

VERTEILTE MESSUNG VON  
PHOTOVOLTAISCHER ENERGIE FÜR  
SENSORNETZE

SEMESTERARBEIT

VON

GIOVANNI SABATO

GEBOREN AM 31. AUGUST 1985 IN AFFOLTERN A.A.

24. SEPTEMBER 2007 BIS 29. FEBRUAR 2008

BETREUER: CLEMENS MOSER  
PROFESSOR: PROF. DR. LOTHAR THIELE

ETH ZÜRICH  
DEPARTEMENT INFORMATIONSTECHNOLOGIE UND  
ELEKTROTECHNIK

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Fragestellung und Zielsetzung</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Vorgehen</b>	<b>8</b>
3.1	Bestimmung der generierten Leistung einer Solarzelle . . . . .	8
3.2	Wahl der Solarzelle . . . . .	10
3.3	Erfassungsweise der Leerlaufspannung . . . . .	14
3.4	Bestimmung der Leistungskurve der Solarzelle . . . . .	15
3.5	Einfluss der Plastiksichten der Solarzelle und der Messbox auf die maximale Leistung . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Verteilte Messung</b>	<b>22</b>
4.1	Harvester . . . . .	22
4.2	Implementierung der Datenerfassung mehrerer Sensoren dessel- ben Moduls . . . . .	23
4.3	Datenerfassung der an der Netzwerksenke ankommenden Nach- richten . . . . .	25
4.4	Platzierung der Sensormodule im ETZ G-Stock . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>32</b>
5.1	Ermittelte Leistung der Sensorknoten . . . . .	32
5.2	Sensornetzwerk auf der ETZ G-Etage . . . . .	37
5.3	Verlauf der Versorgungsspannungen . . . . .	38
5.4	Zeitlicher Anteil eines Tages mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung	39
5.5	Überblick der maximal erzeugten Energie über die Zeit . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>48</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Ermittelte maximale Leistung für Sensorknoten ohne Solarzelle innerhalb des ETZ-Gebäudes</b>	<b>54</b>
<b>B</b>	<b>Auflistung der ermittelten Werte bei Messungen an der Sonne</b>	<b>55</b>
<b>C</b>	<b>Auflistung der ermittelten Werte bei Messungen an der Tisch- lampe mit äusserer Plastiksicht der Messbox</b>	<b>56</b>

**D Auflistung der ermittelten Werte bei Messungen an der Tisch-  
lampe ohne äussere Plastikschicht der Messbox 57**



# Kapitel 1

## Einleitung

Sensor-Netzwerke finden heutzutage Anwendung in den verschiedensten Gebieten der Forschung und Wissenschaft. Eine vielseitig benutzte Anwendung ist die Überwachung natürlicher Phänomene wie Vulkanismus, Erdbeben oder Tsunamis. Zur Aufzeichnung vulkanischer Aktivität werden zum Beispiel Sensorknoten eingesetzt, die mit infrasonischen Mikrofonen und Seismometern ausgestattet sind. Sensor-Netzwerke werden auch zur Überwachung der klimatischen Bedingungen empfindlicher ökologischer Nischen oder Gebiete (z.B. Berggebiete) eingesetzt, um mögliche Einflüsse der globalen Erwärmung zu verstehen und eventuell voraussagen. Weitere Anwendungen sind im Bereich des intelligenten Wohnens zu finden, wo Sensor-Netzwerke zur automatischen Regelung der Beleuchtung und der Heizung dienen. Zudem werden solche Netzwerke zur Brandmeldung und Einbruchüberwachung eingesetzt.

Um eine sinnvolle Benützung eines Sensor-Netzwerks zu ermöglichen, ist für die meisten Anwendungen eine lange Lebenszeit aller einzelnen Sensorknoten unabdingbar, insbesondere wenn das Ersetzen der Energieversorgung nicht möglich oder zu gefährlich wäre. Zum Lösen dieses Problems stellt aber photovoltaische Energiewandlung eine zentrale Technologie dar. Das Ziel ist, vorhandene Energiequellen wie Licht zur Versorgung des gesamten Netzwerks optimal zu nutzen. Lichtquellen sind bekanntlich stochastischer Natur und können dabei sowohl zeitlich (z.B. wegen dem Tag-Nacht-Rythmus oder durch wetterbedingte Sonneneinstrahlung) als auch räumlich (z.B. durch den wandernden Schatten eines Gebäudes oder eines Baumes) variieren. Somit ist beim Aufbau eines durch Lichtquellen versorgten Sensor-Netzwerks mit allfälligen zeitlichen oder räumlichen Energieengpässen zu rechnen, wobei einzelne Datenpakete verloren gehen oder sogar Sensorknoten ausfallen könnten.

Diese Problematik lässt sich durch energie-adaptive Algorithmen überwinden, die den Datenfluss im gesamten Netzwerk energieeffizient steuern, indem die an energetisch ungünstigeren Stellen liegenden Sensorknoten nicht unnötig mit dem Weiterleiten von Daten anderer Knoten belastet oder sogar kurzzeitig ausgeschaltet werden. Es ist demzufolge ein schnelleres Wiederaufladen dieser Sensorknoten möglich und das Netzwerk kann ohne Datenverluste oder Ausfälle aufrecht erhalten werden.

Für die Entwicklung solcher energie-adaptiven Algorithmen ist somit ein räumlich-zeitliches Energie-Profil der vorhandenen photovoltaischen Energie von grosser Bedeutung.

## Kapitel 2

# Fragestellung und Zielsetzung

Das Ziel dieser Semesterarbeit ist, ein räumlich-zeitliches Energie-Profil der G-Etage des ETZ-Gebäudes zu erstellen. Zu diesem Zweck soll ein Sensor-Netzwerk aufgebaut werden, das an 10 bis 15 ausgewählten Stellen Leistungswerte während einer Messperiode von mindestens drei Wochen möglichst zeitsynchron erfasst.

Die Begriffe photovoltaische Zelle und Solarzelle sind in dieser Semesterarbeit gleichbedeutend. Die für eine Solarzelle charakteristische Strom-Spannung-Kennlinie ist in Abbildung 2.1 [1] ersichtlich.

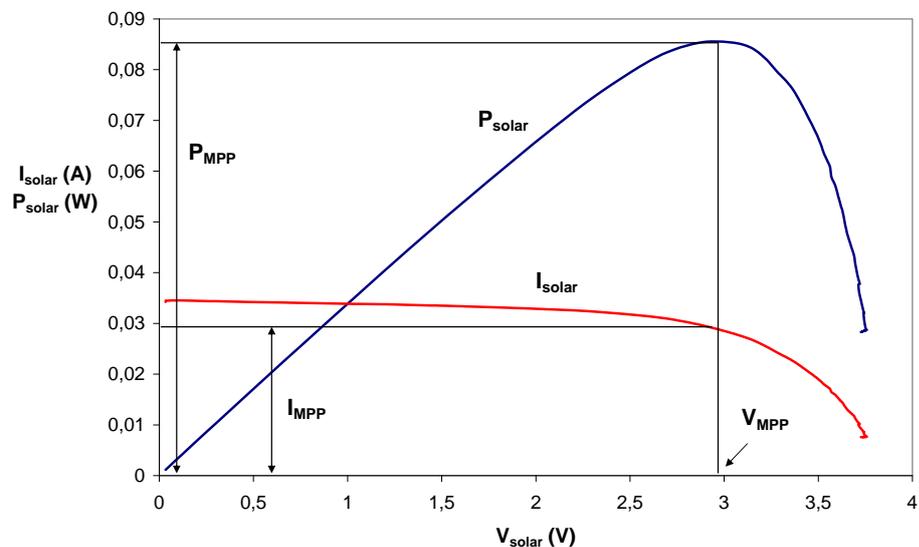


Abbildung 2.1: Charakteristischer Verlauf der Strom-Spannung-Kennlinie einer Solarzelle [1]

Man erkennt, dass die generierte Leistung einer Solarzelle sehr stark in Funktion der zugehörigen Spannung variiert. Der Arbeitspunkt, bei dem die Solarzelle die maximale Leistung generieren kann wird mit Maximum Power Point (MPP) bezeichnet. Der Strom, die Spannung und die Leistung im MPP werden rsp. mit  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  und  $P_{MPP}$  bezeichnet.

Natürlicherweise ist man daran interessiert, Solarzellen beim MPP zu betreiben, um verfügbare Lichtquellen optimal nutzen zu können. Dazu gibt es verschiedene Verfahren, so genannte *Maximum Power Point Tracking Techniques* [2], die eine betrachtete Solarzelle automatisch in ihrem geschätzten MPP steuern. In dieser Semesterarbeit wird somit angenommen, dass jede verwendete Solarzelle sich dauernd im MPP befindet und demzufolge den Leistungswert  $P_{MPP}$  generiert.

Aus den Ergebnissen dieser verteilten Messung soll somit an solchen ausgewählten Stellen die potentiell vorhandene Energie bei verschiedenen Belichtungen (indoor/outdoor) und unterschiedlichen Temperaturen ersichtlich sein. Das Betrachten der erfassten Leistungswerte über eine längere Zeitperiode soll zusätzlich eine erste Abschätzung der Variationen der vorhandenen Energie und möglicher Energieengpässe ermöglichen, die einerseits wetterbedingt, andererseits auf Ferienperioden zurück zu führen sind. Zudem soll angedeutet werden, wo es sich auf der G-Etage eher lohnen würde, Solarzellen zur Energieumwandlung zu platzieren.

# Kapitel 3

## Vorgehen

### 3.1 Bestimmung der generierten Leistung einer Solarzelle

Die maximale Leistung einer Solarzelle bei gegebenen Umgebungsbedingungen entspricht dem Produkt der Spannung und des Stroms beim Maximum Power Point (MPP). In dieser Semesterarbeit soll die maximale Leistung mit Hilfe von den auf Tmote Sky's [9] verfügbaren Sensoren ermittelt werden. Durch diese Sensormodule ist es u.a. möglich, Temperatur in °C und Lichtintensität in Lux zu messen. Zudem lassen sich zu messende Spannungswerte durch Analog Digital Converter (ADC) bestimmen.

Ein erster Ansatz könnte sein, die maximale Leistung der Solarzelle anhand der gemessenen Temperatur und Lichtintensität zu schätzen. Man versucht also, das Verhalten der Solarzelle mit diesen beiden Grössen zu charakterisieren. Betrachtet man Abbildung 3.1, so erkennt man, dass die maximale Leistung einer Solarzelle nicht gut genug mit den zugehörigen Lichtwerten in Lux korrelierbar ist. Beispielsweise sind bei 1400 und 1450 Lux zwei Messpunkte eingetragen, die einen wesentlichen Unterschied bei der maximale Leistung von fast 0.2 mW aufweisen. Es lässt sich also nicht auf einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der maximalen Leistung und den ermittelten Lichtwerten schliessen. Deshalb wurde dieser Ansatz nicht weiter in dieser Semesterarbeit berücksichtigt.

Als zweiter Ansatz könnte man Grössen wie Leerlaufspannung und/oder Kurzschlussstrom messen, um anhand schon bestehender oder selbst generierten U-I-Kennlinien die maximale Leistung der verwendeten Solarzelle zu bestimmen. Wie in Abbildung 3.2 [7] gezeigt, wäre es somit möglich, die 'richtige' U-I-Kennlinie anhand der gemessenen Leerlaufspannung und des Kurzschlussstromes eindeutig auszuwählen. Auf jeder eingezeichneten Kurve in Abbildung 3.2 ist die Stelle beim Erreichen des MMP's rot markiert. Durch multiplizieren der bei diesem Punkt zugehörigen Strom- und Spannungswerte ergibt sich somit die gesuchte maximale Leistung.

Leider ist es aber nicht möglich an der gleichen Solarzelle gleichzeitig Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom zu messen, ohne ein aktives Element wie ein steuerbarer Schalter wie in Abbildung 3.3 zu verwenden, der periodisch und zeitsynchron mit dem Sensor Modul arbeiten würde. Somit lässt sich der zuletzt erwähnte Ansatz nicht anwenden.

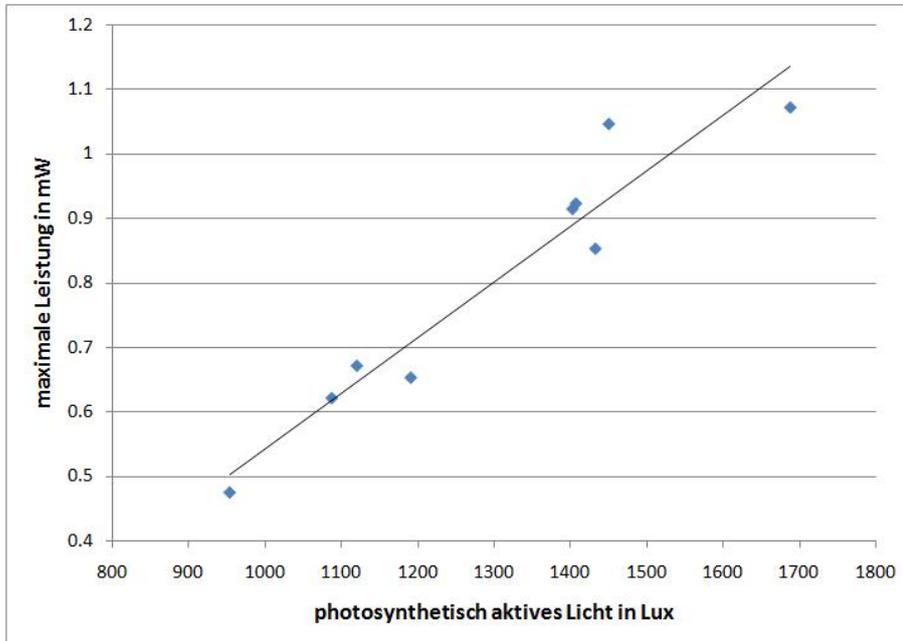


Abbildung 3.1: Korrelation der maximalen Leistung mit dem photosynthetisch aktiven Licht. Die Messpunkte stammen aus Messungen an einer Lampe. Die Lichtwerte in Lux wurden mit einem Sensor Modul ermittelt.

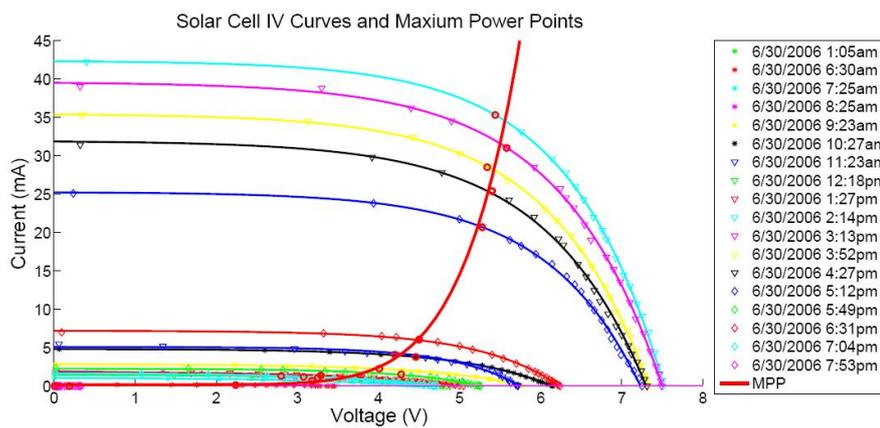


Abbildung 3.2: Durch Sonnenbestrahlung bedingte Sequenz von U-I-Kennlinien einer Solarzelle. Je höher die Sonnenlichtintensität ist, desto weiter oben liegen die entsprechenden U-I-Kennlinien [7].

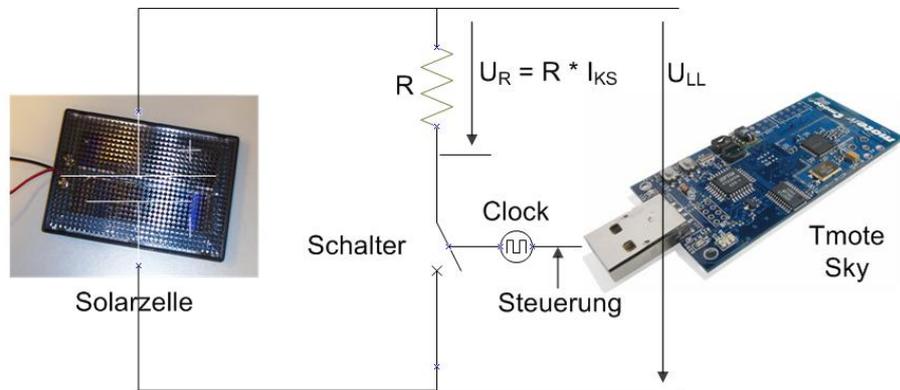


Abbildung 3.3: Mögliches Schaltungsbild mit einem steuerbaren Schalter, der zeitsynchron mit dem Tmote Sky arbeitet. Dabei wird bei offenem Schalter die Leerlaufspannung, bei geschlossenem Schalter den Kurzschlussstrom periodisch gemessen

Stattdessen kann man versuchen, nur die Leerlaufspannung zu messen und somit eine möglichst gute Korrelation mit der maximalen Leistung zu bestimmen. Zeichnet man diesmal die Messpunkte wie in Abbildung 3.4 mit den Leistungswerten bezüglich ihrer zugehörigen Leerlaufspannung (anstatt der Lichtwerte) auf, so weist die Leerlaufspannung eine wesentlich bessere Korrelation mit der maximalen Leistung auf, was in Abbildung 3.4 (rechts) ersichtlich ist. Demzufolge wird in dieser Semesterarbeit die Leerlaufspannung zur Schätzung der maximalen Leistung verwendet.

Diese Schätzung für die maximal generierte Leistung ist überall dort anzuwenden, wo nichtstationäre Umweltbedingungen anzunehmen sind. Dies trifft beispielsweise zu, wenn man die Solarzelle hinter Bürofenster oder ausserhalb des ETZ-Gebäudes positioniert, wo Lichtintensität und Temperatur unter Beeinflussung der Wetterbedingungen und Sonneneinstrahlung stark variieren können. Anders ist es, wenn man die Solarzelle an einem Platz mit annäherungsweise konstanter Temperatur und Beleuchtung stellt, der genug weit weg von Sonnenlicht und weiteren Umweltfaktoren ist. In diesem Fall reicht es aus, die maximale Leistung der Solarzelle bei den jeweiligen Lichtbedingungen direkt mithilfe des Agilent Multimeters zu bestimmen. Über die Werte der Lichtsensoren vom Tmote Sky's kann man beobachten, ob die Deckenbeleuchtung an oder aus ist, was dann bedeuten würde, dass keine Leistung generiert wird. Ansonsten wird die bereits ermittelte maximale Leistung als konstant angenommen (Siehe Anhang A).

### 3.2 Wahl der Solarzelle

In den Abbildungen 3.5 bis 3.7 sind die in dieser Semesterarbeit betrachteten Solarzellen dargestellt. Sie sind verschiedener Dimensionen und Charakteristiken ([3], [4] und [5]). Gemäss der Zielsetzung ist einerseits diejenige Solarzelle zu

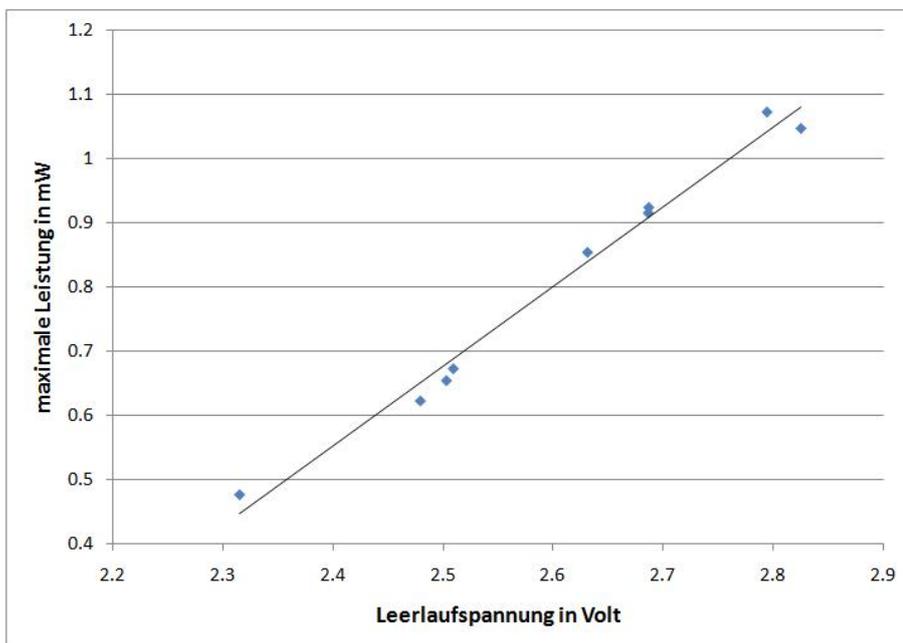


Abbildung 3.4: Korrelation der maximalen Leistung mit der zugehörigen Leerlaufspannung. Die Messpunkte stammen aus den gleichen Messungen an einer Lampe wie in Abbildung 3.1. Die Lichtwerte in Lux wurden ebenfalls mit einem Sensor Modul ermittelt.

wählen, die eine möglichst hohe Leistung bei gegebenen Umgebungsbedingungen generieren kann. Andererseits muss überprüft werden, welche Solarzelle sich für die Bestimmung der maximalen Leistung über die entsprechende Leerlaufspannung am Besten eignet. Dazu sind die jeweiligen maximalen Leistungswerten der drei Solarzellen wie bei folgender Versuchsanordnung beschrieben zu ermitteln und miteinander zu vergleichen.

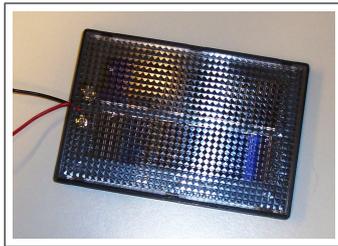


Abbildung 3.5:  
Zelle1 [3]



Abbildung 3.6:  
Zelle2 [4]



Abbildung 3.7:  
Zelle3 [5]

Jede Solarzelle wurde mit einer Tischlampe in einem Abstand von 10cm senkrecht von oben belichtet. Die Lichtintensität der Tischlampe kann mittels eines Drehreglers gesteuert werden. Für die Durchführung dieses Versuchs wurde der kontinuierliche Bereich des Drehreglers in sechs äquidistante, diskrete Stufen aufgeteilt. Um die jeweils maximale Leistung dieser Solarzellen ermitteln und vergleichen zu können ist jeweils deren gesamte U-I-Charakteristik bei gegebener Versuchsanordnung und Umweltbedingungen aufzuzeichnen. Zu diesem Zweck und für alle weiteren Messungen dieser Art in dieser Semesterarbeit wird ein Agilent Multimeter [6] wie in Abbildung 3.8 dargestellt eingesetzt.

Die Schaltung in Abbildung 3.8 besteht aus der jeweiligen, als Spannungsquelle modellierten Solarzelle mit einem in Serie geschalteten Widerstand und Potentiometer. Das Agilent Multimeter misst die Spannung der Solarzelle  $U_{Solar}$  und des Widerstands  $U_R$ . Durch Anwenden des ohmschen Gesetzes  $U = R \times I$  lässt sich der Strom  $I_{Solar}$  im Arbeitspunkt der Solarzelle bestimmen:  $I_{Solar} = \frac{U_R}{0,5\Omega}$ . Das Potentiometer dient dazu, den Arbeitspunkt der angeschlossenen Solarzelle zu verändern und somit deren Leistungskurve nachzufahren. Durch die vom Agilent Multimeter periodisch gemessenen Spannungswerte ist es möglich, die maximale Leistung, d.h. die entsprechende Leistung beim Maximum Power Point (MPP), zu bestimmen. Die erfassten Leistungswerte sind in Abbildung 3.9 in Funktion der gemessenen Leerlaufspannungen für jede Solarzelle ersichtlich.

Jede eingezeichnete Kurve beschreibt das Verhalten einer der drei Solarzellen beim variieren der Lichtintensität. Die sechs diskreten Messpunkte einer Kurve entsprechen jeweils der ermittelten maximalen Leistung mit zugehöriger Leerlaufspannung bei einer der sechs in steigender Ordnung eingestellten Stufen des Radreglers. Wie erwartet, je höher die eingestellte Stufe der Lichtintensität, desto höher die maximale Leistung. Bei der höchsten Stufe erwärmt sich aber die Solarzelle derart, das die Effizienz der Solarzelle abnimmt, was die leichte

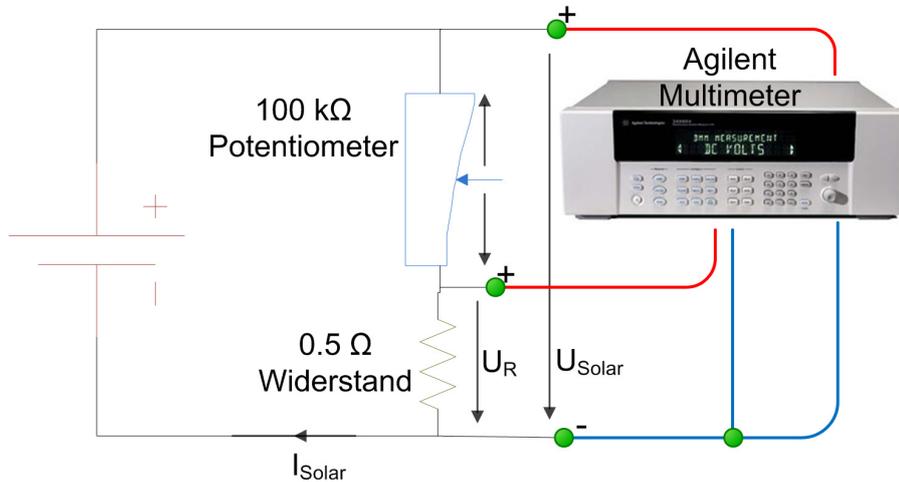


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der Verwendung eines Agilent Multimeters zur Bestimmung der maximal erbrachten Leistung einer Solarzelle unter gegebenen Umweltbedingungen

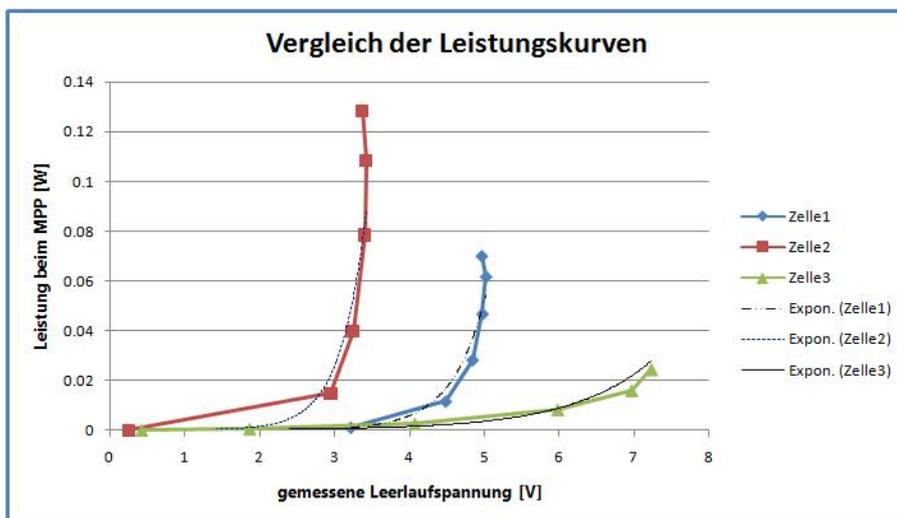


Abbildung 3.9: Leistungskurven der erfassten maximalen Leistungswerte in Funktion der zugehörigen Leerlaufspannung. Für jede Kurve ist zusätzlich der mögliche exponentielle Verlauf angedeutet.

Krümmung nach links der einzelnen Kurvenspitzen bewirkt. Dieser Effekt ist für die eigentliche Aussage der Abbildung nicht relevant. Es zeigt sich aber, dass die Messungen so schnell wie möglich durchzuführen sind, um von einer näherungsweise konstanten Umgebungstemperatur während einer Messung ausgehen zu dürfen.

Offensichtlich ist man für die weitere Verwendung in dieser Semesterarbeit an einer Solarzelle interessiert, die eine möglichst hohe Leistung generieren kann. Die Leistungskurve von Zelle3 ist aber zu flach und somit nicht vielversprechend. Hingegen scheint die Zelle2 eine optimale Wahl zu sein, da ihre Leistungskurve immer steiler wird. Dies bringt aber den Nachteil mit sich, dass wenn man (im steilen Bereich der Leistungskurve) die maximale Leistung in Funktion der Leerlaufspannung bestimmen möchte nur ein kleiner Messfehler ausreicht, um zu einer sehr grossen Fehlschätzung der zugehörigen Leistung zu führen. Da die Grössenordnung des Fehlers beim Messen der Leerlaufspannung einer Solarzelle unabhängig von deren Charakteristik ist, ist die Leistungskurve von Zelle1 ein guter Kompromiss zwischen den obig erwähnten Fällen. Ausserdem sind die generierten maximalen Leistungen von Zelle1 und Zelle2 bei den unteren drei Stufen vergleichbar. Es ist also naheliegend, Zelle1 aus Abbildung 3.5 für die Zwecke dieser Semesterarbeit zu verwenden.

### 3.3 Erfassungsweise der Leerlaufspannung

Nachdem man die Leistungskurve der gewählten Solarzelle bestimmt hat, muss der Frage nachgegangen werden, wie man nun die zur Ermittlung der maximalen Leistung notwendige Leerlaufspannung konkret erfassen möchte. Die verwendeten Sensor Module besitzen ADC Wandler, die analoge Spannungswerte in digitale umwandeln können. Dazu steht eine Diskretisierungsgenauigkeit von 12 bit zur Verfügung mit einem Wertebereich von 0 bis maximal 4095, was einer maximal messbaren Spannung von 1.5 Volt entspricht. Abweichungen bezüglich der Diskretisierung dürften im Regelfall unterhalb von zwei Millivolt sein. Das Problem ist aber, dass die Solarzelle bei den durchgeführten Messungen einen Wertebereich von 0 bis über 5 Volt aufgewiesen hat und somit nicht mit demjenigen Wertebereich des Sensor Moduls übereinstimmt. Um die beiden Wertebereiche wieder aneinander anzupassen, wird eine Spannungsteilerschaltung wie in Abbildung 3.10 dargestellt benützt.

Die Schaltung besteht aus der Solarzelle und eines in Serie geschalteten Potentiometers, bei dem nur ein bestimmtes Verhältnis der über ihm abfallenden Spannung durch das Tmote Sky abgemessen wird. Es ist zu beachten, dass die ermittelte Spannung nicht der tatsächlichen Leerlaufspannung der Solarzelle entspricht, sondern wegen des durch das Potentiometer fliessenden Stroms davon abweicht. Um diese Ungenauigkeit in akzeptablen Grenzen zu halten, sind  $1\text{M}\Omega$  Potentiometer mit maximal  $30\text{k}\Omega$  Abweichung vom Nennwert in Einsatz. Da die Solarzelle eine Spannung von unterhalb 10 Volt generiert, ist somit der Strom durch das Potentiometer in der Grössenordnung von  $10\mu\text{A}$ . Der Widerstand aller eingesetzten Potentiometer wurde gemessen und ist bei einem Spannungsteilverhältnis von einem Fünftel eingestellt worden. Der Spannungsabgriff eines Potentiometers mit  $970\text{k}\Omega$  Widerstand ist demzufolge bei  $194\text{k}\Omega$  auf  $0.2\text{k}\Omega$  genau verstellt worden. Somit müssen die von den Sensor Modulen ermittelten Spannungswerte noch um einen Faktor 5 skaliert werden, damit man wieder die

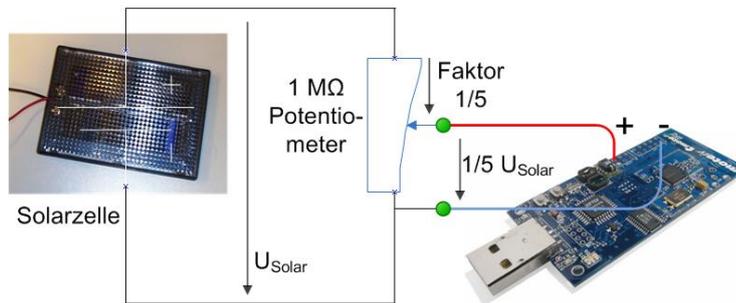


Abbildung 3.10: Ein Potentiometer wird eingesetzt, um die Wertebereiche der Solarzelle und des Tmote Sky's anzupassen

eigentliche Spannung erhält.

Es ist zusätzlich zu hinterfragen, wie sich das Spannungsverhältnis bei sich ändernder Temperatur verhält. Widerstände sind bekanntlich temperaturabhängig. In dieser Semesterarbeit wurde dieser Frage nicht experimentell nachgegangen. Es wurde aber angenommen, dass der Widerstand  $R$  eines Potentiometers sich gleichmässig über dessen gesamte Länge in Funktion der Temperatur  $t$  verändert, also  $R(t) = f(t) \times R$  und  $f$  eine gegebene Funktion. Wenn man den Widerstand bis zum Spannungsabgriff mit  $R_a$  bezeichnet und  $R = R_a + R_b$ , so ist das Spannungsteilerverhältnis des Potentiometers  $\frac{R_a(t)}{R(t)} = \frac{f(t) \times R_a}{f(t) \times R} = \frac{R_a}{R}$  temperaturinvariant.

### 3.4 Bestimmung der Leistungskurve der Solarzelle

Wie im obigen Abschnitt erläutert, soll die maximal generierte Leistung der Solarzelle anhand der gemessenen Leerlaufspannung bestimmt werden. Gesucht ist also eine Funktion, die möglichst genau die durch mehrere Messungen erfassten Punkten auf der Leistungskurve approximiert. Die Messungen sind an drei Tagen mit jeweils verschiedenen Wetterbedingungen mit Hilfe eines Agilent Multimeters wie in Abbildung 3.8 auf Seite 13 beschrieben durchgeführt worden. Dabei wurde beachtet, dass man an bewölkten bis sehr sonnigen Tagen Messungen durchführen konnte. Die Solarzelle wurde dabei in einer Messbox mit durchsichtiger Plastikschicht eingebettet und bei offenem und geschlossenem Fenster direkt an die Sonne platziert (Siehe Anhang B).

Da die erfassten Punkte auf der Leistungskurve alle im ersten Quadranten liegen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, diese Punkte  $(x_i, y_i)$  mit einer Funktion als  $\tilde{y}_i = f(x_i)$  zu approximieren. Mit Hilfe von Matlab kann man beispielsweise einen linearen Ansatz wie  $f(x) = p_1x + p_0$  bzw. einen polynomialen Ansatz der  $n$ -ten Ordnung wie  $f(x) = p_nx^n + p_{n-1}x^{n-1} + \dots + p_1x + p_0$  wählen und die entsprechenden Koeffizienten  $p_i$  berechnen lassen. Die Ergebnisse sind in Abbildungen 3.11 und 3.12 dargestellt.

Der lineare Ansatz ist aber offensichtlich zu grob. Der polynomiale Ansatz ist bis zur dritten Ordnung sinnvoll, da bei höheren Ordnungen, beispielsweise wie

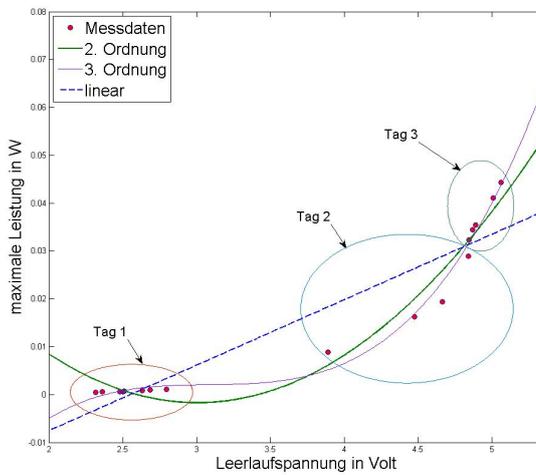


Abbildung 3.11: *polynomiale Ansätze der 1. bis 3. Ordnung*

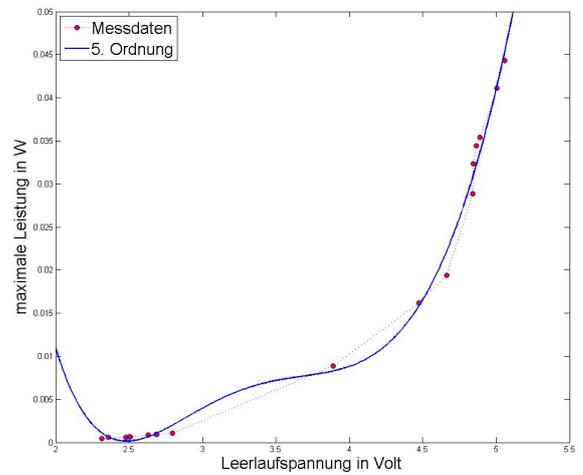


Abbildung 3.12: *polynomialer Ansatz 5. Ordnung*

in Abbildung 3.12, zwar die einzelnen Messpunkte besser approximiert werden, was aber zu grösseren Abweichungen zwischen zwei benachbarten Punkten führt. Deshalb werden die polynomialen Ansätze 4. und 5. Ordnung nicht mehr weiter berücksichtigt.

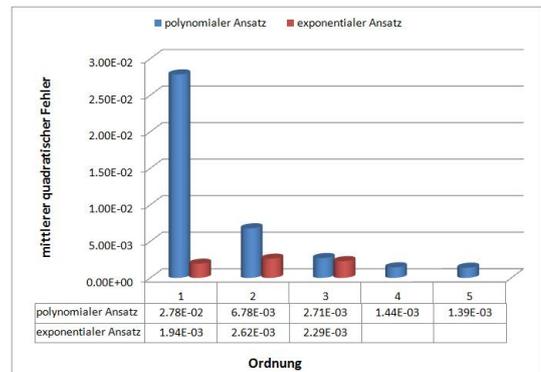
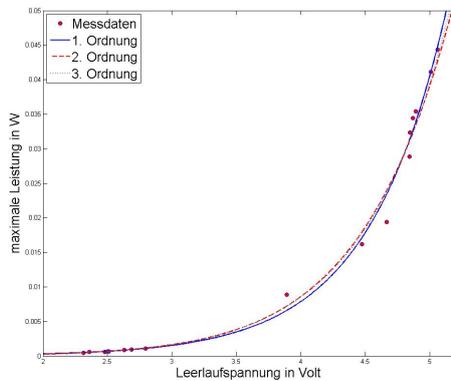


Abbildung 3.13: *Links: exponentiale Ansätze der 1. bis 3. Ordnung. Rechts: Übersicht des mittleren quadratischen Fehlers*

Für die Leistungswerte  $y_i$  wäre ein Funktionsverlauf wie  $f(x_i) = e^{p_1 x_i + p_0}$  durchaus denkbar. Leider stellt Matlab keinen exponentiellen Ansatz zur Verfügung. Dieses Problem kann durch beidseitiges Logarithmieren gelöst werden. Man erhält  $\ln(y_i) = p_1 x_i + p_0$ , was wieder einem polynomialen Ansatz entspricht, der mit Matlab behandelt werden kann. In Abbildung 3.13 sind die Ergebnisse der drei angewendeten exponentiellen Ansätze  $f_n(x_i) = e^{Polynom(x_i, n)}$  für

$n = 1, 2$  und  $3$ , die Ordnung des Polynoms in  $x_i$ , ersichtlich.

Wie in Abbildung 3.13 gezeigt, kann der exponentielle Ansatz erster Ordnung  $f(x_i) = e^{p_1 x_i + p_0}$  die vorgegebenen Punkten am besten approximieren, wobei der mittlere quadratische Fehler der Formel  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2$  entspricht. Der maximale Fehler beträgt bei diesen Messungen 4mW. Somit lautet die durch Matlab ermittelte Formel für die maximale Leistung in Funktion der Leerlaufspannung

$$f(x) = e^{1.6392x - 11.3989},$$

dessen Verlauf in Abbildung 3.14 dargestellt ist.

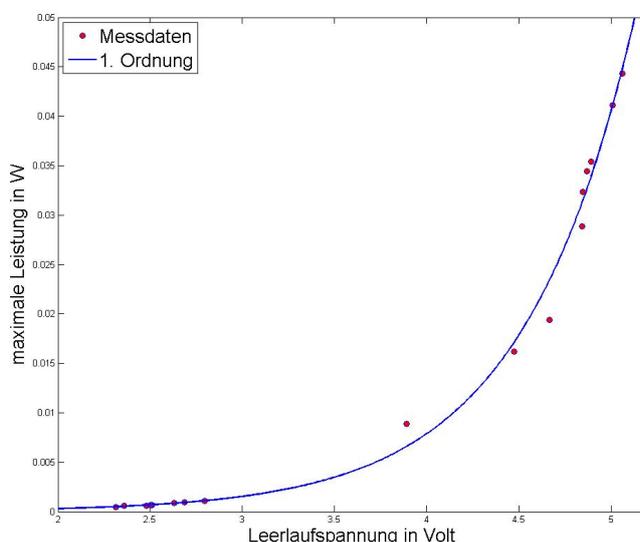


Abbildung 3.14: Verlauf der maximalen Leistung in Funktion der Leerlaufspannung anhand der Formel  $f(x) = e^{1.6392x - 11.3989}$

### 3.5 Einfluss der Plastiksichten der Solarzelle und der Messbox auf die maximale Leistung

Die in dieser Semesterarbeit verwendete Solarzelle hat eine entfernbare, durchsichtige Plastiksicht, die eine texturierte Oberfläche aufweist. Um die ausserhalb des ETZ-Gebäudes plazierten Solarzellen mit zugehörigem Sensor Modul vor störenden Umweltbedingungen wie Wind und Regen zu schützen, werden sie in einer Messbox eingebettet, die über einen durchsichtigen, entfernbaren Plastikdeckel mit glatter Oberfläche verfügt. Es stellt sich nun die Frage, was für einen Einfluss diese zwei verschiedenen Plastiksichten auf die gemessene Maximalleistung haben, wenn die Solarzelle in der Messbox liegt. Man hat also vier verschiedene Möglichkeiten zu untersuchen, je nach dem, ob die eine oder

andere Schicht eingesetzt wird oder nicht.

Dazu sind für jede der vier möglichen Versuchsanordnungen die jeweiligen maximalen Leistungswerte der Solarzelle unter drei Belichtungswinkeln und je im Abstand von 10cm und 20cm von der Lichtquelle ermittelt worden. Als Lichtquelle diente die in Abschnitt 3.2 beschriebene Tischlampe, wobei der Drehregler für alle Messungen bei zwei Drittel von der maximalen Lichtintensität eingestellt wurde. Zusätzlich wurde die Position der Solarzelle innerhalb der Messbox verändert, die entweder am Boden (bottom) oder ganz beim Deckel (top) der Messbox lag, was einen Höhenunterschied von 3 bis 4 cm ausmacht. Die Ergebnisse dieser Reihe von Messungen sind in Abbildungen 3.15 und 3.16 ersichtlich. Dabei sind mit den vier Bezeichnungen 'Beide', 'Zelle', 'Messbox' und 'Ohne' Messungen gemeint, bei der beide, nur diejenige der Solarzelle bzw. der Messbox oder keine der beiden Plastikschichten vorhanden war.

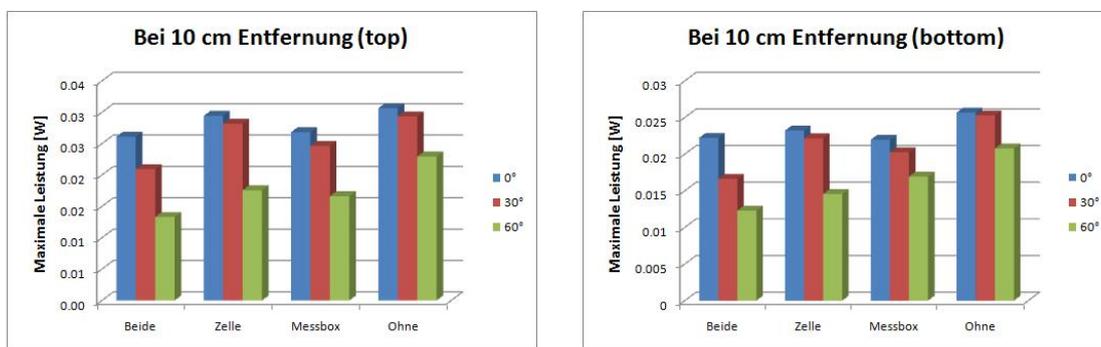


Abbildung 3.15: Messergebnisse bei 10 cm Abstand von der Lichtquelle und unter Belichtungswinkeln von  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  oder  $60^\circ$ , wobei die Solarzelle ganz beim Deckel (links) oder am Boden (rechts) der Messbox positioniert wurde.

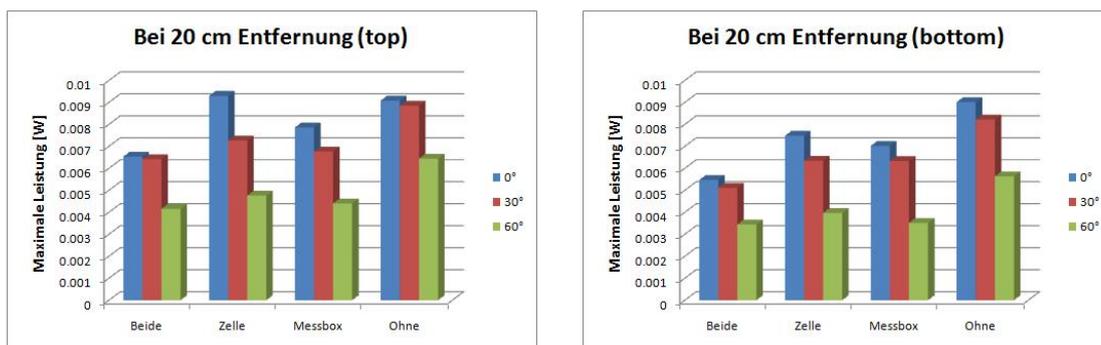


Abbildung 3.16: Messergebnisse bei 20 cm Abstand von der Lichtquelle und unter Belichtungswinkeln von  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  oder  $60^\circ$ , wobei die Solarzelle ganz beim Deckel (links) oder am Boden (rechts) der Messbox positioniert wurde.

Aus den Ergebnissen der Messungen kann man generell entnehmen, dass die erfasste maximale Leistung der Solarzelle mit zunehmendem Belichtungswinkel abnimmt. Zudem ist die maximal generierte Leistung der ganz am Deckel der

Messbox positionierten Solarzelle deutlich höher als die der am Boden liegenden Solarzelle. Deshalb werden die in einer Messbox eingebetteten Solarzellen möglichst alle ganz am Deckel eingerichtet.

Die draussen platzierten Solarzellen müssen zum Schutz in einer Messbox mit zugehöriger Plastikschiicht integriert werden. Man kann in diesem Fall untersuchen, was für einen Einfluss die Plastikschiicht der Solarzelle auf die Maximalleistung hat. Vergleicht man die mit 'Beide' und 'Messbox' bezeichneten Balken der Abbildung 3.15 (links), so sieht man, dass sich die maximal erreichten Leistungen bei frontaler Bestrahlung kaum unterscheiden. Bei den restlichen Bestrahlungswinkeln ist die 'Messbox' Variante deutlich besser. Betrachtet man aber dieselben Balken in Abbildung 3.16 (links), so ist bei frontaler Bestrahlung die 'Messbox' Variante besser, während bei den anderen Belichtungswinkeln kein deutlicher Unterschied erkennbar ist. Somit hat die Plastikschiicht der Solarzelle bei grösseren Entfernungen von der Lichtquelle nur bei frontaler Belichtung einen relevanten negativen Einfluss auf die maximale Leistung. Eine mögliche Begründung dazu könnte sein, dass die texturartige Plastikschiicht der Solarzelle die Nachteile einer zusätzlichen Schicht bei grösseren Bestrahlungswinkel kompensieren kann. Für die ausserhalb des Gebäudes platzierte Solarzellen wurde schliesslich die 'Beide' Variante, wie in Abbildung 3.17 ersichtlich, verwendet, um von der Messkonfiguration bei der Erfassung der Leistungskurve möglichst nicht abzuweichen.

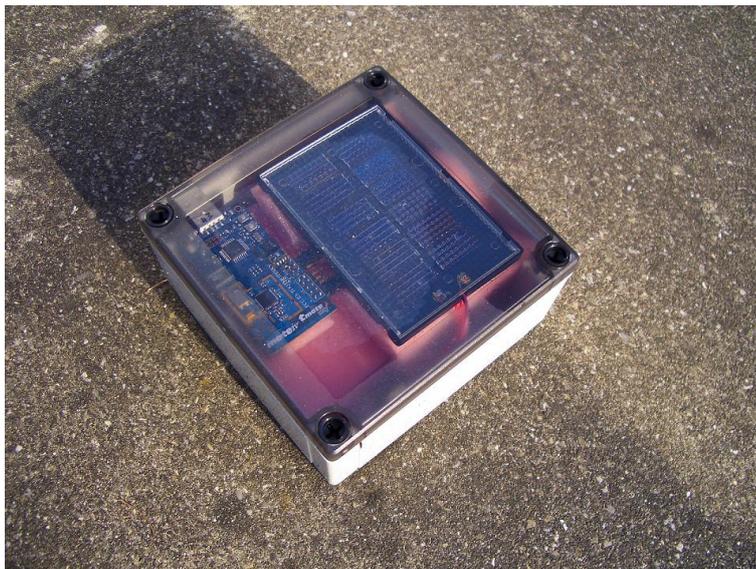


Abbildung 3.17: Messbox mit äusserer Plastikschiicht, die für verteilte Messungen ausserhalb des ETZ-Gebäudes eingesetzt wird

Aus den Abbildungen 3.15 und 3.16 ist ersichtlich, dass die Varianten ohne Plastikschiicht der Messbox 'Zelle' und 'Ohne' immer besser als die übrigen Varianten 'Beide' und 'Messbox' sind. Die im Gebäude vor den Fenstern platzierten Solarzellen dürfen in einer Messbox ohne zugehörige äussere Plastikschiicht integriert werden. Es bleibt also zu untersuchen, wie das Vorhandensein der Plastikschiicht der Solarzelle die maximal generierte Leistung beeinflusst. Ver-

gleicht man zu diesem Zweck die Varianten 'Zelle' und 'Ohne' der Abbildung 3.15 (links), so sieht man, dass sich die maximal erreichten Leistungen bei frontaler und bei einem  $30^\circ$  Bestrahlungswinkel wenig unterscheiden, während bei einem  $60^\circ$  Bestrahlungswinkel die 'Ohne' Variante deutlich besser ist. Anders ist es unter Betrachtung der gleichen Balken in Abbildung 3.16 (links). In diesem Fall ist die 'Zelle' Variante bei frontaler Bestrahlung, die 'Ohne' Variante aber bei den übrigen Bestrahlungswinkeln besser. Es kann also je nach dem die eine oder andere Variante benützt werden. Für die im Gebäude platzierten Solarzellen wurde letztlich die 'Zelle' Variante gebraucht, welche in Abbildung 3.18 ersichtlich ist.



Abbildung 3.18: Messbox ohne äussere Plastikschicht, die für verteilte Messungen innerhalb des ETZ-Gebäudes eingesetzt wird

In Abbildung 3.19 sind die gemessenen maximalen Leistungen mit zugehöriger Leerlaufspannung als Punkte für die zwei verwendeten Messanordnungen 'Beide' und 'Zelle' dargestellt (Siehe Anhang C und D). Zusätzlich ist die bisherige exponentielle Approximation für die maximale Leistung von Seite 17 eingezeichnet. Man erkennt, dass die Punkte tendentiell oberhalb der Kurve liegen. Im Extremfall kann somit bei der Variante 'Zelle' einen maximalen Fehler von bis 15mW entstehen, was nicht zulässig ist.

Um eine bessere Approximation zu erhalten, wurden die Messdaten der beiden Varianten zusammen mit den bisherigen ermittelten Daten aus Abschnitt 3.4 verwendet. Man betrachtet also das Verhalten der Solarzelle bei den zwei Messanordnungen in einem Temperaturbereich von 14 bis  $45^\circ\text{C}$ . Die durch Matlab berechneten Approximationen sind in Abbildung 3.20 ersichtlich. Es wurde wiederum einen exponentiellen Verlauf erster Ordnung der Kurve angesetzt. Der Fehler beträgt in beiden Fällen maximal 4mW.

Die ermittelten Leistungskurven zur Umrechnung von Leerlaufspannung in maximal generierten Leistung lauten für die Messanordnungen 'Beide' und 'Zelle'  $f(x) = e^{1.6353x-11.2873}$  und  $f(x) = e^{1.6417x-11.4338}$ .

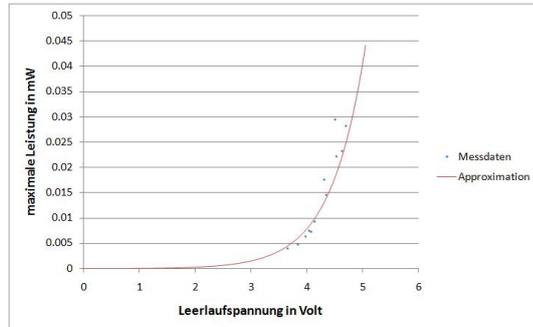
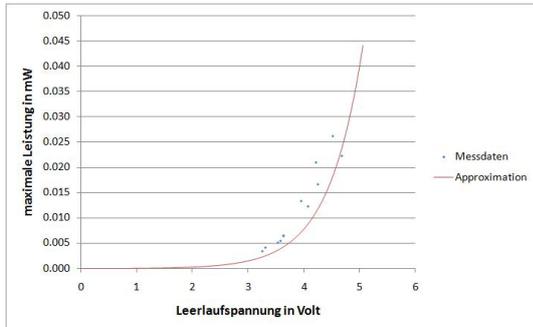


Abbildung 3.19: Vergleich zwischen der bisher berechneten Approximation und der Ergebnisse für die Messanordnungen 'Beide' (links) bzw. 'Zelle' (rechts)

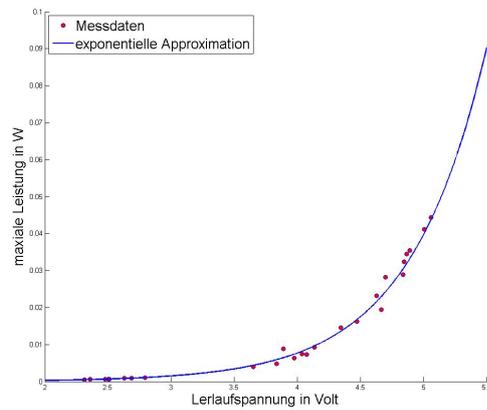
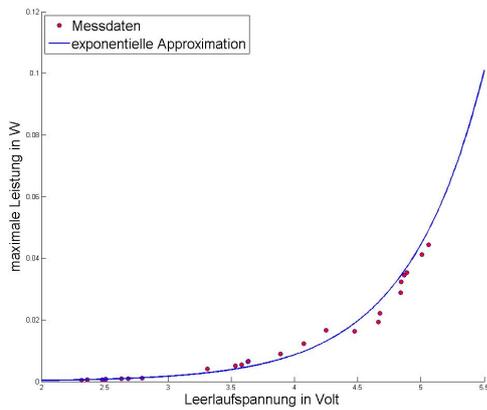


Abbildung 3.20: Verlauf der neu berechneten Approximationskurve für die Messanordnungen 'Beide' (links) bzw. 'Zelle' (rechts)

# Kapitel 4

## Verteilte Messung

### 4.1 Harvester

In dieser Semesterarbeit soll die von Solarzellen erzeugte elektrische Energie an ausgewählten Stellen gemessen und somit ein räumliches, zeitliches Profil erstellt werden. Um Messdaten mehrerer Knoten erfassen zu können, ist ein geeignetes Kommunikationsprotokoll notwendig. Das verwendete Kommunikationsprotokoll baut auf dem *MICS Sensor Network Platform Kit* [8] auf, das für die Zwecke dieser Semesterarbeit entsprechend modifiziert wurde. Die zur Datenerfassung auf jedes Sensormodul geladene Protokollanwendung heisst *Harvester*, die englische Bezeichnung für land- oder forstwirtschaftliche Vollernter.

Harvester ist eine vom Betriebssystem TinyOS 2.x unterstützte Anwendung, die in NesC implementiert wurde. TinyOS ist ein Open-Source-Betriebssystem, das besonders für drahtlose Sensornetzwerke mit sehr begrenzten Hardware- und Energieresourcen geeignet ist. NesC ist eine komponentenbasierte Erweiterung der Programmiersprache C, die speziell für TinyOS geschaffen wurde. Über Schnittstellen (Interfaces) ist es möglich, mehrere Komponenten zu verknüpfen und somit Funktionalitäten anderer Komponenten in der eigenen zu verwenden.

Harvester ist hauptsächlich von drei Timer-Ereignissen dirigiert. Ein Timer versetzt das Sensormodul alle 400 Millisekunden in den Wachmodus, wobei das Radio und weitere benötigte Komponenten aktiviert werden um anstehende Aufgaben zu verarbeiten und eventuelle Nachrichtenpakete zu empfangen oder zu versenden. Falls keine Aufgaben zu erledigen sind, geht das Sensormodul ins energiesparsameren Schlafmodus über, bei dem nur der Timer von der Hardware aktiv ist. Ein weiterer Timer ist für die Aktualisierung der lokalen Netzwerktopologie zuständig. Alle 20 Sekunden aktualisiert

jedes Sensormodul die Liste seiner fünf besten Netzwerknachbarn, geordnet nach der kleinsten Distanz zur Senke. Zudem wird der zur Netzwerksenke führende Parent-Knoten bestimmt. Somit werden alle Nachrichten, die einkommen oder zu versenden sind, dem Parent-Knoten weitergeleitet bis die Netzwerksenke erreicht wird. Jeder Sensorknoten teilt der Senke periodisch durch eine so genannte topologische Nachricht seine aktuellen topologischen Informationen oder Einstellungen mit. Ein letzter Timer ist für die periodische Datenerfassung mehrerer Sensoren des jeweiligen Sensormoduls zuständig, was im Folgenden eingehender beschrieben wird.

## 4.2 Implementierung der Datenerfassung mehrerer Sensoren desselben Moduls

Für die Zwecke dieser Semesterarbeit sind die folgenden Sensoren des Tmote Sky's abzulesen: Die beiden Lichtsensoren, der externe Temperatursensor, die durch das Ablesen des ADC-Wandlers ermittelte Leerlaufspannung der Solarzelle und die interne Batteriespannung.

Die Komponenten der beiden Lichtsensoren, des Temperatursensor und der Batteriespannung sind schon in der Umgebung von TinyOS 2.x vorhanden. Eine weitere Komponente musste für die Ermittlung der momentanen Leerlaufspannung der Solarzelle implementiert werden, die aber ganz analog zur Komponente für das Ablesen der internen Batteriespannung ist. Man musste nur die Zuweisung zum verwendeten Kanal für das Ablesen der Leerlaufspannung hinzufügen.

Der gesamte Ablauf der periodischen Datenerfassung, der für die Zwecke dieser Semesterarbeit konzipiert wurde, ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt. Die Periode des Sensortimers dauert typischerweise 32 Sekunden, wobei die Timerperiode auf 4 Sekunden verkürzt wird, falls sich die Lichtbedingungen zwischen zwei Abtastwerte zu stark verändern. Der Schwellwert für eine solche Verkürzung der Periode wurde in der Testphase des Sensornetzwerks beim betrachten der erfassten Daten ermittelt. Die Timerperiode wird dann verdoppelt, solange der Schwellwert nicht erneut unterschritten oder die maximale Periode von 32 Sekunden erreicht wird.

Als der Sensortimer feuert, werden somit alle benötigten Sensoren der Reihe nach durch Implementierung einer Kaskadierung abgefragt. Sobald die Daten eines Sensors bereit stehen, werden sie der zu sendenden Nachricht hinzugefügt. Zugleich wird das Ablesen des nächsten Sensors veranlasst. Nach der Datenerfassung des letz-

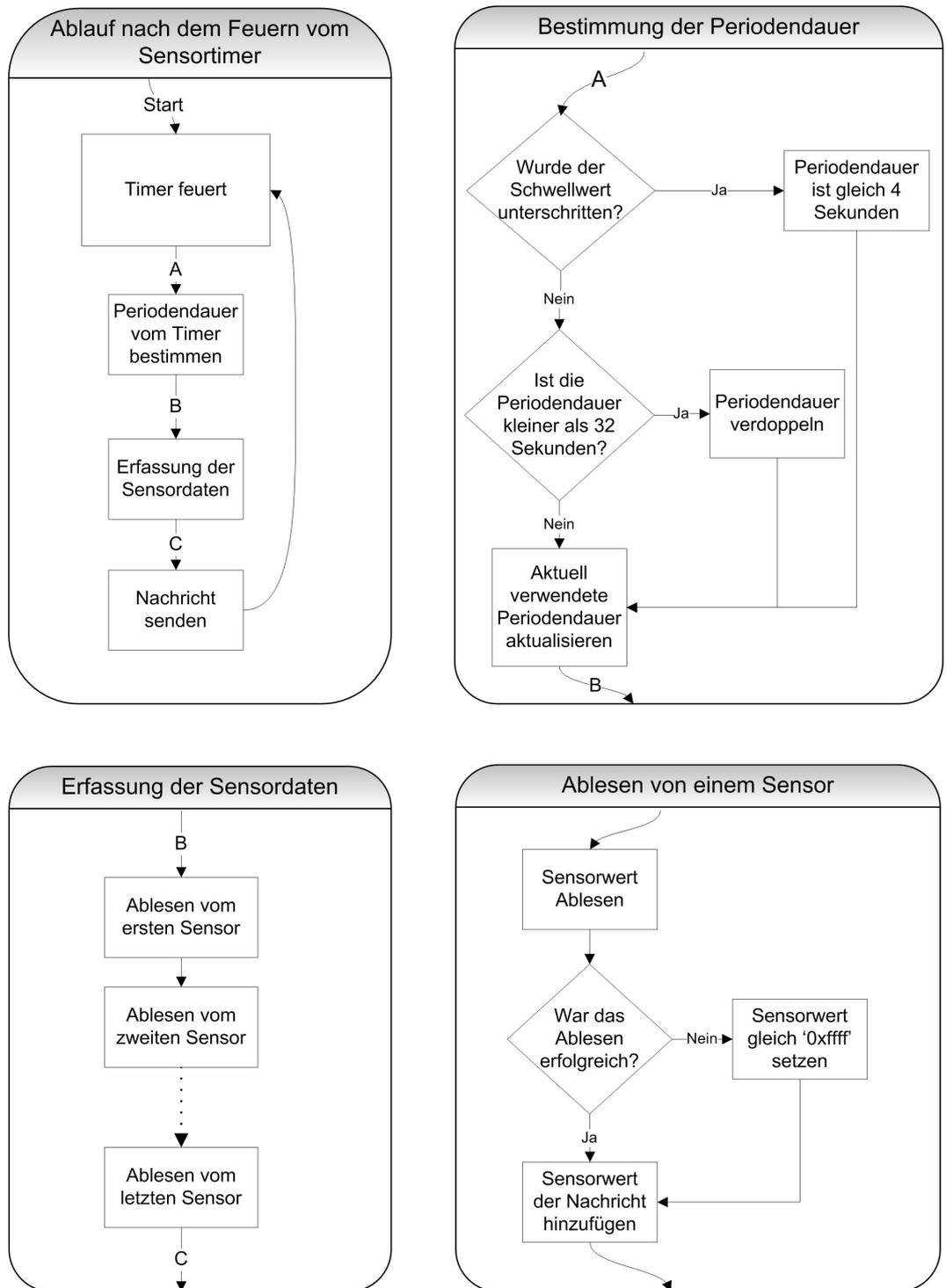


Abbildung 4.1: Schematischer Ablauf der periodischen Datenerfassung durch das Sensortimer von mehreren Sensoren eines Sensorknotens

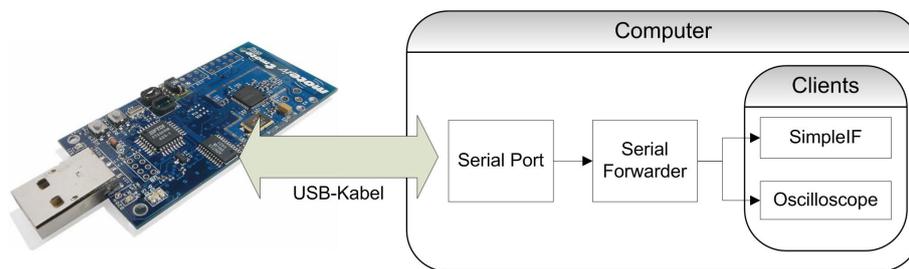


Abbildung 4.2: Empfang und Bereitstellung der von der Netzwerksenke ankommenden Datenpakete.

ten Sensors wird die Nachricht dem Parent-Knoten weitergeleitet. Dieser Vorgang wird periodisch wiederholt. Der Nachricht werden zusätzlich die aktuell verwendete Periode vom Sensortimer und die ID des Absenderknoten beigefügt. Falls es zu einem Fehler beim ermitteln eines Sensorwertes gekommen ist, wird der jeweilige Wert zu '0xffff' gesetzt und so der Nachricht angehängt, damit es später möglich ist, Messfehler zu erkennen.

### 4.3 Datenerfassung der an der Netzwerksenke ankommenden Nachrichten

Nachdem die Nachrichten mit den Sensordaten von den einzelnen Sensorknoten abgesendet werden und durch das aufgebaute Sensornetzwerk bis zur Senke ankommen, müssen diese Nachrichten einem Computer zum Abspeichern weitergeleitet werden. Die Netzwerksenke ist ein gewöhnliches Sensormodul wie jedes andere, auf dem ebenfalls Harvester läuft. Diesem Sensormodul wurde aber beim Laden von Harvester der Sensorindex 0 zugewiesen. Für das Sensormodul bedeutet es, dass Harvester diesen Sensorknoten als Netzwerksenke betrachtet und somit alle eingehende Nachrichten nicht mehr Wireless, sondern, via USB direkt zum angeschlossenen Computer überträgt. Damit man die beim Computer ankommenden Datenpakete abfangen kann, wird ein SerialForwarder, wie in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt, eingesetzt.

Dem SerialForwarder kann vorgegeben werden, Daten von einem bestimmten, seriellen Port mit einer bestimmten Datenrate zu empfangen und für die weitere Verarbeitung vorzubereiten. Die beim Computer ankommenden Datenpakete sind aber in der hexadezimalen Darstellung, was für die Weiterverwendung der Daten nicht günstig ist. Zudem müssen die übertragenen, dezimalen Sensorwerte in die entsprechenden Einheiten umgewandelt werden.

Diese beiden Aufgaben lassen sich mit Hilfe einer Java-Klasse erledigen, die freundlicherweise für diese Semesterarbeit zur Verfügung gestellt wurde. Diese Java-Klasse meldet sich beim SerialForwarder als Client an, um Zugriff auf die empfangenen Daten zu haben. Zusätzlich ist eine Methode vorhanden, die beim Empfang einer bestimmten Nachrichtstruktur aufgerufen wird. Die ursprüngliche Java-Klasse wurde für die Zwecke dieser Semesterarbeit modifiziert. Somit werden alle Sensorwerte der empfangenen Nachricht von der hexadezimalen Darstellung in der entsprechenden Dezimaldarstellung  $x_{Sensorwert}$  (Float) umgewandelt und anhand der folgenden formalen Zusammenhänge in der gewünschten Einheit abgebildet.

Photosynthetisch aktives Licht:

$$L_{photosynthetisch}[Lux] = x_{Sensorwert} \times 0.625 \times 1.5 \times 10^5 \frac{1}{4096}.$$

Gesamtes sichtbares Lichtspektrum inkl. Infrarotstrahlung:

$$L_{sichtbar}[Lux] = x_{Sensorwert} \times 0.769 \times 1.5 \times 10^3 \frac{1}{4096}.$$

Externe Temperatur:

$$T[^\circ C] = \frac{x_{Sensorwert} - 3960}{4096}.$$

Leerlaufspannung am Potentiometer:

$$V_{Potentiometer}[V] = x_{Sensorwert} \frac{1.5}{4096}.$$

Interne Batteriespannung:

$$V_{Batterie}[V] = x_{Sensorwert} \frac{3}{4096}.$$

Es ist zu beachten, dass die effektive Leerlaufspannung der Solarzelle  $5 \times V_{Potentiometer}$  ist. Zudem entspricht  $V_{Batterie}$  der Spannung von zwei in Serie geschalteten AA Batterien.

Die Java-Klasse 'SimpleIF' ermittelt zusätzlich das aktuelle Datum und die Ankunftszeit jeder Nachricht beim SerialForwarder, so-

wie die zugehörige Nachrichtennummer, die von den jeweiligen Sensormodulen bei jedem Absenden inkrementiert wird. Somit kann man eventuelle Datenverluste schnell ausfindig machen. Nachdem die nötigen Daten in der gewünschten Form bereit stehen, werden sie nach Absenderknoten sortiert, indem die Daten zeilenweise dem nach dem Absenderknoten benannten Textfile angehängt werden. Falls kein solches Textfile existiert, wird ein neues erstellt.

Um mögliche Fehlverhalten der Sensorknoten jederzeit beobachtbar zu machen, wird bei jeder Nachricht überprüft, ob es Fehler beim Ermitteln eines Sensorwertes gab (Test: `Sensorwert == '0xffff'`). Über solche Fehler wird im Textfile `'SensingERRORS.txt'` ein Protokoll mit Sensorknoten-ID, Datum und Zeitangabe geführt. Zudem wird überprüft, ob die aktuelle Batteriespannung genügend ist. Anhand des Tmote Sky Datasheets, beginnt der kritische Bereich, falls man den Flashspeicher des Sensormoduls nicht benötigt, bei einer Speisespannung von weniger als 2.1 Volt. Falls die ermittelte Batteriespannung unterhalb von 2.15 Volt liegt, wird im Textfile `'BatteryWarnings.txt'` die Sensorknoten-ID, die aktuelle Batteriespannung, Datum und Uhrzeit zeilenweise eingetragen. Somit lassen sich unerwünschte Ereignisse schnell überblicken. An jedem Sensorknoten selbst sind Fehlfunktionen nach aussen hin sichtbar. Falls die grüne Led nicht mehr regelmässig blinkt oder ganzzeitig leuchtet, ist mit einer Fehlfunktion zu rechnen.

Zusammen mit Harvester ist beim *MICS Sensor Network Platform Kit* eine andere Java-Anwendung namens Oscilloscope [8] vorhanden, die die empfangenen topologischen Nachrichten interpretieren und in einem separaten Fenster grafisch darstellen kann. Eine Momentaufnahme davon ist in Abbildung 4.3 ersichtlich. Anhand dieser Grafik lässt sich jederzeit erkennen, wie das aktuelle Sensornetzwerk verbunden ist und ob es vereinzelte oder mehrere Sensorknoten gibt, die isoliert sind oder sogar isolierte Zyklen bilden. Es besteht übrigens kein Problem, die beiden Java-Anwendungen SimpleIF und Oscilloscope parallel laufen zu lassen, da der SerialForwarder den Zugriff von mehreren Anwendungen auf einkommenden Nachrichten ermöglicht. Wenn beim SerialForwarder nicht brauchbare Pakete ankommen, so wird dies auch angezeigt.

## 4.4 Platzierung der Sensormodule im ETZ G-Stock

Bevor man mit der Platzierung der Sensormodule beginnen kann, muss geprüft werden, ob das Kommunikationsprotokoll wie erwünscht funktioniert und ob die Reichweite der einzelnen Sensorknoten ge-

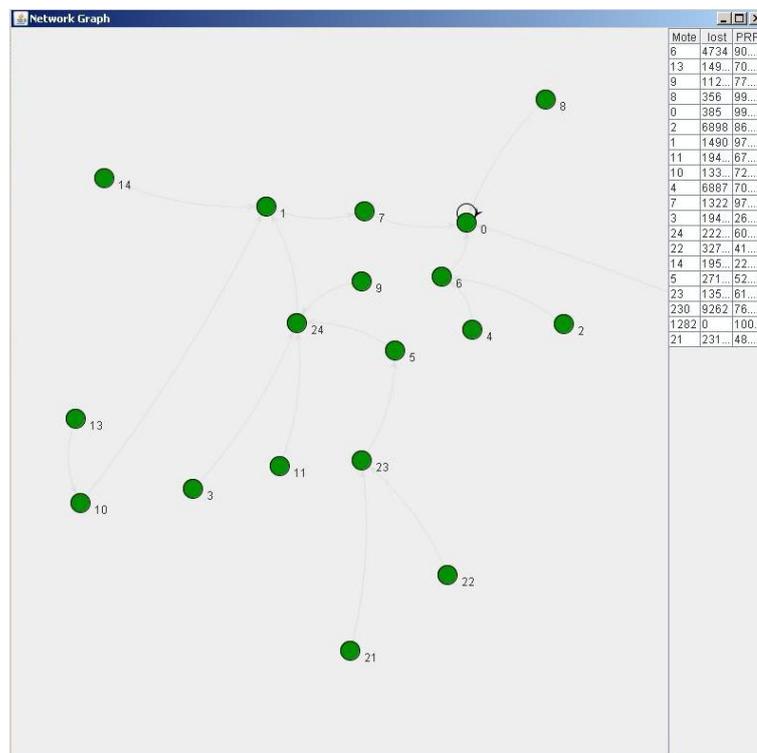


Abbildung 4.3: Momentanaufnahme des von der Java-Anwendung Oscilloscope erzeugten Fensters, das die aktuelle Topologie des Sensornetzwerkes zeigt.

nügend ist um mit benachbarten Knoten Daten auszutauschen. Dies wurde mit 7 bis 8 Knoten getestet, die längs eines Gangs vom ETZ G-Stock je im Abstand von ca. 10m verteilt wurden. Dabei war die Senke an einem Computer des Studentenraumes G 71.1 angeschlossen, in etwa 10m Abstand vom Gang. In der Testphase ist auch die Möglichkeit berücksichtigt worden, einen Sensorknoten auf dem Dach des ETZ-Gebäude zu positionieren. Die Verbindungsqualität war leider sehr schlecht.

Nachdem man das Kommunikationsprotokoll auf die Knoten geladen hat, sind diese bereit, mit der verteilten Messung zu beginnen. Man muss nun geeignete Messpunkte der einzelnen Sensorknoten auswählen, um mit möglichst wenigen Knoten ein aussagekräftiges Profil der G-Etage zu erstellen. Dabei gibt es drei mögliche Platzierungsarten.

Eine Möglichkeit ist, Sensorknoten nach draussen zu platzieren, und zwar dort, wo die Sonne möglichst lange scheint. Dafür ist zum Beispiel die Westseite des ETZ-Gebäudes eine geeignete Stelle. Es werden Sensorknoten verwendet, die über ein Potentiometer an einer Solarzelle angeschlossen sind. Zusätzlich wird jeweils die gesamte Messkonfiguration zum Schutz in einer Messbox mit zugehöriger äusserer Plastikschrift eingebettet.

Eine weitere Möglichkeit ist, Sensorknoten hinter Glasfenstern zu platzieren, wo Sonnenlicht und Deckenbeleuchtung vorhanden sind. Dafür sind Sensorknoten im Einsatz wie oben beschrieben, aber ohne äussere Plastikschrift der Messbox.

Eine letzte Möglichkeit ist, Sensorknoten dort zu platzieren, wo kein direktes Sonnenlicht vorhanden ist oder zumindest genug weit weg von den Fenstern. An diesen Stellen kann man annehmen, dass Temperatur näherungsweise konstant und die Beleuchtung entweder an oder aus ist. Es reicht also, an diesen Stellen die maximale Leistung der Solarzelle direkt mit Hilfe des Agilent Multimeters zu bestimmen und mit den Lichtsensoren des Sensorknotens zu beobachten, ob die Deckenbeleuchtung an oder aus ist. Somit ist keine Messanordnung mit Solarzelle und Messbox notwendig. Es wird an solchen Stellen nur ein Tmote Sky platziert mit zugehöriger Energieversorgung.

Die für die Durchführung der automatisierten Messung ausgewählten Messpunkte sind in Abbildung 4.4 ersichtlich. Die Sensorknoten in den Büros und Gängen der G-Etage sind mit unterschiedlichen Abständen und Orientierungen zu den Neonröhren platziert worden. Die Netzwerksenke bzw. der Sensorknoten mit Index 0 ist im Studentenraum G 71.1 an einem Computer via USB verbunden.

Die für diese Semesterarbeit relevanten Daten wurden im Rah-

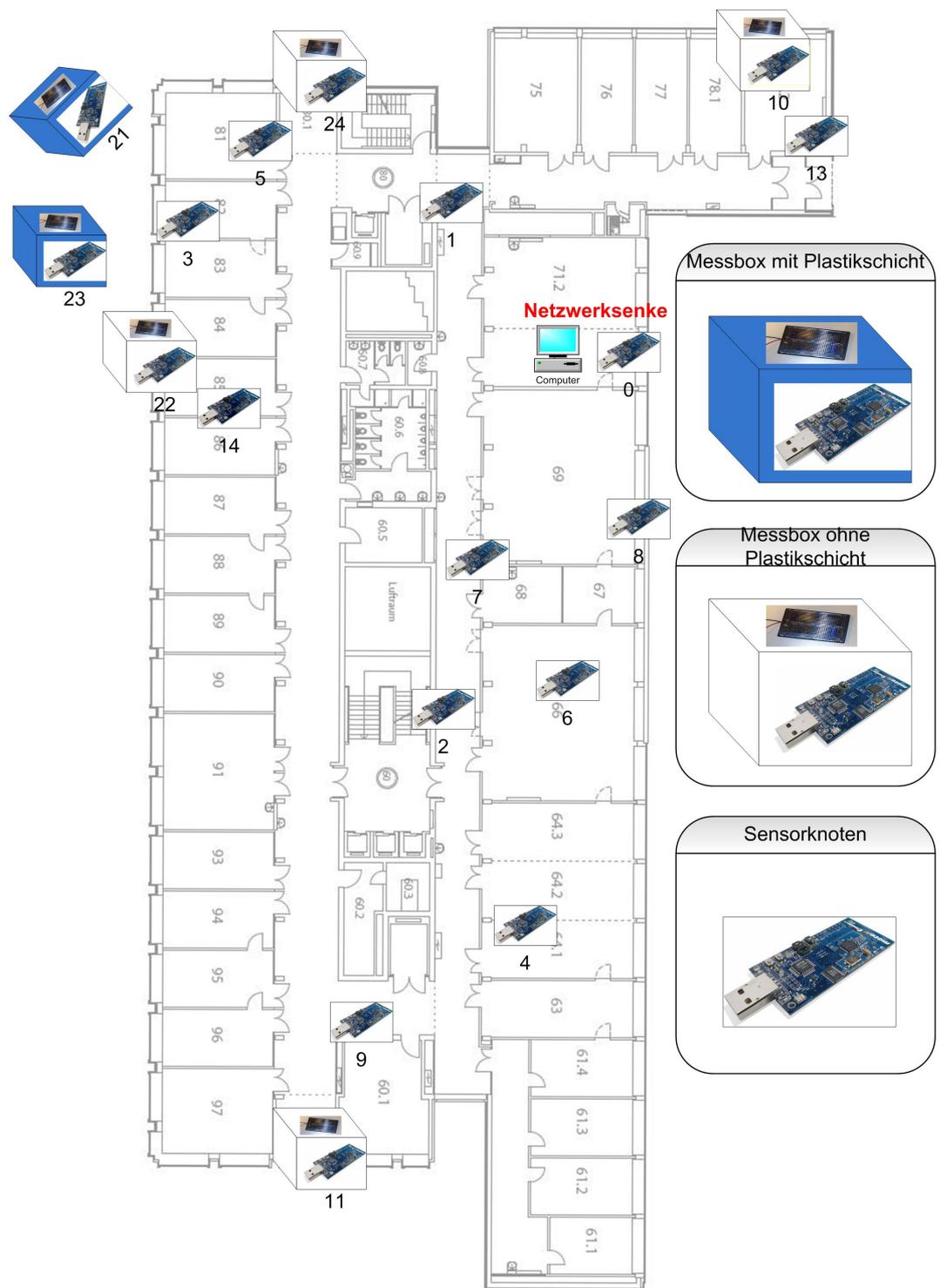


Abbildung 4.4: Verwendete Platzierung der Sensorknoten in der ETZ G-Etage für die verteilte Messung. Die Sensorknoten 21 und 23 sind auf der gegenüberliegenden Terrasse vom ETF-Gebäude in etwa 15m Entfernung vom ETZ-Gebäude positioniert worden.

men vom 12. Dezember 2007 bis zum 9. Januar 2008 erfasst. Die verteilte Messung hat also rund vier Wochen lang gedauert.

# Kapitel 5

## Ergebnisse

### 5.1 Ermittelte Leistung der Sensorknoten

Das Hauptergebnis dieser Semesterarbeit ist die ermittelte Leistung der einzelnen Sensorknoten über eine Messperiode von vier Wochen. In diesem Abschnitt werden die Messungen über die Zeitspanne einer Woche (vom 17.12.2007 bis 23.12.2007) für je eines der drei verschiedenen Sensorknotentypen in den Abbildungen 3.17 bis 3.18 näher betrachtet. Die räumliche Verteilung aller Sensorknoten ist in Abbildung 4.4 auf Seite 30 schematisch dargestellt.

Für Sensorknoten, die wie in Abbildung refbox1 in einer Messbox eingebettet und gemäss Abbildung 3.10 über ein Potentiometer an eine Solarzelle angeschlossen sind, ist die maximale Leistung anhand der Formel auf Seite 21 zu berechnen.

Der Temperaturverlauf eines solchen Sensorknoten mit Index 21, der im Freien auf der Terrasse des ETF-Gebäudes platziert wurde, ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Temperatur beträgt nachts weit unter  $0^{\circ}\text{C}$  und tags kann sie 30 bis  $40^{\circ}\text{C}$  erreichen. Da stellt sich die Frage, ob der im Abschnitt 3.5 durch wiederholte Messungen untersuchte Temperaturbereich von 14 bis  $45^{\circ}\text{C}$  genügend ist.

Betrachtet man den Verlauf der Leerlaufspannung in Abbildung 5.2 und der zugehörigen maximalen Leistung in Abbildung 5.3, so erkennt man, dass die bei tiefen Temperaturen generierte Leistung in der Regel Null beträgt, da es nachts auch kein Sonnenlicht gibt. Somit müssen tiefe Temperaturbereiche nicht weiter berücksichtigt werden. Das Temperaturintervall zwischen 0 und  $13^{\circ}\text{C}$  konnte leider nicht untersucht werden.

In Abbildung 5.4 sind die Verläufe des photosynthetisch aktiven Lichts und des sichtbaren Lichts (inkl. Infrarot) gezeigt. Obwohl der Verlauf der maximalen Leistung von Tag zu Tag unterschiedlich ist, sind die meisten erfassten Lichtwerte der beiden Sensoren auf

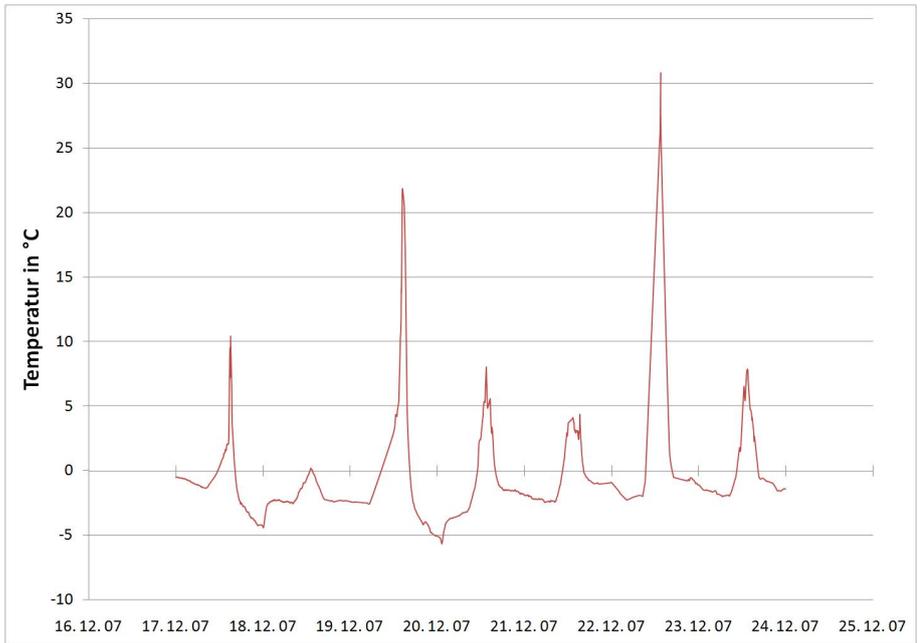


Abbildung 5.1: Verlauf der vom Sensorknoten 21 gemessenen Temperatur in °C über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

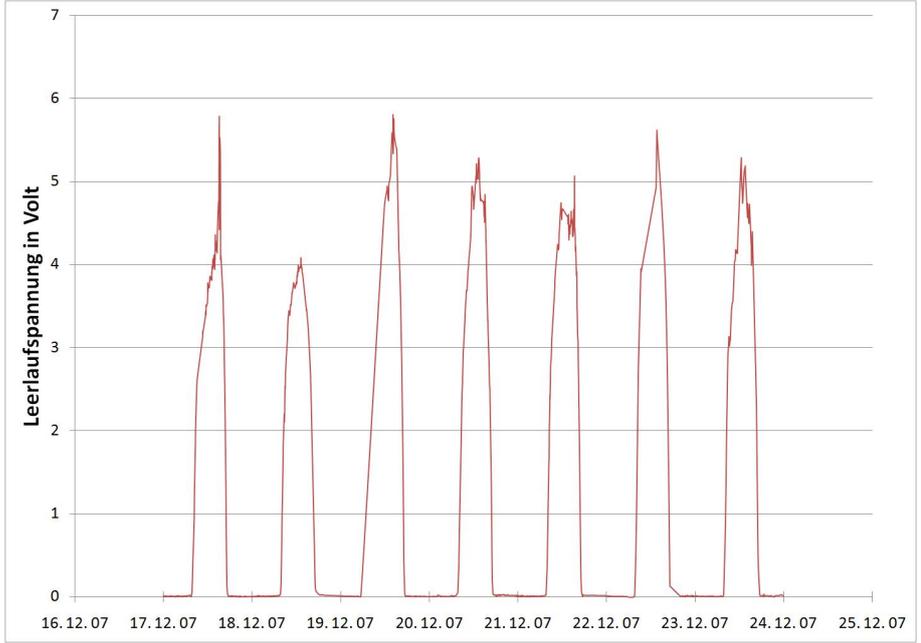


Abbildung 5.2: Verlauf der vom Sensorknoten 21 gemessenen Leerlaufspannung in Volt über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

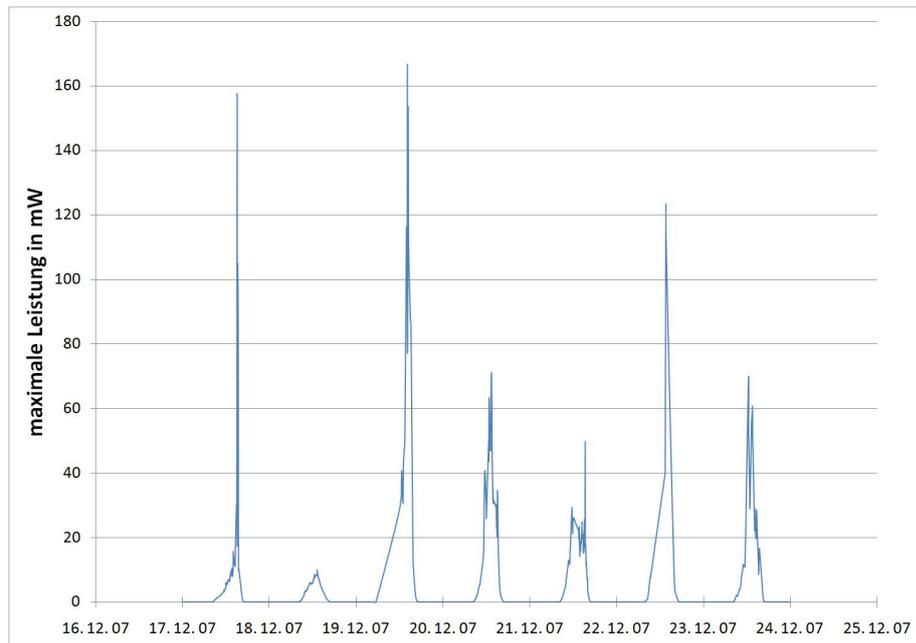


Abbildung 5.3: Verlauf der vom Sensorknoten 21 ermittelten Maximalleistung über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

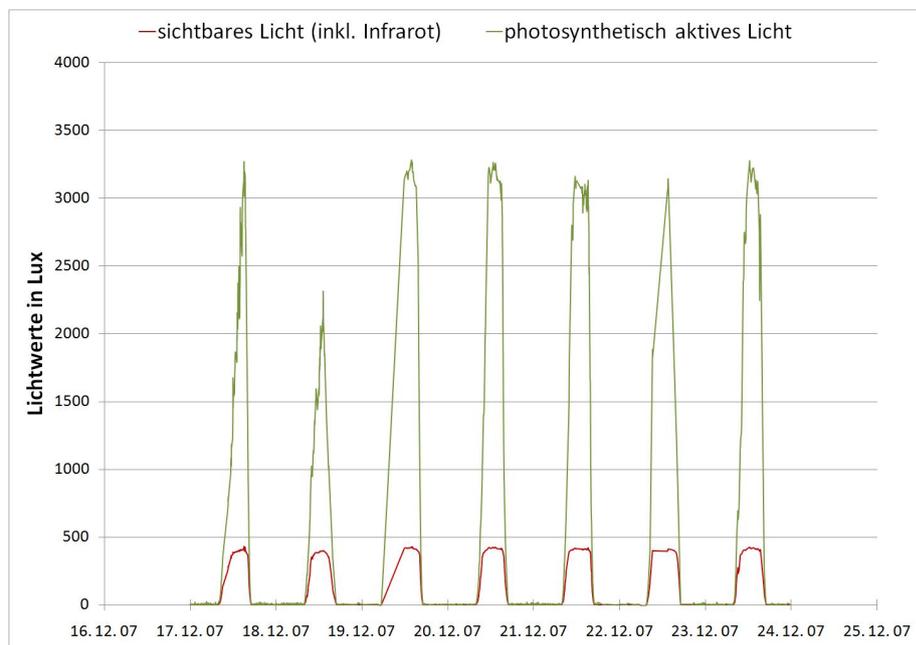


Abbildung 5.4: Verlauf des vom Sensorknoten 21 ermittelten photosynthetisch aktiven Lichts und des sichtbaren Lichts (inkl. Infrarot) über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

Sonneneinstrahlung zwischen 250 und 500 Lux bzw. 3000 und 3500 Lux beschränkt.

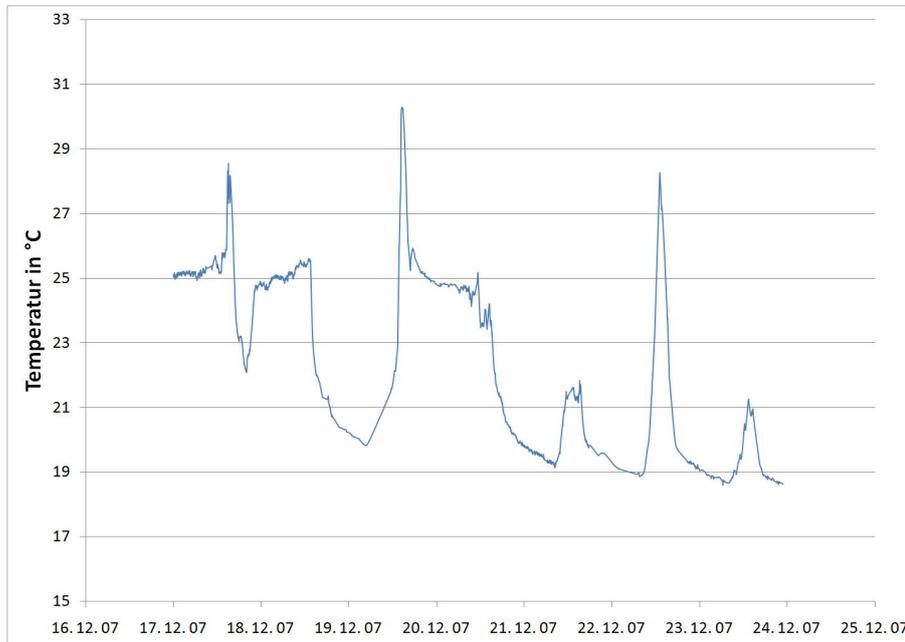


Abbildung 5.5: Verlauf der vom Sensorknoten 22 gemessenen Temperatur in °C über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

Die Ergebnisse eines anderen Sensorknotens über die gleiche Zeitspanne sind in den Abbildungen 5.5 bis 5.8 zu finden. Dieser Knoten mit Solarzelle wurde, wie in den Abbildung 3.18 gezeigt, in einer Messbox ohne äussere Plastikschiicht eingebettet und an der westlichen Seite des ETZ-Gebäudes hinter Bürofenstern im ETZ G 85 platziert. Der Verlauf der Temperatur in Abbildung 5.5 ist im Bereich von 18 bis 31 °C beschränkt und liegt somit vollständig im untersuchten Temperaturbereich.

In Abbildung 5.6 fällt es auf, dass die ersten vier Tagesverläufe der Leerlaufspannung auf der rechten Seite einen Knick aufweisen. Dies lässt sich auf das automatische Herunterlassen der Storen auf der westlichen Seite des ETZ-Gebäude zurückführen.

Zuletzt folgen repräsentative Ergebnisse derjenigen Sensorknoten, die über keine Solarzelle verfügen und folglich nur aus einem Tmote Sky mit Speisespannung bestehen. Diese sind für den Sensorknoten Nummer 13 über die gleiche Zeitperiode wie bei den obigen Ergebnissen in Abbildungen 5.9 bis 5.9 ersichtlich. Dieser Knoten wurde im Büro ETZ G 78.2 auf einem Tisch platziert, wo es kein Sonnenlicht gibt.

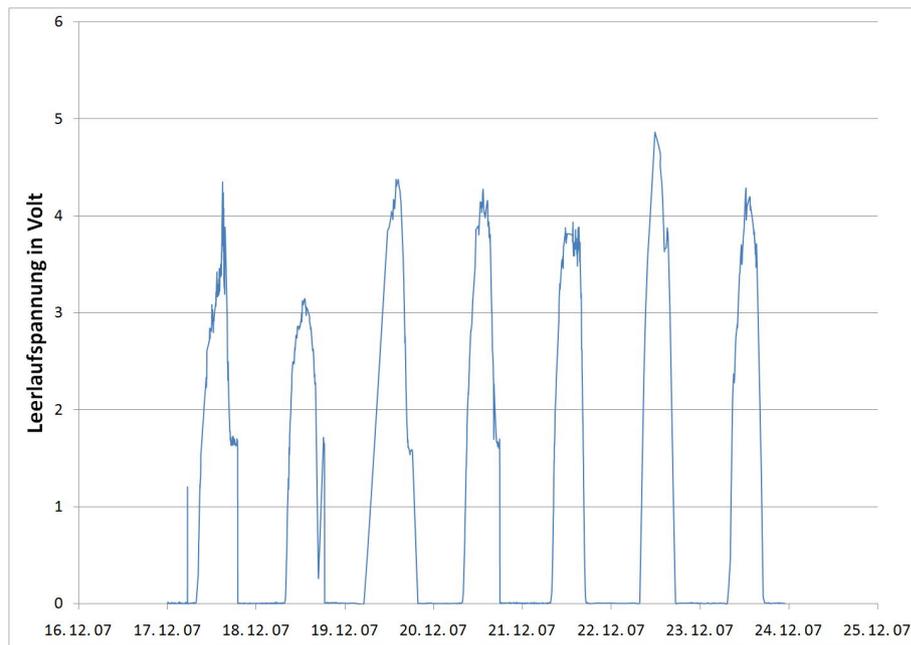


Abbildung 5.6: Verlauf der vom Sensorknoten 21 gemessenen Leerlaufspannung in Volt über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

Der in Abbildung 5.9 aufgezeichnete Temperaturverlauf ist im Bereich von 20.6 bis 22.2 °C begrenzt, was näherungsweise als konstant angenommen werden kann. Bei Arbeitstagen steigt die Temperatur tags leicht an, nachts wieder leicht ab. Am Wochenende sinkt die Temperatur bis zum Minimum der betrachteten Woche.

Für solche Sensorknoten ohne Solarzelle wurde die maximal generierte Leistung bei vergleichbaren Umgebungsbedingungen mit Hilfe des Agilent Multimeters ermittelt. Mit Hilfe eines Lichtsensors soll entschieden werden, ob die Deckenbeleuchtung an oder aus ist. Da stellt sich aber die Frage, welcher der beiden Lichtsensoren des Tmote Sky's als Referenz dienen soll.

Vergleicht man aber in Abbildung 5.10 den vom Sensorknoten Nummer 21 dargestellten Verlauf der Leerlaufspannung und der beiden Lichtsensorwerte, so erkennt man, dass die Leerlaufspannung und das photosynthetisch aktive Licht sich ähnlich verhalten. Positive oder negative Ausschläge der Leerlaufspannung sind auch beim photosynthetisch aktiven Licht wieder zu finden. Hingegen verläuft das sichtbare Licht (inkl. Infrarot) relativ flach. Deshalb werden die erfassten Werte des photosynthetisch aktiven Lichts als Referenz verwendet, ob die Deckenbeleuchtung an oder aus ist.

Für die Berechnung der maximal generierten Leistung ist für alle

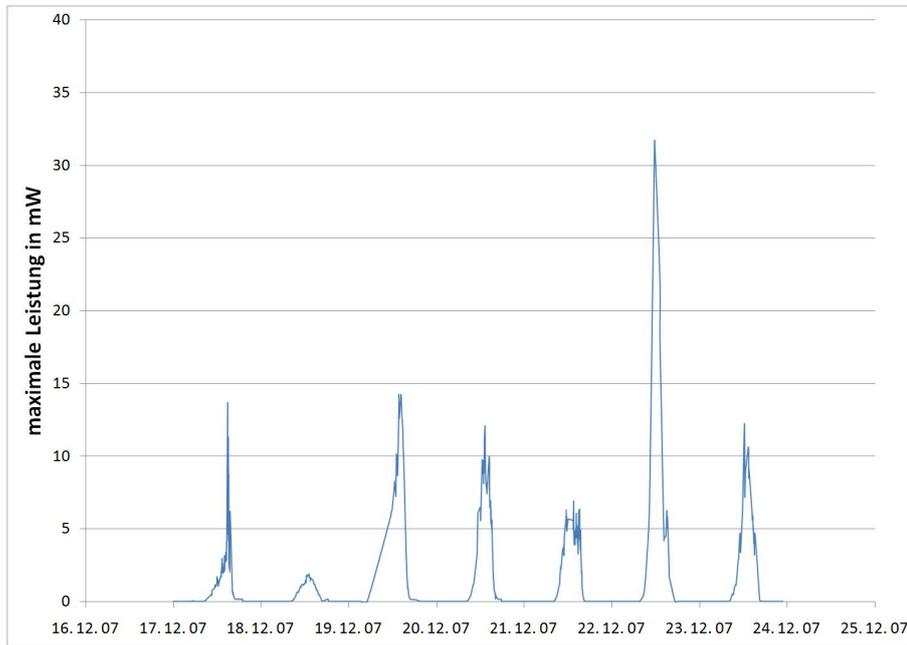


Abbildung 5.7: Verlauf der vom Sensorknoten 21 ermittelten Maximalleistung über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

solche Knoten ein empirischer Schwellenwert zu bestimmen. Dembezüglich kann die Deckenbeleuchtung in die Zustände ein- oder ausgeschaltet eingeteilt werden. Wenn die Deckenbeleuchtung als eingeschaltet erkannt wird, so entspricht die maximale Leistung dem mit dem Agilent Multimeter erfassten Wert. Sonst beträgt die maximale Leistung null. Die von einem Sensorknoten innerhalb des ETZ-Gebäudes erfassten Lichtwerte des photosynthesisch aktiven Lichts weisen einen verrauschten, zweistufigen Verlauf auf wie in Abbildung 5.12 gezeigt. Somit kann beispielsweise für diesen Schwellenwert jeweils der Mittelwert der von einem Sensorknoten erfassten Lichtwerte genommen werden.

## 5.2 Sensornetzwerk auf der ETZ G-Etage

Nach dem Aktivieren aller Sensorknoten und Anschliessen der Netzwerksenke am Computer bildet sich innerhalb von wenigen Minuten ein Sensornetzwerk, dessen Vernetzung mit Hilfe der Java-Anwendung Oscilloscope visualisiert werden kann. Dabei entspricht die angezeigte Position der Sensorknoten nicht deren realer Verteilung. Die bestehende Vernetzung ändert sich immer wieder an manchen Stellen, da einzelne Knoten immer auf der Suche nach besseren Ver-

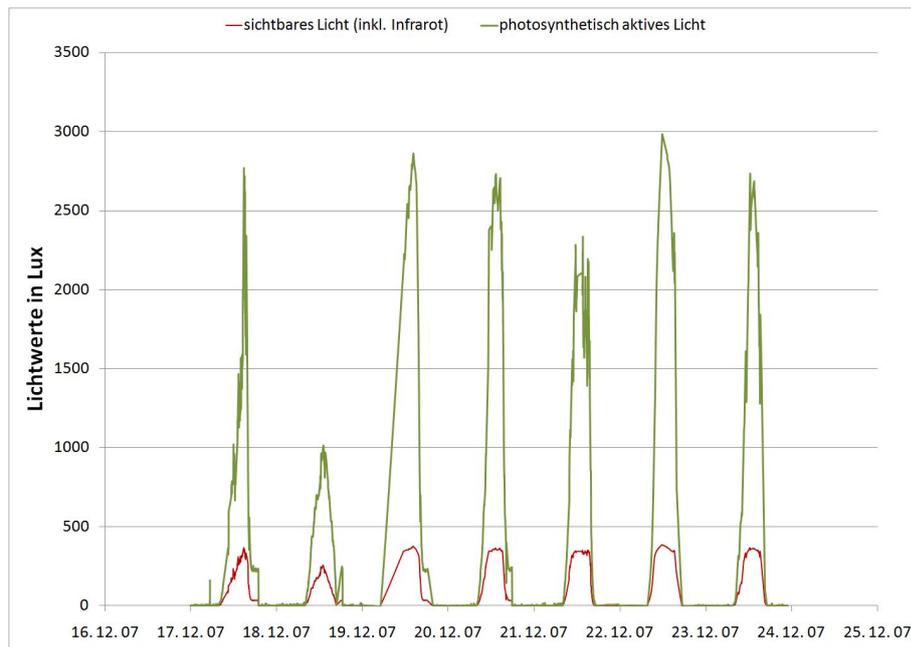


Abbildung 5.8: Verlauf des vom Sensorknoten 21 ermittelten photosynthetisch aktiven Lichts und des sichtbaren Lichts (inkl. Infrarot) über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

bindungen sind. In Abbildung 5.13 ist eine Momentaufnahme des bestehenden Netzwerks dargestellt.

### 5.3 Verlauf der Versorgungsspannungen

Wider Erwarten reichen zwei AA-Batterien mit je 1.5 Volt völlig aus, um einen Sensorknoten ohne den kritischen Bereich von unterhalb 2.1 Volt zu erreichen über fünf Wochen lang zu versorgen. Denn, als die vierwöchige verteilte Messung startete, waren die Sensorknoten zum Testen bereits eine ganze Woche lang mit den neuen Batterien in Betrieb. Die Versorgungsspannung jedes Knotens ist somit während dieser ersten Woche von den ursprünglichen 3 Volt schon etwas gesunken.

Es ist aber interessant, die unterschiedlichen Verläufe von vier ausgewählten Sensorknoten miteinander zu vergleichen. In der folgenden Abbildung 5.14 sind die Verläufe der Versorgungsspannung der Knoten 7, 8, 11 und 21 ersichtlich. Betrachtet man deren Positionen in der Netzwerktopologie der vorherigen Abbildung, so sind die Sensorknoten 8, 11 und 21 Endknoten, d.h. durch diese Sensorknoten werden keine weiteren Knoten mit dem Netzwerk verbunden.

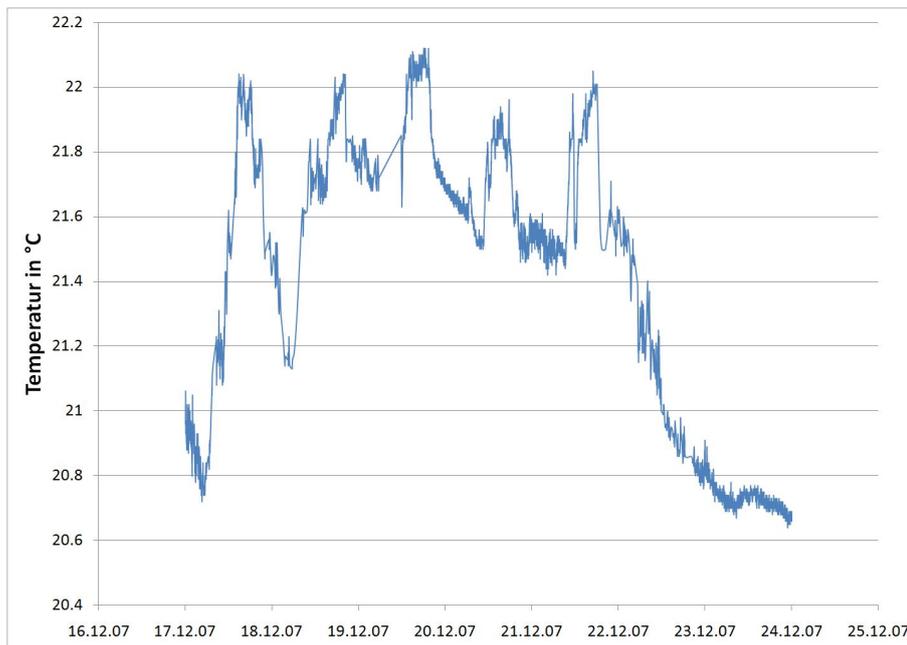


Abbildung 5.9: Verlauf der vom Sensorknoten 13 gemessenen Temperatur in °C über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

Hingegen spielt Knoten 7 für die Vernetzung und Weiterleitung von Nachrichten anderer Knoten eine zentrale Rolle.

Erwartungsgemäss bleibt dem Knoten 7 am wenigsten Speisenspannung übrig. Obwohl Knoten 8 der Netzwerksenke am nächsten ist, hat Knoten 11 am Ende der fünf Wochen deutlich weniger Energie als Knoten 8 verbraucht. Dies lässt sich erklären, da Knoten 11 eine direkte Verbindung zu Knoten 9 hat, während zwischen Knoten 8 und der Netzwerksenke eine Wand steht, was eine höhere Sendeleistung beansprucht. Der Energieverbrauch von Knoten 21 ist mit dem von Knoten 8 vergleichbar, da es zwischen Knoten 21 und seinen nächsten Knoten eine lange Strecke sowie ein Glasfenster hat. Merkwürdigerweise fällt es in Abbildung 5.14 auf, dass die Versorgungsspannung von Knoten 21 gegen Ende kurzzeitig wieder ansteigt.

## 5.4 Zeitlicher Anteil eines Tages mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung

Die von den innerhalb des ETZ-Gebäude liegenden Sensorknoten erzeugte Energie ist hauptsächlich von der Deckenbeleuchtung abhängig. So wirkt sich nicht nur die relative Entfernung eines Sensor-

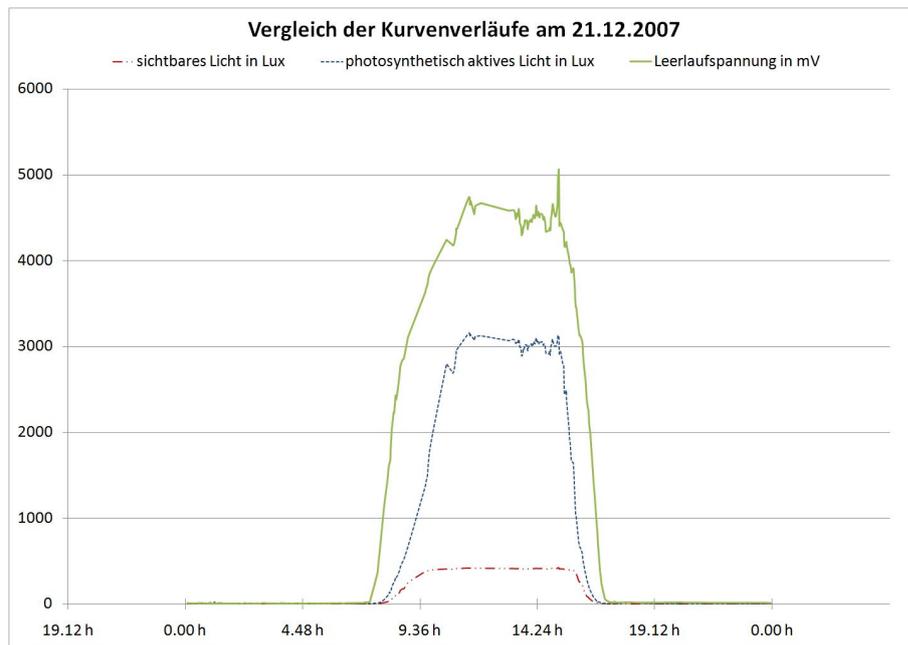


Abbildung 5.10: Vergleich der vom Sensorknoten 21 am 21.12.2007 ermittelten Sensorwerte. Der Verlauf der Leerlaufspannung ist dem des photosynthetisch aktiven Lichts ähnlicher als dem von sichtbares Licht (inkl. Infrarot)

knotens von der Deckenbeleuchtung auf die total erzeugte Energie aus, sondern auch der zeitliche Anteil mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung während eines Tages. In den folgenden Abbildungen 5.15 bis 5.17 ist der ermittelte zeitliche Anteil im Gang, in den Büros oder in Studentenräumen der G-Etage liegenden Sensorknoten ohne Solarzellen ersichtlich.

Betrachtet man Abbildung 5.15, so ist an Wochenenden (Tag 4 und 5, 11 und 12 sowie 18 und 19) sowie in der Ferienperiode (vom Samstag 22.12.2007 bis Dienstag 01.01.2008, entsprechend der Tagen 11 bis 22) der zeitliche Anteil in Prozent mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung in der Regel sehr klein. Gemäss Abbildungen 5.16 und 5.17 ist die Deckenbeleuchtung an Wochenenden nur noch in vereinzelt Büros bzw. Studentenräumen an, während sie in den Gängen in der Regel aus ist. Im Allgemeinen ist bei Feiertagen eine wesentliche Abnahme des zeitlichen Anteils in Prozent mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung zu erkennen. So wird am 26.12.2007 und am 01.01.2008 praktisch keine Energie erzeugt. Es lässt sich somit einsehen, in welchen Räumen oder Büros es sich lohnen würde, Solarzellen zur Energierzeugung zu platzieren. Offensichtlich sind diejenigen Stellen geeignet, in denen durchgehend viel gearbeitet

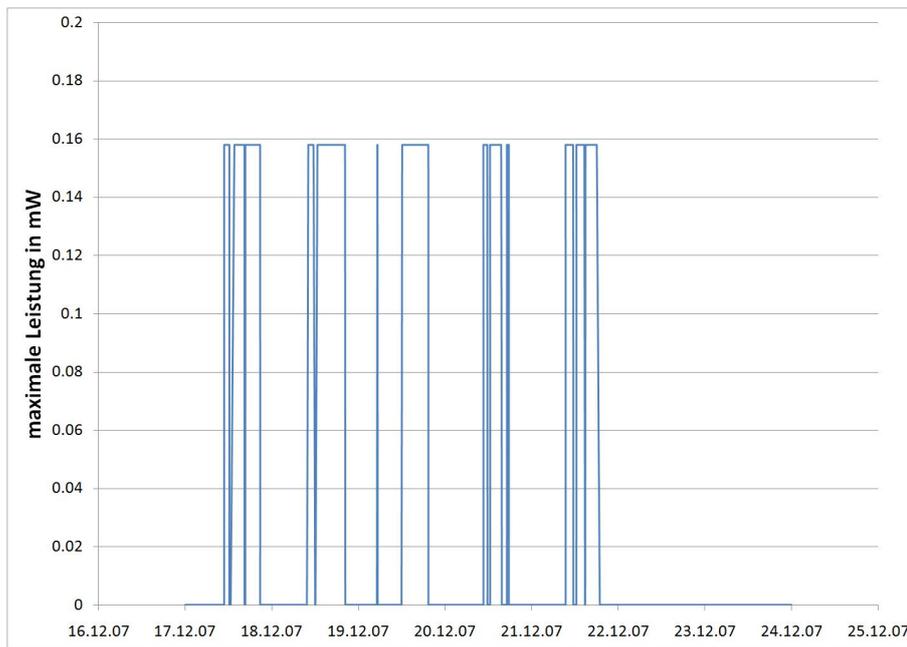


Abbildung 5.11: Verlauf der vom Sensorknoten 13 ermittelten Maximalleistung über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

wird. Beispielsweise scheinen Studentenräume besonders geeignet zu sein, da an Arbeitstagen Anteile von 40 bis 60 Prozent und in der Ferienperiode immerhin noch Anteile zwischen 20 und 30 Prozent erreicht werden.

## 5.5 Überblick der maximal erzeugten Energie über die Zeit

Der Verlauf der gemessenen Leistungskurven ist für die jeweiligen Sensorknoten mit gleicher Messanordnung ähnlich. Die absoluten Leistungswerte sind aber natürlich von der gewählten Platzierung abhängig. Um sich einen Überblick der maximal erzeugten Energie des gesamten Sensornetzwerkes über die Zeit zu verschaffen, wurde für jeden Knoten die über vier Wochen ermittelte Leistungskurve in den entsprechenden Tagintervallen unterteilt und über die Zeit integriert. Dazu wurde für Sensorknoten mit Solarzelle die Matlab-Funktion `trapz(X, Y)` verwendet, die das Integral über den Zeitvektor  $X$  mit zugehörigem Wertevektor  $Y$  numerisch approximiert. Für Sensorknoten ohne angeschlossene Solarzelle wurde ein Excel-Makro verwendet, das der Anteil in Prozent berechnet, für den die Deckenbeleuchtung während eines Tages als eingeschaltet erkannt

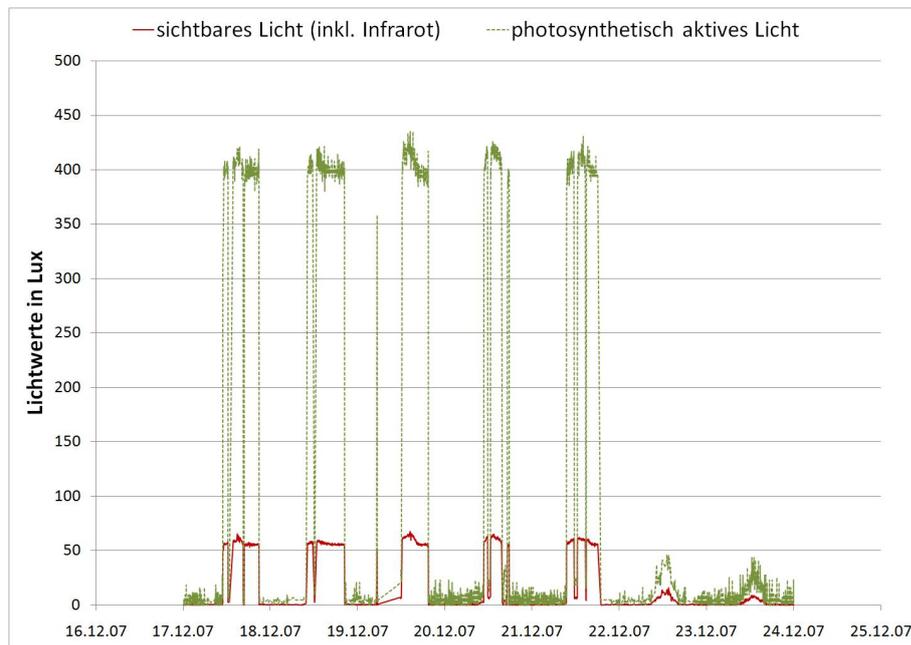


Abbildung 5.12: Verlauf des vom Sensorknoten 13 ermittelten photosynthetisch aktiven Lichts und des sichtbaren Lichts (inkl. Infrarot) über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007

wurde. Da für solche Knoten der Verlauf der maximalen Leistung, wie in Abbildung 5.11 gezeigt, stufenartig ist, kann man die pro Tag erzeugte Energie als Produkt des prozentualen Anteils mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung und des jeweiligen Leistungswerts berechnen. Man erhält somit für jeden Sensorknoten die Energie in Joule, die von der betrachteten Solarzelle während eines Tages erzeugt würde.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.18 und 5.19 dargestellt. Mit Hilfe der Legende lässt sich an einem horizontalen Balken auch der Anteil jedes betrachteten Knotens an der pro Tag erzeugten Energie ablesen. Die von allen Sensorknoten in Abbildung 5.18 gemessene mittlere Energie pro Tag beträgt 36.4 Joule pro Tag, während die der Sensorknoten in Abbildung 5.19 ca. um den Faktor 20 höher ist, also 817.9338874 Joule pro Tag.

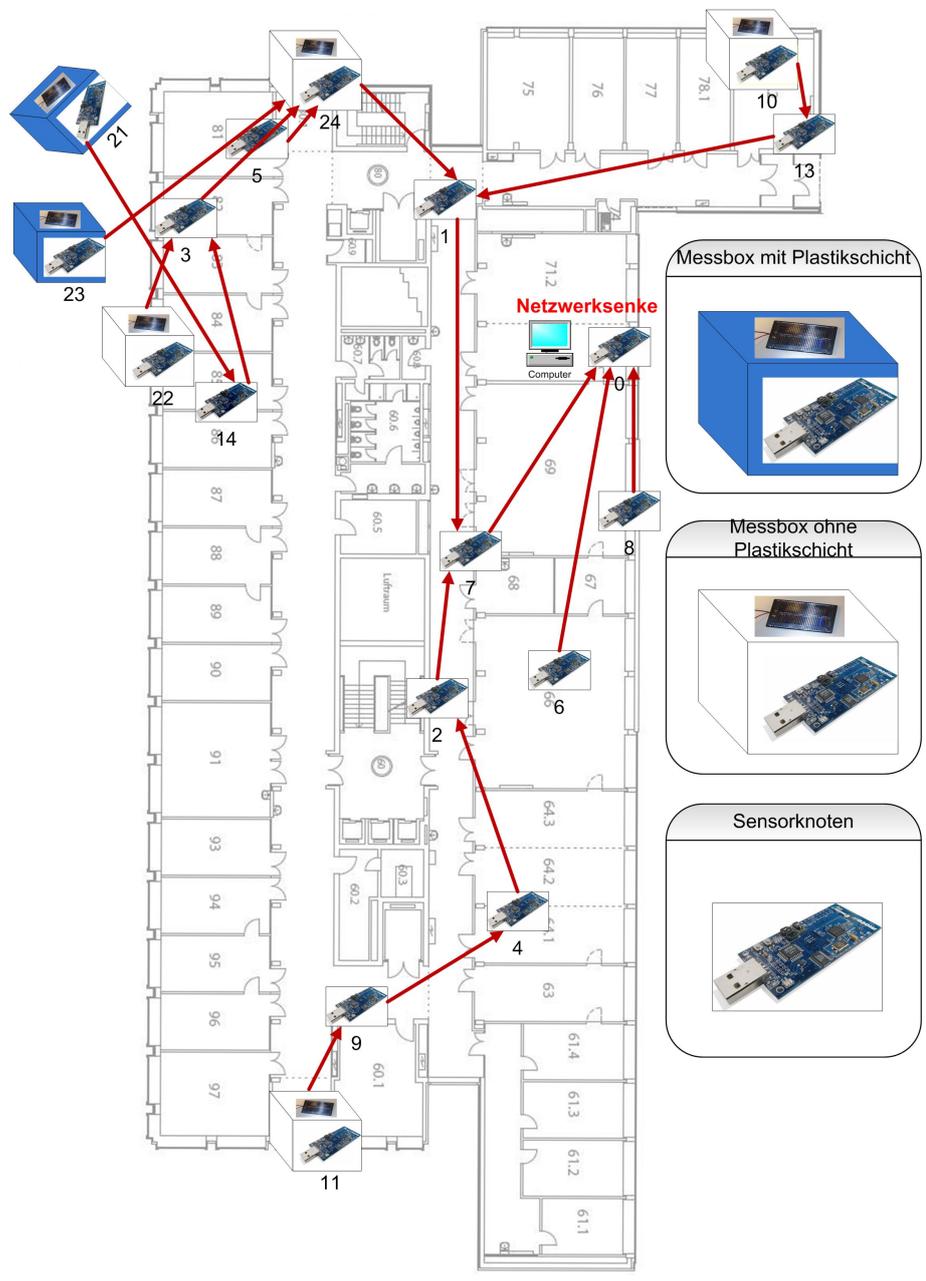


Abbildung 5.13: Momentaufnahme der bestehenden Vernetzung der Sensorknoten

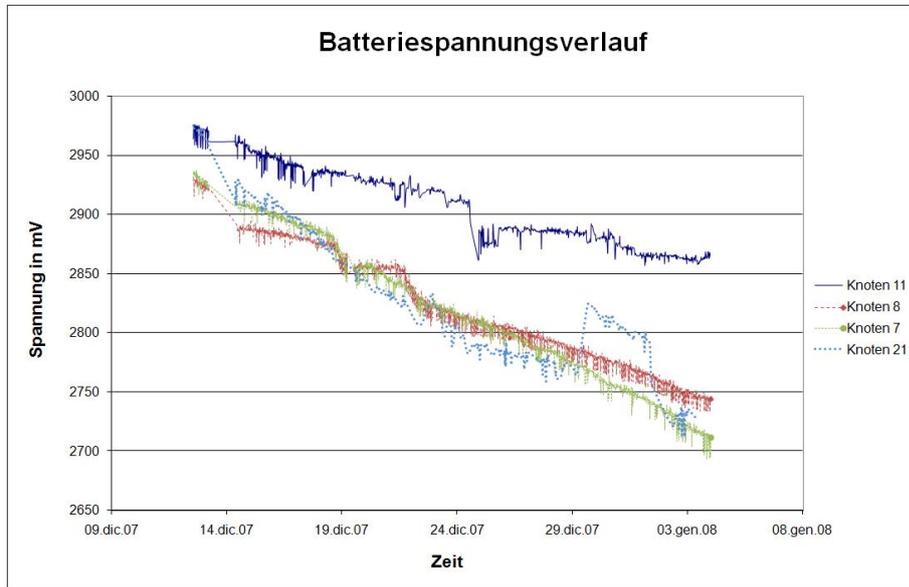


Abbildung 5.14: Verlauf der Versorgungsspannung in der Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008

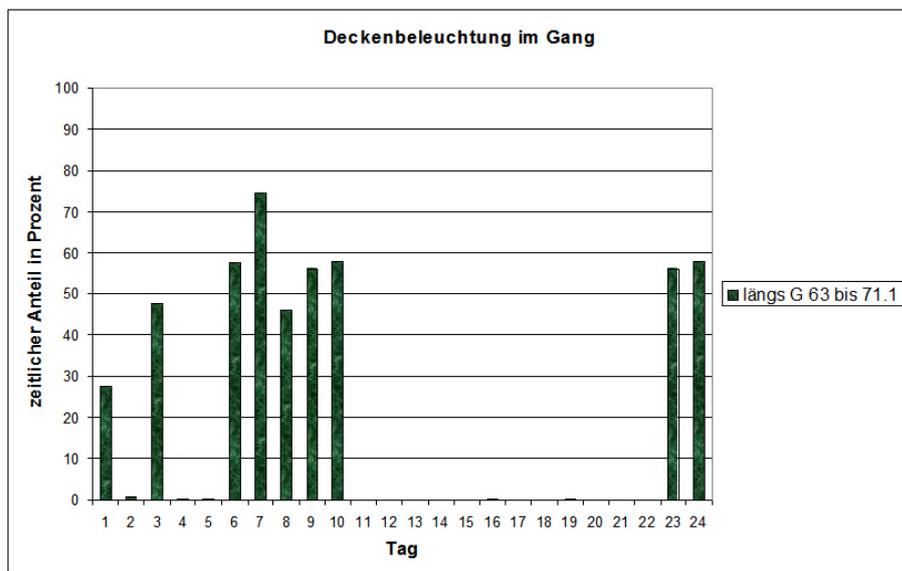


Abbildung 5.15: Zeitlicher Anteil eines Tages in Prozent mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008

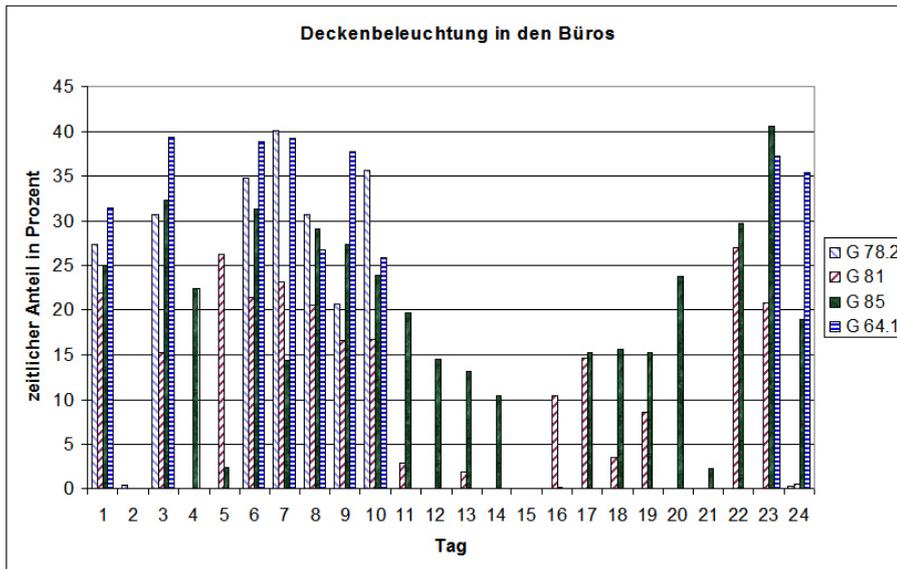


Abbildung 5.16: Zeitlicher Anteil eines Tages in Prozent mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008

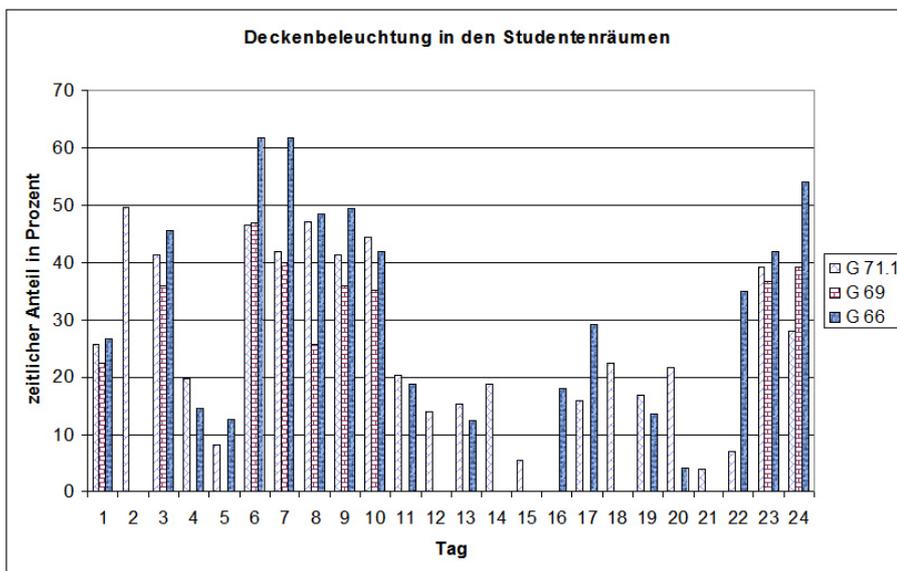


Abbildung 5.17: Zeitlicher Anteil eines Tages in Prozent mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008

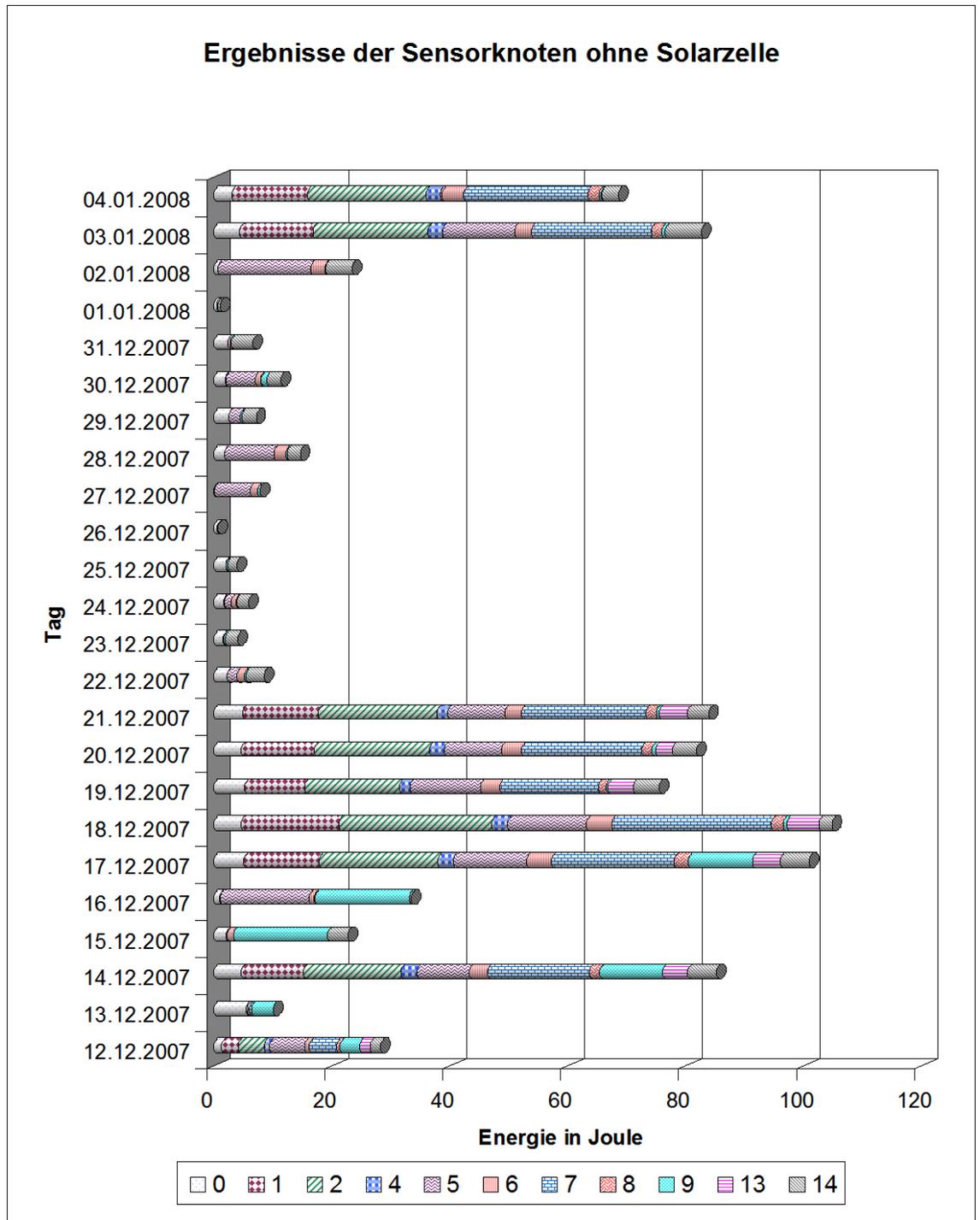


Abbildung 5.18: Von Sensorknoten ohne Solarzelle pro Tag erzeugte Energie in Joule für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008

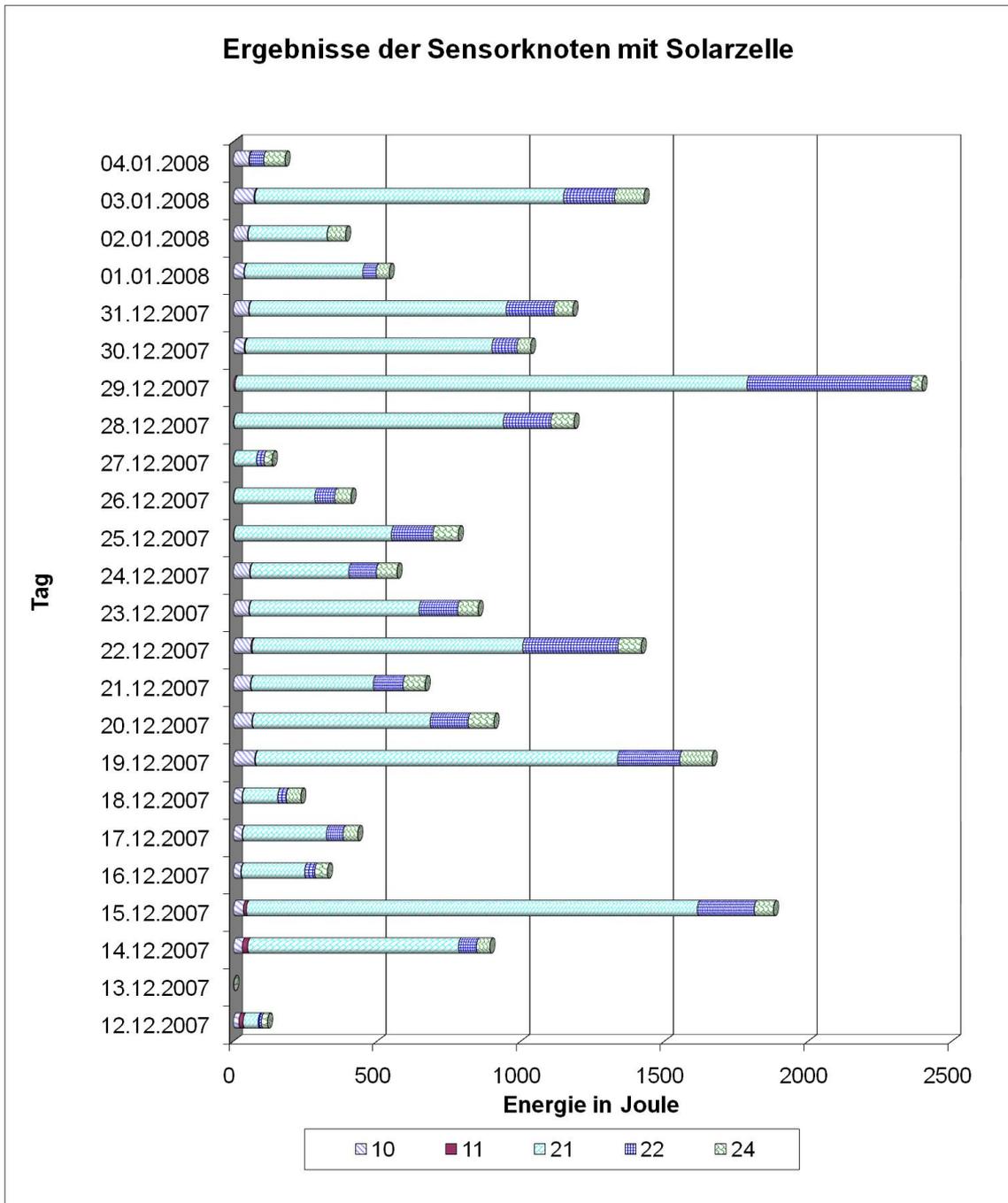


Abbildung 5.19: Von Sensorknoten mit Solarzelle pro Tag erzeugte Energie in Joule für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008

# Kapitel 6

## Fazit

Das Hauptergebnis dieser Semesterarbeit ist ein räumlich-zeitliches Energie-Profil der G-Etage des ETZ-Gebäudes. Es sind Variationen der erfassten Leistungswerte über eine längere Zeitperiode von vier Wochen ersichtlich, was eine erste Abschätzung vorhandener Energieengpässe ermöglicht. Somit ist ein solches Profil zur Entwicklung energie-adaptiver Algorithmen zur Steuerung des Datenflusses in Sensornetzwerken von grosser Bedeutung.

Zur Ermittlung eines solchen Energie-Profiles wurde dabei wie in folgenden Hauptpunkten beschrieben vorgegangen.

- Die Erfassungsmethode der von einer Solarzelle generierten Maximalleistung wurde festgelegt.
- Es wurden drei verschiedene Arten von Solarzellen betrachtet und deren maximal generierte Leistung untersucht.
- Mögliche Einflüsse der Plastikschichten der Messbox und der verwendeten Solarzelle auf die maximale Leistung wurden gründlich untersucht und bei der Bestimmung der jeweiligen Leistungskurven in Funktion der Leerlaufspannung berücksichtigt.
- Die Leistungskurven wurden für verschiedene Umgebungen (sowohl innerhalb als auch ausserhalb des ETZ-Gebäudes) gemessen und approximiert.
- Die bei der verteilten Messung verwendete Anwendung namens Harvester wurde für die Zwecke dieser Semesterarbeit ergänzt und modifiziert.
- Die Sensorknoten wurden nach Bedarf in Messboxen eingebettet und auf der G-Etage des ETZ-Gebäudes verteilt sowie auf der äusseren Terrasse des ETF-Gebäudes platziert. Die verteilte Messung begann am 12.12.2007 und endete am 09.01.2008.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Charakteristischer Verlauf der Strom-Spannung-Kennlinie einer Solarzelle [1] . . . . .	6
3.1	Korrelation der maximalen Leistung mit dem photosynthetisch aktiven Licht. Die Messpunkte stammen aus Messungen an einer Lampe. Die Lichtwerte in Lux wurden mit einem Sensor Modul ermittelt. . . . .	9
3.2	Durch Sonnenbestrahlung bedingte Sequenz von U-I-Kennlinien einer Solarzelle. Je höher die Sonnenlichtintensität ist, desto weiter oben liegen die entsprechenden U-I-Kennlinien [7]. . . . .	9
3.3	Mögliches Schaltungsbild mit einem steuerbaren Schalter, der zeitsynchron mit dem Tmote Sky arbeitet. Dabei wird bei offenem Schalter die Leerlaufspannung, bei geschlossenem Schalter den Kurzschlussstrom periodisch gemessen . . . . .	10
3.4	Korrelation der maximalen Leistung mit der zugehörigen Leerlaufspannung. Die Messpunkte stammen aus den gleichen Messungen an einer Lampe wie in Abbildung 3.1. Die Lichtwerte in Lux wurden ebenfalls mit einem Sensor Modul ermittelt. . . . .	11
3.5	<i>Zelle1</i> [3] . . . . .	12
3.6	<i>Zelle2</i> [4] . . . . .	12
3.7	<i>Zelle3</i> [5] . . . . .	12
3.8	Schematische Darstellung der Verwendung eines Agilent Multimeters zur Bestimmung der maximal erbrachten Leistung einer Solarzelle unter gegebenen Umweltbedingungen . . . . .	13
3.9	Leistungskurven der erfassten maximalen Leistungswerte in Funktion der zugehörigen Leerlaufspannung. Für jede Kurve ist zusätzlich der mögliche exponentielle Verlauf angedeutet. . . . .	13

3.10	Ein Potentiometer wird eingesetzt, um die Wertebereiche der Solarzelle und des Tmote Sky's anzupassen	15
3.11	<i>polynomiale Ansätze der 1. bis 3. Ordnung</i>	16
3.12	<i>polynomialer Ansatz 5. Ordnung</i>	16
3.13	<i>Links: exponentiale Ansätze der 1. bis 3. Ordnung. Rechts: Übersicht des mittleren quadratischen Fehlers</i>	16
3.14	Verlauf der maximalen Leistung in Funktion der Leerlaufspannung anhand der Formel $f(x) = e^{1.6392x-11.3989}$	17
3.15	<i>Messergebnisse bei 10 cm Abstand von der Lichtquelle und unter Belichtungswinkeln von 0°, 30° oder 60°, wobei die Solarzelle ganz beim Deckel (links) oder am Boden (rechts) der Messbox positioniert wurde.</i>	18
3.16	<i>Messergebnisse bei 20 cm Abstand von der Lichtquelle und unter Belichtungswinkeln von 0°, 30° oder 60°, wobei die Solarzelle ganz beim Deckel (links) oder am Boden (rechts) der Messbox positioniert wurde.</i>	18
3.17	Messbox mit äussere Plastikschiicht, die für verteilte Messungen ausserhalb des ETZ-Gebäudes eingesetzt wird	19
3.18	Messbox ohne äussere Plastikschiicht, die für verteilte Messungen innerhalb des ETZ-Gebäudes eingesetzt wird	20
3.19	<i>Vergleich zwischen der bisher berechneten Approximation und der Ergebnisse für die Messanordnungen 'Beide' (links) bzw. 'Zelle' (rechts)</i>	21
3.20	<i>Verlauf der neu berechneten Approximationskurve für die Messanordnungen 'Beide' (links) bzw. 'Zelle' (rechts)</i>	21
4.1	Schematischer Ablauf der periodischen Datenerfassung durch das Sensortimer von mehreren Sensoren eines Sensorknotens	24
4.2	Empfang und Bereitstellung der von der Netzwerksenke ankommenden Datenpakete.	25
4.3	Momentanaufnahme des von der Java-Anwendung Oscilloscope erzeugten Fensters, das die aktuelle Topologie des Sensornetzwerkes anzeigt.	28
4.4	Verwendete Platzierung der Sensorknoten in der ETZ G-Etage für die verteilte Messung. Die Sensorknoten 21 und 23 sind auf der gegenüberliegenden Terrasse vom ETF-Gebäude in etwa 15m Entfernung vom ETZ-Gebäude positioniert worden.	30

5.1	Verlauf der vom Sensorknoten 21 gemessenen Temperatur in °C über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	33
5.2	Verlauf der vom Sensorknoten 21 gemessenen Leerlaufspannung in Volt über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	33
5.3	Verlauf der vom Sensorknoten 21 ermittelten Maximalleistung über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	34
5.4	Verlauf des vom Sensorknoten 21 ermittelten photosynthetisch aktiven Lichts und des sichtbaren Lichts (inkl. Infrarot) über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	34
5.5	Verlauf der vom Sensorknoten 22 gemessenen Temperatur in °C über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	35
5.6	Verlauf der vom Sensorknoten 21 gemessenen Leerlaufspannung in Volt über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	36
5.7	Verlauf der vom Sensorknoten 21 ermittelten Maximalleistung über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	37
5.8	Verlauf des vom Sensorknoten 21 ermittelten photosynthetisch aktiven Lichts und des sichtbaren Lichts (inkl. Infrarot) über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	38
5.9	Verlauf der vom Sensorknoten 13 gemessenen Temperatur in °C über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	39
5.10	Vergleich der vom Sensorknoten 21 am 21.12.2007 ermittelten Sensorwerte. Der Verlauf der Leerlaufspannung ist dem des photosynthetisch aktiven Lichts ähnlicher als dem von sichtbares Licht (inkl. Infrarot)	40
5.11	Verlauf der vom Sensorknoten 13 ermittelten Maximalleistung über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	41
5.12	Verlauf des vom Sensorknoten 13 ermittelten photosynthetisch aktiven Lichts und des sichtbaren Lichts (inkl. Infrarot) über die Zeitspanne vom 17.12.2007 bis 23.12.2007 . . . . .	42
5.13	Momentaufnahme der bestehenden Vernetzung der Sensorknoten . . . . .	43

5.14	Verlauf der Versorgungsspannung in der Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008 . . . . .	44
5.15	Zeitlicher Anteil eines Tages in Prozent mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008 . . . . .	44
5.16	Zeitlicher Anteil eines Tages in Prozent mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008 . . . . .	45
5.17	Zeitlicher Anteil eines Tages in Prozent mit eingeschalteter Deckenbeleuchtung für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008 . . . . .	45
5.18	Von Sensorknoten ohne Solarzelle pro Tag erzeugte Energie in Joule für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008 . . . . .	46
5.19	Von Sensorknoten mit Solarzelle pro Tag erzeugte Energie in Joule für die Messperiode vom 12.12.2007 bis 04.01.2008 . . . . .	47

# Literaturverzeichnis

- [1] Steven Laurier. Experimental analysis of photovoltaic energy scavengers for sensor nodes. Master thesis, Academic year 2006-2007, Computer Engineering and Networks Lab, ETH Zürich.
- [2] T. Eswam und P. Chapman. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *Energy conversion, IEEE Transaction on*, 2:439-339, 2007.
- [3] Encapsulated High Output Solar Cell, 4-6.0-50, Solar World, <http://www.solar-world.com/SolarMini-Panels&Motors.htm>.
- [4] Solarex. MSX-005F, Solar Panel 0.5W, Datasheet. <http://www.farnell.com/datasheets/8196.pdf>.
- [5] Solar cell provided by Clemens Moser, 24/9/2007, Computer Engineering and Networks Lab, ETH Zürich.
- [6] Agilent Technologies. 34980A Multifunction Switch/Measure Unit, Datasheet. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1437EN.pdf>.
- [7] Jaein Jeong, Xiaofan Fred Jiang und David E. Culler. Design and Analysis of Micro-Solar Power Systems for Wireless Sensor Networks. Technical Report No. UCB/EECS-2007-24, Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley, February, 2007.
- [8] MICS SNPK - Low Power Wireless Network, <http://www.btnode.ethz.ch/projects/micssensornetworkplatformkit>.
- [9] Moteiv Corporation. Tmote sky - ultra low power ieee 802.15.4 compliant wireless sensor module, datasheet. <http://www.moteiv.com/products/docs/tmote-sky-datasheet.pdf>, June, 2006.

## Anhang A

# Ermittelte maximale Leistung für Sensorknoten ohne Solarzelle innerhalb des ETZ-Gebäudes

Knotennummer	Platzierungsort	maximale Leistung in mW
0	G 71.1	0.128
1	Gang	0.256
2	Gang	0.402
4	G 64.1	0.0788
5	G 81	0.671
6	G 66	0.0793
7	Gang	0.419
8	G 69	0.0578
9	Gang	0.186
13	G 78.2	0.158
14	G 85	0.177

## Anhang B

# Auflistung der ermittelten Werte bei Messungen an der Sonne

Temperatur in °C	Leerlaufspannung in Volt	maximale Leistung in mW
13.76	2.3156716	0.47555
29.78	2.3606975	0.56543
16.52	2.479809	0.62189
16.57	2.5034306	0.65354
21.46	2.5097507	0.672008
18.69	2.6315493	0.853449
14.51	2.6868282	0.914937
21.58	2.6871599	0.923466
21.65	2.7946431	1.072277
32.02	3.8881018	8.892701
32.23	4.4737393	16.213768
31.71	4.6635949	19.369567
47.96	4.8390299	28.857954
47.42	4.8443142	32.360784
46.81	4.8657589	34.452032
45.85	4.8894614	35.418137
42.32	5.0048345	41.13882
40.88	5.0586167	44.30016

## Anhang C

### Auflistung der ermittelten Werte bei Messungen an der Tischlampe mit äusserer Plastiksicht der Messbox

Temperatur in °C	Leerlaufspannung in Volt	maximale Leistung in mW
29.7	3.26	3.44
29.7	3.3122559	4.157324
29.8	3.5347799	5.110734
30.3	3.5811416	5.467394
29.8	3.6330783	6.413939
30.3	3.6352552	6.529696
31.2	3.9497251	13.314407
31.3	4.0722194	12.279905
31.5	4.2126064	20.931858
31.7	4.2473712	16.622763
33.1	4.5124858	26.12016
33.3	4.6732977	22.217705

## Anhang D

### Auflistung der ermittelten Werte bei Messungen an der Tischlampe ohne äussere Plastiksicht der Messbox

Temperatur in °C	Leerlaufspannung in Volt	maximale Leistung in mW
26.3	3.6512376	3.966718
26.7	3.8370548	4.756498
27.1	3.9741073	6.340569
26.9	4.0724055	7.267695
27.4	4.038539	7.48139
27.1	4.1365863	9.295486
28.5	4.3443745	14.554782
28.3	4.3077809	17.564365
28.7	4.528185	22.155735
28.7	4.6282637	23.212072
29.5	4.6995735	28.18612
29.6	4.5042879	29.4439