von $d_{t_{i+1}} = 1$ bzw. $d_{t_{i+1}} = 0$, d. h. das System sammelt nur Energie für sich selbst, verbraucht aber keine. Im abgeschalteten Zustand ist das Tastverhältnis nicht von Belang. Eine schematische Übersicht über diese Zustände ist in Abbildung 6.1 zu sehen.

6.2 Anwendungsszenario

Zur Verdeutlichung der Wirkungsweise soll ein Beispielsystem betrachtet werden. Als Anwendungsszenario dient die Hochwasserüberwachung. Hierbei soll ein zyklischer Betrieb realisiert werden, welcher eine gleichmäßige Verteilung der Mess-/Sendevorgänge ermöglicht. Weil im Vorhinein nicht bekannt ist, zu welchen Zeiten Problemfälle auftreten können, erbringt eine gleichmäßige Verteilung der Vorgänge ein kontinuierliches Überwachungsintervall zu allen Zeitpunkten, sodass zu allen Zeiten eine gleichmäßig geringstmögliche Reaktionszeit gegeben ist.

Zur Festlegung des dafür notwendigen Energieverbrauchs dienen kommerziell erhältliche Sensorknoten, gezeigt in Tabelle 6.1. Diese Systeme stellen Plattformen aus Mikrocontroller und Funksystem dar und besitzen zum Teil bereits vorinstallierte Sensoren. An alle Knoten können zusätzliche Sensorplatinen angeschlossen werden, um die Systeme an eine bestimmte Messaufgabe anzupassen. Der IMote2 verfügt über ein Basisbetriebssystem (TinyOS) zur einfacheren Handhabung, wohingegen der Waspote

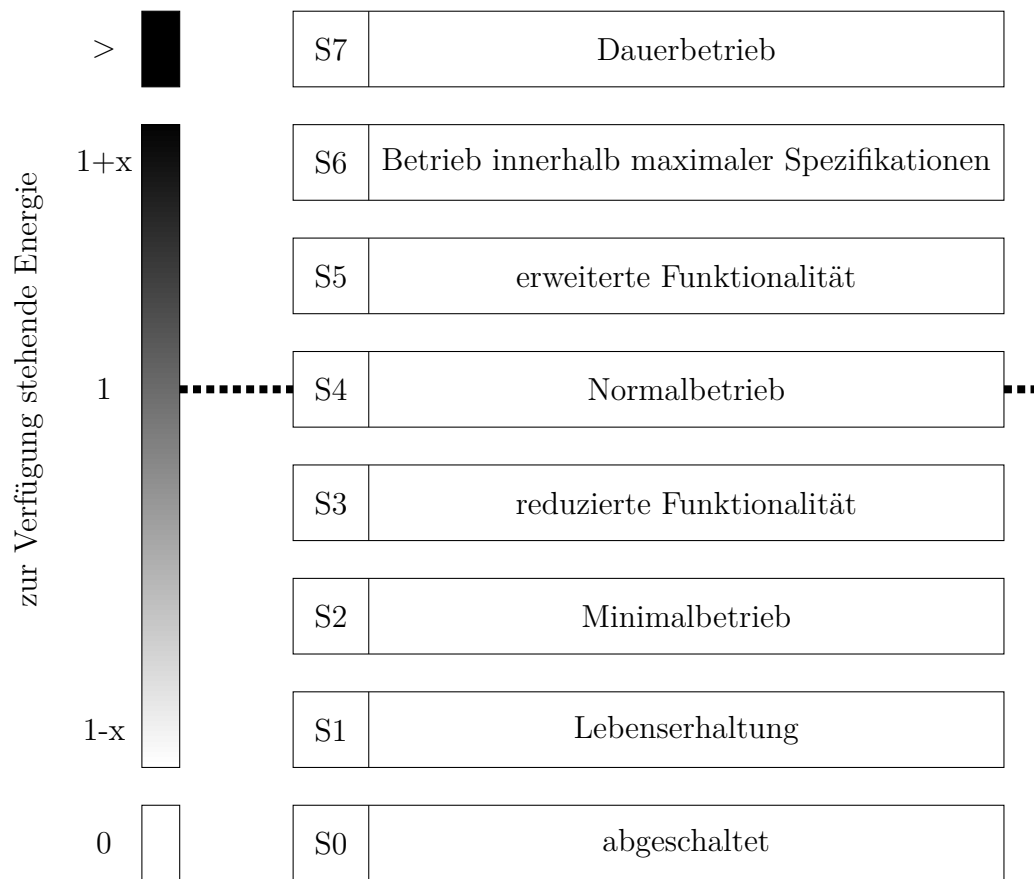


Abbildung 6.1: Allgemeine Übersicht über die verschiedenen möglichen Betriebszustände für ein energieautarkes low-power System.

	IRIS [134]	MicaZ [135]	IMote2 [136]	Waspote [137]	WiSMote [138]
Controller	Atmega 1281	Atmega 128	Marvell PXA271	Atmega 1281	MSP430
Sleep	8 μ A	15 μ A	390 μ A	55 μ A	12 μ A
Aktiv	8 mA	8 mA	31-53 mA	15 mA	2,2 mA
Empfangen	16 mA	19,7 mA	44 mA	30 mA	18,5 mA
Senden	15 mA	17,4 mA	44 mA	30 mA	18,5 mA
Spannung	2,7-3,3 V	2,7 V	3,2 V	3,3-4,2 V	2,2-3,6 V

Tabelle 6.1: Vergleich der Energieverbräuche verschiedener kommerziell verfügbarer Plattformen für drahtlose Sensornetzwerke [139] (abgeändert).

auf Verschlüsselung vorbereitet ist und auch über den Funkweg umprogrammiert werden kann. Alle Plattformen sind auf niedrigen Energieverbrauch ausgelegt und lassen sich in einen Schlafzustand mit geringer Stromaufnahme versetzen. Die Funknetzwerke werden auf Basis von ZigBee aufgebaut. Grundsätzlich sind sie für Batteriebetrieb geplant, die Energieversorgung kann jedoch aufgrund ihres geringen Verbrauchs auch durch Energy Harvesting realisiert werden.

Ausgehend von den in Tabelle 6.1 angegebenen Verbräuchen, soll ein Sensorknoten für das angegebene Szenario folgende Parameter aufweisen:

- Stromverbrauch im Ruhezustand: 20 μ A
- Stromverbrauch im aktiven Zustand: 20 mA
- Stromverbrauch der Kommunikation: 30 mA
- Betriebsspannung 3,3 V
- Betriebsdauer pro Mess-/Sendevorgang: 1 Sekunde aktiv, 0,5 Sekunden Kommunikation

Anwendungsabhängige Sensoren sollen dabei nicht berücksichtigt werden, d. h. es wird lediglich von der Grundplattform ausgegangen. Im realen Anwendungsfall kann sich hier demnach ein höherer Verbrauch ergeben. Ausgehend von diesen Werten ergeben sich ein täglicher Verbrauch von rund 5,7 Ws im Schlafmodus sowie ein Verbrauch von 0,1155 Ws für einen Mess-/Sendevorgang.

Für die Versorgung des Systems ist eine Solarzelle mit einer aktiven Fläche von 5 cm² vorgesehen. Damit lässt sich, ausgehend von den Datensätzen in Abschnitt 5.4, die täglich zur Verfügung stehende Energie berechnen. Abbildung 6.2 zeigt diese in Wattsekunden für die Jahre 2012 - 2014. Ausgegangen wird hierbei neben der aktiven

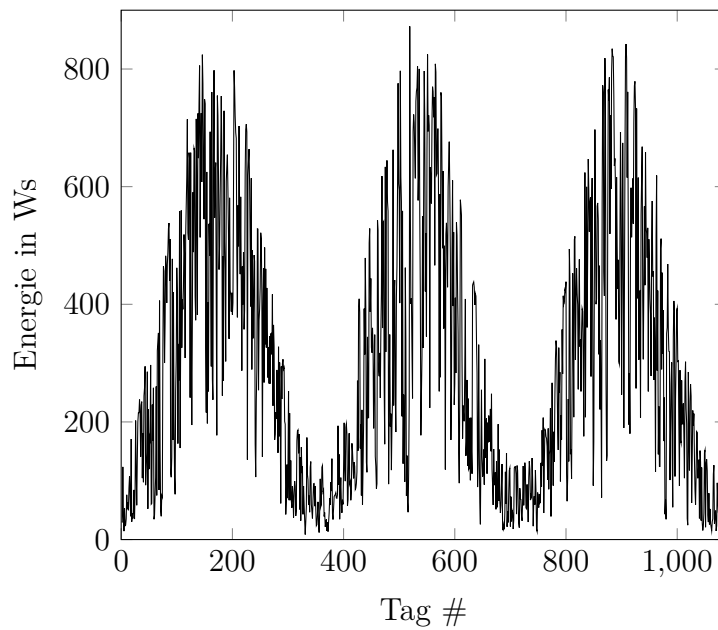


Abbildung 6.2: Für die Beispielanwendung täglich zur Verfügung stehende Energie in Wh für die Jahre 2012-2014 unter Berücksichtigung von Zellgröße, Wirkungsgrad Spannungswandler und Wirkungsgrad Solarzelle.

Fläche von einem Wirkungsgrad der Zelle von 8 % sowie einem Wirkungsgrad des Spannungswandlers, welcher aufgrund unterschiedlicher Bereiche der Quell-/Zielspannung schwankt, von durchschnittlich 70 %.

Mit dieser verfügbaren Energie würde sich ein durchschnittliches Arbeitsintervall von 37 Sekunden ergeben, d. h. es können weniger als zwei Mess-/Sendevorgänge pro Minute erfolgen, wenn die Gesamtenergie eines Tages kumuliert wird. Für eine reale Anwendung würde dieser Intervall, bei Betrachtung aller Verluste, deutlich höher ausfallen. Hierbei nicht berücksichtigt sind u. a. die Selbstentladung der verwendeten Speicher, Umladeverluste der Speicher, eine Verschmutzung bzw. Abschattungseffekte an der Solarzelle oder der nicht konstante Wirkungsgrad des Spannungswandlers, welcher besonders bei geringen Eingangsgrößen deutlich niedriger liegt. Weiterhin ist davon auszugehen, dass eine kumulierte tägliche Energiemenge, welche auf die Tageszeit aufgeteilt wird, dem Idealfall entspricht und so nicht umsetzbar ist.

Für die in Abschnitt 6.1 dargestellten Betriebszustände lassen sich demnach folgende Festlegungen treffen. Der Zustand S0 gilt als abgeschaltet. S1 entspricht einem dauerhaften Schlafmodus. S2 entspricht dem Zustand, dass kein zyklischer Betrieb möglich ist, eine geringe Menge Energie gesammelt wird und, sobald diese für einen Vorgang genügt, eine Messung gestartet wird. Eine Regelmäßigkeit ist damit nicht gegeben. Für

das vorliegende Beispiel wird S2 ab dem Bereich angenommen, ab dem die Zeitspanne zwischen zwei Vorgängen im Vergleich zum Normalbetrieb um mehr als das Doppelte zunimmt. Die Zustände S3 - S5 stellen den geregelten zyklischen Betrieb dar. Der Normalbetrieb S4 definiert den Sollzustand des Systems unter Berücksichtigung der Eingangsleistung. Kann dieses Intervall im Bereich von $\pm 10\%$ eingehalten werden, liegt Normalbetrieb vor. Darunter bzw. darüber liegen S3 und S5. Mit S6 wird der Betriebsbereich bezeichnet, ab welchem die Zeitspanne zwischen zwei Vorgängen im Vergleich zum Normalbetrieb mehr als halbiert wird. Dauerbetrieb liegt vor, sobald die verfügbare Energie ein Arbeitsintervall ermöglicht, welches kleiner als die Dauer eines Einzelvorgangs ist.

6.3 Hardwareumsetzung

Die Umsetzung des Energiemanagements in Hardware erfolgt auf einem MSP-430 Mikrocontroller. Diese Controllerfamilie zählt, im Vergleich zu ähnlichen Prozessoren, zu den energiesparenden. Sie verfügt über verschiedene Funktionen um den Verbrauch zu senken, so zum Beispiel Schlafmodi. Gleichzeitig stehen, je nach konkretem Exemplar, alle gängigen Methoden und Komponenten zur Verfügung, welche in einem drahtlosen Sensorknoten gebraucht werden. Der MSP-430 ist daher einer der am häufigsten verwendeten Controller in drahtlosen Sensornetzen.

Die wesentlichen Herausforderungen in der Implementierung liegen in den Beschränkungen der Hardware. So sind Controller für drahtlose Sensorknoten für Kosteneinsparungen generell minimal ausgelegt, wobei die geforderte Funktionalität stets korrekt erfüllt werden muss. Daraus ergibt sich eine beschränkte Rechenleistung, was ein effizientes Programmieren erfordert. Gleichzeitig steht ein geringer Speicher für Kennlinien zur Verfügung. Zur Modellberechnung muss ausreichend Speicherplatz vorhanden sein, um den Realverlauf des aktuellen Tages sowie den Verlauf des vorausberechneten Modellverlaufs aufnehmen zu können. Zusätzlich besteht ein Bedarf an speziell angepassten Mathematikbibliotheken, da beispielsweise Exponentialfunktionen nicht zum Standardbefehlssatz des Mikrocontrollers gehören.

Die Messung des Realverlaufs wird über eine Photodiode realisiert, deren Energieverbrauch im Vergleich zum Controller gering ausfällt und deren Empfindlichkeitsspektrum dem Bereich der Solarzelle angepasst ist. Das System ist in Abbildung 6.3 zu sehen.

Die vollständige Berechnung der Modellparameter aus dem Tagesverlauf einer Kennlinie auf dem Mikrocontroller dauert etwa 5 Minuten. Hierbei ist anzumerken, dass

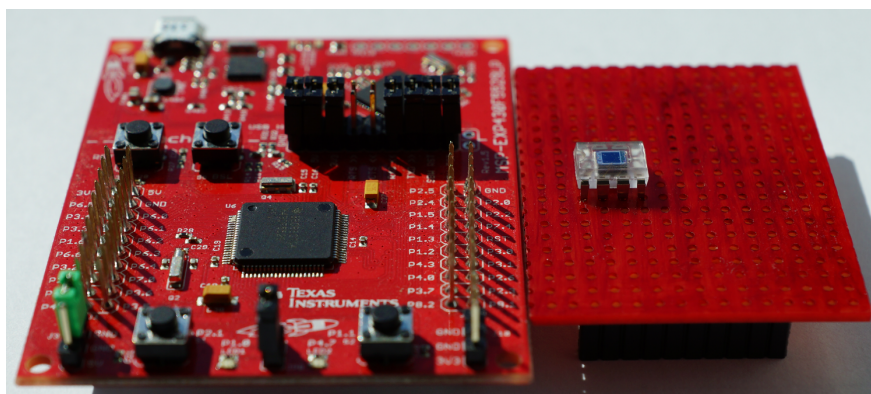


Abbildung 6.3: MSP-430 mit Fotodiode zur Bestimmung des Realverlaufs.

die Berechnung sowohl zeitunkritisch ist, d. h. beispielsweise nachts erfolgen kann, und in Abhängigkeit von der verfügbaren Energie stattfinden kann. Demnach ist es sowohl möglich überschüssige Energie zu verwenden als auch die Berechnung für einen Tag ausfallen zu lassen. Da die Änderungen innerhalb zweier aufeinanderfolgender Tage gering ausfällt (vergleiche Abschnitt 5.4.2), kann dabei der vorhergehende Tag angenommen werden.

Die Leistungsaufnahme des Sensorknotens mit Modellberechnung und ohne ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Wie zu erkennen ist, verbraucht der Sensorknoten mit aktiver Modellberechnung etwa 1,33 mW, ohne Modellberechnung 0,66 mW. Bei einer Gesamtdauer von 5 Minuten für die Berechnung ergibt daher ein Mehrverbrauch von 0,2 Ws. Dies entspricht durchschnittlich 0,175 % der über einen Tag zur Verfügung stehenden Energie und beeinflusst die Systemfunktion damit nur in sehr geringem Maß.

Abbildung 6.5 zeigt beispielhaft für Parameter A den Vergleich der Parameterbestimmung zwischen Mikrocontroller und rechnergestützter Mathematiksoftware (Kapitel 5). Die mittels Rechner bestimmten Parameter werden aufgrund der höheren Rechenleistung und der damit verbundenen höheren möglichen Genauigkeit als Referenz angesehen. Wie zu erkennen ist, zeigen die Werte, bis auf wenige Ausnahmen, einen linearen Zusammenhang. Die Differenz zwischen dem mittels Mathematikprogramm berechneten Modell und der Berechnung auf dem Mikrocontroller beträgt durchschnittlich 5,4 %. Hierbei wirken sich u. a. die 16-Bit Registerbreite sowie der Energie- und Zeitverbrauch aus, wodurch sich eine höhere Genauigkeit in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Ressourcen negativ auf die Einsatzfähigkeit des Systems auswirkt.

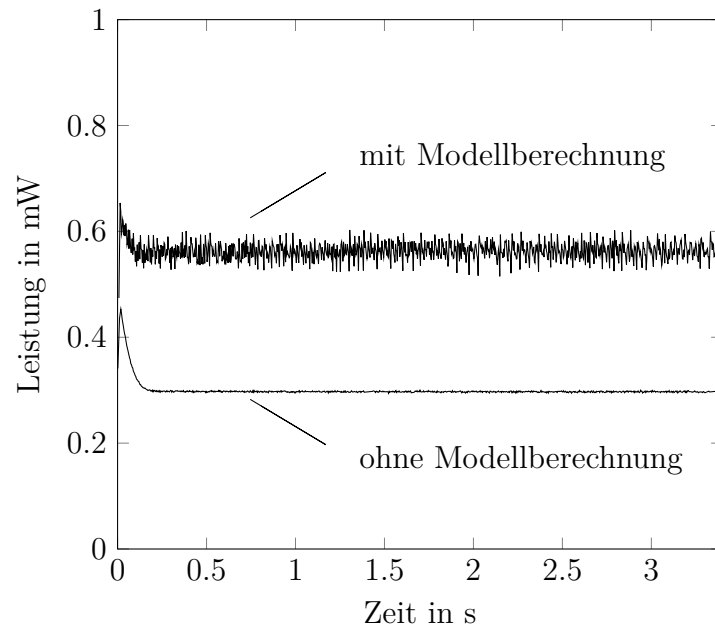


Abbildung 6.4: Leistungsaufnahme des Sensorknotens mit und ohne Energiemodellberechnung.

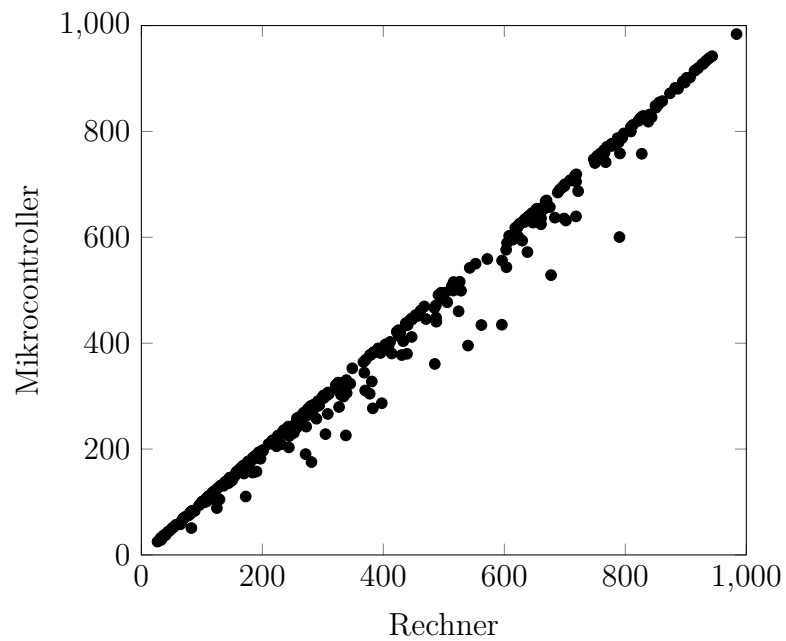


Abbildung 6.5: Vergleich der Parameterbestimmung zwischen Mikrocontroller und Rechner am Beispiel von Parameter A.

6.4 Systemfunktion mit und ohne Energiemodell

Das in Abschnitt 6.2 beschriebene Anwendungsszenario dient als Grundlage für die Demonstration der Funktionalität des modellbasierten Energiemanagements. Als Einschränkung wird im Folgenden lediglich der Tagbereich der Kennlinien betrachtet, die Funktionalität über Nacht bleibt unberücksichtigt. Für die Berücksichtigung des Betriebs bei Dunkelheit ist zusätzlich eine Speicherbetrachtung notwendig, welche von verschiedenen systemspezifischen Parametern abhängig ist. Die Vielzahl der hierfür zu treffenden Annahmen würde einen realistischen Vergleich erschweren, deshalb wird ausschließlich der Bereich betrachtet, in welchem das Energiemodell überhaupt zum Tragen kommt. Ziel ist es, innerhalb dieses Bereichs eine möglichst gleichmäßige Funktionalität zu erhalten. Die Betriebszustände S0, S1 und S7 werden im Folgenden nicht berücksichtigt. Diese werden erst notwendig, wenn der energetische Zustand über 24 Stunden betrachtet wird. Im vorliegenden Fall mit der ausschließlichen Fokussierung auf den Tagverlauf, wird davon ausgegangen dass zu jedem Zeitpunkt eine definierte Eingangsleistung bereitsteht.

Abbildung 6.6 zeigt vier ausgewählte Beispielverläufe von realem und modelliertem Energieverlauf für die Hardware im Detail. Zu erkennen sind hierbei unterschiedlich starke Schwankungen im Verlauf. In den Beispielen unterscheiden sich die durchschnittlichen Gesamtenergien lediglich um 10 %. In a) besteht der Vorteil des modellbasierten Verfahrens darin, dass bereits im Zeitraum vor 200 Minuten erkannt wird, dass das Mittagshoch der Kennlinie schwächer ausfallen wird. Durch den gleichmäßigen Verlauf ohne große Schwankungen kann mit einer konstant niedrigeren Energie geplant werden. Im hinteren Tagesdrittel wird wieder der modellierte Zustand erreicht. In b) zeigt sich ein deutlich wechselhaftes Verhalten während der solaren Tagesmitte, mit erkennbarem Energieüberschuss. Aufgrund des wechselhaften Verhaltens wird der Überschuss nicht verbraucht, sondern vorgehalten und steht damit im letzten Tagesdrittel, in welchem weniger Energie zur Verfügung steht als geplant, bereit. In c) zeigen sich deutliche Ausschläge in der Leistungsbereitstellung. Diese Spitzenwerte werden als kurzzeitig erkannt und führen somit nicht zur einer Maximierung der Systemfunktionalität. Bei einem glatten Verlauf mit entsprechendem Spitzenwert würden die Intervallzeiten entsprechend angepasst, weil von einem konstant höheren Eintrag ausgegangen werden würde. Der Vorteil durch das Modell zeigt sich hierbei in den geringeren Schwankungen des Mess-/Sendeintervalls, da andernfalls die Zeitverkürzung aufgrund des kurzen Zeitraums der Mehrleistung nach wenigen Minuten zurückgenommen werden

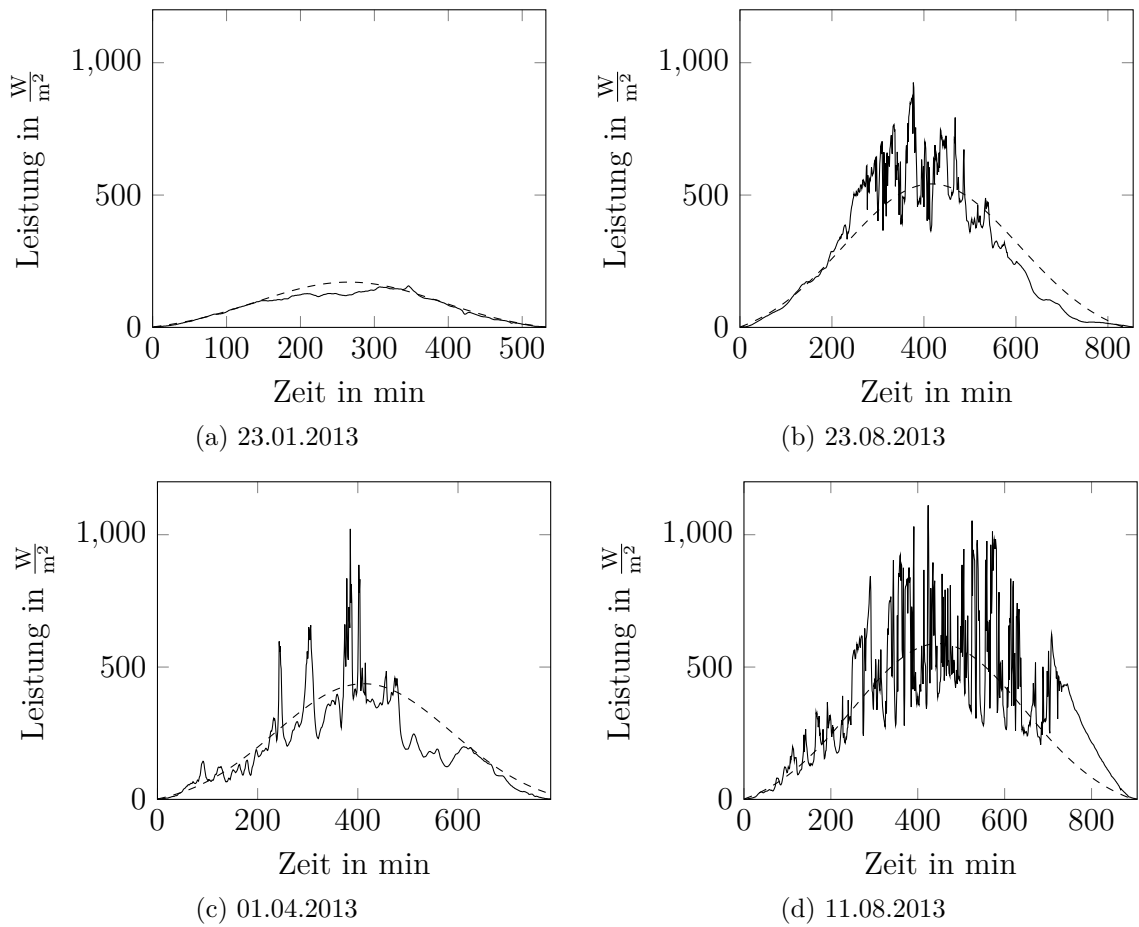


Abbildung 6.6: Detaillierte Betrachtung der Systemfunktion anhand von vier Beispieltagen. Modell- und Realverlauf.

müsste. Abbildung 6.6 d) zeigt einen über den gesamten Tag stark wechselhaften Realverlauf. Der Unterschied in der Gesamtenergie beträgt für diesen Tag lediglich 2%, d. h. die eingehende Energiemenge verläuft planmäßig und die Systemfunktion muss nicht angepasst werden. Ohne diese Erkenntnis würde ein Sensorsystem, welches derartige Schwankungen in der Energieversorgung erkennt, einen Sicherheitsfaktor in der Funktionalität vorhalten um die Ausfallsicherheit zu gewährleisten. Das modellbasierte Energiemanagement erkennt, dass dies nicht notwendig ist und die Funktion unverändert fortgeführt werden kann.

Um die Eignung des modellbasierten Energiemanagements zu zeigen, wird dieses mit zwei weiteren, für drahtlose Sensorsysteme typischerweise verwendeten, Verfahren verglichen. Abbildung 6.7 stellt den Ablauf aller drei Funktionen grafisch dar.

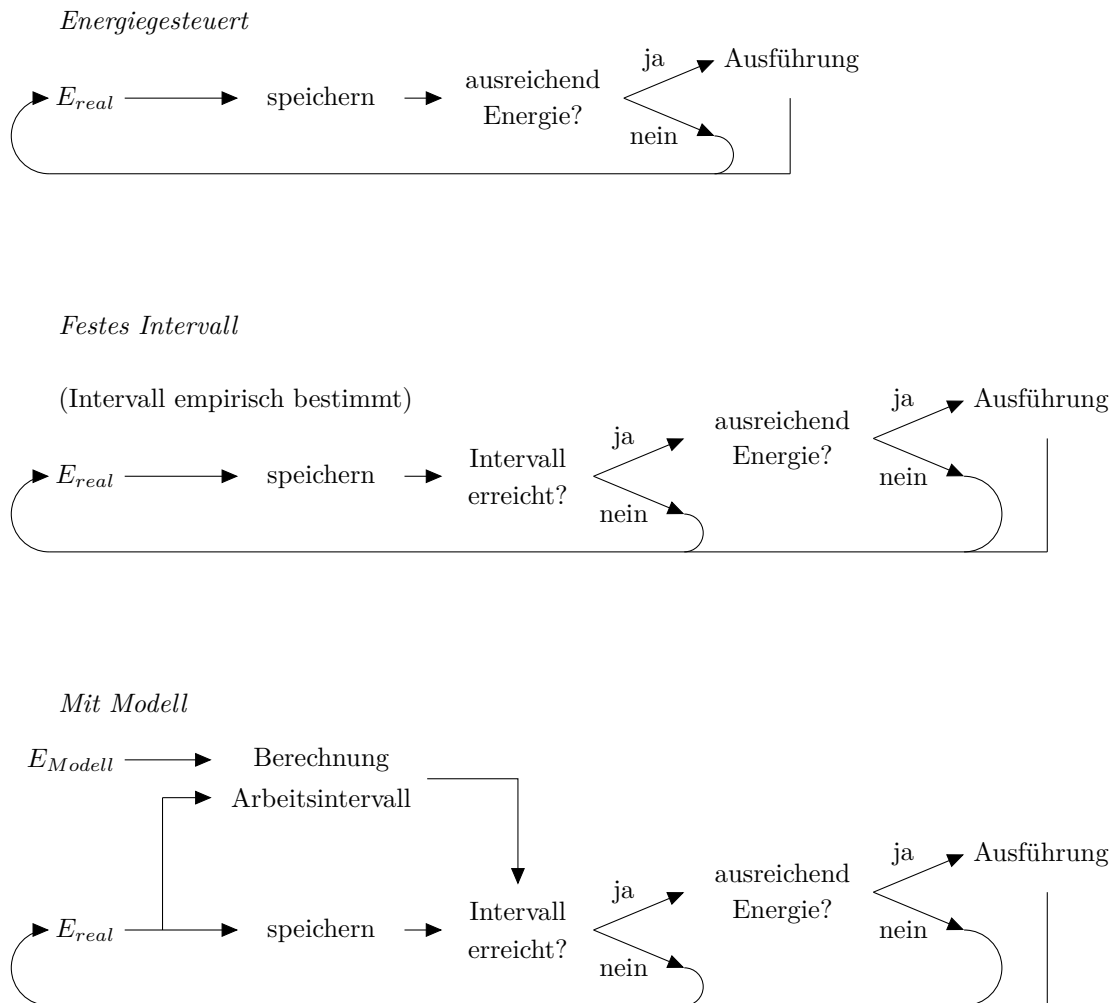


Abbildung 6.7: Schematischer Ablauf von drei verschiedenen Energiemanagementverfahren für drahtlose Sensorsysteme.

Die erste Variante zeigt den Ansatz, dass ein Vorgang immer dann ausgeführt wird, wenn dies möglich ist (energiegesteuert). Dies bedeutet, es wird Energie gesammelt und aufsummiert, bis die zur Verfügung stehende Menge für einen Vorgang genügt. Entsprechend der Eingangsleistung kann somit der Zeitraum zwischen Vorgängen stark schwanken. Die Bestimmung der Betriebszustände erfolgt in diesem Fall über die Verteilung der Intervallzeiten.

Die zweite Variante berücksichtigt die zur Verfügung stehende Energie, indem aus vorangegangenen Messungen eine empirische Ermittlung bzw. Berechnung des möglichen Arbeitsintervalls erfolgt. Ein Vorgang erfolgt dabei immer dann, wenn sowohl der vorherbestimmte Intervallzeitraum als auch die dafür notwendige Energie erreicht wird. Bei zu geringer Leistung verzögert sich der Vorgang entsprechend. Da die Prognose des möglichen Zeitraums auf statistischen Berechnungen basiert, sind hier ebenfalls Schwankungen möglich.

Variante drei entspricht der Zuhilfenahme des innerhalb der vorherigen Kapitel entwickelten Energiemodells. Hierbei wird ebenfalls auf Basis empirischer Werte ein Startintervall vorgegeben, welches unter Zuhilfenahme der realen Eingangsenergie sowie des Energiemodells regelmäßig angepasst wird. Durch das Zusammenwirken von vorangegangenen Energieverfügbarkeitsmessungen, realen Eingangswerten und dem nach Modell planmäßigen Energieverlauf sind im Vergleich zu den oben stehenden Varianten geringe Schwankungen möglich.

Betrachtet man die sich aus den drei Varianten ergebenden Betriebszustände, werden deutliche Unterschiede sichtbar. Abbildung 6.8 zeigt die Verteilung der Zustände für die jeweiligen Verfahren unter Berücksichtigung des Energieeintrags des Jahres 2013. Wie zu erkennen ist, liefert die Variante eins, d. h. einen Vorgang immer dann auszuführen, wenn dafür ausreichend Energie verfügbar ist, ein gemischtes Ergebnis. Der Normalbetrieb wird in weniger als 10 % der Fälle erreicht, in über 70 % der Zustände wird ein verkürztes Intervall erzielt und mit knapp 20 % ein verlängertes. Dies wird ebenfalls in Abbildung 6.9 deutlich (rote Kurve) und zeigt sich einer Vielzahl von Zustandswechseln über den ausgewählten Beispieltag. Der qualitative Verlauf der Zustände entspricht dem grundsätzlichen Energieverlauf über einen Tag. Hier wird deutlich, dass dieses Verfahren zum Erreichen eines über den Tag verteilt gleichmäßigen Betriebszustands nicht geeignet ist. Weiterhin sind die Zustände S5 und S6 im Hinblick auf eine Energiespeicherung für den Nachtbetrieb nachteilig.

Variante zwei, mit festem, empirisch bestimmtem Intervall, entspricht einer Modifikation von Variante eins. Prinzipiell werden durch das Festlegen einer Regelzeitdauer

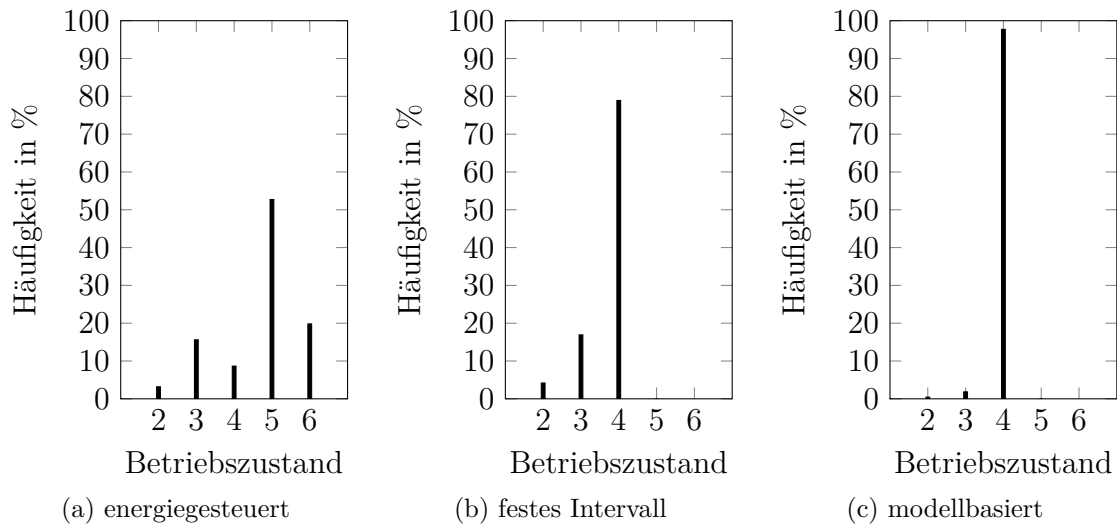


Abbildung 6.8: Prozentuale Verteilung der Betriebszustände für die drei verglichenen Energiemanagementvarianten. Als Eingangsenergie dient das Jahr 2013. Gespeist wird die Hardware mit den Energieverläufen von 363 Tagen.

zwischen zwei Vorgängen die Betriebszustände S5 und S6 vermieden, weil hierdurch eine minimale Wartezeit festgelegt wird. Dies verdeutlicht sich in Abbildung 6.8, indem die vorhergehenden Zustände S5 und S6 in guter Näherung im Betriebszustand S4 aufgehen. In Zeiten mit geringem Energieeintrag kann S4 weiterhin nicht garantiert werden, weshalb S2 und S3 mit knapp unter 5 % bzw. 20 % noch etwa ein Viertel der Zustände ausmachen. Dieses Verhalten wird auch in Abbildung 6.9 deutlich (blaue Kurve). Die Schwankungen nehmen qualitativ ab. Ausschläge finden ausschließlich zu niedrigeren Betriebszustände hin statt. Dies bedeutet ebenfalls, dass bei zusätzlicher Betrachtung des Nachtbereichs durch die Vermeidung der Zustände S5 und S6 eine höhere Energie zur Verfügung steht.

Für Variante drei, der modellbasierten Berechnung des Zielintervalls, zeigt sich in Abbildung 6.8, dass in über 97 % der Fälle Betriebszustand S4 gehalten werden kann. S2 und S3 werden stärker unterdrückt als bei einem festen Arbeitsintervall, weil Zeiträume mit hohem sowie niedrigem Energieaufkommen erkannt werden. Es kann somit ein Ausgleich stattfinden. In Abbildung 6.9 zeigt sich dieses Verhalten anhand eines Beispieltages, wobei im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Methoden zu einem Großteil des Zeitraums der Normalzustand eingehalten werden kann. In den Randbereichen treten trotz Modellanpassung niedrigere Betriebszustände auf, halten jedoch nur für einen kurzen Zeitraum an.

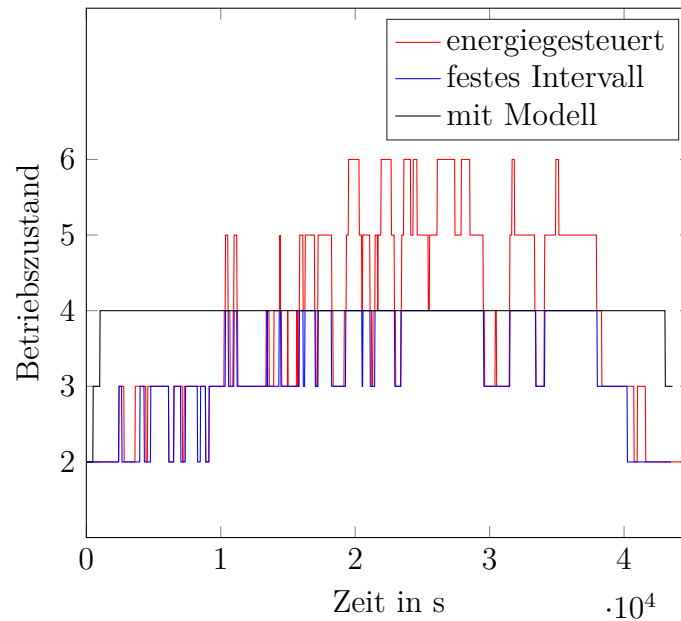


Abbildung 6.9: Verlauf der eingestellten Betriebszustände für die drei verglichenen Verfahren. Ausgewählter Beispieltag: 20.09.2013.

Insgesamt betrachtet werden durch das modellbasierte Energiemanagement die über den normalen Tagesverlauf auftretenden Leistungsschwankungen ausgeglichen, d. h. zu Zeiten mit hohem Energieaufkommen wird der Verbrauch nur geringfügig erhöht, um gleichzeitig Zeiträume mit niedrigem Energieaufkommen ausgleichen zu können, wodurch in diesen der Verbrauch weniger stark gesenkt werden muss. Für das vorliegende Anwendungsszenario treten für den Fall, dass ein Vorgang immer ausgeführt wird, wenn dieser energetisch möglich ist, 21.944 Betriebszustandswechsel über das gesamte Jahr auf (durchschnittlich 60 pro Tag). Bei einer festen Intervallzeit reduziert sich die Anzahl auf 5.475 (durchschnittlich 15 pro Tag) und bei Verwendung des Energiemodells auf 4.916 (durchschnittlich 13 pro Tag). Die geringere Anzahl an Zustandswechseln ermöglicht eine gleichmäßigere und besser planbare Beobachtung von Messwerten bei gleichzeitig konstant niedrigen Reaktionszeiten. Gleichzeitig wird durch die, im Vergleich der drei Verfahren, bessere Ausnutzung der Energie die Ausfallsicherheit erhöht. Damit werden die in Abschnitt 5.1 gesteckten Ziele bezüglich Planbarkeit, Sicherheit und intelligentes Management auf einem drahtlosen Sensorknoten erreicht.

7 Zusammenfassung

Die neuesten Entwicklungen hin zu energiesparsamen Mikrocontrollern, Sensoren und Funkkommunikationsmitteln ermöglichen breite Anwendungsgebiete für drahtlose Sensorsysteme. Die Versorgung dieser Systeme stellt nach aktuellem Stand der Technik eine wesentliche Limitierung für deren Einsatz dar. Eine kabelgebundene Energieversorgung ist dabei nicht sinnvoll und durch Batteriebetrieb entsteht entweder ein zusätzlicher Wartungsaufwand oder eine begrenzte (energetische) Lebensdauer des Systems. Eine Versorgung über Energy Harvesting Lösungen ist daher zweckmäßig. Für Außenanwendungen sind dabei besonders Solarenergiewandler von Interesse.

Die Nutzung von Solarzellen ist auf Wandlerebene ein weit fortgeschrittenes Gebiet, jedoch ist die dauerhaft zuverlässige Versorgung auch während großen wetterbedingten Schwankungen in der Verfügbarkeit eine wesentliche Herausforderung, um ein robustes Gesamtsystem zu erhalten, welches die Nutzerakzeptanz findet. Bislang wird diesen Herausforderungen mit Überdimensionierung begegnet, wodurch sich jedoch neue Probleme ergeben. So sind überdimensionierte Systeme beispielsweise unnötig teuer oder weisen, aufgrund großer Speicherkapazitäten, lange Anlaufzeiten auf. Dies verringert wiederum die Akzeptanz und wirkt der universellen Einsetzbarkeit der Sensorsysteme entgegen.

Mit der intelligenten Nutzung und Verteilung der verfügbaren Energie lässt sich ein System besser dimensionieren, ohne Stabilität zu verlieren. Auch dessen Funktionalität wird besser planbar. Hierfür ist das Wissen um den aktuellen und zukünftigen energetischen Zustand erforderlich.

Prinzipiell zählt Solarenergie zu den gut vorhersagbaren Quellen im Vergleich zu anderen Energy Harvesting Lösungen. Die Genauigkeit hängt jedoch stark vom aktuellen, wetterbedingten Zustand und den verfügbaren Informationen ab. Im Tagesverlauf können verschiedene Abschattungseffekte kürzere oder längere Leistungseinbrüche verursachen, auf welche ein intelligentes Energiemanagement mit geeigneten Maßnahmen reagieren muss.

Im Fall von autarken Sensorsystemen sprechen Aufwand und Kosten sowie die limitierte Hardware der Knoten gegen einen Einsatz der auf Großanlagen üblichen Methoden. Um eine in die Praxis umsetzbare Möglichkeit zu schaffen und eine Aussage zum aktuellen energetischen Zustand auch auf autarken Sensorsystemen treffen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell entwickelt, welches auf den typischerweise leistungsarmen Mikrocontrollern von Sensorknoten mit geringem Ressourcenaufwand lauffähig ist. Mit diesem kann der Verlauf der erwarteten Eingangsleistung für den aktuellen Tag hergeleitet werden. Aus dem Vergleich zwischen erwarteter und tatsächlicher Eingangsleistung können verschiedene, für das Energiemanagement wichtige und notwendige, Informationen abgeleitet werden. So können beispielsweise kritische Zustände rechtzeitig erkannt werden, um Vorsorgemaßnahmen einzuleiten. Auf wechselhafte Bedingungen kann mit einer angepassten Systemfunktion bzw. entsprechenden Betriebszuständen reagiert werden und eine Verschwendung von überschüssiger Energie kann vermieden werden, indem der Zustand, in welchem die Speicher vollständig geladen sind und zugleich mehr Leistung zur Verfügung steht, als vom System verbraucht wird, vermieden wird.

Die Betrachtung des Stands der Technik ergibt, dass sich das ASHRAE Modell als im Vergleich bestgeeignet erweist. Eine Anpassung dieses Modells über verschiedene Funktionsparameter ermöglicht eine modellbasierte Zustandsbeschreibung bei geringem Rechen- und Speicheraufwand. Das Abspeichern von Datensätzen als Entscheidungsgrundlage ist dabei nicht notwendig. Gleichzeitig ist es dem System möglich, durch ein dynamisches Parameterupdate eine weitere Verbesserung und Anpassung des Modells an seine Umgebung vorzunehmen.

Das Modell des Energieertrags erreicht mit einem Fehler im Bereich von 5 - 15 % eine Genauigkeit, welche etwa dem entspricht, was aus der Literatur bekannt ist und in diesem Bereich akzeptabel ist. Anders als die Modelle aus dem Stand der Technik ist es jedoch vollständig in die Umgebung drahtloser Sensorknoten integrierbar und erhöht die Zuverlässigkeit, Ausfallsicherheit und energetische Lebensdauer eines autarken Messsystems. Neben den Vorteilen bezüglich der Verbesserung der Systemfunktion ergeben sich auch neue Möglichkeiten in der Dimensionierung der Energieversorgung, welche unter Einbezug der Zustandsbeobachtung einen geringeren Sicherheitsfaktor benötigt. Damit kann einer Überdimensionierung vorgebeugt werden, die Kosten reduzieren sich und die Nutzerakzeptanz kann wesentlich gesteigert werden.

Die Umsetzung des modellbasierten Energiemanagements in Hardware unter Verwendung eines beispielhaften Energieverbrauchs und realen Leistungskurven für ein

ausgewähltes Anwendungsszenario ergibt deutliche Verbesserungen im Vergleich zu herkömmlichen Energiemanagementstrategien. Hier zeigt sich, dass bei Betrachtung von drei aufeinanderfolgenden Jahren, das modellbasierte System zu 97 % im Normalbetrieb verbleibt, wohingegen zeit- oder energiegesteuerte Verfahren deutlich häufigere Zustandswechsel aufweisen und damit in ihrer Systemfunktion weniger gut vorhersagbar sind. Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit konnte somit ein Verfahren geschaffen werden, welches das Energiemanagement deutlich verbessert, die Zuverlässigkeit erhöht und den Einsatz eines Sensornetzes besser planbar macht.

In der Zukunft wird sich die Energieversorgung von drahtlosen Sensorsystemen durch neue und effizientere Speichertechnologien sowie Fortschritte bei den Energiewandlern weiter verbessern. Damit eröffnen sich auch weitere Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der modellgestützten Zustandsdiagnose. Durch eine höhere Arbeitsleistung pro Milliwatt der Mikrocontroller und eine allgemein höhere Effizienz, wird der Verbrauch weiter sinken und die zusätzliche Rechenleistung kann genutzt werden, um die Genauigkeit der Modellierung weiter zu erhöhen. Ebenfalls können komplexere Modelle unter Berücksichtigung weiterer Eingangsparameter umgesetzt werden. Verfahren der künstlichen Intelligenz, welche derzeit unter Beachtung der Ressourcen in der Regel nicht zweckmäßig für diesen Einsatz sind, werden ebenfalls denkbar.

Literaturverzeichnis

- [1] Adamala, S.; Raghuwanshi, N. S.; Mishra, A., *Development of Surface Irrigation Systems Design and Evaluation Software (SIDES)*, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 100, 2014, Seiten 100-109, ISSN 0168-1699, doi: 10.1016/j.compag.2013.11.004
- [2] Zia, H.; Harris, N. R.; Merrett, G. V.; Rivers, M.; Coles, N., *The impact of agricultural activities on water quality: A case for collaborative catchment-scale management using integrated wireless sensor networks*, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 96, 2013, Seiten 126-138, ISSN 0168-1699, doi: 10.1016/j.compag.2013.05.001
- [3] Kwong, K. H.; Wu, T. T.; Goh, H. G.; Sasloglou, K.; Stephen, B.; Glover, I.; Shen, C.; Du, W.; Michie, C.; Andonovic, I., *Practical considerations for wireless sensor networks in cattle monitoring applications*, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 81, 2012, Seiten 33-44, ISSN 0168-1699, doi: 10.1016/j.compag.2011.10.013
- [4] Lu, X.; Wang, S.; Li, W.; Jiang, P.; Zhang, C., *Development of a WSN based real time energy monitoring platform for industrial applications*, Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), IEEE 19th International Conference on, 2015, Seiten 337-342, doi: 10.1109/CSCWD.2015.7230982
- [5] Wan, Y.; Li, L.; He, J.; Zhang, X.; Wang, Q., *Anshan: Wireless Sensor Networks for Equipment Fault Diagnosis in the Process Industry*, 5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, USA, 2008, Seiten 314-322, doi: 10.1109/SAHCN.2008.46
- [6] Dutta, P.; Hui, J.; Jeong, J.; Kim, S., *Trio: enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments*, 5th International Conference

- on Information Processing in Sensor Networks, USA, 2006, Seiten 407-415, doi: 10.1145/1127777.1127839
- [7] Evers, L.; Havinga, P. J. M.; Kuper, J.; Lijding, M. E. M.; Meratnia, N., *SensorScheme: Supply chain management automation using Wireless Sensor Networks*, IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA), 2007, Seiten 448-455, doi: 10.1109/EFTA.2007.4416802
- [8] Wall, J.; Platt, G.; James, G.; Valencia, P., *Wireless Sensor Networks as Agents for Intelligent Control of Distributed Energy Resources*, 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, Puerto Rico, 2007, doi: 10.1109/ISWPC.2007.342664
- [9] Farella, E.; Falavigna, M.; Ricco, B., *Aware and smart environments: The Casattenta project*, Microelectronics Journal, Vol. 41, Issue 11, 2010, Seiten 697-702, ISSN 0026-2692, doi: 10.1016/j.mejo.2010.01.008
- [10] Antoine-Santoni, T.; Santucci, J. F.; De Gentili, E.; Costa, B., *Using Wireless Sensor Network for Wildfire detection. A discrete event approach of environmental monitoring tool*, First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area, 2006, Seiten 115-120, doi: 10.1109/ISEIMA.2006.344927
- [11] He, D.; Zhang, L. X., *The water quality monitoring system based on WSN*, Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2nd International Conference on, 2012, Seiten 3661-3664, doi: 10.1109/CECNet.2012.6201666
- [12] Shi-Yong, J.; Fei, W.; Jing-Fu, B.; Ting, Y., *Geological disaster monitoring system based on WSN and GSM dual-network integration technology*, Communication Technology (ICCT), IEEE 14th International Conference on, China, 2012, Seiten 374-379, doi: 10.1109/ICCT.2012.6511246
- [13] Johnson, T. M.; Margalho, M., *Wireless Sensor Networks for Agroclimatology Monitoring in the Brazilian Amazon*, International Conference on Communication Technology, 2006, Seiten 1-4, doi: 10.1109/ICCT.2006.341876
- [14] Lu C.; Raghunathan, V.; Roy, K., *Efficient Design of Micro-Scale Energy Harvesting Systems*, Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,

- IEEE Journal on, Vol. 1, Nr. 3, 2011, Seiten 254-266, doi: 10.1109/JET-CAS.2011.2162161
- [15] Niyato, D.; Hossain, E.; Rashid, M. M.; Bhargava, V. K., *Wireless sensor networks with energy harvesting technologies: a game-theoretic approach to optimal energy management*, Wireless Communications, IEEE, Vol. 14, Nr. 4, 2007, Seiten 90-96, doi: 10.1109/MWC.2007.4300988
- [16] Dolgov, A.; Zane, R.; Popovic, Z., *Power Management System for Online Low Power RF Energy Harvesting Optimization*, Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, Vol. 57, Nr. 7, 2010, Seiten 1802-1811, doi: 10.1109/TCSI.2009.2034891
- [17] Heo, S.; Yang, Y. S.; Lee, J.; Lee, S. K.; Kim, J., *Micro energy management for energy harvesting at maximum power point*, Integrated Circuits (ISIC), 13th International Symposium on, 2011, Seiten 136-139, doi: 10.1109/ISI-Cir.2011.6131896
- [18] Chao, L.; Tsui, C. Y.; Ki, W. H., *Vibration energy scavenging and management for ultra low power applications*, Low Power Electronics and Design (ISLPED), ACM/IEEE International Symposium on, 2007, Seiten 316-321, doi: 10.1145/1283780.1283848
- [19] Kanago, A.; Barry, V.; Sprague, B.; Cevik, I.; Ay, S., *A low power maximum power point tracker and power management system in 0.5um CMOS*, Circuits and Systems (MWSCAS), IEEE 55th International Midwest Symposium on, 2012, Seiten 238-241, doi: 10.1109/MWSCAS.2012.6292001
- [20] Chang, M. H.; Wu, J. Y.; Hsieh, W. C.; Lin, S. Y.; Liang, Y. W.; Wei, H., *High efficiency power management system for solar energy harvesting applications*, Circuits and Systems (APCCAS), IEEE Asia Pacific Conference on, 2010, Seiten 879-882, doi: 10.1109/APCCAS.2010.5774960
- [21] Shao, H.; Tsui, C. Y.; Ki, W. H., *The Design of a Micro Power Management System for Applications Using Photovoltaic Cells With the Maximum Output Power Control*, Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on, Vol. 17, Nr. 8, 2009, Seiten 1138-1142, doi: 10.1109/TVLSI.2008.2001083

- [22] Kong, N.; Cochran, T.; Ha, D. S.; Lin, H. C.; Inman, D. J., *A self-powered power management circuit for energy harvested by a piezoelectric cantilever*, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 25th Annual IEEE, 2010, Seiten 2154-2160, doi: 10.1109/APEC.2010.5433535
- [23] Kansal, A.; Hsu, J.; Srivastava, M.; Raghunathan, V., *Harvesting Aware Power Management for Sensor Networks*, Design Automation Conference, Proceedings of the 43rd annual, 2006, Seiten 651-656, doi: ACM 1-59593381-6/06/0007
- [24] Kansal, A.; Potter, D.; Srivastava, M., *Performance Aware Tasking for Environmentally Powered Sensor Networks*, SIGMETRICS '04/Performance '04, Proceedings of the joint international conference on Measurement and modeling of computer systems, 2004, Seiten 223-234, doi: 10.1145/1005686.1005714
- [25] Christmann, J. F.; Beigne, E.; Condemine, C.; Willemin, J.; Piguet, C., *Energy harvesting and power management for autonomous sensor nodes*, Design Automation Conference (DAC), 49th ACM/EDAC/IEEE, 2012, Seiten 1049-1054
- [26] Raghunathan, V.; Chou, P. H., *Design and Power Management of Energy Harvesting Embedded Systems*, Low Power Electronics and Design (ISLPE'D'06), Proceedings of the 2006 International Symposium on, 2006, Seiten 369-374, doi: 10.1109/LPE.2006.4271870
- [27] Yi, J.; Su, F.; Lam, Y. H.; Ki, W. H.; Tsui, C. Y., *An energy-adaptive MPPT power management unit for micro-power vibration energy harvesting*, Circuits and Systems (ISCAS), IEEE International Symposium on, 2008, Seiten 2570-2573, doi: 10.1109/ISCAS.2008.4541981
- [28] Saggini, S.; Ongaro, F.; Galperti, C.; Mattavelli, P., *Supercapacitor-based hybrid storage systems for energy harvesting in wireless sensor networks*, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 25th Annual IEEE, 2010, Seiten 2281-2287, doi: 10.1109/APEC.2010.5433554
- [29] Khan, J. A.; Qureshi, H. K.; Iqbal, A., *Energy management in Wireless Sensor Networks: A survey*, Computers & Electrical Engineering, Vol. 41, 2015, Seiten 159-176, ISSN 0045-7906, doi: 10.1016/j.compeleceng.2014.06.009

- [30] Frezzetti, A.; Manfredi, S.; Pagano, M., *A design approach of the solar harvesting control system for wireless sensor node*, Control Engineering Practice, Vol. 44, 2015, Seiten 45-54, ISSN 0967-0661, doi: 10.1016/j.conengprac.2015.07.004
- [31] Bader, S.; Scholzel, T.; Oelmann, B., *A Method for Dimensioning Micro-Scale Solar Energy Harvesting Systems Based on Energy Level Simulations*, Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), IEEE/IFIP 8th International Conference on, Hong Kong, 2010, Seiten 372-379, doi: 10.1109/EUC.2010.62
- [32] Baranov, A.; Spirjakin, D.; Akbari, S.; Somov, A.; Passerone, R., *wireless carbon monoxide sensor node with hybrid power supply*, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Italien, 2015, Seiten 1019-1023, doi: 10.1109/I2MTC.2015.7151410
- [33] Gakkestad, J.; Hanssen, L., *Powering Wireless Sensor Networks Nodes in Northern Europe Using Solar Cell Panel for Energy Harvesting*, New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 4th IFIP International Conference on, Frankreich, 2011, Seiten 1-5, doi: 10.1109/NTMS.2011.5720640
- [34] Liu, X.; Sanchez-Sinencio, E., *An 86% Efficiency 12 μ W Self-Sustaining PV Energy Harvesting System With Hysteresis Regulation and Time-Domain MPPT for IOT Smart Nodes*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 50, Nr. 6, 2015, Seiten 1424-1437, doi: 10.1109/JSSC.2015.2418712
- [35] Strakosch, F.; Derbel, F., *Fast and Efficient Dual-Forecasting Algorithm for Wireless Sensor Networks*, AMA Conferences, 2015, ISBN 978-3-9813484-8-4, doi: 10.5162/sensor2015/P9.2
- [36] Levron, Y.; Shmilovitz, D.; Martinez-Salamero, L., *A Power Management Strategy for Minimization of Energy Storage Reservoirs in Wireless Systems With Energy Harvesting*, Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, Vol. 58, Nr. 3, 2011, Seiten 633-643, doi: 10.1109/TC-SI.2010.2073830
- [37] Seo, J. B., *On Minimizing Energy Consumption of Duty-Cycled Wireless Sensors*, IEEE Communications Letters, Vol. 19, Nr. 10, 2015, Seiten 1698-1701, doi: 10.1109/LCOMM.2015.2459698

- [38] Liu, S.; Lu, J.; Wu, Q.; Qiu, Q., *Harvesting-Aware Power Management for Real-Time Systems With Renewable Energy*, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 20, Nr. 8, 2012, Seiten 1473-1486, doi: 10.1109/TVLSI.2011.2159820
- [39] Le, T. N.; Sentieys, O.; Berder, O.; Pegatoquet, A.; Belleudy, C., *Adaptive Filter for Energy Predictor in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks*, Architecture of Computing Systems (ARCS), Proceedings of 26th International Conference on, Tschechische Republik, 2013, Seiten 1-4
- [40] Cammarano, A.; Petrioli, C.; Spenza, D., *Pro-Energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks*, IEEE 9th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS), USA, 2012, Seiten 75-83, doi: 10.1109/MASS.2012.6502504
- [41] Prabhakar, T. V.; Devasenapathy, S.; Jamadagni, H. S.; Prasad, R. V., *Smart applications for energy harvested WSNs*, Second International Conference on COMmunication Systems and NETworks (COMSNETS), Indien, 2010, Seiten 1-7, doi: 10.1109/COMSNETS.2010.5431958
- [42] Piorno, J. R.; Bergonzini, C.; Atienza, D.; Rosing, T. S., *Prediction and management in energy harvested wireless sensor nodes*, Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Wireless VITAE), 1st International Conference on, Dänemark, 2009, Seiten 6-10, doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2009.5172412
- [43] Mokrenko, O.; Vergara-Gallego, M. I.; Lombardi, W.; Lesecq, S.; Puschini, D.; Albea, C., *Design and implementation of a Predictive Control strategy for power management of a wireless sensor network*, European Control Conference (ECC), Österreich, 2015, Seiten 2303-2308, doi: 10.1109/ECC.2015.7330882
- [44] Kroener, M., *Energy harvesting technologies: Energy sources, generators and management for wireless autonomous applications*, Systems, Signals and Devices (SSD), 9th International Multi-Conference on, 2012, Seiten 1-4, doi: 10.1109/SSD.2012.6198111
- [45] Fan, P. M. Y.; Wong, O. Y.; Chung, M. J.; Su, T. Y.; Zhang, X.; Chen, P. H., *Energy harvesting techniques: Energy sources, power management and*

- conversion*, Circuit Theory and Design (ECCTD), European Conference on, 2015, Seiten 1-4, doi: 10.1109/ECCTD.2015.7300104
- [46] Sharma, R.; Prasad, S.; Balaji, S., *A Tour into Ambient Energy Resources and Battery Optimization*, Signal and Image Processing (ICSIP), 5th International Conference on, 2014, Seiten 343-347, doi: 10.1109/ICSIP.2014.60
- [47] Kheng Tan, Y.; Panda, S. K., *Self-Autonomous Wireless Sensor Nodes With Wind Energy Harvesting for Remote Sensing of Wind-Driven Wildfire Spread*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, Vol. 60, Nr. 4, 2011, Seiten 1367-1377, doi: 10.1109/TIM.2010.2101311
- [48] Rindelhardt, U., *Photovoltaische Stromversorgung*, Teubner Verlag, 2001, ISBN 3-519-00411-9
- [49] Quaschnig, V., *Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen Systemen*, Beiträge zur Solarforschung - Solarstrahlung, Solarenergie, Photovoltaik, Vol. 6, 1996, ISBN 3-89574-191-4
- [50] Pandiarajan, N.; Ramaprabha, R.; Muthu, R., *Application of Circuit Model for Photovoltaic Energy Conversion System*, International Journal of Photoenergy, 2012, Article ID 410401, doi:10.1155/2012/410401
- [51] Chun, S.; Kwasinski, A., *Analysis of Classical Root-Finding Methods Applied to Digital Maximum Power Point Tracking for Sustainable Photovoltaic Energy Generation*, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol.26, Nr. 12, 2011, Seiten 3730-3743, doi: 10.1109/TPEL.2011.2157707
- [52] Lopez-Lapena, O.; Penella, M. T.; Gasulla, M., *A New MPPT Method for Low-Power Solar Energy Harvesting*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 57, Nr. 9, 2010, Seiten 3129-3138, doi: 10.1109/TIE.2009.2037653
- [53] Eltawil, M. A.; Zhao, Z., *MPPT techniques for photovoltaic applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 25, 2013, Seiten 793-813, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.022
- [54] Bhatnagar, P.; Nema, R. K., *Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 23, 2013, Seiten 224-241, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2013.02.011

- [55] Ali, A. N. A.; Saied, M. H.; Mostafa, M. Z.; Abdel-Moneim, T. M., *A survey of maximum PPT techniques of PV systems*, IEEE Energytech, 2012, Seiten 1-17, doi: 10.1109/EnergyTech.2012.6304652
- [56] Onat, N., *Recent Developments in Maximum Power Point Tracking Technologies for Photovoltaic Systems*, International Journal of Photoenergy, 2010, Article ID 245316, doi:10.1155/2010/245316
- [57] Goetzberger, A.; Hoffmann, V., *Photovoltaic Solar Energy Generation*, Springer Verlag, 2005, ISBN 3-540-23676-7
- [58] Hohm, D. P.; Ropp, M. E., *Comparative study of maximum power point tracking algorithms*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 11, Issue 1, 2003, Seiten 47-62, doi: 10.1002/pip.459
- [59] Kasa, N.; Iida, T.; Chen, L., *Flyback Inverter Controlled by Sensorless Current MPPT for Photovoltaic Power System*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 52, Nr. 4, 2005, Seiten 1145-1152, doi: 10.1109/TIE.2005.851602
- [60] Esumi, T.; Chapman, P. L., *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Vol. 22, Nr. 2, 2007, Seiten 439-449, doi: 10.1109/TEC.2006.874230
- [61] Rekioua, D.; Matagne, E., *Optimization of Photovoltaic Power Systems*, Modelization, Simulation and Control, Springer Verlag, 2012, ISBN 978-1-4471-2348-4
- [62] Won, C. Y.; Kim, D. H.; Kim, S. C.; Kim, W. S.; Kim, H. S., *A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller*, Power Electronics Specialists Conference (PESC), 25th Annual IEEE, Vol. 1, 1994, Seiten 396-403, doi: 10.1109/PESC.1994.349703
- [63] Schlien, U., *Schaltnetzwerke und ihre Peripherie*, Vieweg Praxiswissen, 2007, ISBN 978-3-8348-0239-2
- [64] Luo, F. L.; Ye, H., *DC/DC Conversion Technique and Twelve Series Luo-converters*, Power Electronics Handbook (3rd Edition), Butterworth-Heinemann, 2011, Seiten 265-356, ISBN 9780123820365, doi: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00014-8

- [65] Pfeifer, T., *Mikrocontroller gesteuertes Maximum Power Point Tracking für Solaranwendungen*, Bachelorarbeit, Technische Universität Chemnitz, 2012
- [66] Meyer, T., *DC/DC-Wandler mit kleiner Eingangsspannung für photovoltaische, elektrochemische und thermoelektrische Zellen*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 288, VDI Verlag, 2000, ISBN 3-18-328821-4
- [67] Richelli, A.; Colalongo, L.; Tonoli, S.; Kovacs-Vajna, Z. M., *A 0.2 - 1.2 V DC/DC Boost Converter for Power Harvesting Applications*, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 24, Nr. 6, 2009, Seiten 1541-1546, doi: 10.1109/TPEL.2009.2013224
- [68] Tyagi, A.; Gopi, C.; Baldi, P.; Islam, A., *CNFET-Based 0.1- to 1.2-V DC/DC Boost Converter With Voltage Regulation for Energy Harvesting Applications*, Nanotechnology, IEEE Transactions on, Vol. 14, Nr. 4, 2015, Seiten 660-667, doi: 10.1109/TNANO.2015.2427292
- [69] Richelli, A.; Comensoli, S.; Kovacs-Vajna, Z. M., *A DC/DC Boosting Technique and Power Management for Ultralow-Voltage Energy Harvesting Applications*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 59, Nr. 6, 2012, Seiten 2701-2708, doi: 10.1109/TIE.2011.2167890
- [70] Bassi, G.; Colalongo, L.; Richelli, A.; Kovacs-Vajna, Z., *A 150mV-1.2V fully-integrated DC-DC converter for Thermal Energy Harvesting*, Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), International Symposium on, 2012, Seiten 331-334, doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264597
- [71] Al-Sanea, S. A.; Zedan, M. F.; Al-Ajlan, S. A., *Adjustment factors for the ASHRAE clear-sky model based on solar-radiation measurements in Riyadh*, Applied Energy, Vol. 79, Issue 2, 2004, Seiten 215-237, ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2003.11.005
- [72] Iqbal, M., *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, 1983, ISBN 0-12-373750-8
- [73] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), *Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen - Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung*, VDI 3789, Blatt 2, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1, Beuth Verlag, 1994

- [74] Riordan, C.; Hulstron, R., *What is an air mass 1.5 spectrum?*, Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the 21st IEEE, Vol. 2, 1990, Seiten 1085-1088, doi: 10.1109/PVSC.1990.111784
- [75] Reno, M. J.; Hansen, C. W.; Stein, J. S., *Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis*, Sandia Report, Sandia National Laboratories, SAND2012-2389, 2012
- [76] Rapp-Arraras, I.; Domingo-Santos, J. M., *Functional forms for approximating the relative optical air mass*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 116, Issue D24, 2011, doi:10.1029/2011JD016706
- [77] Kasten, F.; Young, A. T., *Revised Optical Air-Mass Tables and Approximation Formula*, Applied Optics, Vol. 28, 1989, Seiten 4735-4738
- [78] Renewable Resource Data Center (RReDC), Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5, ASTM G173-03 Tables
- [79] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), *Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen - Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken im solaren Wellenlängenbereich*, VDI 3789, Blatt 3, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b, Beuth Verlag, 1994
- [80] Gueymard, C. A.; Garrison, J. D., *Critical evaluation of precipitable water and atmospheric turbidity in Canada using measured hourly solar irradiance*, Solar Energy, Vol. 62, Issue 4, 1998, Seiten 291-307, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/S0038-092X(98)00005-X
- [81] Bird, R. E.; Hulstrom, R. L., *Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*, Technical Report No. SERI/TR-642-761, 1981
- [82] Badescu, V.; Gueymard, C. A.; Cheval, S.; Oprea, C.; Baci, M.; Dumitrescu, A.; Iacobescu, F.; Milos, I.; Rada, C., *Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, Issue 3, 2012, Seiten 1636-1656, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2011.12.010
- [83] Deutsches Institut für Normung, DIN ISO 2533 - Normatmosphäre, Beuth Verlag, 1979

- [84] Muneer, T., *Solar Radiation and Daylight Models*, Elsevier, 1997, ISBN 0750659742
- [85] Young, A. T., *Rayleigh Scattering*, Physics Today, Band 35, 1982, Seite 42
- [86] Gueymard, C. A., *Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance*, Solar Energy, Vol. 71, Issue 5, 2001, Seiten 325-346, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/S0038-092X(01)00054-8
- [87] Alnaser, W. E.; Awadalla, N. S., *The linke turbidity factor and Angström coefficient in humid climate of Bahrain*, Earth, Moon, and Planets, Kluwer Academic Publishers, Vol. 70, Issue 1, 1995, Seiten 61-74, ISSN 0167-9295, doi: 10.1007/BF00619451
- [88] Lopez, G.; Batlles, F. J., *Estimate of the atmospheric turbidity from three broad-band solar radiation algorithms. A comparative study*, Annales Geophysicae, Vol. 22, 2004, Seiten 2657-2668, doi: 10.5194/angeo-22-2657-2004
- [89] Tadros, M. T. Y.; El-Metwally, M.; Hamed, A. B., *Determination of Angström coefficients from spectral aerosol optical depth at two sites in Egypt*, Renewable Energy, Vol. 27, Issue 4, 2002, Seiten 621-645, ISSN 0960-1481, doi: 10.1016/S0960-1481(01)00156-2
- [90] Eltbaakh, Y. A.; Ruslan, M. H.; Alghoul, M. A.; Othman, M. Y.; Sopian, K., *Issues concerning atmospheric turbidity indices*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, Issue 8, 2012, Seiten 6285-6294, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.034
- [91] Eltbaakh, Y. A.; Ruslan, M. H.; Alghoul, M. A.; Othman, M. Y.; Sopian, K.; Razykov, T. M., *Solar attenuation by aerosols: An overview*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, Issue 6, 2012, Seiten 4264-4276, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2012.03.053
- [92] Gueymard, C. A., *Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models*, Solar Energy, Vol. 86, Issue 8, 2012, Seiten 2145-2169, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2011.11.011

- [93] Engerer, N. A.; Mills, F. P., *Validating nine clear sky radiation models in Australia*, Solar Energy, Vol. 120, 2015, Seiten 9-24, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2015.06.044
- [94] Davies, J. A.; Abdel-Wahab, M.; McKay, D. C., *Estimating Solar Irradiation on Horizontal Surfaces*, International Journal of Solar Energy, Vol. 2, Issue 5, 1984, Seiten 405-424, doi: 10.1080/01425918408909940
- [95] Ineichen, P., *Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks*, Solar Energy, Vol. 80, Issue 4, 2006, Seiten 468-478, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2005.04.018
- [96] Badescu, V., *Verification of some very simple clear and cloudy sky models to evaluate global solar irradiance*, Solar Energy, Vol. 61, Issue 4, 1997, Seiten 251-264, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/S0038-092X(97)00057-1
- [97] Younes, S.; Muneer, T., *Clear-sky classification procedures and models using a world-wide data-base*, Applied Energy, Vol. 84, Issue 6, 2007, Seiten 623-645, ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2007.01.016
- [98] Ianetz, A.; Lyubansky, V.; Setter, I.; Kriheli, B.; Evseev, E. G.; Kudish, A. I., *Inter-comparison of different models for estimating clear sky solar global radiation for the Negev region of Israel*, Energy Conversion and Management, Vol. 48, Issue 1, 2007, Seiten 259-268, ISSN 0196-8904, doi: 10.1016/j.enconman.2006.04.006
- [99] Janjai, S.; Sricharoen, K.; Pattarapanitchai, S., *Semi-empirical models for the estimation of clear sky solar global and direct normal irradiances in the tropics*, Applied Energy, Vol. 88, Issue 12, 2011, Seiten 4749-4755, ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.021
- [100] Gueymard, C. A.; Thevenard, D., *Monthly average clear-sky broadband irradiance database for worldwide solar heat gain and building cooling load calculations*, Solar Energy, Vol. 83, Issue 11, 2009, Seiten 1998-2018, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2009.07.011
- [101] Howell, R. H.; Coad, W. J.; Sauer, H. J., *Principles of Heating, Ventilating and Air Conditioning, ASHRAE Handbook - Fundamentals*, 7th Edition, 2013, ISBN 978-1-936504-57-2

- [102] Hottel, H. C., *A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres*, Solar Energy, Vol. 18, 1976, Seiten 129-134
- [103] Hoyt, D. V., *A model for the calculation of solar global insolation*, Solar Energy, Vol. 21, Issue 1, 1978, Seiten 27-35, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(78)90113-5
- [104] Davies, J. A.; Uboegbulam T. C., *Parameterization of surface incoming radiation in tropical cloudy conditions*, Atmosphere-Ocean, Vol. 17, Issue 1, 1979, doi: 10.1080/07055900.1979.9649048
- [105] Atwater, M. A.; Ball, J. T., *A surface solar radiation model for cloudy atmospheres*, Monthly Weather Review, Vol. 109, Issue 4, 1981, Seiten 878-888, ISSN 1520-0493
- [106] Tarpley, J. D., *Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data*, Journal of Applied Meteorology, Vol. 18, 1979, Seiten 1172-1181, doi: 10.1175/1520-0450(1979)018<1172:EISRAT>2.0.CO;2
- [107] Gueymard, C., *A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface*, Solar Energy, Vol. 43, Issue 5, 1989, Seiten 253-265, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(89)90113-8
- [108] Justus, C. G.; Paris, M. V., *A model for solar spectral irradiance and radiance at the bottom and top of a cloudless atmosphere*, Journal of Applied Meteorology, Vol. 24, 1985, Seiten 193-205, doi: 10.1175/1520-0450(1985)024<0193:AMFSSI>2.0.CO;2
- [109] Kumar, L.; Skidmore, A. K.; Knowles, E., *Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment*, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 11, Issue 5, 1997, Seiten 475-497, doi: 10.1080/136588197242266
- [110] Maxwell, E. L., *METSTAT-The solar radiation model used in the production of the National Solar Radiation Data Base (NSRDB)*, Solar Energy, Vol. 62, Issue 4, 1998, Seiten 263-279, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/S0038-092X(98)00003-6

- [111] Fu, P.; Rich, P. M., *Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales*, Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, 1999
- [112] Rigollier, C.; Bauer, O.; Wald, L., *On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas - with respect to the heliosat method*, Solar Energy, Vol. 68, Issue 1, 2000, Seiten 33-48, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/S0038-092X(99)00055-9
- [113] Ineichen, P.; Perez, R., *A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient*, Solar Energy, Vol. 73, Issue 3, 2002, Seiten 151-157, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/S0038-092X(02)00045-2
- [114] Ineichen, P., *A broadband simplified version of the Solis clear sky model*, Solar Energy, Vol. 82, Issue 8, 2008, Seiten 758-762, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2008.02.009
- [115] Gueymard, C. A., *REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation - Validation with a benchmark dataset*, Solar Energy, Vol. 82, Issue 3, 2008, Seiten 272-285, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2007.04.008
- [116] Kambezidis, H. D.; Adamopoulos, A. D.; Sakellariou, N. K.; Pavlopoulos, H. G.; Aguiar, R.; Bilbao, J.; Miguel, A.; Negro, E., *The Meteorological Radiation Model*, 2008
- [117] Badescu, V., *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface - Recent Advances*, Springer Verlag, 2008, ISBN 978-3-540-77454-9
- [118] Perez, R.; Seals, R.; Ineichen, P.; Stewart, R.; Menicucci, D., *A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces*, Solar Energy, Vol. 39, Issue 3, 1987, Seiten 221-231, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/S0038-092X(87)80031-2
- [119] Demain, C.; Journee, M.; Bertrand, C., *Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces*, Renewable Energy, Vol. 50, 2013, Seiten 710-721, ISSN 0960-1481, doi: 10.1016/j.renene.2012.07.031

- [120] Temps, R. C.; Coulson, K. L., *Solar radiation incident upon slopes of different orientations*, Solar Energy, Vol. 19, Issue 2, 1977, Seiten 179-184, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(77)90056-1
- [121] Reindl, D. T.; Beckman, W. A.; Duffie, J. A., *Evaluation of hourly tilted surface radiation models*, Solar Energy, Vol. 45, Issue 1, 1990, Seiten 9-17, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(90)90061-G
- [122] Badescu, V., *3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces*, Renewable Energy, Vol. 26, Issue 2, 2002, Seiten 221-233, ISSN 0960-1481, doi: 10.1016/S0960-1481(01)00123-9
- [123] Willmott, C. J., *On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors*, Solar Energy, Vol. 28, Issue 3, 1982, Seiten 205-216, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(82)90159-1
- [124] Evseev, E. G.; Kudish, A. I., *The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south*, Solar Energy, Vol. 83, Issue 3, 2009, Seiten 377-388, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2008.08.010
- [125] Klucher, T. M., *Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces*, Solar Energy, Vol. 23, Issue 2, 1979, Seiten 111-114, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(79)90110-5
- [126] Bugler, J. W., *The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation*, Solar Energy, Vol. 19, Issue 5, 1977, Seiten 477-491, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(77)90103-7
- [127] Ma, C. C. Y.; Iqbal, M., *Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces*, Solar Energy, Vol. 31, Issue 3, 1983, Seiten 313-317, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(83)90019-1
- [128] Belcher, B. N.; DeGaetano, A. T., *A revised empirical model to estimate solar radiation using automated surface weather observations*, Solar Energy, Vol. 81, Issue 3, 2007, Seiten 329-345, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2006.07.003

- [129] Molineaux, B.; Ineichen, P.; Delaunay, J. J., *Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity-Improving model performance*, Solar Energy, Vol. 55, Issue 2, 1995, Seiten 125-137, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/0038-092X(95)00035-P
- [130] Shi, J.; Lee, W. J.; Liu, Y.; Yang, Y.; Peng, W., *Forecasting power output of photovoltaic system based on weather classification and support vector machine*, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011, Seiten 1-6, doi: 10.1109/IAS.2011.6074294
- [131] Wagemann, H. G.; Eschrich, H., *Photovoltaik - Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben*, Teubner Verlag, 2007, ISBN 978-3-8351-0168-5
- [132] Kasper, L., *Elektrische und spektrale Charakterisierung verschiedener Solarzellen auf Siliziumbasis für Low-Power-Anwendungen im Innenraum*, Technische Universität Chemnitz, 2012
- [133] Viehweger, C.; Keutel, T.; Kasper, L.; Pfeifer, T.; Kanoun, O., *System Design and Energy Management for Indoor Solar Energy Harvesting Under Consideration of Spectral Characteristics of Solar Cells*, International Journal of Measurement Technologies and Instrumentation Engineering (IJMTIE), Vol. 3, Issue 1, 2013, Seiten 1-15, doi: 10.4018/ijmtie.2013010101
- [134] IRIS, Memsic, <http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks>, zuletzt besucht: 10.02.2016
- [135] MicaZ, Memsic, <http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks/MPR2400CB>, zuletzt besucht: 10.2.2016
- [136] IMote2, Intel Research, <http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/Imote2>, zuletzt besucht: 10.2.2016
- [137] Wasp mote, Libelium, <http://www.libelium.com/products/wasp mote>, zuletzt besucht: 10.2.2016
- [138] WiSMote, Arago Systems, <http://www.aragosystems.com/en/wisnet-item/wisnet-wismote-item.html>, zuletzt besucht: 10.2.2016

- [139] Shaikh, F. K.; Zeadally, S., *Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55, 2016, Seiten 1041-1054, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.010

Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktur der Arbeit	5
2.1	Aufbau des Energiemanagements in drahtlosen Sensorknoten bestehend aus einem oder mehreren Harvestern, Speichern, Steuerung und Last. .	9
2.2	Betriebszustände für eine solarzellenbasierte Energieversorgung.	11
2.3	Aufbau des erweiterten Energiemanagements für drahtlose Sensorknoten mit Energiemodell zur Bewertung des eigenen Zustands.	13
2.4	Typischerweise auftretende Probleme bei Verwendung eines Energiemanagements ohne die Fähigkeit zur Erkennung des zeitlichen Verlaufs des eigenen energetischen Zustands.	21
2.5	Vergleich zwischen stark wechselhaftem und gleichmäßigem Verlauf sowie eine exemplarische Sommerkennlinie im Vergleich mit einem Winterverlauf.	22
3.1	2-Dioden Ersatzschaltbild einer Solarzelle.	28
3.2	Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle.	30
3.3	Fehlerhaftes Trackingverhalten des Perturb & Observe Verfahrens: Zielspannung entfernt sich vom MPP.	38
3.4	Blockschaltbild einer MPPT Steuerung nach dem Incremental Conductance Verfahren.	41
3.5	Schematischer Überblick zum Einsatz neuronaler Netze für MPPT. . .	44
3.6	Topologische Übersicht zu typischen DC/DC-Wandlern für Sensorknoten.	47
3.7	Schematischer Aufbau eines Dual-DC/DC-Wandlers zum Anlauf ohne Hilfsspannung und zur Nutzung geringer Spannungswerte an der Solarzelle.	50
4.1	Direkt- und Diffusstrahlung innerhalb der Erdatmosphäre.	52
4.2	Gegenüberstellung von Global- und Diffusstrahlung.	53
4.3	Winkelbeziehungen des solaren Tagesverlaufs.	54
4.4	Zusammenhang zwischen AM-Modell und Weglänge des Sonnenlichts innerhalb der Erdatmosphäre.	56
4.5	AM 0 und AM 1,5 Spektrum.	57

4.6	Transmittanzen der für die Beeinflussung des Leistungsverlaufs wichtigsten Stoffanteile in der Luft über dem Zenitwinkel.	59
4.7	Einfluss von Mehrfachreflexionen zwischen Oberfläche und Atmosphäre auf die eingehende Strahlung.	65
4.8	Vergleich der Modellabweichungen verschiedener Quellen in Prozent. . .	76
4.9	Normierte Emissionsspektren von LED, Leuchtstoffröhre und Halogenlampe sowie normierte spektrale Empfindlichkeit von fünf verschiedenen Solarzellen.	79
5.1	Übersicht zum Ablauf der Bestimmung des Energieertrags für einen solarbasierten drahtlosen Sensorknoten mit Verwendung eines abgewandelten Ertragsmodells.	84
5.2	Dichtespektrum der Kennlinien der stündlichen Durchschnittswerte des Globalstrahlungsverlaufs in den Jahren 1988 bis 2014.	89
5.3	Kumulierte Sonnenscheindauer bzw. durchschnittliche Sonnenscheindauer pro Stunde in den Jahren 1988 bis 2014.	90
5.4	Dichtespektrum der Kennlinien der stündlichen Durchschnittswerte des Diffusstrahlungsverlaufs in den Jahren 1988 bis 2014.	90
5.5	Jahresdurchschnitt der Globalstrahlung. Veränderung im Zeitraum 1990 - 2010.	91
5.6	Dauer der Globalstrahlung pro Tag in Minuten. Jahre 2012 - 2014. . . .	92
5.7	Verlauf der maximal eingehenden Energie von Global- und Diffusstrahlung. Jahre 2012 - 2014.	92
5.8	Korrelation der Globalstrahlungskennlinien aus 2012 - 2014.	94
5.9	Detaillierte Korrelation von Einzelmonaten.	94
5.10	Streudiagramme der Globalstrahlungsdurchschnittswerte des jeweils selben Monats verschiedener Jahre im Vergleich. März und August aus den Jahren 2012 - 2014.	96
5.11	Vergleich zwischen stündlicher und minütlicher Abtastung der Sonnenleistung.	98
5.12	Vergleich zwischen Bedeckungsgrad und Leistungsverlauf ausgewählter Kennlinien.	99
5.13	Einfluss der Modellparameter A, B und C.	101
5.14	Anpassung des Modells an den Datensatz für das Jahr 2013.	102
5.15	Übersicht der RSME-Werte über ein Jahr für verschiedene Ordnungen der Modellfunktion.	103

5.16	Übersicht der RSME-Werte für einzelne Monate der Jahre 2012 - 2014.	104
5.17	Realverlauf und Modellprognose bei hoher und niedriger Anpassungsge- nauigkeit.	105
5.18	Prozentuale Abweichung zwischen Tagesverlauf und dazugehörigem (mo- natlichen) Modell der Jahre 2012 - 2014.	107
5.19	Prozentuale Abweichung zwischen Tagesverlauf und dazugehörigem (mo- natlichen) Modell der Jahre 2012 - 2014. Chronologische Reihenfolge zur Verdeutlichung der Fehlerverteilung über das jeweilige Jahr.	107
5.20	Vergleich zwischen den durchschnittlichen Abweichungen zwischen Mo- dell und Kennlinie für einzelne Tage des Jahres 2013 mit monatlichem Parameterupdate und interpolierten Zwischenwerten für einzelne Tage.	109
6.1	Allgemeine Übersicht über die verschiedenen möglichen Betriebszustände für ein energieautarkes low-power System.	114
6.2	Für die Beispielanwendung täglich zur Verfügung stehende Energie in Ws für die Jahre 2012-2014 unter Berücksichtigung von Zellgröße, Wirkungsgrad Spannungswandler und Wirkungsgrad Solarzelle.	116
6.3	MSP-430 mit Fotodiode zur Bestimmung des Realverlaufs.	118
6.4	Leistungsaufnahme des Sensorknotens mit und ohne Energiemodellbe- rechnung.	119
6.5	Vergleich der Parameterbestimmung zwischen Mikrocontroller und Rech- ner am Beispiel von Parameter A.	119
6.6	Detaillierte Betrachtung der Systemfunktion anhand von vier Beispiel- tagen. Modell- und Realverlauf.	121
6.7	Schematischer Ablauf von drei verschiedenen Energiemanagementver- fahren für drahtlose Sensorsysteme.	122
6.8	Prozentuale Verteilung der Betriebszustände für die drei verglichenen Energiemanagementvarianten.	124
6.9	Verlauf der eingestellten Betriebszustände für die drei verglichenen Verfahren.	125
A.1	Auswirkungen der Änderung einzelner Parameter auf die Solarzellen- kennlinie.	156
A.2	Korrelation der Globalstrahlungskennlinien aus 2012.	157
A.3	Korrelation der Globalstrahlungskennlinien aus 2013.	157
A.4	Korrelation der Globalstrahlungskennlinien aus 2014.	158

A.5	Streudiagramme der Globalstrahlungsdurchschnittswerte des jeweils selben Monats verschiedener Jahre im Vergleich. Januar - Juni.	159
A.6	Streudiagramme der Globalstrahlungsdurchschnittswerte des jeweils selben Monats verschiedener Jahre im Vergleich. Juli - Dezember. . . .	160

Tabellenverzeichnis

3.1	Vergleich unterschiedlicher MPPT Verfahren.	33
3.2	Beispiel für eine Entscheidungstabelle eines Fuzzy-basierten MPPT Systems.	43
4.1	Übersicht zu den in der Literatur meist verwendeten Parametern für Globalstrahlungsmodelle.	60
4.2	Zusammensetzung der Normatmosphäre auf Höhe des Meeresspiegels. .	61
4.3	β_A und α_A Koeffizienten der Ångström-Trübung für verschiedene qualitative Atmosphärenzustände.	63
5.1	Vergleich der wichtigsten Eigenschaften der Modelle aus Abschnitt 4.6.1 in Bezug zu ihrer Einsatzfähigkeit in drahtlosen Sensorsystemen.	87
5.2	Übersicht der Korrelationswerte der Jahre 2012 - 2014.	95
5.3	Bedeckungsgrad im Vergleich zu prozentualen Schwankungen der Kennlinien.	99
5.4	Ergebnisparameter der Modellanpassung für die jeweiligen Monate in 2013	102
5.5	Errechnete durchschnittliche RSME-Werte für die einzelnen Monate der Jahre 2012 - 2014.	105
6.1	Vergleich der Energieverbräuche verschiedener kommerziell verfügbarer Plattformen für drahtlose Sensornetzwerke.	115
B.1	Eingabeparameter von 54 Clear Sky Modellen.	161
B.2	Übersicht der Korrelationswerte der Jahre 2012 - 2014 miteinander (Fortsetzung zu Tabelle 5.2).	163

A Weitere Abbildungen

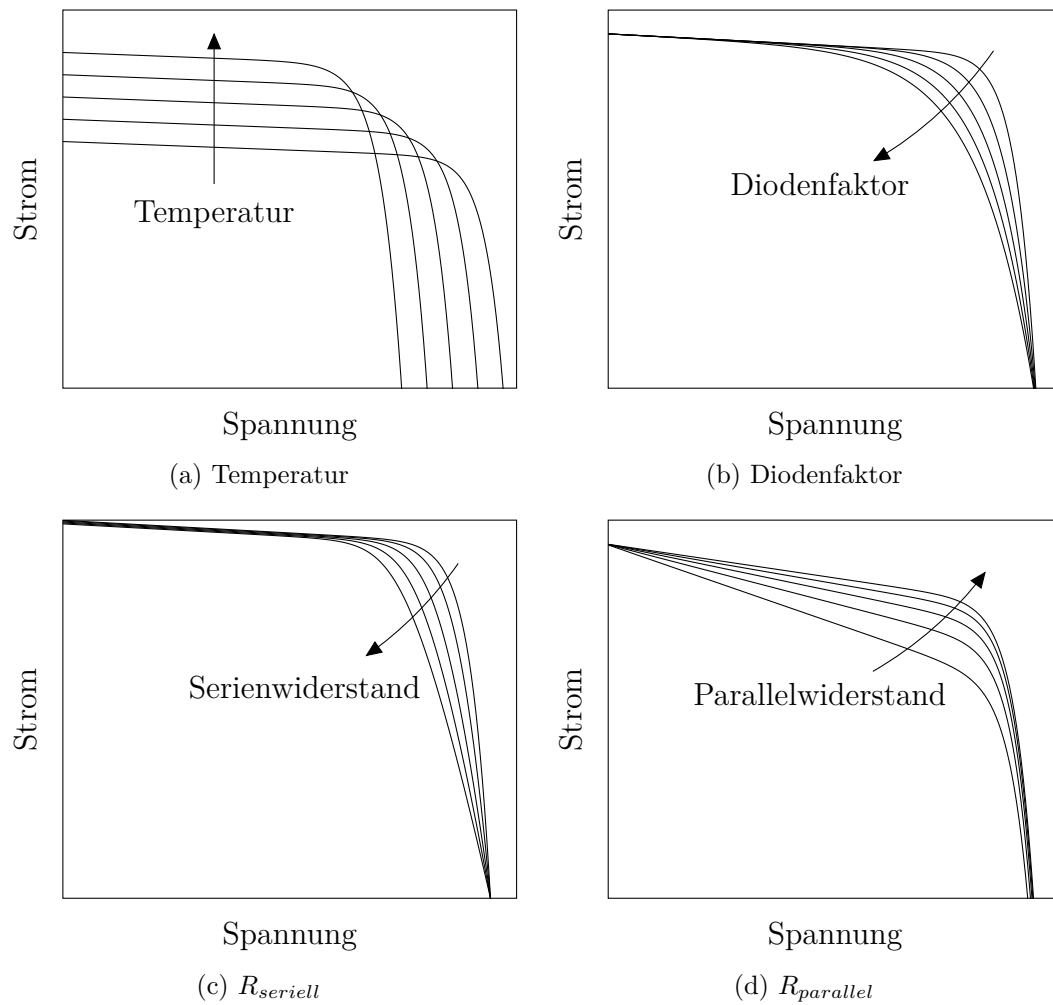


Abbildung A.1: Auswirkungen der Änderung einzelner Parameter auf die Solarzellenkennlinie.

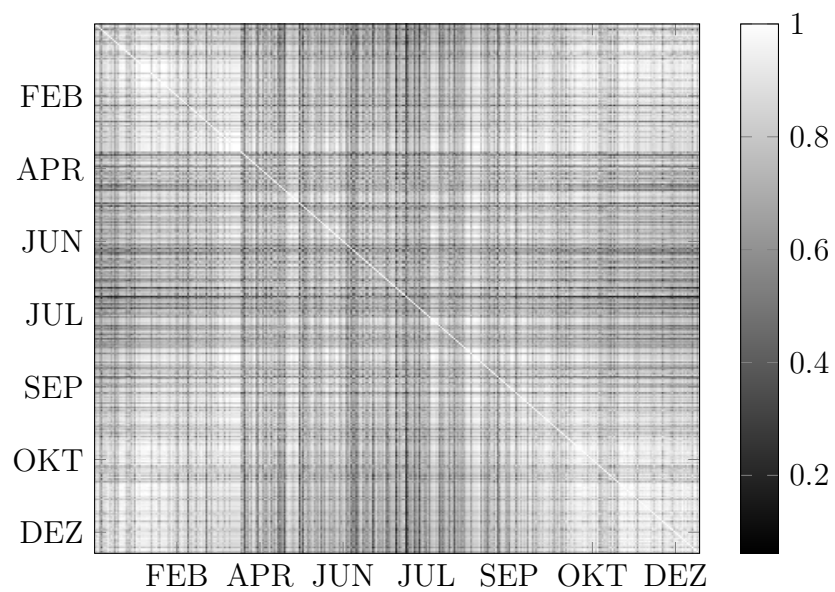


Abbildung A.2: Korrelation der Globalstrahlungskennlinien aus 2012.

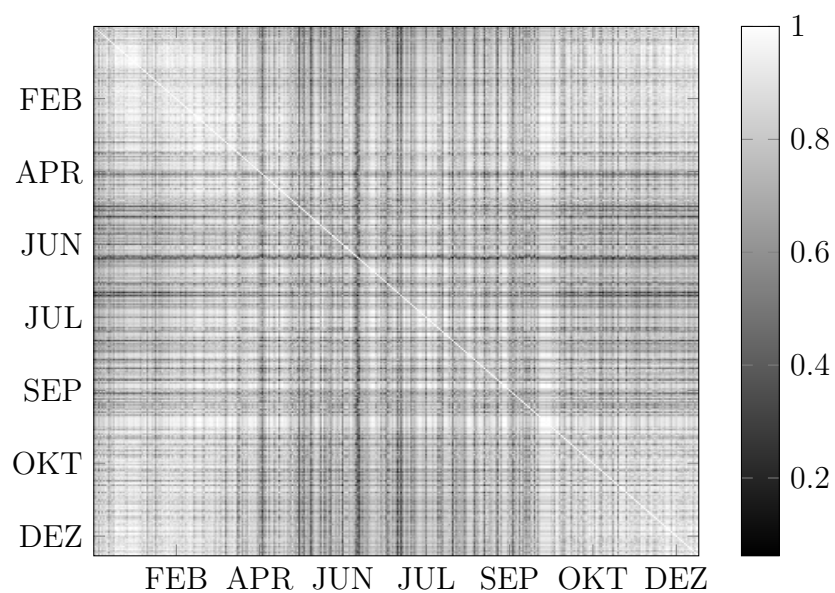


Abbildung A.3: Korrelation der Globalstrahlungskennlinien aus 2013.

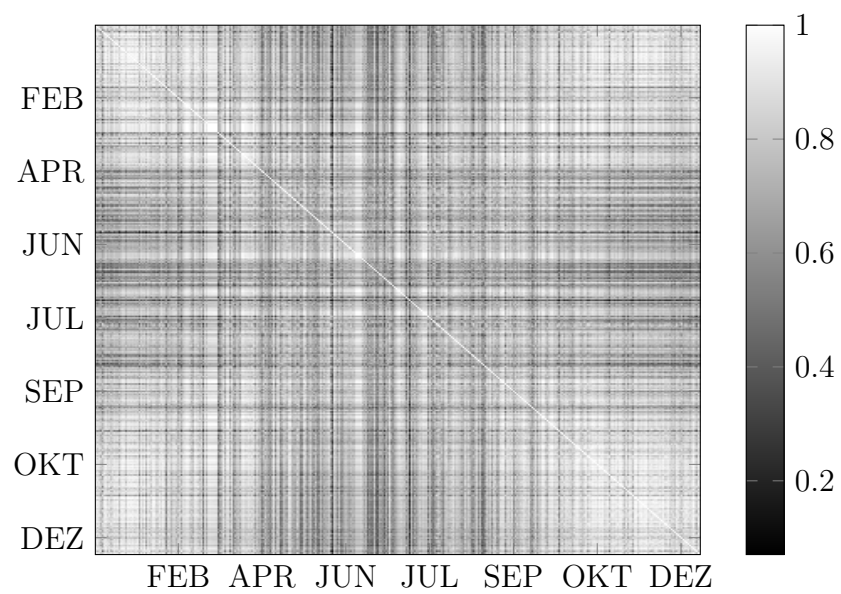


Abbildung A.4: Korrelation der Globalstrahlungskennlinien aus 2014.

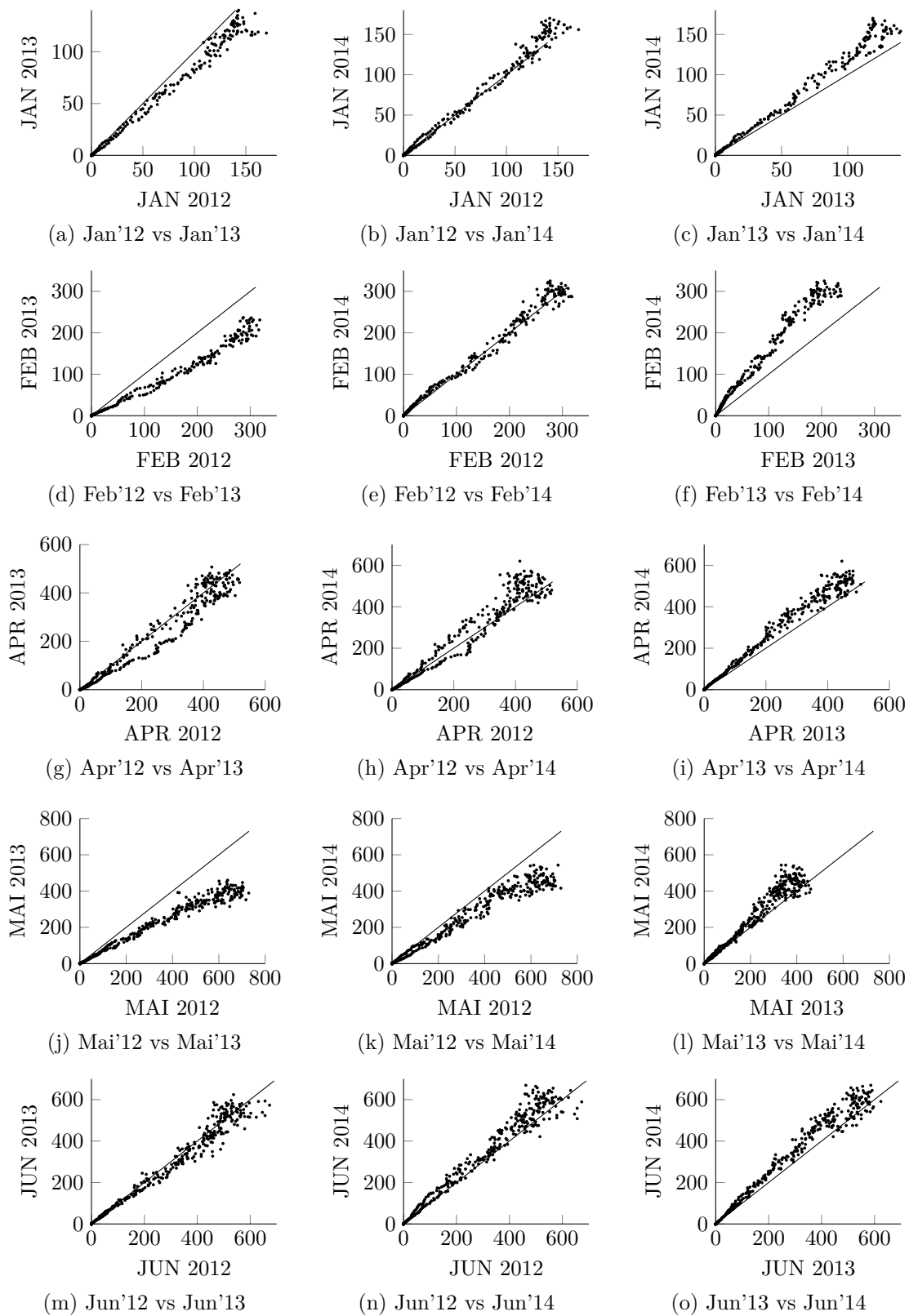


Abbildung A.5: Streudiagramme der Globalstrahlungsdurchschnittswerte des jeweils selben Monats verschiedener Jahre im Vergleich. Januar - Juni.

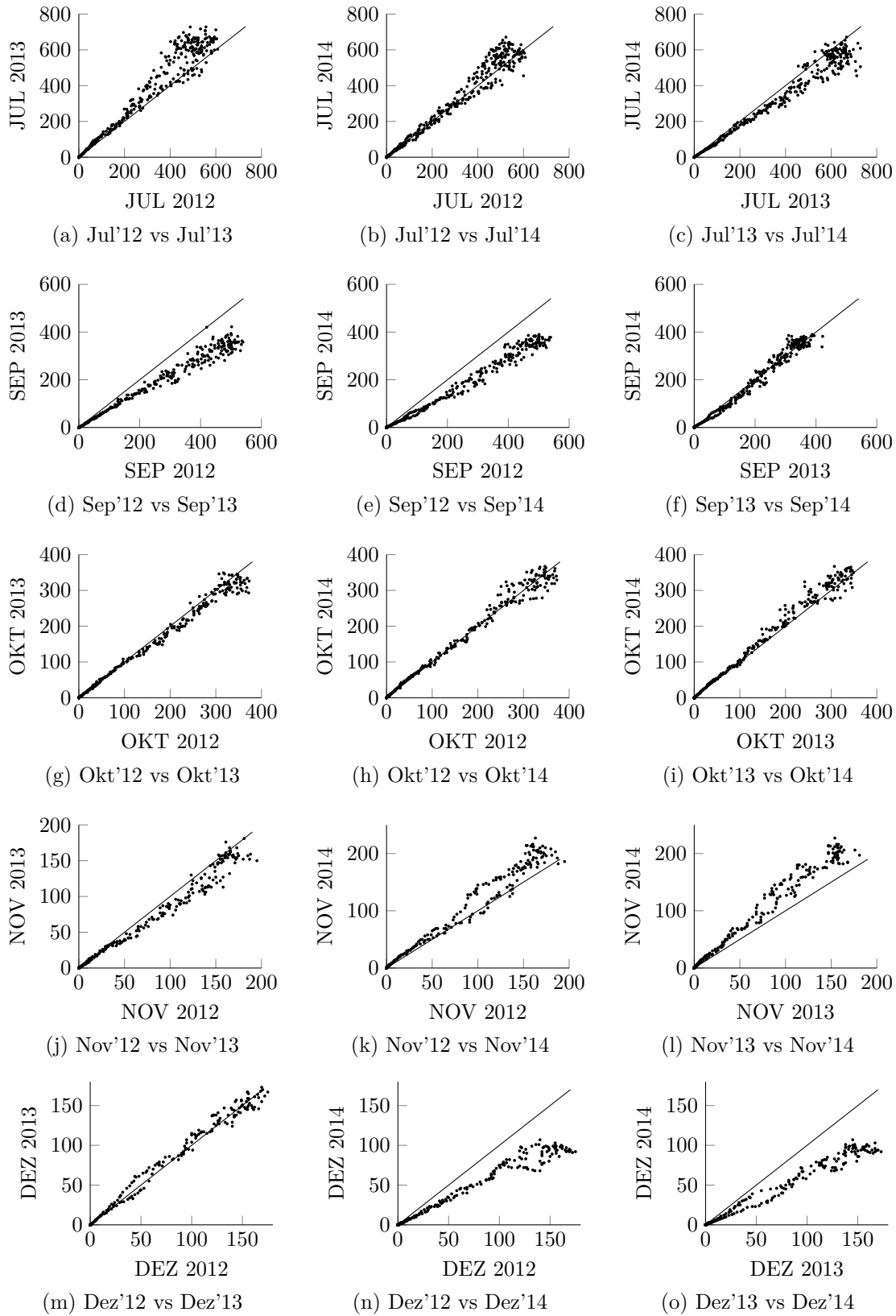


Abbildung A.6: Streudiagramme der Globalstrahlungsdurchschnittswerte des jeweils selben Monats verschiedener Jahre im Vergleich. Juli - Dezember.

B Weitere Tabellen

Tabelle B.1: Eingabeparameter von 54 Clear Sky Modellen, Übersicht aus [82].

Modell	z	m	ρ_g	p	T	U	W	vis	w	u_o	u_n	α_A	β_A	τ_a	T_L	γ
ABCGS	X															
ASHRAE72	X															
ASHRAE05	X								X	X						
Badescu	X	X		X					X							
Bashasu	X	X		X					X				X			
BCLSM	X	X														
Biga	X								X	X						
Bird	X	X	X	X					X			X	X			
CEM	X		X	X										X		
Chandra	X								X						X	
CLS	X	X	X	X					X	X						
CPCR2	X		X	X								X	X			X
Dognio	X	X		X											X	
DPPLT	X															
ESRA1	X	X		X											X	
ESRA2	X	X		X											X	
ESRA3	X	X		X											X	
ESRA4	X	X		X											X	
HLJ	X															
HS	X															
Ideria	X	X		X					X			X	X			
Ineichen	X			X					X					X		
IqbalA	X	X	X	X	X				X	X		X	X			
IqbalB	X	X	X	X	X				X	X			X			
IqbalC	X	X	X	X	X				X	X		X	X			
Janjai	X	X		X					X	X		X	X			
Josefs	X	X	X	X					X							

Fortsetzung auf der nächsten Seite

54 Clear Sky Modelle [82] - Fortsetzung																
Modell	z	m	ρ_g	p	T	U	W	vis	w	u_o	u_n	α_A	β_A	τ_a	T_L	γ
KASM	X	X		X					X							
Kasten	X	X		X											X	
King	X	X	X	X					X				X			
KZHW	X				X	X	X									
MAC	X		X	X	X				X							
Machler	X			X				X	X							
METSTAT	X	X	X	X					X	X				X		
MRM4	X	X		X					X	X						
MRM5	X	X	X	X					X	X			X			
Nijego	X	X		X	X				X	X		X	X			
NRCC	X			X		X		X	X							
Paltri	X															
Paulescu	X	X		X					X	X			X			
Perrin	X	X		X					X	X			X			
PR	X	X	X	X					X	X			X			
PSIM	X		X	X					X				X			
REST250	X		X	X					X	X	X	X	X			X
REST281	X		X	X					X	X	X	X	X			X
Rodger	X			X					X					X		
RSC	X	X	X	X					X				X			
Santa	X	X	X	X					X	X						
Schulz	X															
Sharma	X															
Watt	X	X	X	X					X	X		X	X			
WKB	X	X		X				X								
Yang	X	X		X					X	X			X			
Zhang	X				X	X										

	$\varnothing$	σ	Median	Min	Max
Januar '12	0,817	0,103	0,834	0,483	0,998
Januar '13	0,862	0,082	0,872	0,582	0,994
Februar '12	0,865	0,102	0,885	0,417	0,997
Februar '13	0,875	0,065	0,886	0,633	0,981
März '12	0,842	0,128	0,886	0,380	1,000
März '13	0,877	0,080	0,898	0,578	1,000
April '12	0,736	0,119	0,747	0,354	0,979
April '13	0,797	0,111	0,812	0,439	0,987
Mai '12	0,758	0,125	0,769	0,211	0,996
Mai '13	0,714	0,117	0,728	0,378	0,993
Juni '12	0,696	0,120	0,708	0,230	0,935
Juni '13	0,729	0,135	0,747	0,143	0,997
Juli '12	0,684	0,130	0,693	0,197	0,990
Juli '13	0,775	0,123	0,796	0,335	1,000
August '12	0,778	0,107	0,780	0,431	0,999
August '13	0,775	0,105	0,788	0,355	0,993
September '12	0,804	0,120	0,828	0,340	0,992
September '13	0,742	0,126	0,753	0,315	1,000
Oktober '12	0,862	0,079	0,877	0,587	0,999
Oktober '13	0,824	0,092	0,837	0,479	0,999
November '12	0,852	0,096	0,860	0,478	1,000
November '13	0,823	0,108	0,851	0,292	0,982
Dezember '12	0,878	0,068	0,890	0,549	0,988
Dezember '13	0,872	0,065	0,879	0,627	1,000

Tabelle B.2: Übersicht der Korrelationswerte der Jahre 2012 - 2014 miteinander. Angegeben sind die Korrelationen zwischen den jeweiligen Monaten der drei Jahre sowie, für den Vergleich, innerhalb eines Monats eines Jahres. Nachtrag zu Tabelle 5.2.

Scientific Reports on Measurement and Sensor Technology

(1) Bouchaala, Dhouha (2016)

Investigation of Current Excitation for Personal Health and Biological Tissues Monitoring

ISBN 978-3-941003-96-9

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-204801>

(2) Heidary Dastjerdi, Maral (2016)

Ein Beitrag zur Verbesserung der Eigenschaften magnetisch-induktiver Tastspulen

ISBN 978-3-944640-98-3

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-207628>

(3) Guermazi, Mahdi (2016)

In-Vitro Biological Tissue State Monitoring based on Impedance Spectroscopy

ISBN 978-3-96100-003-6

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-206710>

(4) Viehweger, Christian (2017)

Modellbasiertes Energiemanagement für die intelligente Steuerung solarversorgter drahtloser Sensorsysteme

ISBN 978-3-96100-022-7

Volltext: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-224040>