

Smart Plug System

Konzeptstudie und Realisierungs-Spezifikationen

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
TU Graz

Autor:
Philipp Mattle

Betreuer:
Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert
DI Maria Aigner

Institutsvorstand: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 - 7551
Telefax: (+43 316) 873 - 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Oktober - 2010





Danksagung

Im möchte meine Diplomarbeit zum Anlass nehmen meinen Eltern, Daniela und Anton Mattle, dafür zu danken, dass sie zu jeder Zeit hinter mir gestanden sind und ich während meiner gesamten Studienzeit Rückhalt aus dem Elternhaus verspüren konnte.

Mein inniges Dankeschön gilt meiner Freundin Manuela Kathrein für ihre alltägliche Unterstützung und ihr Verständnis, wenn wir auf gemeinsame Stunden verzichten mussten.

In fachlicher Hinsicht gilt mein Dank Frau DI Maria Aigner für ihr Bemühen und ihre Hilfe während der gesamten Arbeit und meinem Betreuer Herrn Univ-Prof. Dr. Lothar Fickert für die Ermöglichung dieser Arbeit.

Für die Bereitstellung der Hardware und die weiterführende Betreuung danke ich der Firma Siemens AG Österreich und besonders Herrn DI Peter Hanak, der mit seinem Einsatz zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 06.10.2010

Philipp Mattle

GENDER

In der vorliegenden Arbeit werden personenbezogene Bezeichnungen häufig in männlicher Form angeführt, sie beziehen sich jedoch auf Frauen und Männer in gleicher Weise. Wird auf bestimmte Personen Bezug genommen, wird die zutreffende geschlechtsspezifische Form verwendet.



Kurzfassung

Durch die Aktualität von Klimaproblematik und Ressourcenknappheit werden Energieeffizienz und Energiesparen immer wichtiger. Mit der starken Präsenz dieser Themen in der Öffentlichkeit nimmt das Interesse der Konsumenten, dadurch einen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten, zu. In dieser Arbeit wird ein System zur Messung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern in Haushalten vorgestellt, das die Konsumenten unterstützt, die Energie effizient und sparsam einzusetzen.

Das Kernelement des Smart Plug Systems ist eine integrierte Schaltung, die zur Messung des Energieverbrauchs von einzelnen Haushaltsgeräten eingesetzt wird. Die integrierte Schaltung verfügt über ein Hallelement, mit dem der vom Gerät bezogene Strom gemessen wird. Zusammen mit einer Spannungsmessung erfolgt über die Bestimmung der Momentanleistung die Ableitung des Energieverbrauchs. Die integrierte Schaltung als Ein-Chip-System (System-on-Chip) vereinigt die Messfunktion mit der Funktion zur Datenübertragung an ein Smart Meter über die kabellose Variante des M-Bus nach EN 13757-4 auf einem elektronischen Baustein. Dieser Baustein ist in eine Zwischensteckvorrichtung verbaut, die mechanisch mit dem Geräteanschlussstecker verbunden wird. Durch das Smart Meter erhält das Smart Plug System unterschiedliche Möglichkeiten zur Anzeige der Messdaten (In-Home Display, Internetportal). Mit der Verbindung zum Smart Meter ermöglicht das Smart Plug System die Miteinbeziehung der elektrischen Einzelverbraucher in das Smart Grid.

Aufbauend auf die Vorstellung des Konzepts definiert diese Arbeit Spezifikationen für die Realisierung der integrierten Schaltung und zeigt anhand eines Demonstrationsaufbaus die reale Umsetzung der Kommunikationsverbindung des Smart Plug Systems zu einem Automated Meter Management System.



Abstract

Energy efficiency and energy conservation are becoming more and more important issues due to climate change and scarce resources. As a result of extended media coverage of these topics the public interest in environmental preservation including energy conservation is increasing. This thesis presents, the Smart Plug System, a power monitoring system for single home appliances to assist consumers to achieve an efficient and economic usage of energy.

The core of the Smart Plug System is an integrated microsystem for measuring the power consumption of single electrical appliances. A Hall-sensor is used for measuring the electric current, drawn by the connected appliance. In combination with a voltage measurement the instantaneous electrical power is determined for the evaluation of the energy consumption. The integrated microsystem as System-on-Chip (SoC) concatenates the described measuring unit with the communication functionality of the Smart Plug System on one single chip. The Smart Plug System uses the wireless M-Bus according to EN 13757-4 for data transmission to a Smart Meter. The integrated microsystem for measuring and communications is integrated in an adapter-plug like shape, that is mechanically interconnected with the appliance plug. The connection to the Smart Meter provides the Smart Plug System with multiple options to display the measured data, like In-Home Display units or websites. Furthermore this connection to the Smart Meter enables electrical home appliances to take part in the Smart Grid.

In advance to the introduction of the system concept, this work derives specifications for the development of the integrated circuit and shows an experimental setup for the communication between the Smart Plug System and an Automated Meter Management System.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
Kurzfassung	5
1 Einleitung	6
1.1 Beschreibung	6
1.2 Motivation	8
1.3 Aufgabe	11
1.4 Hintergrund	11
1.5 Ähnliche Arbeiten	12
2 Methoden	15
3 Zieldefinition	16
4 Einsatzszenarien	18
4.1 Szenario 1: Konsumenteninformation in Echtzeit	18
4.2 Szenario 2: Geräteüberwachung	21
4.3 Szenario 3: Geräte störungswarnung	21
4.4 Szenario 4: Statistische Auswertung	24
4.5 Szenario 5: Energieberatung	27
4.6 Szenario 6: Virtueller Energieberater	28
4.7 Szenario 7: Gesteuertes Schalten von zentraler Stelle	30
4.8 Szenario 8: Netzgesteuertes Lastmanagement	31
4.9 Szenario 9: Notstromversorgung – Dezentrale Erzeuger	32
4.10 Zusammenstellung der Anforderungen aus den Szenarien	34
5 Smart Plug Systemkonzept	36
5.1 Anforderungsanalyse	37
5.2 Systemstruktur	38



6 Systemvarianten	40
6.1 Variante 1: Autonomes System	40
6.2 Variante 2: Teilsystem	42
6.3 Realisierung im Smart Plug System	44
7 Kommunikation	48
7.1 Smart Meter Kommunikation	48
7.2 Realisierung im Smart Plug System	53
7.3 Kommunikationstest Smart Plug System	61
8 Systemaufbau	75
8.1 Umsetzungsmöglichkeiten	75
8.2 Realisierung des Smart Plug Systems	82
9 Messung	85
9.1 Definitionen	86
9.2 Messmethode	92
9.3 Physikalisches Messprinzip	94
9.4 Messverfahren	98
9.5 Abtastung und Quantisierung	104
9.6 Leistungsberechnung	112
9.7 Realisierung im Smart Plug	123
10 Zusammenfassung	132
11 Ausblick	134
Literaturverzeichnis	136

Abkürzungsverzeichnis

α	Winkel des ersten Abastwerts der Periode
Δ	Quantisierungsstufenbreite
δ	Winkel des Abschneidefehlers
γ	Winkel der Abtastperiode
λ	Leistungsfaktor
θ	Magnetische Durchflutung in A
\underline{I}	Komplexer Stromzeiger in A
\underline{S}	Komplexe Scheinleistung in VA
\underline{U}	Komplexer Spannungszeiger in V
φ	Phasenverschiebungswinkel zw. Spannung und Strom
φ	Phasenverschiebungswinkel
φ_1	Phasenwinkel zw. der Grundschiwingung von U und I
φ_k	Phasenwinkel zwischen den Harmonischen mit der Ordnungszahl k von U und I
\vec{B}	Vektor der magnetischen Flussdichte in T
\vec{F}	Kraftvektor in N
\vec{H}	Vektor der magnetischen Feldstärke in A/m
\vec{s}	Vektor des Wegelements in m
\vec{v}	Vektor der Geschwindigkeit der Ladungsträger in m/s
ζ	Winkel zwischen der Abtastung von Spannung und Strom
B	Magnetische Flussdichte in T
d	Dicke des Hallelements in m
e	Elementarladung in C
f_a	Abtastrate in $\frac{\text{Abtastwerte}}{\text{s}}$
f_{smax}	Maximal auftretende Signalfrequenz in Hz
H	Magnetische Feldstärke in A/m
I	Effektivwert des elektrischen Stroms in A



i	Elektrischer Strom in A
$I(k)$	Effektivwert des elektrischen Stroms der Harmonischen mit Ordnungszahl k in A
I_0	Gleichanteil des elektrischen Stroms in A
I_1	Effektivwert der Grundschwingung des elektrischen Stroms in A
I_H	Hallelementstrom in A
I_i	Strom in A
I_{max}	Grenzstrom in A (Effektivwert)
I_{min}	Mindeststrom in A (Effektivwert)
I_{tr}	Übergangsstromstärke in A (Effektivwert)
L_{opt}	Wegstrecke im optischen Medium in m
n	Ladungsträgerdichte in $1/m^3$
P	Wirkleistung in W
p	Momentanleistung in W
$P(k)$	Wirkleistung der Harmonischen mit Ordnungszahl k in W
P_1	Wirkleistung der Grundschwingung in W
Q	Blindleistung in var
q	Elektrische Ladungsmenge in C
$Q(k)$	Blindleistung der Harmonischen mit Ordnungszahl k in var
Q_1	Blindleistung der Grundschwingung in var
Q_{\sim}	Gesamtblindleistung in var
r	Radius in m
S	Scheinleistung in VA
T	Periodendauer in s
t	Zeit in s
U	Effektivwert der elektrischen Spannung in V
$U(k)$	Effektivwert der elektrischen Spannung der Harmonischen mit Ordnungszahl k in V
U_0	Gleichanteil der elektrischen Spannung in V
U_1	Effektivwert der Grundschwingung der elektrischen Spannung in V
U_1	Grundschwingung der elektrischen Spannung in V
U_2, \dots, U_n	Oberschwingungen der elektrischen Spannung in V



U_H	Hallspannung in V
U_N	Referenzspannung in V (Effektivwert)
u_{AB}	Elektrische Spannung zwischen Punkt A und B in V
V	Effektivwert der zeitabhängigen Größe $v(t)$
V_0	Gleichanteil der zeitabhängigen Größe $v(t)$
V_C	Verdet-Konstante in $1/(m \tau)$
V_k	Effektivwert der Harmonischen mit Ordnungszahl k der zeitabhängigen Größe $v(t)$
X_m	Maximaler Aussteuerungsbereich
AES	Advanced Encryption Standard
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMIS	Automated Metering and Information System
AMM	Automated Meter Management
AMR	Automated Meter Reading
BCD	Binary-Coded-Decimal
CBC	Cipher-Block-Chaining
CD	Compact Disc
CEE	Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CIC	Cascaded Integrator-Comb
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COSEM	Companion Specification for Energy Metering
CRC	Cyclic Redundancy Check
DES	Data Encryption Standard
DFT	Discrete Fourier Transform
DIB	Data Information Block
DIF	Data Information Field
DIFE	Data Information Field Extension
DLC	Distribution Line Communication
DLNA	Digital Living Network Alliance
DSMR	Dutch Smart Meter Requirements



DTFT	Discrete-Time Fourier Transform
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
FFT	Fast Fourier Transform
IEV	International Electrotechnical Vocabulary
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
KNX	Konnex
M-Bus	Metering Bus
MPE	Maximum Permissible Error
NIALM	Nonintrusive Appliance Load Monitoring
NILM	Nonintrusive Load Monitoring
OBIS	Object Identification System
OMS	Open Metering System
OPEN meter	Open Public Extended Network Metering
OSI	Open Systems Interconnection
PLC	Powerline Communication
SM-CG	Smart Metering Coordination Group
SMS	Short Message Service
SoC	System-on-Chip
SOI	Silicon-on-Insulator
THF	Total Harmonics Factor
USB	Universal Serial Bus
VIB	Value Information Block
VIF	Value Information Field
VIFE	Value Information Field
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network

Kurzfassung

Ziel

Mit dem Smart Plug System zur Messung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern soll dem Konsumenten ein Hilfsmittel für einen effizienten und sparsamen Einsatz von elektrischer Energie zur Verfügung gestellt werden. Die Entwicklung eines Konzepts für ein derartiges System ist das Ziel dieser Arbeit. Neben dem Konzept werden konkrete Realisierungs-Spezifikationen für die Umsetzung des Smart Plug Systems mit einer integrierten Schaltung als Kernelement gezeigt.

Methode

In der vorliegenden Arbeit wird eine konzeptionelle Analyse eines Systems zur Messung des Energieverbrauchs auf Geräteebene mit einem Ein-Chip-System (System-on-Chip) als Hauptelement durchgeführt. Die Erstellung des Konzepts folgt dem Top-Down-Ansatz einer deduktiven Vorgehensweise. Für den Test der Integration des Smart Plug Systems in das intelligente Stromnetz wird die Messeinheit des Systems kommunikationstechnisch mit einem Personal Computer simuliert.

Ergebnisse

Die Arbeit zeigt eine Möglichkeit zur Integration von elektrischen Einzelverbrauchern in das intelligente Stromnetz. Durch den Test der Anbindung des Smart Plug Systems an ein Automated Meter Management (AMM) System wird gezeigt, dass die Einbindung von elektrischen Geräten über das Smart Meter möglich ist. Mit dem Smart Plug System wird eine technische Lösung vorgestellt, die den Konsumenten unterstützt den Einsatz von elektrischer Energie im Haushalt effizient und sparsam zu gestalten.

Schlussfolgerungen

Durch die gemeinsame Darstellung von Geräteenergieverbrauch und Gesamtenergieverbrauch des Haushalts über das Smart Meter, wird dem Konsumenten die Kontrolle des Haushaltsenergieverbrauchs auf Geräteebene ermöglicht und Eigeninitiativen im Bereich des Energiesparens gefördert. Mit der Integration von Informationen zum elektrischen Energieverbrauch auf Geräte- und Haushaltsebene sowie Verbrauchsdaten anderer Energieträger des Haushalts wird das Smart Meter zur zentralen Anlaufstelle für Verbrauchsinformationen im Haushalt.

1

Kapitel 1

Einleitung

Mit der vorangestellten Beschreibung des Smart Plug Systems soll dem Leser der Einstieg in das Thema der Arbeit erleichtert werden. Die Motivation, dieses Thema zu bearbeiten, bildet den Ausgangspunkt für die Bearbeitung des Themas und gibt zusammen mit den darauffolgenden Abschnitten 1.3 und 1.4 Hintergrundinformation zur vorliegenden Arbeit. Der Abschluss dieses einführenden Kapitels in Abschnitt 1.5 zeigt ähnliche Arbeiten im Bereich der Messung des Energieverbrauchs auf Geräteebene.

1.1 Beschreibung

Die Aufgabe der Diplomarbeit Smart Plug System ist die Entwicklung eines Konzepts zur Messung der Energieaufnahme von elektrischen Einzelverbrauchern in Haushalten. Der Name Smart Plug steht hierbei für den intelligenten Stecker. Die Intelligenz erhält der Stecker durch eine elektronische Baugruppe, die in einen Zwischenstecker eingebaut ist, und mit dem Gerätestecker verbunden wird.

Herzstück des Smart Plug Systems ist eine integrierte Schaltung zur Messung der elektrischen Leistung, Ausgabe von Steuerbefehlen für eine Schalteinrichtung und die mit diesen Aufgaben verbundene Verarbeitung und Übertragung von Daten.

Zur Messung des Stroms, der vom angeschlossenen Gerät bezogen wird, kommt ein Hall-sensor zum Einsatz. Der Hallsensor gibt eine zum Magnetfeld, das durch den elektrischen Strom hervorgerufen wird, proportionale Spannung aus, die in weiterer Folge digitalisiert wird. Um die anliegende Spannung mit einem Digital-Analog-Wandler bestimmen zu können wird mit einem Spannungsteiler eine zur Netzspannung proportionale Spannung erzeugt, die in einem für die Schaltung auswertbaren Bereich liegt. Nach der analogen Vorverarbeitung werden beide Messsignale synchron mit einer, an die Netzfrequenz angepassten, Abtastfrequenz diskretisiert und digitalisiert.

Mit Hilfe der beiden Messungen erfolgt auch die Auswertung des Phasenwinkels zwischen Spannung und Strom, um den Anteil von Wirk- und Blindenergie zu bestimmen.

Anhand von technischen Normen und Richtlinien erfolgt die Bestimmung der techni-



schen Parameter für das Smart Plug System. Aktuelle Entwicklungen werden durch Informationen von Vertretern aus der Industrie und fach einschlägigen Organisationen in der Arbeit berücksichtigt.

Ziel der Arbeit ist es, aus der Analyse von Einsatzszenarien und Umsetzungsvarianten eines intelligenten Steckers auf Systemebene, ein Konzept zur Verwirklichung und Verwendung des Smart Plug Systems im Haushaltsbereich zu erarbeiten. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Definition von Anforderungen an die Realisierung der integrierten Schaltung, die als Messeinheit direkt am Gerät den Kern des Smart Plug Systems darstellt.

Das Smart Plug System, als Synonym für den intelligenten Gerätestecker (Smart Plug), stellt verbrauchsseitig einen Bestandteil des intelligenten Stromnetzes (Smart Grid) dar. Mit der Anbindung der Smart Plug Messeinheiten an das Smart Meter wird damit der Verbraucher in das intelligente Stromnetz eingebunden. Das Smart Meter verkörpert die Schnittstelle zwischen Stromnetz und Haushalt und stellt somit die Verbindungskomponente zwischen dem intelligenten Stromnetz und dem Haushalt dar.

Da die Kommunikationsinfrastruktur für das intelligente Messsystem im Stromnetz auch zur Übertragung von Verbrauchsdaten anderer Energieträger im Haushalt eingesetzt werden soll, bildet das Smart Meter sozusagen die zentrale Stelle für Energieverbrauchsinformationen im Haushalt.[72] Die Verbindung des Smart Plug Systems erweitert die Informationen des Smart Meters mit dem gerätespezifischen Energieverbrauch. Über das Smart Meter erhält der Konsument damit zentral Informationen zum Haushaltsenergieverbrauch aufgeteilt nach Energieträger und elektrischem Haushaltsgerät.

Diese Integration des Smart Plug Systems in das Smart Grid ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt und zeigt den Informationsaustausch mit der zentralen Komponente Smart Meter.

Als Erweiterung können die Smart Plug Einheiten mit einem elektrischer Schalter ausgestattet werden, der den angeschlossenen Verbraucher vom Netz trennen kann. Dies ermöglicht eine Zu- und Abschaltung von Geräten und erschließt damit neue Anwendungsgebiete für das Smart Plug System. Der Informationsweg zum Smart Plug Schalter ist ebenfalls in Abbildung 1 gezeigt.

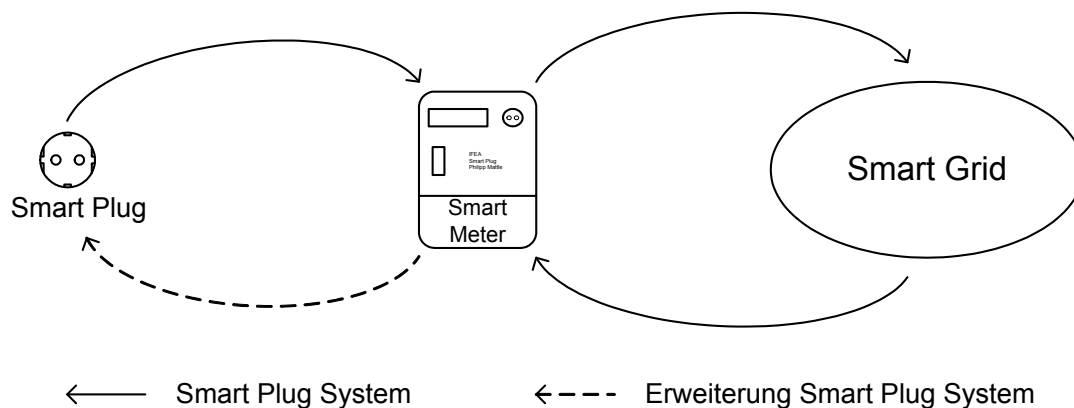


Abbildung 1: Informationsaustausch Smart Plug System

Eine Konzept zur Umsetzung des Smart Plug Systems mit konkreten Vorgaben für die Realisierung sowie die Einbindung des Smart Plug Systems in ein Automated Meter Management (AMM) System werden in dieser Arbeit gezeigt. Die Verbindung der Smart Plug Einheiten mit einem Smart Meter wird an einem Testsystem demonstriert und im Kapitel 7 beschrieben.

1.2 Motivation

Die Themen Energiesparen und Energieeffizienz rücken durch die Klimaproblematik und die „20 und 20 bis 2020“ [66] Ziele der Europäischen Gemeinschaft mehr und mehr in das Licht der Öffentlichkeit.

Um wirksam die Effizienz von Haushaltsgeräten zu steigern, bedarf es Informationen über den tatsächlichen Energieverbrauch von Geräten und das Nutzerverhalten. Obwohl der Gesamtstromverbrauch von Haushalten eine bekannte Größe für die Elektrizitätsunternehmen ist, sind kaum detaillierte Informationen über die wirkliche Aufteilung des Verbrauchs auf die Einzelgeräte im Zeitverlauf vorhanden, und der wahre Energieverbrauch bleibt die meiste Zeit im Dunkeln. Viele Menschen haben nur ein vages Gefühl, wie viel Energie sie für welchen Zweck aufwenden.[119]

Neben einer Steigerung der technischen Effizienz von Geräten ist ein energiebewusstes Nutzerverhalten für Energieeinsparungen ein wichtiger Faktor. Ein derartiges Verbrauchsverhalten bedarf der Information über den Energieverbrauch der Verbraucher, denn mangelndes Bewusstsein und ungenügende Information hinsichtlich des Energieverbrauchs sowie Kosten sind oft Hemmnisse für energieeffizientes Verhalten.[139]

Der Weg zu aktiven Energiesparen durch die Nutzer führt über Anreize und Information, wie unterschiedliche Untersuchungen [130, 95] zeigen. Eine ebenso wichtige Rolle wie Vorschriften und Anreize kommt folglich einer möglichst feingranularen Information zum Energieverbrauch zu. Ohne zeitnahe Rückmeldung ist es kaum möglich, einen ineffizienten Umgang mit Energie zu erkennen und somit Gewohnheiten zu ändern.[139]

Bewusstsein im Bezug auf den Energieverbrauch hilft positive Emotionen, die durch das Energieeinsparen als Beitrag zum Umweltschutz ausgelöst werden, zu nutzen, um Motivation für einen kontinuierlichen Prozess des Energiesparens zu schaffen. Neben diesem guten Gefühl trägt die Information zum Energieverbrauch von Geräten auch dazu bei, effektive Kosteneinsparungen zu erkennen und damit monetäre Vorteile zu realisieren.[130, 141]

Unmittelbare und direkte Information von Nutzern kann Einsparungen im Bereich von 5 - 15 Prozent bringen, wie in Referenz [119] gezeigt wird. Speziell für nicht heizende Verbraucher ist eine zeitnahe Rückmeldung aufgrund der kürzeren Zeitkonstanten besonders wertvoll.

Zu wissen, wo und wann die elektrische Energie im Haushalt verbraucht wird, bildet zudem die Basis für die Entwicklung von effektivem netzgeführtem Lastmanagement im Haushalt und für die Schaffung entsprechend wirksamer, zeitlich variabler Stromtarife.

Um diese Informationen zu gewinnen, bedarf es einer Lösung, die exakt und möglichst ohne besonderen Aufwand den elektrischen Verbrauch aufzeichnet und an zentraler Stelle im Haushalt bereitstellt. Eine technische Lösung mittels des Smart Plug Systems setzt genau diese Forderungen um.

Mit seiner integrierten Messfunktion kann das Smart Plug System zur Aufzeichnung von individuellen Lastprofilen von Einzelverbrauchern im Haushalt eingesetzt werden. Aus der Messung des tatsächlichen Energieverbrauchs von einzelnen Geräten können die maßgeblichen Energieverbraucher bestimmt werden. Die Identifizierung der Geräte mit hohem Verbrauch ermöglicht es, gezielte Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung zu setzen und zeigt Sparpotentiale im Haushalt auf. Die vom Smart Plug System aufgenommenen Daten beinhalten neben dem Geräteenergieverbrauch die Zeit des Verbrauchs. Diese Informationen in Kombination mit einem Smart Meter ermöglichen die Zusammensetzung des Gesamtlastgangs des Haushalts zu Nieder- und Hochlastzeiten zu analysieren. Das Wissen über die zeitliche Zusammenstellung des elektrischen Energieverbrauchs erlaubt darüber hinaus das Erkennen von Lastverschiebungspotentialen für

die aktive Einbeziehung von Verbrauchern in das elektrische Netz durch Lastmanagement.

Neben der Steigerung der Energieeffizienz von Verbrauchern in Haushalten scheint die aktive Teilnahme von bestimmten Verbrauchergruppen für eine möglichst verbrauchsnahe Erzeugung aus erneuerbaren Energieträgern bei gleichzeitig effizienter Umwandlung von fossilen Brennstoffen ein beachtenswerter Weg zu sein, um die „20 und 20 bis 2020“ [66] Ziele zu erreichen. Die Schaltfunktion des erweiterten Smart Plug Systems unterstützt hierbei aktives Lastmanagement, da das Zu- und Abschalten von bestimmten Verbrauchern durch Tarif- oder Netzinformation automatisiert gesteuert werden kann. Das Smart Meter stellt die Übergabestelle für die Tarif- und Netzinformation dar und ist somit eine wichtige Schnittstelle für die Umsetzung von netzgeführtem Lastmanagement. Das netzgeführte Lastmanagement ist eine Funktion eines intelligenten Stromnetzes in dem die unterschiedlichen Teilnehmer miteinander kommunizieren um das Gesamtsystem zu optimieren.

Für die Entwicklung des intelligenten Stromnetzes, kommt dem Smart Meter an der Schnittstelle zwischen Verteilnetz und Haushalt eine zentrale Bedeutung zu. Für die Miteinbeziehung der kleinsten organisatorischen Einheit, dem Haushalt, in das Netz ist die Komponente an der Systemgrenze (Smart Meter) von besonderer Bedeutung, da diese für die systemübergreifende Kommunikation genutzt werden kann. Besonders interessant ist die Nutzung dieser Infrastruktur, zumal mit einer sehr hohen Verfügbarkeit von Smart Metern in Haushalten aufgrund der Richtlinien 2009/72/EG [68], die besagt, dass bis 2020 80% der Verbraucher mit intelligenten Messsystemen ausgestattet werden, in der Europäischen Gemeinschaft zu rechnen ist. Als Messkomponente beim Kunden ist das Smart Meter die Basiskomponente eines intelligenten Messsystems. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Smart Meter als Synonym für einen intelligenten Elektrizitätszähler verwendet. Die Smart Meter Infrastruktur soll nicht auf den Energieträger Elektrizität beschränkt sein, sondern die unterschiedlichen Energieträger im Haushalt wie beispielsweise Gas oder Fernwärme gemeinsam integrieren, wie ein Konsultationspapier der österreichischen Regulierungsbehörde E-Control GmbH [72] und mehrere Initiativen aus Deutschland [48, 104] zeigen. Damit wird das Smart Meter zum zentralen Informationsknoten für Verbrauchsinformationen im Haushalt. Aus diesem Grund erscheint die Verbindung des Smart Plug Systems mit dem Smart Meter als sinnvoll und wird in dieser Arbeit behandelt.

1.3 Aufgabe

Die Aufgabe der Diplomarbeit ist die Entwicklung eines Konzepts, ausgehend von der Idee einer integrierten Halbleiterschaltung zur Messung von elektrischer Energie mit Kommunikationsfähigkeiten bis hin zu einer Invention, die als integrierte Prototypschaltung umgesetzt werden kann.

Mit dieser Idee als Ausgangspunkt gilt es, die Schritte bis hin zur praktischen Umsetzung der Schaltung zu bestimmen. Demzufolge beinhaltet die Arbeit die Festlegung des Zielraums für das Smart Plug System. Die Entwicklung von Szenarios für den Einsatz des Smart Plug Systems bildet die Grundlage für die Bestimmung der Ziele. In welcher Form das Smart Plug System eingesetzt wird und welchen Einfluss dies auf die tatsächliche Verwendung des Systems hat, gilt es in weiterer Folge zu klären. Eine Analyse dieser Systemvarianten auf eventuelle Einschränkungen ist für die folgende Detailanalyse eine wertvolle Angabe, da sich darausfolgend Ausschlusskriterien für bestimmte Umsetzungen ergeben können.

Das Entwickeln eines Konzepts für das Smart Plug System ist als ein Aufzeigen von unterschiedlichen Lösungswegen ohne einer vorausgehenden Einschränkung des Lösungsraumes zu sehen. Deshalb wird auf eine Vorauswahl von Lösungsvarianten in den behandelten Teilgebieten verzichtet.

Um von Synergien mit anderen Systemen im Umfeld des Smart Plug Systems profitieren zu können, ist auf die Kompatibilität zu relevanten Systemen zu achten und die Möglichkeiten einer Kopplung zum Smart Plug System zu prüfen. Die Interoperabilität des Smart Plug Systems mit den relevanten Systemen wird nach Möglichkeit durch Versuche an einem konkreten Testaufbau überprüft.

Der Weg hin zu einem Konzept für die integrierte Schaltung, das auf ein funktionierendes Gesamtsystem ausgerichtet ist, erfolgt über die Bewertung von Umsetzungsmöglichkeiten im Bezug auf deren Realisierbarkeit. Eine Abwägung der Vor- und Nachteile von unterschiedlichen Umsetzungsvarianten führt zu einer Auswahl der Systembausteine für die Realisierung des Smart Plug Systems.

1.4 Hintergrund

Die Idee einer integrierten Schaltung zur Messung der elektrischen Energie und deren Anbindung an ein Informationssystem ist im Rahmen des ASIC Design Wettbewerb 2009 des Instituts für Elektronik der Technischen Universität Graz in Kooperation mit

der Firma Infineon Technologies Austria am Institut für elektrische Anlagen entstanden. Diese Idee von Herrn DI Christian Elbe und Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert wurde im Rahmen der Tagung Austrochip 2009 präsentiert und als Sieger des ASIC Design Wettbewerbs 2009 ausgewählt. Dem Siegerprojekt des ASIC Design Wettbewerbs wird es ermöglicht, nach erfolgtem Schaltungsdesign eine Prototypenfertigung umzusetzen und die entstandenen Muster zu nutzen.

Durch die Einrichtung eines Testaufbaus für Automated Meter Management Systeme am Institut für elektrische Anlagen lassen sich Untersuchungen zu neuen Möglichkeiten im intelligenten Stromnetz durchführen. Damit ergibt sich die Gelegenheit die Integration des Smart Plug Systems, in das Smart Grid zu erproben, um in weiterer Folge die Möglichkeiten der Einbindung von einzelnen elektrischen Verbrauchern in das intelligente Stromnetz zu testen.

1.5 Ähnliche Arbeiten

In der englischsprachigen Literatur werden Systeme zur Messung und Aufzeichnung von Leistungswerten beziehungsweise Energieverbrauch von elektrischen Verbrauchern als „Power Monitoring Systems“ bezeichnet. Diese verschiedenen Systeme lassen sich anhand ihrer Messmethode und gemäß ihres Einbaus klassifizieren. Eine mehrfach in diesem Zusammenhang verwendete Einordnung unterscheidet zwischen direkter und indirekter Messung. Es wird des Weiteren in Systeme die für den direkten Einbau am Gerät beziehungsweise am Anschluss der Geräte vorgesehen sind und Systeme zur Ermittlung des Energieverbrauchs von Einzelgeräten durch Messung der Gesamtleistung eines Haushalts am Anschlusspunkt zum Verteilnetz unterteilt, wobei letztere in vielen Arbeiten als NILM (Non Intrusive Load Monitoring) Systeme bezeichnet werden.

Die Aktualität der Themen Energiesparen und Energieeffizienz hat zu diversen Entwicklungen zur Unterstützung von Maßnahmen zum nachhaltigen Umgang mit Energie sowohl im wissenschaftlichen als auch im kommerziellen Umfeld geführt. Ein Teil dieser unterstützenden Maßnahmen ist die Messung des realen Energieverbrauchs von Einzelgeräten in quasi Echtzeit, um unter anderem dem Nutzer eine möglichst fein aufgelöste Rückmeldung zu seinem Energieeinsatz zu geben und so ein Gefühl für den effizienten Einsatz von Energie zu vermitteln. Die Automatisierung von energieeinsparenden Maßnahmen ist ein weiterer Teilbereich der technischen Unterstützung und kann darüberhinaus eine gewisse Komfortsteigerung mit sich bringen.

Systeme für den Einsatz direkt am Einzelverbraucher werden in [140, 141] als kabel-

lose Sensornetzwerke ausgeführt, die als in sich abgeschlossene System arbeiten. Eine direkte Messung des Energieverbrauchs am Anschluss des Geräts ist in [140] umgesetzt, wohingegen [141] eine indirekte Messung über Sensoren für verschiedene physikalische Größen bevorzugt. Die direkte Messung der elektrischen Energie am Einzelverbraucher in Form eines Zwischensteckers wird in [138] gezeigt. Im Unterschied zu den vorher referenzierten Projekten ist in dieser Umsetzung die Verbindung zu einem Hausautomatisierungssystem realisiert worden. Neben den bisher erwähnten wissenschaftlichen Arbeiten sind kommerzielle Produkte wie Watts up [47] und Plogg [93], die jeweils als Zwischenstecker ausgeführt sind, verfügbar. Diese Produkte verfügen über die Möglichkeit von kabelgebundener beziehungsweise kabelloser Kommunikation. Sie sind aber als in sich abgeschlossene Systeme konzipiert und verfügen über Möglichkeiten zur Kommunikation über IP¹-Netze. Mit Preisen über EUR 100,- je Stück sind die Investitionskosten relativ hoch, wenn mehrere Geräte damit ausgestattet werden. Neben diesen Produkten sind Verbrauchsmessgeräte ohne Kommunikationsmöglichkeit, die elektrische Parameter direkt anzeigen und an der Steckdose als Einzelmessgerät betrieben werden, wie beispielsweise Kill a Watt [36], verfügbar.

Systeme, die an einer zentralen Stelle im Haushalt den Gesamtstromverbrauch aufzeichnen, sind das Gegenstück zur Aufzeichnung pro Steckdose. Diese Systeme nutzen statistische Signatuerkennungsverfahren zur Ermittlung des Energieverbrauchs von Einzelgeräten. Diese Methoden nutzen Modelle zur Beschreibung von einzelnen Geräten oder Gerätegruppen für die Trennung des Gesamtlastgangs in die geräteindividuellen Komponenten. Unterschiedliche Arbeiten wie beispielweise [92, 75, 100, 78] zeigen Ansätze und Umsetzungen solcher Systeme.

Problematisch sind die Komplexität der Stromkreise, die Genauigkeit der Messung und die Geräteerkennung für diese Systeme. Im Speziellen ist der Umgang mit mehrstufigen Geräten schwierig, die im Verlauf der Zeit ihr Verbrauchsprofil ändern.[141]

Diese Systeme brauchen Lernphasen, um die Algorithmen auf die verwendeten Geräte zu trainieren. Dazu ist wiederum die Messung von elektrischen Parametern direkt am Geräte erforderlich, um individuelle Daten für das Training zu erhalten.

Mit dem Smart Plug System wird ein, für die Integration in die im Ausbau befindliche Smart Metering Infrastruktur, geeignetes System geschaffen, um die Synergieeffekte aus der Verbindung der Systeme auszunutzen. Die Nutzung des Smart Meters als zentrale Sammelstelle für Energieinformationen und die Verbindung des Smart Plug Systems

¹Internet Protocol



mit einer in Haushalten verfügbaren Infrastruktur erhöhen den Nutzen der einzelnen Systeme.

Die Möglichkeit, den Energieverbrauch von mehreren Geräten im Haushalt gleichzeitig ohne Aufwand für den Nutzer aufzuzeichnen, und die Übertragung der Information der verteilten Geräte an eine zentrale, sowie in der Mehrheit der Haushalte verfügbaren, Stelle zeichnen das Smart Plug System aus. Die Umsetzung in einer eigenen integrierten Schaltung bietet die Möglichkeit eines flexiblen und platzsparenden Aufbaus. Das Smart Plug System kann ohne vorangehende Messungen und Trainingsphasen installiert werden. Diese einfache Handhabung des Systems ist Voraussetzung für die selbstständige Installation durch den Konsumenten. Dass kein Fachmann für die Installation benötigt wird, bringt neben einem Kostenvorteil die Eliminierung der psychologischen Schranke, jemanden Fremden Zutritt zu privaten Räumen geben zu müssen.

In den folgenden Kapiteln wird aufbauend auf einer Beschreibung von verschiedenen Anwendungsfällen für ein System zur Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern der Aufbau eines derartigen Systems skizziert und durch eine Bewertung der unterschiedlichen Möglichkeiten die Auswahl von Spezifikationen für das Smart Plug System begründet.

2 Kapitel 2

Methoden

Diese Arbeit ist eine konzeptionelle Analyse der Entwicklung eines Systems zur Messung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern mit einer integrierten Schaltung als Kernelement. Für die Erstellung des Konzepts wird grundsätzlich eine deduktive Vorgehensweise angewandt, um die Idee hin zu einer konkreten Realisierung weiterzuentwickeln.

Die Arbeit beginnt mit der Formulierung von Einsatzmöglichkeiten des Systems und zeigt die Entwicklung von Realisierungsspezifikationen nach dem Top-Down-Ansatz. Dementsprechend folgt auf die Betrachtung auf Systemebene in den Kapiteln 4 bis 6 die Erarbeitung konkreter Umsetzungsstrategien in den Kapiteln 7 bis 9. Mit dem Aufzeigen von Anwendungsfällen in Kapitel 4 werden verschiedene Szenarien für die Verwendung des Smart Plug Systems analysiert um aus den Zielvorstellungen Anforderungen an das System abzuleiten.

Um die Realisierbarkeit der Integration des Smart Plug Systems in ein intelligentes Stromnetz zu überprüfen, wird die Verbindung einer Smart Plug Einheit zum Smart Meter an einem Demosystem getestet. Für die Durchführung der Tests wird mit dem Programm Matlab (Mathworks Inc., Natick, USA) ein Simulator für den Smart Plug als OMS²[106] konformer Zähler umgesetzt. Die Funkschnittstelle für den Informationsaustausch mit dem Smart Meter ist mit dem Funkmodul AMB8465-M (AMBER wireless GmbH, Köln, Deutschland) realisiert worden.

Vor der tatsächlichen Durchführung der Tests wird die Kommunikation zwischen den beteiligten Einheiten simuliert und der Smart Plug Simulator auf den realen Einsatz abgestimmt.

Als Automated Meter Management Testsystem kommt das Automated Metering and Information System (AMIS) der Firma Siemens AG (Wien, Österreich) zum Einsatz. Die konkrete Umsetzung des Versuchsaufbaus und die Durchführung der Tests wird in Kapitel 7 näher beschrieben.

²Open Metering System

3

Kapitel 3

Zieldefinition

Die Formulierung der Ziele für das Smart Plug System bildet die Ausgangsbasis für die Entwicklung eines Konzepts zur Messung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern.

Der Ursprung der Idee des Smart Plug Systems liegt in den Themen Energieeffizienz und Energiesparen als Mittel zur Begegnung von Klimaproblematik und Ressourcenknappheit. Da neben dem Verkehrs- und dem Industriesektor mit dem größten Energieverbrauch die Haushalte in Österreich für etwa ein Viertel des energetischen Endverbrauchs verantwortlich sind und diese aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit einen besonders diffizilen Bereich darstellen, zielt das Smart Plug System insbesondere auf den Haushaltsektor ab.[126, 23]

In den österreichischen Haushalten sind die Haushaltsgeräte inklusive Warmwasseraufbereitung nach der Raumwärme die größten Energieverbraucher. Da ein Großteil der Haushaltsverbraucher mit elektrischer Energie betrieben werden und die Anzahl der Haushaltsgeräte im Steigen begriffen ist, widmet sich das Smart Plug System elektrischen Einzelverbrauchern.[43, 74]

Damit ist das Hauptziel des Smart Plug Systems die Schaffung eines Hilfsmittels für den effizienten und sparsamen Einsatz von elektrischer Energie im Haushalt. Um mit Maßnahmen zu den Themen Energieeffizienz und Energiesparen an der richtigen Stelle anzusetzen, werden Informationen zum Energieverbrauch auf Geräteebene benötigt.

Mit dem Smart Plug System zur Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern wird die Information zum tatsächlichen Energieeinsatz zugänglich gemacht. Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben wird, ist die Information des Nutzers über den Energieverbrauch seiner Geräte ein Weg zu effizienterem und sparsamerem Energieeinsatz in Haushalten.

Über diesen Ansatz hinaus werden in Kapitel 4 Anwendungsmöglichkeiten für ein System zur Messung des Energieverbrauchs auf Geräteebene gezeigt. Bei der Entwicklung des Konzepts für das Smart Plug Systems wird versucht, auf alle Anwendungsfälle einzugehen. Das Hauptaugenmerk liegt aber auf dem Ansatz, durch zeitnahe Information zum



Energieverbrauch auf Geräteebene den Nutzer beim effizienten und sparsamen Umgang mit elektrischer Energie zu unterstützen.

Mit dem Smart Plug System soll mit der Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern einem möglichst breiten Kreis an Konsumenten ein Hilfsmittel gegeben werden. Damit vielen Konsumenten der Einsatz des Systems ermöglicht wird, soll das System möglichst unabhängig von den tatsächlichen Gegebenheiten des Haushalts eingesetzt und ohne besondere Vorkenntnisse und spezielle technische Hilfsmittel im Haushalt installiert werden können.

Der Einsatz des Smart Plug Systems soll für den Konsumenten so einfach und bequem als möglich gestaltet werden, da dies einer der bedeutendsten Faktoren für den Erfolg des Systems ist. Das System soll eine unauffällige Integration im Haushalt erlauben, damit dessen Einsatz nicht durch den Systemaufbau verhindert oder gehemmt wird.

Neben der Installation der zusätzlich erforderlichen Hardware in den Haushalten soll eine bequeme Art der Integration des Systems in die Abläufe im Haushalt ermöglicht werden um die Nutzung des Smart Plug Systems zu etablieren.

Das folgende Kapitel zeigt verschiedene Einsatzmöglichkeiten für ein System zur Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern auf und definiert Anforderungen an das System für den jeweiligen Fall.

4

Kapitel 4

Einsatzszenarien

Das Smart Plug System als Hilfsmittel zum effizienten und sparsamen Einsatz von elektrischer Energie im Haushalt liefert die Information zum Energieverbrauch auf Geräteebene in Echtzeit.

Eine Analyse im Bezug auf die Verwendung des Smart Plug Systems in unterschiedlichen Bereichen zeigt die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten eines solchen Systems für verschiedene Aufgaben auf. Die unterschiedlichen Aufgaben bringen neue Anforderungen an das Smart Plug System. Die Betrachtung von Szenarien zur Verwendung des Smart Plug Systems in diesem Kapitel zeigt Lösungswege zu bestimmten Problemstellungen und gibt neue Motive zur Umsetzung eines derartigen Systems.

In den folgenden Abschnitten sind Einsatzmöglichkeiten für das Smart Plug System beschrieben und die sich daraus ergebenden Anforderung an die Umsetzung abgeleitet.

4.1 Szenario 1: Konsumenteninformation in Echtzeit

Wie bereits in der Einleitung aufgezeigt, ist die Information von Konsumenten ein wichtiges Werkzeug für das Energiesparen. Eine zeitnahe Rückmeldung zum Energieverbrauch von alltäglichen Tätigkeiten erhöht das Bewusstsein für den Energieverbrauch und den damit verbundenen Kosten sowie Energie im Allgemeinen. Wenn den Konsumenten nicht bewusst ist, dass Energie verschwendet wird, kann kein Prozess hin zu einem effizienteren Umgang mit Energie stattfinden. Dies hindert am Erkennen von energieeffizientem oder ineffizientem Verhalten und die Potenziale durch Anpassung von alltäglichen Handlungsweisen bleiben ungenutzt.

Die Echtzeitinformationen zum Energieverbrauch der Haushaltsgeräte regen zum Experimentieren und selbstständigen Auffinden von Sparpotenzialen an. Dies ermutigt die Konsumenten zur aktiven Teilnahme und der Umsetzung von Sparmaßnahmen.

Die Rückmeldung, dass eine umgesetzte Maßnahme sofort Auswirkungen zeigt, trägt zur Motivation für das kontinuierliche Auffinden und Ausnützen von Sparpotentialen bei. Die kontinuierliche Information weist den Konsumenten immer wieder auf den Ener-

gieverbrauch hin und unterstützt dabei, das Thema Energiesparen ins Bewusstsein des Konsumenten zu bringen, damit sich ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess entwickeln kann.

Eine zeitnahe Rückmeldung über Erfolge von Maßnahmen zur Energieeinsparung und Effizienzsteigerung bestätigt den Konsumenten in der Meinung etwas Sinnvolles zu tun und löst positive Gefühle aus. Diese Emotionen bewirken eine positive Einstellung gegenüber dem Thema Energiesparen und wirken der Meinung, dass Einsparung zwangsgedrungen bedeutet, auf Komfort verzichten zu müssen, entgegen. Denn laut [139] ist der Verlust von Komfort ein bedeutender Faktor im Bezug auf Energiesparmaßnahmen.

Neben dem psychologischen Faktor zeigt die Rückmeldung den direkten Einfluss von Maßnahmen auf die Energiekosten auf und weist damit den monetären Vorteil von Sparmaßnahmen gerätespezifisch aus.

Dementsprechend sind die Verbrauchsdaten je Gerät, die das Smart Plug System liefert, für die Analyse des Energieverbrauchs gut verwendbar und verwertbar, wenn die Verbrauchsdaten auch einem spezifischen Gerät zugeordnet werden können und nicht als anonyme Daten vorliegen. Daraus ergibt sich die Forderung einer Zuordnung der Informationen zu einem spezifischen Gerät, die auch für die nachfolgenden Einsatzszenarien gilt.

Für die Umsetzung einer zeitnahen Information des Benutzers über den Energieverbrauch von Haushaltsgeräten ist die Messung der elektrischen Leistung beziehungsweise der Energie auf Geräteebene notwendig. Daneben ist eine bequeme Art der Rückmeldung für die Akzeptanz und den tatsächlichen Einsatz des Systems besonders bedeutend, da möglichst viele Hürden für ein aktives Mitwirken des Konsumenten beseitigt werden sollen. Die Umsetzung der Rückmeldung kann auf viele Arten erfolgen. Die Möglichkeiten reichen von einem ortsfixen Display bis hin zu einer ortsunabhängigen Darstellung der Informationen auf einem Mobiltelefon. Neben einem eigenen Display im Haus kommen die Anzeige der Informationen auf einem Fernsehgerät oder einem Personal Computer in Frage. Mit Ausnahme einer direkten Anzeige des Energieverbrauchs am Ort der Messung direkt am Gerät ist für alle genannten Wege der Darstellung des Geräteenergieverbrauchs eine Möglichkeit zur Übertragung der Messdaten erforderlich. Die Übertragung der Messdaten erlaubt zudem eine gesammelte Darstellung des Energieverbrauchs aller Geräte im Haushalt an einer zentralen Stelle. Damit wird eine gemeinsame Anlaufstelle für die Informationen des Energieverbrauchs der Geräte geschaffen und dem Nutzer der separate Weg zu jedem Gerät erspart.

Smart Meter sind mit einem Display zur Darstellung von Verbrauchswerten ausgestattet. Bei einer Anbindung des Smart Plug Systems an ein Smart Meter kann dieses Display zur Anzeige der gerätespezifischen Verbrauchsinformation des Smart Plug verwendet werden. Da die Elektrizitätszähler zum Teil an nicht leicht einsehbaren Orten montiert sind, werden zu einem Smart Meter von vielen Herstellern sogenannte „In-Home Displays“ angeboten, die für die Darstellung der Daten des Smart Meter an einem gut einsehbaren Ort gedacht sind. Auch diese Anzeigevariante kann bei der Verbindung des Smart Plug Systems mit dem Smart Meter genutzt werden, wie Abbildung 2 schematisch zeigt.

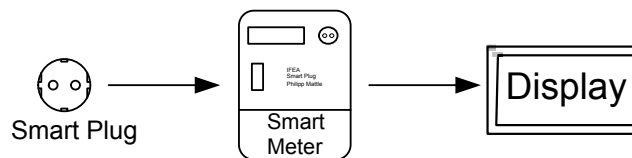


Abbildung 2: Informationsweg vom Smart Plug über das Smart Meter zum Home Display

Im Zuge der Forderungen der Richtlinie 2009/72/EG des Europäischen Parlaments und Rates, dass Stromkunden häufig genug über ihren tatsächlichen Stromverbrauch und ihre Stromkosten informiert werden müssen, entwickeln sich zunehmend Internetportale von Energiedienstleistungsunternehmen, wie beispielsweise das Energieinformationssystem der Linz AG [102], die den Kunden über aktuelle und historische Verbrauchswerte informieren. Durch die Möglichkeit der automatischen Fernabfrage (AMR³) von Smart Meter Systemen können aktuelle Verbrauchsinformationen in derartige Internetportale integriert werden. Mit der Anbindung des Smart Plug Systems an das Smart Meter steht dieser Informationsweg auch für gerätespezifische Verbrauchsdaten des Smart Plug Systems zur Verfügung. Der Weg der Messdaten vom Smart Plug direkt am Gerät bis zur Anzeige der Information für den Nutzer ist in Abbildung 3 dargestellt.

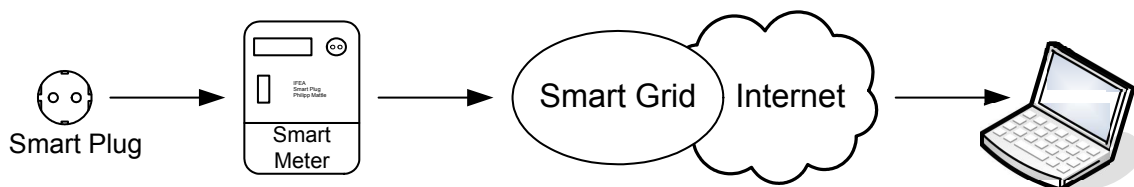


Abbildung 3: Informationsweg vom Smart Plug sowie Smart Meter zum Internetportal

³Automated Meter Reading

4.2 Szenario 2: Geräteüberwachung

Nicht zu wissen, ob ein Gerät zu Hause ein- oder ausgeschaltet ist, kann unterwegs unter Umständen zu großer Anspannung führen. Denn bei heizenden Geräten, wie beispielsweise einem Bügeleisen oder einem Toaster, besteht bei unkontrolliertem Betrieb die Gefahr, dass ein Brand ausgelöst wird. In dieser Situation ist die Information, dass das Gerät ausgeschaltet ist, überaus wertvoll.

Eine derartige Überwachung kann über die Messung des Energieverbrauchs umgesetzt werden. Insbesondere heizende elektrische Verbraucher haben in der Regel im Betrieb eine große Stromaufnahme. Daher ist für eine derartige Überwachung eine einfache Messung ausreichend, da prinzipiell nur die zwei Gerätezustände ein- beziehungsweise ausgeschaltet von Interesse sind. Für die Fernabfrage des Gerätezustands ist wiederum die Möglichkeit einer unidirektionalen Datenübertragung der Messeinheit Voraussetzung.

Für das Smart Plug System ist die Nutzung einer vorhandenen Infrastruktur für die Anzeige, wie bereits in Abschnitt 4.1 beschrieben, ein Vorteil. Die Anbindung des Smart Plug Systems an ein Smart Meter bringt die Möglichkeit der Anzeige am Smart Meter, sowie einem eventuell vorhandenen „In-Home Displays“ und der Bereitstellung des Gerätezustands auf einem Internetportal, wenn dieses Service angeboten wird. Da die Fernabfrage des Gerätezustands von Haushaltsgeräten eigentlich nur interessant ist, wenn sich niemand zu Hause befindet, erfüllt nur die Bereitstellung der Information auf einem Internetportal den Zweck.

Auch die Bereitstellung des Gerätezustands durch die Nutzung von zum Teil in Haushalten verfügbaren Systemen zur Hausautomatisierung hat den Vorteil, dass kein separates System aufgebaut werden muss.

4.3 Szenario 3: Gerätestörungswarnung

Der Stromverbrauch von einem großen Teil der Geräte im Haushalt folgt einem beständigen Muster. Ob dies nun Geräte sind, die über die Schaltzustände Ein / Aus verfügen, oder Geräte, die mit mehreren Schaltzuständen und Ablaufprogrammen arbeiten, bewirkt nur Unterschiede in der Komplexität und Art des Musters. Es existieren mehrere charakteristische Eigenschaften, die das Verbrauchsmuster eines bestimmten Geräts beschreiben können.

Der Vorgang des Einschaltens an sich ist eine dieser Eigenschaften, da beispielsweise eine Einschaltspitze, eine kontinuierliche Leistungserhöhung oder ein Leistungssprung kenn-

zeichnend für das Gerät sein können. Repräsentativ für Geräte ist die Höhe der Leistungsänderung beim Einschalten. Darüberhinaus sind das Verhältnis von Wirkleistung zu Blindleistung sowie die vom Geräte erzeugten Oberschwingungen charakteristisch für den Betrieb eines Geräts. Neben diesen stationären Größen stellen transiente Vorgänge ebenfalls ein Merkmal von Geräten dar. Die Transienten der Leistung von Einschaltvorgängen verändern sich in der Regel nicht von einem Einschaltzeitpunkt zum nächsten und bilden damit ein Merkmal für den Normalbetrieb eines Geräts ab.[78, 75]

Diese Eigenschaften von Geräten werden für die Erkennung dieser aus dem Gesamtlastgang des Haushalts bereits eingesetzt. Diese Technik findet sich unter der Bezeichnung „Nonintrusive Load Monitoring“ (NILM) oder „Nonintrusive Appliance Load Monitoring“ (NIALM) in der Literatur.[75, 78, 100]

Die Konstanz der beschriebenen Eigenschaften charakterisiert somit den Normalbetrieb von elektrischen Geräten. Neben dem Einschaltvorgang können Geräte durch ihren Energieverbrauch im Zeitverlauf charakterisiert werden. Ein konstanter Energieverbrauch sowie ein gepulster Betrieb oder das Auftreten einer bestimmten Leistungskurve durch das Abarbeiten eines Ablaufprogramms, sind gängige Zeitprofile von Elektrogeräten. Der zeitliche Verlauf des Energieverbrauchs weist allein durch die Interaktion des Nutzers eine Variabilität auf. Beispielsweise ändert sich der Abstand zwischen den Leistungsimpulsen eines Kühlgeräts, wenn sich durch das Öffnen des Kühlraumes die Temperatur im Kühlraum schneller erhöht und häufigere Kühlperioden für eine konstante Temperatur notwendig sind. Ein weiteres Beispiel ist die Veränderung der Leistungskurve des Programms eines Geschirrspülers durch das Unterbrechen des Spülvorgangs durch den Benutzer.[75]

Unter Berücksichtigung einer gewissen Abweichung lässt sich auch für das Zeitprofil von Geräten ein Normalbetrieb feststellen. Eine tiefere Analyse des Zeitverhaltens kann auch die Gewohnheiten des Nutzers beziehungsweise der Nutzer miteinschließen. Die Interaktionen der Benutzer folgen in der Regel ebenfalls bestimmten Mustern, die in unterschiedlichen Zeitskalen analysiert werden können. Jedenfalls erhöht die Ausdehnung der Analyse die Komplexität der Aufgabe. Die Analyse des Energieverbrauchs und das Extrahieren von Charakteristika sind für diese Aufgabe sehr ähnlich zu den Herausforderungen der bereits beschriebenen NILM Systeme. Beispiele für Methoden und die Umsetzung finden sich in den Referenzen [75, 100, 78, 92].

Die Störung eines Geräts kann allgemein als die Abweichung von einem erwarteten Vorgang, wie es der Normalbetrieb darstellt, bezeichnet werden.

Durch die Aufzeichnung eines charakteristischen Profils eines Elektrogeräts können Störungen durch signifikante Abweichung von diesem gespeicherten Referenzprofil erkannt werden.[123] Die erkannten Störungen werden anschließend dem Nutzer gemeldet. Für den Nutzer von Elektrogeräten ist wohl die bedeutendste Störung, wenn das Gerät ausfällt. Im Fall, dass der Ausfall auf eine Folge von Veränderungen im Lastgangprofil des Geräts zurückgeht, wird ein drohender Geräteausfall dem Benutzer bereits frühzeitig angekündigt.

Tritt ein plötzlicher Ausfall eines Geräts auf, so ist eine entsprechende Information des Nutzers über den Ausfall des Geräts ebenfalls vorteilhaft. Der Ausfall eines Gefriergeräts stellt eine typische Situation, in der die Information des Nutzers von besonderer Bedeutung ist, dar. Da Gefriergeräte zum Teil im Keller oder Lagerräumen aufgestellt sind, kann der Ausfall des Geräts nicht gleich erkannt werden. Um ein Verderben den gefrorenen Lebensmittel zu vermeiden und dem Benutzer die Möglichkeit einer schnellen Reaktion zu geben, ist die Warnung des Nutzers von besonderer Bedeutung.

Neben einem Gerätefehler kann auf diese Weise auch eine mögliche Fehlbedienung des Geräts erkannt werden. Im Fall des bereits angesprochenen Gefrierschranks im Keller ist als Fehlbedienung die nicht geschlossene Schranktür zu sehen. Durch die beschleunigte Erwärmung des Kühlraums verringert sich die Zeit zwischen den Leistungspulsen des Geräts im Vergleich zum Normalbetrieb. Das geänderte Verbrauchsmuster kann erkannt und der Nutzer informiert werden, um das Auftauen des Gefriergutes zu verhindern.

Für die Umsetzung der Gerätestörungswarnung ist die Messung von elektrischen Parametern pro Gerät Voraussetzung. Die Auswertung von schnellen zeitlichen Veränderungen für die Mustererkennung bedarf zudem einer hohen zeitlichen Auflösung der Aufzeichnung. Da die zur Auswertung verwendeten Methoden durchaus sehr rechenintensiv sind, ist eine Möglichkeit zur unidirektionalen Übertragung der Messdaten an eine explizite Auswerteeinheit Voraussetzung um die Messeinheit direkt am Elektrogeräte möglichst platz- und energiesparend umzusetzen. Die Aufgabe der Auswerteeinheit ist die automatisierte Auswertung und Störungserkennung basierend auf den gerätebezogenen Daten der Messeinheiten. Die hohe zeitliche Auflösung für die Erkennung von bestimmten Merkmalen im Energieverbrauch hat die Notwendigkeit einer hohen Datenübertragungsrate zwischen Messeinheit und Auswerteeinheit zur Folge.

Im Gegensatz zu den vorigen Szenarien bringt die Anbindung des Smart Plug Systems an ein Smart Meter oder eine andere bereits in Haushalten verfügbare Infrastruktur kaum Vorteile. Infrastruktur wie beispielsweise Hausautomatisierung oder auch die Energie-

verbrauchsdatenabfrage sind auf vergleichsweise geringe Übertragungsraten angewiesen und erfüllen insofern die Anforderung dieses Szenarios nicht. Damit bleibt noch der Aufbau einer eigenen Datenübertragungsinfrastruktur und einer eigenen Auswerteeinheit für die Umsetzung der Gerätestörungswarnung.

Der Informationsweg zum Benutzer kann prinzipiell, wie in den vorigen Abschnitten beschrieben, umgesetzt werden. Insbesondere um dem Benutzer eine rasche Reaktion auf einen Geräteausfall zu ermöglichen, ist für diese Anwendung eine aktive Benachrichtigung vorteilhaft. Eine rasche, aktive Benachrichtigung ist über die Nutzung elektronischer Medien möglich. Die Nutzung von E-Mail oder Diensten wie „Short Message Service“ (SMS) für mobile Geräte erscheint für diese Aufgabe sinnvoll. Wohingegen die Nutzung von passiven Informationssystemen wie Displays oder auch Internetportale wie in den vorigen Abschnitten einen geringeren Nutzen im Bezug auf die Warnung bringen. Damit ist auch bezüglich dieser Anforderung die Nutzung von in Hohneaushalten verfügbarer Infrastruktur nur beschränkt möglich.



Abbildung 4: Informationsweg Smart Plug über Smart Plug Zentrale zu Mobiltelefon

4.4 Szenario 4: Statistische Auswertung

Der Gesamtstromverbrauch von Haushalten ist eine gut bekannte Größe. Jedoch sind nur wenige Informationen zum tatsächlichen Energieverbrauch im Haushalt verfügbar. Die Aufteilung des Energieverbrauchs im Haushalt zeigt aber erst, bei welchen Verbrauchern gezielte Maßnahmen zur Energieeinsparung beziehungsweise Steigerung der Effizienz den größten Vorteil bringen. Bei Haushaltsgeräten mit einem großen Verbrauch ist im Allgemeinen die Erreichung eines sinnvollen Kosten-Nutzen-Verhältnisses leichter möglich, da bei hohem Verbrauch ein größeres absolutes Potenzial zur Senkung besteht.

Die Messung des Energieverbrauchs auf Geräteebene in einem repräsentativen Kreis von Haushalten liefert das Datenmaterial für Aussagen über den tatsächlichen Energieverbrauch in einem durchschnittlichen Haushalt. Die statistische Auswertung liefert somit Informationen für die Beurteilung von Maßnahmen zur Energieeinsparung auf makroskopischer Ebene.

Die Aufzeichnung des Energieverbrauchs im Zeitverlauf ermöglicht überdies eine statistische Auswertung im Bezug auf die Zeit des Einsatzes von bestimmten Haushaltsgeräten. Diese Information zeigt welche Haushaltsverbraucher tatsächlich für die Lastspitzen im elektrischen Netz verantwortlich sind. Damit lassen sich genauere Aussagen über die Potenziale von Lastmanagement zur Reduzierung dieser Lastspitzen treffen. Wenn sich zeigt, dass elektrische Geräte, die grundsätzlich für Lastmanagement geeignet sind, nur wenig in der Zeit von Lastspitzen betrieben werden, ist das Potenzial zur Verringerung der Spitzen durch Lastmanagement eher gering.

Aus den Informationen der statistischen Auswertung auf Geräteebene lassen sich Schlussfolgerungen für Förderung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und zum Einsparen von Elektrizität in Haushalten ziehen und liefern damit eine Entscheidungsgrundlage für Verantwortliche in Unternehmen und der Politik. Die Aufzeichnung des Energieverbrauchs pro Haushaltsgerät bildet somit die Datenbasis für diverse statistische Aussagen und hilft Energiesparpotentiale zu erkennen, die es im Hinblick auf die Erreichung der „20 und 20 bis 2020“ Ziele der Europäischen Gemeinschaft [67] gilt zu nützen.

Anforderungen für das beschriebene Szenario „Statistische Auswertung“ sind die Messung der elektrischen Leistung im Zeitverlauf von elektrischen Einzelverbrauchern und die Speicherung der Messdaten in einer Form die zur Weiterverarbeitung und statistischen Analyse geeignet ist. Die Speicherung kann nun direkt in der Messeinheit beim Gerät oder gesammelt an einer zentralen Stelle erfolgen, wobei für die zentrale Speicherung die laufende Übertragung der Messdaten von der Messeinheit zur Zentraleinheit notwendig ist. Vorteilhaft ist die zentrale Verfügbarkeit der Daten und der reduzierte Speicherbedarf in der Messeinheit.

Die Ausführung der Messeinheit sollte möglichst platzsparend sein, um keine besonderen Anforderungen an den Installationsort zu stellen und eine temporäre Installation für die Aufzeichnung der Rohdaten zur statistischen Auswertung ermöglichen. Die einfache Handhabung und ein hoher Grad an Automatismus, sodass der Nutzer wenig Aufwand für die Aufzeichnung hat, erleichtern den Einsatz des Systems als akzeptiertes Mittel zur Gewinnung der Daten für die statistische Auswertung. Weniger Aufwand bedeutet auch weniger Hindernisse für die Teilnahme an einem Programm zur Datenerhebung für den Konsumenten.

Für die Aufgaben der statistischen Auswertung ist grundsätzlich keine besonders hohe zeitliche Auflösung erforderlich. In der Energiewirtschaft werden im Allgemeinen $1/4$ -Stunden-Werte verwendet. Richtet sich die statistische Auswertung nach diesem Zeiträum-



ter, sind die Anforderung an die Speicherkapazität beziehungsweise Übertragungsrate eher gering.

Falls in diesem Szenario eine Zentralkomponente eingesetzt wird, besteht deren Aufgabe im Sammeln und Speichern der Messdaten. Da die Statistik aus den Daten mehrerer Haushalte gebildet wird, können in der Zentraleinheit die Leistungsrohdaten abgelegt werden. Daher hat die Zentraleinheit generell keine Verarbeitungsaufgaben.

In diesem Szenario ist eine Anbindung des Smart Plug Systems zur Messung des Energieverbrauchs an ein Smart Meter als zentrale Stelle möglich. Smart Meter sind jedoch im Allgemeinen nicht für die Datenspeicherung von externen Geräten ausgelegt und der Weg der Information vom Smart Meter zur Organisation, die an der statistischen Auswertung der Rohdaten arbeitet, ist offen. Eine Abfrage der Daten über ein Automated Meter Reading System des Messstellenbetreibers ist denkbar. Jedoch ist fraglich, ob der Aufwand für die Herstellung einer Fernabfragemöglichkeit ausschließlich für die Umsetzung des beschriebenen Szenarios zur statistischen Auswertung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern nicht zu hoch ist. Eine ähnliche Situation ergibt sich bei der Nutzung einer anderen in Haushalten verfügbaren Infrastruktur, wie zum Beispiel eines Hausautomatisierungssystems.

Bei der Umsetzung des Smart Plug Systems ohne Anbindung an eine andere Infrastruktur sollte die Weitergabe der Messdaten zur Auswertung einfach möglich sein. Erfolgt die Speicherung der Messdaten direkt auf der Messeinheit ohne laufende Datenübertragung, ist das Auslesen jeder einzelnen Messeinheit notwendig, um alle Daten zu erhalten. Für den Aufbau der Messeinheit ergibt sich nur bedingt einer Vereinfachung, da trotzdem eine Möglichkeit zur Übertragung der Daten geschaffen werden muss. Der Verzicht auf eine laufende Übertragung der Daten bewirkt einen geringeren Energieverbrauch der Messeinheit, da das Kommunikationsmodul nicht laufend verfügbar sein muss. Dieser Vorteil tritt aber kaum in Erscheinung, wenn ein geringe zeitliche Auflösung, wie beispielsweise 1/4-Stunden-Werte, verwendet werden. Bei einer großen Anzahl von Messeinheiten ist ohnedies eine automatische Abfrage der Messdaten anzustreben, um den Aufwand zur Gewinnung der Rohdaten gering zu halten.

Wird eine Einheit zur zentralen Speicherung mit einer laufenden Übertragung der Messdaten realisiert, kann als Zusatzfunktion die Nutzung der Messdaten für eine Analyse des Energieverbrauchs im Haushalt angeboten werden. Für Interessierte kann dies ein Argument zur Teilnahme an einem Programm zu Datenerhebung darstellen. Für diese Zusatzfunktion stellt eine Schnittstelle zu einem Personal Computer eine gute Mög-

lichkeit dar, um dem Konsumenten selbst die Auswertung seines Energieverbrauchs zu ermöglichen. Schematisch ist dies in Abbildung 5 gezeigt.

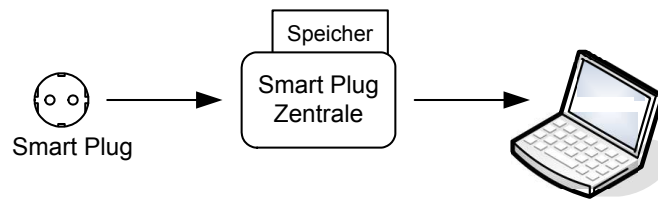


Abbildung 5: Informationsweg vom Smart Plug über die Smart Plug Zentrale zur Auswertung

4.5 Szenario 5: Energieberatung

Neben der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Information des Konsumenten und der Bewusstseinsbildung durch persönliche Erfahrungen im Zusammenhang mit effizientem und sparsamem Umgang mit Energie hilft ein Energieberater, einen optimalen Energieeinsatz im Haushalt zu erreichen. Damit ein Berater auf die individuelle Situation im Haushalt eingehen kann, ist eine detaillierte Information im Vorfeld wichtig. Als Informationsquellen stehen unter anderem die Jahresabrechnungen, die Geräteausstattung des Haushalts und der Benutzer selbst zur Verfügung. Mit der Jahresabrechnung steht nur eine zeitlich sehr grob aufgelöste Messung für den Haushalt im Gesamten zur Verfügung. Bei einer tiefergehenden Analyse kann mangels detaillierterer Messungen nur auf Abschätzungen beziehungsweise Erfahrungswerte zurückgegriffen werden.

Durch eine Aufzeichnung, wie im Abschnitt 4.4 für die statistische Auswertung beschrieben ist, steht dem Energieberater Datenmaterial auf Geräteebene zur Verfügung. Die fein granulare Struktur der Aufzeichnung erlaubt es Aussagen über einzelne Geräte treffen zu können. Zu den gerätespezifischen Daten sind im Energieverbrauch im Zeitverlauf Informationen zum Verbrauchsverhalten des Konsumenten enthalten.

Der Vergleich des subjektiven Empfindens zum Energieverbrauch von Geräten und dem tatsächlichen Verbrauch werden Fehleinschätzungen des Konsumenten aufgedeckt. Diese Gegenüberstellung der eigene Einschätzung mit den tatsächlichen Werten hilft wenig effizienten Umgang mit Energie bewusst zu machen und bildet damit den ersten Schritt im Prozess zu einem sparsameren Energieeinsatz. Aus dem tatsächlichen Energieverbrauch und dem Nutzerverhalten lassen sich Strategien für eine effizientere Nutzung der Geräte und das Einsparen von Ressourcen erarbeiten. Der tatsächliche Energieverbrauch eines Geräts bildet zudem die Grundlage für eine vorausschauende Beurteilung

der Sinnhaftigkeit von Maßnahmen und die Bewertung von Investitionen zur Einsparung von Energie.

Im Wesentlichen gelten für diesen Anwendungsfall des Smart Plug Systems die selben Anforderungen wie unter Abschnitt 4.4 beschrieben. Für die individuelle Beratung werden im Unterschied zu einer statistischen Auswertung jedoch nur die Daten eines einzigen Haushalts benötigt, was die Anzahl der auszuwertenden Messstationen deutlich reduziert. Damit ist der Verzicht auf eine automatische Abfrage und Sammlung der Messdaten mit entsprechend weniger Aufwand verbunden. Deshalb ist die Speicherung der Messdaten direkt an der Messeinheit für dieses Szenario jedenfalls in Betracht zu ziehen, da die Verwendung eines auswechselbaren Speichers bereits die Möglichkeit des Datentransfers für die Auswertung bietet, wie Abbildung 6 schematisch zeigt.

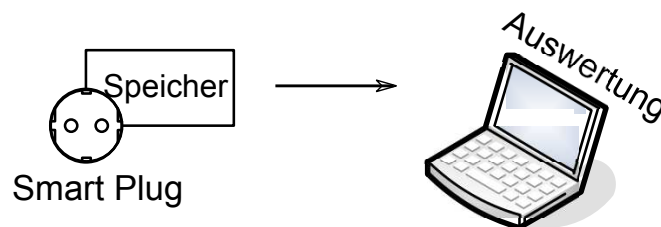


Abbildung 6: Informationsweg mit Wechselspeicher

4.6 Szenario 6: Virtueller Energieberater

Die Aufzeichnung des Energieverbrauchs von Einzelgeräten lässt, wie in den vorigen Abschnitten beschrieben, Rückschlüsse auf das Gerät an sich und auf das Nutzerverhalten zu. Aus der Analyse der Daten lassen sich schließlich geeignete Maßnahmen zu Steigerung der Effizienz des Energieeinsatzes und zum Einsparen von Energie ableiten. Neben der persönlichen Betreuung durch einen Energieberater der, wie in Abschnitt 4.5 verdeutlicht, durch die Kenntnis des tatsächlichen Geräteenergiebedarfs individuelle Empfehlungen geben kann, können die aufgezeichneten Daten außerdem automatisiert ausgewertet werden.

Die automatisierte Auswertung kann als Vorbereitung für die Arbeit eines persönlichen Energieberaters dienen und eine komprimierte Darstellung zum Energieverbrauch jedes einzelnen Geräts liefern. Mit diesen Informationen ist auch die Konsultation eines Energieberaters über elektronische Kommunikationsmedien denkbar, der basierend auf den Daten Empfehlungen für einen effizienteren und sparsameren Einsatz der Geräte geben

kann. Auf diesem Weg kann aber nicht auf individuelle Verhaltensweisen der Personen im analysierten Haushalt eingegangen werden, wie es im Szenario 5 möglich ist.

Um die automatisierte Auswertung zu verwirklichen, ergeben sich prinzipiell die selben Anforderungen wie im vorigen Abschnitt 4.5. Zudem ist hier eine für den Nutzer einfache Handhabung der Datenweitergabe von der Messeinheit bis zur Ausgabe der ausgewerteten Daten für die Weitergabe an einen Energieberater von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund ist eine zentrale Speicherung beziehungsweise Auswertung wichtig, damit die Handhabung des Systems für den Nutzer so bequem als möglich gestaltet wird und die Informationen nicht im Haushalt verteilt an den Geräten zu Verfügung stehen. Werden die Messdaten an einer zentralen Stelle gespeichert, kann mit der Schaffung einer Datenschnittstelle die Auswertung bequem an einem Personal Computer durchgeführt werden und somit dem Benutzer zugänglich gemacht werden. Das Prinzip ist in Abbildung 5 dargestellt.

Entsprechend Abschnitt 4.3 werden in NILM Systemen Muster von elektrischen Verbrauchern für deren Erkennung aus dem Gesamtlastgang eines Haushalts verwendet. Die verschiedenen Gerätetypen lassen sich durch die Muster unterscheiden. Die Typen ergeben sich aufgrund stationärer und transients Eigenschaften des Energieverbrauchs.[133] Neben diesen Eigenschaften kann eine zeitliche Abfolge von bestimmten Mustern im Energieverbrauch bestimmte Gerätetypen klassifizieren. Für Kühlgeräte ist beispielsweise ein gepulster Betrieb charakteristisch, der durch die variable Länge der Kühlphasen und der Pausen dazwischen entsprechen der Kühllast gekennzeichnet ist.

Wenn es möglich ist, Muster für den effizienten Betrieb eines Gerätetyps zu erkennen und von einer ineffizienten Nutzung der Geräts zu unterscheiden, kann eine automatisierte Rückmeldung zur individuellen Verwendung der Haushaltsgeräte realisiert werden. Damit können gewisse, vorher gelernte, Muster, die eine ineffiziente Handhabung kennzeichnen, erkannt werden und der Benutzer informiert werden.

Die Anforderungen für die Umsetzung der automatischen Erkennung von ineffizienter Nutzung sind grundsätzlich identisch mit dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen Szenario. Jedoch ist die aktive Information des Benutzers in diesem Anwendungsfall nicht unbedingt notwendig. Die Darstellung auf einem Display im Haushalt oder die Bereitstellung der Information auf einem Personal Computer erscheinen als ausreichend, da im Unterschied zu Punkt 4.3 keine dringende Aktion des Nutzers erforderlich und auch kein Zugriff auf die Information von außerhalb des Haushalts notwendig ist.

In den nachstehenden Abschnitten wird auf die Erweiterung des Smart Plug Systems mit einer Schaltvorrichtung für elektrische Lasten Bezug genommen und ausgewählte Anwendungsfälle der Schaltfunktion beschrieben.

4.7 Szenario 7: Gesteuertes Schalten von zentraler Stelle

Als Erweiterung des Endkundennutzens können die installierten Smart Plug Einheiten auch zum gesteuerten Ein- beziehungsweise Ausschalten von elektrischen Verbrauchern verwendet werden. Damit kann beispielsweise eine Nachtabschaltung von Einzelverbrauchern, wie Fernsehgeräten oder Stereoanlagen, realisiert werden, um den Stand-by-Verbrauch zu senken. Die Automatisierung dieser individuellen Stromfreischaltung von einzelnen Verbrauchern kann zu einer Reduktion des Stand-by-Verbrauchs und somit zu einem effizienteren Energieeinsatz beitragen. Diese Funktionalität kann ferner für das automatische Schalten von Verbrauchern, wie beispielsweise Beleuchtungselementen, eingesetzt werden. Von Vorteil ist eine zentrale Bedienstelle für das Smart Plug System, um die Schalthandlungen von einer Stelle aus kontrollieren zu können.

Gleichzeitig ist eine Überwachung der eingeschalteten Geräte in Bezug auf ihren Energieverbrauch möglich, wodurch eine Überwachung des realen Schaltzustands realisiert werden kann.

Mit der Ermöglichung eines Zugriffs auf die zentrale Bedienstelle von unterwegs kann eine Fernschaltung von Geräten durchgeführt werden. Zusammen mit der Geräteüberwachung aus Abschnitt 4.2 kann von außerhalb der Wohnung oder des Hauses sowohl der Gerätezustand kontrolliert werden als auch die Geräte ein und ausgeschaltet werden. Beispielsweise ist es möglich die eigene Saunakabine aus dem Büro einzuschalten, sodass diese bei der Heimkehr vom Arbeitsplatz bereits vorgewärmt ist. Die Kommunikations- und Schaltfunktion dieser Variante des Smart Plug Systems kann benutzt werden um eine Zeitsteuer- oder Fernsteuerfunktion für Geräte ohne diese Möglichkeiten zu realisieren. Problematisch könnte hierbei sein, dass die durch den Smart Plug automatisiert in Betrieb genommenen Hausgeräte keine Sicherheitsfunktionen, wie beispielsweise Schutzabschaltung bei Überhitzung, aufweisen. Dies ist nachteilig im Vergleich zu Geräten die eine Fernsteuerfunktionalität bereits integriert haben.

Die reale Schalterstellung überwachen zu können, ist neben einem Schalter die Messung des elektrischen Stroms notwendig. Für eine zentrale Konfiguration der Schalthandlung

gen und die Rückmeldung des Schalterzustands ist eine bidirektionale Kommunikation zwischen der Schalt- beziehungsweise Messeinrichtung und der Bedieneinheit notwendig.

Die Anbindung an ein Smart Meter ist für diesen Anwendungsfall kein Vorteil, da Elektrizitätszähler grundsätzlich nicht für individuelle Schaltfunktion des Konsumenten gedacht sind und daher auch nicht über entsprechende Eingabemöglichkeit verfügen. Viel interessanter ist die Anbindung an ein System zur Hausautomatisierung, aufgrund der übereinstimmenden Aufgaben. In Hausautomatisierungssystemen sind Komponenten zur zentralen Konfigurationen und Anzeige von Betriebszuständen verfügbar und auch Möglichkeiten zum Zugriff von außerhalb des Haushalts sind erhältlich.

Obwohl die in diesem Abschnitt beschriebene Aufgabe eigentlich der Hausautomatisierung zuzurechnen ist und dafür auch Produkte verfügbar sind, stellt dieses Szenario eine wertvolle Zusatzfunktion für das Smart Plug System dar.

4.8 Szenario 8: Netzgesteuertes Lastmanagement

Da im elektrischen Stromnetz zu jeder Zeit ein Ausgleich zwischen Produktion und Verbrauch notwendig ist, erfordern Lastspitzen die Erzeugung von ebenso viel Energie und zudem die Kapazitäten für den Transport dieser Energiemenge von der Erzeugungsanlage zum Verbraucher. Um einen unterbrechungsfreien Betrieb zu ermöglichen, ist das Energiesystem auf die höchste auftretende Last auszulegen. Lastspitzen erfordern deshalb hohe Investitionen in das Energiesystem. Um Lastspitzen zu reduzieren, kann Lastmanagement eingesetzt werden. Mittels Lastmanagementsystemen werden unkritische Verbraucher in Hochlastzeiten vom Netz getrennt und der Energieverbrauch dadurch in eine Zeit geringeren Bedarfs verschoben, um eine gleichmäßigere Ausnützung des Energiesystems zu erreichen.

Durch die „20 und 20 bis 2020“ [67] Ziele der europäischen Gemeinschaft haben sich die Staaten der europäischen Union darauf geeinigt bis 2020 den Anteil an erneuerbaren Energieträgern auf 20 Prozent zu erhöhen. Erneuerbare Energieträger, wie beispielweise Wind- und Solarenergie, unterliegen starken Dargebotsschwankungen, die den kontinuierlichen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch im Stromnetz erschweren. Mit Lastmanagement auf Geräteebene kann der Energieverbrauch verringert oder erhöht werden, um auf die lokale Erzeugung aus erneuerbaren Energieträgern Rücksicht zu nehmen. Mit Lastmanagement kann dementsprechend der Verbraucher zum Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch beitragen.

Für die Unterstützung von netzgesteuertem Lastmanagement durch das Smart Plug

System als Erweiterung zu Geräten ist ein Schalter zur Trennung des Geräts vom Netz und eine Kommunikationsmöglichkeit vom Netzbetreiber zur betroffenen Einheit notwendig. In diesem Anwendungsfall ist folglich eine Anbindung des Smart Plug Systems an das Smart Meter, das sich an der Schnittstelle zwischen Haushalt und Netz befindet, vorteilhaft, wenn damit die Verbindung zum Netzbetreiber hergestellt wird.

Jedenfalls ist es notwendig, zwischen für Lastmanagement geeigneten Geräten und ungeeigneten Geräten zu unterscheiden. Wenn nicht nur die, für Lastmanagement, geeigneten Geräte mit einer Smart Plug Einheit ausgestattet werden, muss diese Unterscheidung im System durchgeführt werden. Einerseits kann eine Vereinbarung zwischen dem Netzbetreiber und dem Konsumenten die Gruppe der Geräte, die in das Lastmanagement mit einbezogen werden, spezifizieren und die Schaltbefehle gerätespezifisch vom Netzbetreiber ausgegeben werden. Alternativ dazu werden die für Lastmanagement geeigneten Geräte innerhalb des Haushalts durch die Smart Plug Zentraleinheit verwaltet und der Netzbetreiber übermittelt Informationen zur Belastung im Netz an die Zentraleinheit. Im zweiten Fall wird die Entscheidung über die Schalthandlungen zum Lastmanagement in der Smart Plug Zentraleinheit getroffen.

4.9 Szenario 9: Notstromversorgung – Dezentrale Erzeuger

Ein Energiesystem mit dezentralen Erzeugungsanlagen neben den konventionellen Großkraftwerken bringt neben Vorteilen für den Netzbetrieb und die Nutzung erneuerbarer Energieträger auch die neue Möglichkeit für Konsumenten für die Wahl der Elektrizitätsversorgung, wie in Referenz [44] beschrieben wird. Im Netzbetrieb können dezentrale Erzeuger einen Beitrag zur Spitzenlastabdeckung und Versorgungsqualität liefern sowie eine Alternative zu Erweiterungen im Netz darstellen. Erzeugung aus erneuerbaren Energieträgern ist in vielen Fällen auch durch dezentrale Erzeugung gekennzeichnet, wenn von großen Wasserkraftwerken oder Windparks abgesehen wird.[111, 44]

Die dezentrale Erzeugung von elektrischer Energie wird in der Richtlinie 2009/72/EG [68] als Element einer stabilen Elektrizitätsversorgung gesehen. Für den Begriff der dezentralen Erzeugung hat sich keine allgemeine Definition durchgesetzt wie verschiedene Referenzen [17, 46, 111] berichten. In der eben erwähnten Richtlinie 2009/72/EG [68] werden dezentrale als an das Verteilernetz angeschlossene Erzeugungsanlage definiert.

Die Dezentralität der Anlagen ermöglicht eine näher am Verbrauch liegende Erzeugung.

Damit können neue Aufgaben wie eine dezentrale Notstromversorgung aufgebaut werden. Durch die Möglichkeit des gesteuerten Schaltens direkt an den Geräten können nach einem Stromausfall des öffentlichen Netzes wichtige Verbraucher sequentiell an eine Eigenenerzeugungsanlage bzw. Notstromversorgung zugeschaltet werden. Damit werden die Einschaltströme zeitlich verteilt und der Aufbau der Notstromversorgung lastflussoptimal gestaltet, sodass sensitive Verbraucher mit Strom versorgt werden können. Dies soll in Bezug auf eine hausinterne Krisenversorgung gesehen werden.

Um die Kommunikationsfähigkeit der Schalteinrichtung am Gerät nach einem Stromausfall aufrecht zu erhalten, ist eine gepufferte Energieversorgung für die Schalteinrichtung vorzusehen. Alternativ kann der Schalter bei Zusammenbruch der Spannungsversorgung standardmäßig die Last vom Netz trennen und nach Zuschalten der Notstromversorgung nur durch eine gezielte Aktivierung jedes einzelnen Schalters das zu versorgende Gerät zuschalten. Um einen unbelasteten Anlauf der Notstromversorgung zu ermöglichen, müssen alle angeschlossenen Verbraucher zu diesem Zeitpunkt von der Versorgung getrennt sein. Daher müssen alle Verbraucher bei einem Ausfall der Versorgung vom Netz getrennt werden.

Für die Unterstützung dieses Szenarios durch ein erweitertes Smart Plug System sind die Ausstattung der Smart Plug Einheit am Gerät mit einem Schalter und eine Kommunikationsmöglichkeit der Einheiten für die Durchführung von koordinierten Schalt-handlungen erforderlich. Daneben ist eine Zentraleinheit zur Verwaltung der Geräte und Definition von sensitiven Verbrauchern notwendig. Die Zentraleinheit koordiniert die Einschaltvorgänge anhand von Prioritäten und Leistungsvorgaben. Die, durch die Notstromversorgung zur Verfügung gestellte, Leistung kann als statische Vorgabe oder dynamisch, entsprechend der erzeugten Leistung, durch die Bedieneinheit verwaltet werden. Eine dynamische Vorgabe ermöglicht es, Rücksicht auf die schwankende Erzeugung einer dezentralen Anlage mit dargebotsabhängigen erneuerbaren Energieträgern nehmen zu können. Eine schnelle Reaktion ist im Krisenfall, wie es ein Stromausfall in vielen Fällen darstellt, von besonderer Bedeutung und lässt sich besonders schnell unter der Verwendung von direkter Kommunikation zwischen den betroffenen technischen Einrichtungen realisieren. Dafür ist eine Datenübertragungsmöglichkeit zwischen Erzeugungsanlage und Zentraleinheit nötig.

4.10 Zusammenstellung der Anforderungen aus den Szenarien

Dieser Abschnitt dient einer Zusammenfassung der beschriebenen Einsatzszenarien für ein System zur Messung des Energieverbrauchs auf Geräteebene und gibt eine komprimierte Übersicht über die abgeleiteten Anforderungen. Die wesentlichen Anforderungen der Einsatzszenarien werden in Tabelle 4.1 gesammelt dargestellt, da diese die Basis für die Entwicklung des Konzepts für das Smart Plug System darstellen.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Anforderungen aus den Einsatzszenarien

Einsatzszenario Anforderung	Messung	Schalten	Datenübertragung	Aufzeichnung	Datenanalyse	Eingabeinheit	Externe Verbindung
Konsumenteninformation in Echtzeit	x		x				Smart Meter
Geräteüberwachung	x		x				Internet
Gerätetöpfungswarnung	x		x		x		Telefonnetz, Internet
Statistische Auswertung	x			x			
Energieberatung	x			x			
Virtueller Energieberater	x		x		x		Personal Computer
Gesteuertes Lastschalten		x				x	
Netzgesteuertes Lastmanagement		x				x	Verteilnetzbetreiber
Notstromversorgung - Dezentrale Erzeuger		x				x	Erzeugungsanlage

Nicht explizit in Tabelle 4.1 angeführt, aber nichtsdestotrotz eine sehr wesentliche Anforderung, ist die Notwendigkeit einer Benutzerschnittstelle für alle Einsatzszenarien. Der Benutzerschnittstelle kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie der direkte Kontaktpunkt des Systems mit dem Nutzer ist und auf diese Weise einer der wichtigsten Faktoren für den Erfolg des Systems ist.

Basierend auf den Anforderungen, der in diesem Kapitel beschriebenen Einsatzszenarien,



werden in Kapitel 5 das Konzept des Smart Plug Systems erarbeitet und die Funktionen des Gesamtsystems definiert.

5 Kapitel 5

Smart Plug Systemkonzept

Für die Erstellung des Konzepts für ein System zur Messung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern steht dessen Verwendung im Mittelpunkt. Aus diesem Grund bildet die Erarbeitung von Einsatzszenarien den ersten Schritt in der Entwicklung des Konzepts für das Smart Plug System.

Zur Beantwortung der Frage, wie ein System zur Messung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern, aufgebaut werden kann, ist zunächst zu klären, in welchem Umfeld das System eingesetzt wird, und was unter dem Begriff Einzelverbraucher in diesem Zusammenhang zu verstehen ist.

Das Smart Plug System zielt insbesondere auf die Erhebung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern in Haushalten ab. Dies beinhaltet die Messung des Energieverbrauchs und die Bereitstellung der Verbrauchsinformation. Das Smart Plug System kommt dementsprechend in Haushalten zum Einsatz. Elektrische Einzelverbraucher können daher als Haushaltsgeräte⁴, laut dem IEV⁵ [134], bezeichnet werden. Ein Gerät ist weiters als Gegenstand, der dazu bestimmt ist, eine vorgesehene Funktion zu erfüllen, im IEV beschrieben.⁶ In weiterer Folge wird ein elektrisches Betriebsmittel als elektrisches Verbrauchsmittel bezeichnet, wenn es dazu vorgesehen ist elektrische Energie in eine andere Energieform umzuwandeln.⁷[134, 35]

Nach der Festlegung des Einsatzgebietes des Smart Plug Systems und der Bestimmung Begriffs Einzelverbraucher werden in Abschnitt 5.1 die Anforderungen aus Kapitel 4 analysiert, um die wichtigen Elemente eines Systems zur Messung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern davon abzuleiten.

⁴IEV 151-11-23

⁵International Electrotechnical Vocabulary

⁶IEV 151-11-20

⁷IEV 826-16-02

5.1 Anforderungsanalyse

Aus der Zusammenstellung der wesentlichen Anforderungen in Abschnitt 4.10 lassen sich drei Gruppen von Aufgaben für das Smart Plug System ableiten. In Abbildung 7 sind die drei Aufgabenkategorien Sensor / Aktuator, Weiterverarbeitung und Benutzerschnittstelle und deren Beziehungen zueinander dargestellt.

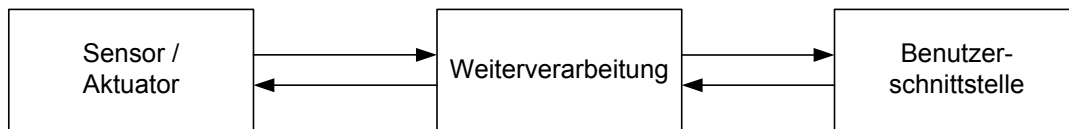


Abbildung 7: Systemaufgaben des Smart Plug Systems

Den Sensorteil des Smart Plug Systems bildet die Messung des Energieverbrauchs des Geräts. Ein Schalter zur Trennung des Verbrauchers vom Netz, in der erweiterten Variante des Smart Plug Systems, stellt die Aktuatoreinheit dar. Die unterschiedlichen Einsatzszenarien aus Kapitel 4 zeigen alle verhältnismäßig ähnliche Anforderungen an diesen Teil der Systemaufgabe.

Der Umfang der Weiterverarbeitung hingegen ist deutlich unterschiedlich für die verschiedenen Anwendungsfälle und hängt von der Wahl des Funktionsumfangs des Systems ab. Die Weiterverarbeitung beinhaltet Berechnungen, Auswertung, Speicherung, Signalanalyse, Mustererkennung und Lernalgorithmen sowie die Kommunikation zwischen den Systemteilen je nach Anwendungsfall.

Die Anforderungen an die Benutzerschnittstelle sind aus den Einsatzszenarien sind vielfältig und unterscheiden sich nach den in Tabelle 5.1 angegebenen Kriterien.

Tabelle 5.1: Einteilung der Anforderungen an die Benutzerschnittstelle

Kriterium	Beispiel
Ort	Fix oder mobil
Zeit	Echtzeit, zeitunkritisch
Art	Aktiv oder passiv
Informationsfluss	Vom oder zum Benutzer

Die detaillierte Betrachtung der wesentlichen Anforderungen aus den beschriebenen Einsatzszenarien zeigt, dass sich im Großen und Ganzen drei Aufgabenblöcke bilden lassen.

Die Anforderungen an die Datengewinnung beziehungsweise Datenausgabe sind relativ homogen. Damit wird ermöglicht, dass sich mit einer einzigen Sensor- / Aktuatoreinheit die Anforderungen aller Einsatzszenarien abbilden lassen. Bei den beiden anderen Systembausteinen Weiterverarbeitung und Benutzerschnittstelle stellt sich die Situation etwas anders dar, sodass eine Umsetzung aller Anforderungen in einem System als schwierig eingestuft wird.

Daraus folgend wird grundsätzlich eine modulare Realisierung mit einer vom Anwendungsfall unabhängigen Sensor- / Aktuatoreinheit vorgeschlagen. Auf diese Weise wird der, von der Anwendung abhängige, Teil abgetrennt und ein vielfach einsetzbarer Systembaustein geschaffen. Damit wird ermöglicht, dass die gleiche Systemeinheit für alle Anwendungsfälle einsetzbar ist. Die beiden anderen Systemblöcke können dann entsprechend der Aufgaben der verschiedenen Einsatzszenarios aufgebaut werden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ausschließlich auf die Grundvariante des Smart Plug Systems eingegangen und auf eine Untersuchung in Bezug auf die Erweiterung mit der Schaltfunktion verzichtet.

5.2 Systemstruktur

Die Kernaufgabe des Systems, die Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern, gibt bereits eine Grundstruktur für das Smart Plug System vor. Aufgrund der verteilten Anordnung der elektrischen Geräte im Haushalt ist die Messung ihres Energieverbrauchs grundsätzlich die Aufgabe eines verteilten Systems. Dies trifft sehr wohl auf die Messung zu, jedoch muss nicht für die Weiterverarbeitung und die Benutzerschnittstelle gelten. Im Bezug auf die Anforderungen und Ziele aus den Kapiteln 1 und 4 ergeben sich Limitierungen durch verteilte Einzelsysteme.

Bei der Betrachtung der Möglichkeiten zur Messung des Energieverbrauchs, wie in Kapitel 8 beschrieben wird, ist speziell eine verteilte Schnittstelle zum Benutzer mit Nachteilen verbunden. Insofern ist eine bequeme Benutzerschnittstelle nicht vereinbar mit der Realisierung als unauffälliges System, wenn eine verteilte Benutzerschnittstelle eingesetzt wird. Außerdem ist ein zentrale Schnittstelle Voraussetzung für bestimmte Einsatzszenarien, wie aus Kapitel 4 hervorgeht. Demzufolge ist eine zentralisierte Benutzerschnittstelle von Vorteil.

Die Weiterverarbeitung ist im Grunde sowohl verteilt als auch zentral möglich. Im Allgemeinen bieten zentrale Lösungen den Vorteil eines geringeren Aufwands für das Gesamtsystem, da Aufgaben zusammengefasst werden können. Damit wird eine bessere

Auslastung der Systemeinheiten erreicht.

Diese Argumente unterstützen den Vorschlag einer modularen Realisierung mit einem eigenständigen Systemteil zur Messung aus dem Kapitel 5.1.

Um nun eine verteilte Informationsgewinnung durch Messung und eine zentrale Benutzerschnittstelle in einem Gesamtsystem zu vereinen, ist eine Verbindung der beiden Systemteile notwendig. Mit der Implementierung einer Kommunikationsschnittstelle wird der Aufgabenblock der Weiterverarbeitung aufgeteilt. Wobei nur jene Funktionen, die für die Messung und die Kommunikation notwendig sind, in der verteilten Einheit integriert werden, um für den Teil, der mehrmals pro System benötigt wird, einen einfachen Aufbau zu ermöglichen.

Damit ergibt sich die Systemstruktur aus mehreren verteilten Systemeinheiten zur Messung und einer zentralen Stelle für Weiterverarbeitungsaufgaben und der Schnittstelle zum Benutzer oder weiteren Systemen, wie in Abbildung 8 dargestellt.

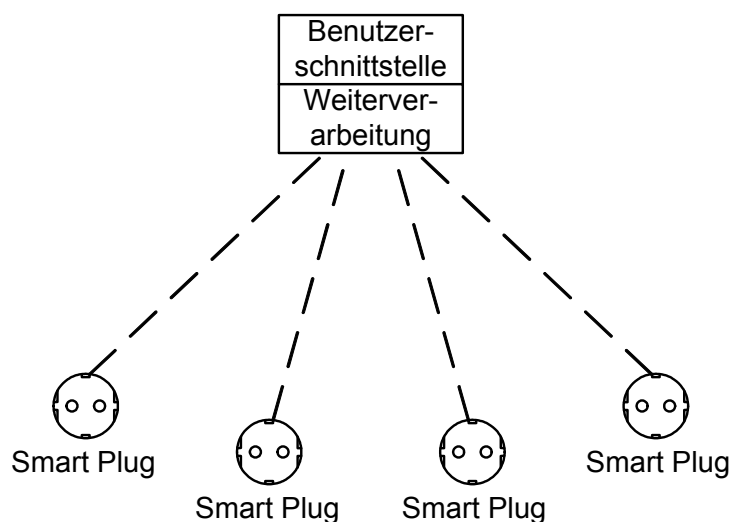


Abbildung 8: Systemstruktur des Smart Plug Systems

Vor der Erarbeitung des konkreten Systemaufbaus wird im folgenden Kapitel 1 die Eingliederung des Smart Plug Systems in den Haushalt als wesentliche Herausforderung im Gesamtkonzept behandelt.

6 Kapitel 6

Systemvarianten

Unabhängig vom konkreten Systemaufbau ist die Integration des Smart Plug Systems im Haushalt eine wesentliche Aufgabe in der Erstellung des Gesamtkonzepts. Die Integration des Smart Plug Systems in den Haushalt betrifft nicht nur den konkreten Einbau der Hardware sondern auch die Verwendung des Systems im Haushalt.

Das Smart Plug System kann einerseits als eigenes und in sich abgeschlossenes System realisiert werden oder in eine bestehende Infrastruktur im Haus eingebunden werden. In diesem Kapitel werden beide Varianten mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben.

Für einen allgemeinen Vergleich der Systemvarianten spielt die interne Struktur des Systems keine besondere Rolle. Die Anbindung an ein vorhandenes System erfordert aber jedenfalls das Vorhandensein einer Kommunikationsschnittstelle im Smart Plug System. Dementsprechend basiert die Auswahl von in Frage kommenden Systemen auf der, im vorangehenden Abschnitt 5.2 entwickelten, Systemstruktur.

Zur Nutzung eines vorhanden Systems wird eine Verbindung vom Smart Plug System zu einem zweiten System hergestellt und dadurch ein gemeinsames Gesamtsystem geschaffen. Damit ist das Smart Plug System als Teilsystem zu sehen. Für die Einbindung des Smart Plug System in ein in Haushalten vorhandenes System werden konkrete Möglichkeiten aufgezeigt und bewertet.

Basierend auf der Bewertung von ausgewählten Verbindungsoptionen für das Smart Plug System erfolgt die Auswahl einer konkreten Systemvariante in Abschnitt 6.3.

6.1 Variante 1: Autonomes System

Ein autonomes System bedeutet, dass das Smart Plug System als eigenständiges und unabhängiges System zur Messung des Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern aufgebaut wird und keine externe Infrastruktur involviert ist. Somit wird ein neues in sich abgeschlossenes System aufgebaut, in dem alle Systemfunktionen integriert sind. Das autonome System kann sowohl aus mehreren Einzelbausteinen ohne Kommunikationsfunktion als auch als verteiltes System mit abgesetzten Messeinheiten und einer



zentralen Verarbeitung aufgebaut sein.

Mit der Realisierung als autonomes System ist die Integration eines vollkommen neuen Systems in den Haushalt verbunden. Daher ist die Installation einer neuen Hardware zur Messung, Weiterverarbeitung und Bedienung des Systems notwendig. Neben der Installation der konkreten Komponenten ist das autonome System in das Leben des Konsumenten zu integrieren. Damit ist gemeint, die Nutzung des Smart Plug Systems zu etablieren und infolgedessen die Themen Energieeffizienz und Energiesparen in das Bewusstsein des Konsumenten zu rücken. Denn nur durch die Nutzung des Systems wird der Zweck des Systems als Hilfsmittel zum effizienten und sparsamen Einsatz von elektrischer Energie erfüllt. Indem die Benutzerschnittstelle in das autonome System eingegliedert ist, ist insbesondere auf eine einfache und intuitive Bedienung zu achten, da der Konsument nicht mit dem neuen System vertraut ist.

Demzufolge wird mit dem autonomen System eine zur Gänze neue Infrastruktur im Haushalt geschaffen. Das autonome System wird folglich neben den bereits im Haushalt existierenden Systemen installiert und betrieben. Damit können Störungen durch andere Systeme nicht ausgeschlossen werden. Auf diesen Aspekt ist bei der Entwicklung Bedacht zu nehmen um das Ziel der Umgebungsunabhängigkeit aus Kapitel 1 erfüllen zu können.

Die Entwicklung des autonomen Systems bietet grundsätzlich viele Freiheiten und Möglichkeiten, da nicht auf die Interoperabilität mit anderen Systemen geachtet werden muss. Damit wird es erleichtert, auf eine Vielzahl von Anwendungsanforderungen einzugehen, da keine Vorgaben von externen Systemen berücksichtigt werden und die Systemparameter entsprechend flexibel gewählt werden können. Bezüglich der Systemfunktionen sind keine Einschränkungen vorgegeben, und das System kann individuell an den Anwendungsfall angepasst werden. Als eigenständiges System spielt zudem die Kompatibilität zu anderen Systemen keine besondere Rolle, da das System selbst alle Funktionen integriert.

Die Freiheit in der Entwicklung des autonomen Systems nicht an die Konventionen anderer Systeme gebunden zu sein, bringt den Nachteil keine bereits verfügbaren Komponenten nutzen zu können und damit auf Entwicklungserleichterungen verzichten zu müssen. Damit verbunden ist die Neuentwicklung aller Komponenten des Systems. Infolgedessen ist der Entwicklungsaufwand relativ groß.

Aufgrund des individuellen Aufbaus des Systems ist die Verwendung von Standardkomponenten nur eingeschränkt möglich. Folglich ist jede Erweiterung mit einer speziellen

Weiterentwicklung verbunden.

Im Vergleich zur vorgestellten Variante eines autonomen Systems zur Energieverbrauchs-messung von Einzelverbrauchern beschäftigt sich der folgende Abschnitt mit einer alter-nativen Möglichkeit, das Smart Plug System im Haushalt zu integrieren.

6.2 Variante 2: Teilsystem

Dieser Ansatz geht einen anderen Weg zur Einbettung des Smart Plug Systems in die Gerätelandschaft eines Haushalts. Neben einer völligen Neuentwicklung besteht die Mög-lichkeit, das Smart Plug System als Erweiterung einer in Haushalten bereits verfügbaren Infrastruktur aufzubauen. Dies erfolgt durch die Einbindung der Smart Plug Systems in eine bestehende Infrastruktur.

Aus einer Verbindung von Systemen ergeben sich Vorteile aus Synergieeffekten. Die Integration des Smart Plug Systems ermöglicht die gemeinsame Nutzung vorhandener Infrastruktur. Die kollektive Nutzung von Hardware und Kommunikationsinfrastruktur verringert den Aufwand zum Aufbau des Smart Plug Systems. Zusätzliche Vorteile er-geben sich bei der Verbindung von Systemen mit ähnlichen Aufgabengebieten, da aus der Ergänzung von einzelnen Systemfunktionen neue Möglichkeiten geschaffen werden können. Nützlich ist eine Verbindung jedoch nur, wenn sich dadurch die Aufgaben des Smart Plug Systems erfüllen lassen.

Mit der Schaffung neuer Möglichkeiten aus der Kombination von Systemfunktionen er-gibt sich eine Aufwertung beider Systeme, und der Kundennutzen der Systeme kann gesteigert werden. Somit profitieren beide System von einer Verbindung.

Die Verbindung von Systemen beruht auf dem Austausch von Informationen. Dement-sprechend ist die Kommunikationsfähigkeit der Systeme ist eine Voraussetzung für den Austausch von Informationen. Folglich erfordert die Anbindung an ein vorhandenes Sys-tem jedenfalls das Vorhandensein einer Kommunikationsschnittstelle in beiden Systeme. Entsprechend der, durch die verteilte Anordnung der Geräte im Haushalt, vorge-gebenen Grundstruktur ergibt sich die in Abschnitt 5.2 beschriebene Systemstruktur, wobei der für die Verbindung der Systeme notwendige Teil der Weiterverarbeitung in die verteilten Messeinheiten zu integrieren ist.

Im Grunde sind unterschiedliche Tiefen der Integration des Smart Plug Systems denkbar. Die Tiefe der Integration richtet sich nach den Funktionen die das Hostsystem für das Smart Plug System als Gastsystem bereitstellt. Dies reicht von der kollektiven Nutzung



von Kommunikationsinfrastruktur über eine gebündelte Weiterverarbeitung bis zu einer gemeinsamen Benutzerschnittstelle. Je mehr Funktionen gemeinsam genutzt werden können, desto geringer ist der Installationsaufwand für das Smart Plug System.

Im Fall der Einbettung der Funktionen des Smart Plug Systems in ein bereits im Haushalt vorhandenes System beschränkt sich der Installationsaufwand auf die Messeinheiten, wenn die vorhandene Benutzerschnittstelle eine gemeinsame Nutzung erlaubt.

Damit wird die Verwendung des Smart Plug Systems erleichtert, weil dem Nutzer prinzipiell der Umgang mit dem bereits eingesetzten System bekannt ist. Die Herausforderung die Nutzung des Smart Plug Systems zu etablieren bleibt dennoch bestehen. Obgleich es in diesem Fall nicht gilt ein neues System, sondern lediglich eine neue Funktion, zu nutzen.

In modernen Haushalten sind eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme mit Kommunikationsfunktionalität zu Hause. Aufgrund der vielen Funktionen dieser Systeme lässt sich das Heimnetzwerk anhand der unterschiedlichen Merkmale grundsätzlich in die drei Teile Steuerungsnetzwerk, Informationsnetzwerk und Heimnetzwerk-Gateway einteilen. Das Steuerungsnetz dient zur Steuerung und Überwachung von traditionellen Haushaltsgeräten, wie beispielweise Kühlschrank und Mikrowellengerät. Im Informationsnetz tauschen die Geräte der Datenverarbeitung und der Unterhaltungselektronik Informationen aus. Das Informationsnetz beinhaltet auch die Verbindung zum Internet und ist durch hohe Datenübertragungsraten gekennzeichnet. Die Funktion des Heimnetzwerk Gateway ist die Integration der Funktionen im Steuerungsnetzwerk in das Informationsnetzwerk.[135]

Das Informationsnetzwerk im Haushalt hat sich mit dem Einzug des Internets in den Haushalt stark entwickelt. Neben dem klassischen Teilnehmer im Heimnetzwerk, dem Personal Computer, setzt sich eine zunehmende Vernetzung der einzelnen Geräte der digitalen Unterhaltungselektronik durch, wie die DLNA⁸ beweist.[39]

Das Smart Plug System zur Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern ist aufgrund seiner Funktionalität nicht dem Informationsnetzwerk, sondern dem Steuerungsnetzwerk zuzuordnen. Das Steuerungsnetzwerk wird im Grunde genommen von Hausautomatisierungssystemen, wie zum Beispiel dem Konnex KNX oder LonTalk, umgesetzt.

Im Bezug auf die Umsetzung des Smart Plug Systems stellen die Systeme des Informationsnetzwerks, die vor allem auf Ethernet und Internet Protokoll basieren, neben der

⁸Digital Living Network Alliance

Kommunikationsinfrastruktur keine weiteren Funktionen für das Smart Plug Systems bereit. Die Aufgaben von Hausautomatisierungssystemen und dem Smart Plug System sind deutlich ähnlicher. In der Hausautomatisierung sind Funktionen zur Übertragung, Verwaltung und Darstellung von Messdaten vorhanden. Damit ist eine Einbindung der Smart Plug Messeinheiten direkt möglich. Für Hausautomatisierungssysteme stehen auch Einheiten für die Datenaufbereitung und die Benutzerschnittstelle zur Verfügung. Folglich ist eine tiefgehende Integration umsetzbar und die Smart Plug Messeinheit werden als Teilsysteme eingebunden. In Referenz [138] wird die Einbindung eines Systems zur Überwachung von Haushaltsgeräten in ein Hausautomatisierungssystem gezeigt.

Aufgrund von Bestrebungen, die Energieeffizienz zu erhöhen, werden in der Europäischen Gemeinschaft intelligente Messsysteme für Elektrizität eingeführt und dadurch im Bereich des Steuerungsnetzwerks neben den klassischen Hausautomatisierungssystemen eine weitere Infrastruktur geschaffen.

Die intelligenten Messsysteme betreffen grundsätzlich die Übertragung von Messdaten vom Haushalt zu einem Energiedienstleister. Durch die Forderung eine gemeinsam Infrastruktur zur Abfrage der Verbrauchsdaten unterschiedlicher Energieträger zu nutzen, werden die intelligenten Messsysteme Teil des Heimnetzwerks, um die Daten der unterschiedlichen Verbrauchszähler eines Haushalts zu kombinieren.[68, 72]

Mit der zentralen Stelle zur Kombination der Daten unterschiedlicher Verbrauchszähler und der Möglichkeit der Anzeige der Daten bringen die intelligenten Messsysteme mit dem Smart Meter die Voraussetzung für eine Anbindung des Smart Plug Systems mit.

6.3 Realisierung im Smart Plug System

Mit dem Smart Plug System soll die Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern in möglichst vielen Umgebungen durchführbar werden und die Nutzung des Systems für den Konsumenten so bequem wie möglich gestaltet werden. Das Smart Plug System unterstützt die Konsumenten beim effizienten und sparenden Einsatz von elektrischer Energie indem der Nutzer über den Verbrauch eines jeden Gerätes in Echtzeit informiert wird, wie in Kapitel 4.1 beschrieben ist. Bei der Auswahl einer Umsetzungsvariante für das Smart Plug System wird im Speziellen auf diese Kriterien eingegangen.

Um ein umfeldunabhängiges System bereitzustellen ist bei einem autonomen System auf die Immunität gegen Störungen von anderen beeinflussenden Systemen und bei der Realisierung als Teilsystem auf die Verfügbarkeit des Hostsystems in Haushalten zu achten. Damit sind Hausautomatisierungssysteme für die Integration des Smart Plug



Systems nicht besonders geeignet, da nur eine relativ geringe Anzahl von Haushalten mit dieser Technologie ausgestattet ist. In einem größeren Anteil der Haushalte finden sich Systeme, die dem Informationsnetzwerk zugeordnet werden. Entsprechend Kapitel 7 sind in diesem Zusammenhang insbesondere Funktechnologien interessant. Etwa ein Viertel der Haushalte in den EU15 verwendeten 2007 die WLAN⁹-Technologie, gemäß Referenz [88]. Die Nutzung dieser Technologie ist stark im Steigen, jedoch stellt die WLAN-Technologie ausschließlich eine Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung.

In der Europäischen Gemeinschaft mit einer hohen Verfügbarkeit von Smart Meter Systemen in Haushalten, aufgrund der Richtlinien 2009/72/EG [68] die besagt, dass bis 2020 80% der Verbraucher mit intelligenten Messsystemen ausgestattet werden, zu rechnen. Damit bringen die Smart Meter die Voraussetzung für die Anbindung des Smart Plug Systems im Bezug auf die Zielsetzung, einem breiten Konsumentenkreis die Nutzung des Systems zu ermöglichen, mit.

Durch die Verbindung des Smart Plug Systems mit dem Smart Meter wird die gemeinsame Nutzung der Kommunikationsinfrastruktur und der Benutzerschnittstelle ermöglicht. Über das Smart Meter können unterschiedliche Benutzerschnittstellen durch das Smart Plug System genutzt werden, wie bereits in Abschnitt 4.1 gezeigt wurde. Damit wird außerdem eine Schnittstelle zu neuen Medien geschaffen, da aufgrund der Richtlinie 2009/72/EG des Europäischen Parlaments und Rates, in der eine zeitnahe Information des Kunden über den Energieverbrauch gefordert wird, immer mehr Energiedienstleistungsunternehmen Internetportale zur Information ihrer Kunden anbieten.

Mit der Kopplung des Smart Plug Systems an das Smart Meter wird der elektrische Gesamtenergieverbrauch mit der fein granularen Information des Energieverbrauchs auf Geräteebene ergänzt. Aus der Kombination dieser Informationen ergeben sich neue Möglichkeiten zur Analyse des elektrischen Energieverbrauchs im Vergleich zur getrennten Betrachtung. Außerdem lässt sich durch die Verbindung dieser Informationen der Energieverbrauch, von nicht mit dem Smart Plug erfassten, Geräten bestimmen, und damit ein noch höherer Detaillierungsgrad erreichen.

Die Verfügbarkeit eines Smart Meters bedeutet nicht unbedingt die Möglichkeit zur Verbindung der Integration des Smart Plug Systems, da die Verwendung der Smart Meter Infrastruktur für die Ablesung anderer Energieträger und damit eine Kommunikationsschnittstelle für Geräte im Haushalt auf nationalen Vorgaben basiert. In mehreren Ländern wie den Niederlanden, Deutschland und Österreich ist eine gemeinsame Über-

⁹Wireless Local Area Network

tragungsinfrastruktur für die Verbrauchsdaten unterschiedlicher Energieträger vorgesehen und wird eine einheitliche Kommunikationsschnittstelle verwendet, siehe Kapitel 7 und [85, 48, 72].

Demzufolge ist eine Anbindung des Smart Plug Systems an das Smart Meter im Vorteil gegenüber der Verbindung zu anderen im Haushalt verfügbaren Systemen. Zur Auswahl der Systemvariante wird die Realisierung des Smart Plug Systems als autonomes System mit der Anbindung der Smart Plug Einheiten an das Smart Meter verglichen.

Wie bereits allgemein in den vorangehenden Abschnitten dieses Kapitels beschrieben, ist einer der wesentlichsten Vorteile bei der Verbindung des Smart Plug Systems mit einem bereits im Haushalt vorhandenen System, der reduzierte Aufwand für Hardware und Installation. Mit dem geringeren Hardwareaufwand ist neben den verringerten Investitionskosten im Allgemeinen ebenso eine Reduzierung des Entwicklungsaufwands verbunden, da nicht alle Komponenten des Systems neu entwickelt werden müssen und vorhandene herangezogen werden können. Außerdem erleichtert die Verwendung bestehender Infrastruktur die Nutzung für den Konsumenten insofern, dass eine bereits bekannte Benutzerschnittstelle verwendet wird und somit kein neues Bedienkonzept erlernt werden muss.

In Anbetracht der steigenden Anzahl von Geräten in Haushalten nimmt die Komplexität des Systems Haushalt zu. Da im Grunde jedes Gerät über ein eigenes Bedienteil verfügt, kommen in Haushalten eine Flut von Bedienelementen zum Einsatz. Gerade im Bezug auf Fernbedienungen wird es für den Konsumenten immer schwieriger den Überblick über die Zuordnung zwischen Bedienelement und Gerät zu behalten. Die Realisierung des Smart Plug Systems als eigenständiges abgeschlossenes System bringt im Unterschied zur Umsetzung als Teilsystem eine weitere Benutzerschnittstelle in den Haushalt.[74]

Die Verschmelzung von Funktionen in vernetzten Geräten ist insgesamt ein Thema für den modernen Haushalt, wie die Internationale Funkausstellung 2010 in Berlin gezeigt hat.[114] In diesem Sinne entspricht eine Verbindung des Smart Plug Systems mit dem Smart Meter dem aktuellen Trend.

Die Entwicklung eines autonomen Systems bietet die eine individuell an den Anwendungsfall angepasste Messdatenübermittlung, wohingegen die Kommunikationsschnittstelle durch das Smart Meter vorgegeben ist, wenn eine Verbindung vom Smart Plug System zum Smart Meter aufgebaut werden soll. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 8 ist aber ohnehin eine automatische Messdatenübermittlung mittels laufen-



der Übertragung, wie in Verbindung mit dem Smart Meter realisiert werden kann, zu bevorzugen. Die vom Smart Meter vorgegebene Kommunikationsschnittstelle bewirkt nicht nur eine Einschränkung in der Entwicklung, sondern bedeutet auch, dass die Kommunikationstechnologie standardisiert und deren Einsatz für die Datenübertragung von verteilten Systemen bereits erprobt wurde.

Durch die Verwendung der Smart Meter Infrastruktur zur Übertragung von Verbrauchswerten verschiedener im Haushalt eingesetzter Energieträger, laufen alle Daten zum Haushaltsenergieverbrauch zentral im Smart Meter zusammen. Damit wird das Smart Meter zur zentralen Plattform für Verbrauchsdaten im Haushalt. Mit der Verbindung von Smart Plug System und Smart Meter, wird der Einzelenergieverbrauch von Geräten auch in diese zentrale Plattform integriert.

Zudem bildet das Smart Meter die Schnittstelle zum intelligenten Stromnetz (Smart Grid). Über die Verbindung des Smart Plug Systems mit dem Smart Meter wird eine Integration von elektrischen Einzelverbrauchern in das Smart Grid ermöglicht. Mit dieser Kommunikationsverbindung können neue Funktionen, wie zum Beispiel netzgeführtes Lastmanagement, das in Abschnitt 4.8 beschrieben ist, umgesetzt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass aufgrund des geringeren Aufwands, sowohl für die Hardware als auch für die Entwicklung und Installation des Systems, bedingt durch die Möglichkeit der gemeinsamen Nutzung von Kommunikationsinfrastruktur und Benutzerschnittstelle, eine Verbindung des Smart Plug Systems mit dem Smart Meter einer Realisierung als autonomes System vorzuziehen ist. Da die, durch das Smart Meter vorgegebene, Kommunikationsschnittstelle auch die in Kapitel 3 definierten Anforderungen, wie beispielsweise der geringe Installationsaufwand und die quasi Echtzeitfähigkeit, entsprechend den Ausführungen unter Punkt 7, ermöglicht, wird das Smart Plug System mit einer Verbindung zum Smart Meter ausgeführt.

7 **Kapitel 7**

Kommunikation

Anschließend an die Untersuchungen zur Struktur und zur Integration des Smart Plug Systems in den Haushalt mit dem Schwerpunkt auf einer systemischen Betrachtung, ist der Hauptinhalt dieses Kapitels die konkrete Realisierung der Kommunikationsschnittstelle des Smart Plug Systems.

Da, basierend auf die Bewertung in Kapitel 1, das Smart Plug System mit einer Verbindung zum Smart Meter ausgeführt wird, beschäftigt sich dieses Kapitel im Anschluss an die Betrachtung der Kommunikationskomponenten eines Automated Meter Management Systems in Abschnitt 7.1 mit der Datenübertragung zwischen den Smart Plug Einheiten und dem Smart Meter in Unterkapitel 7.2. Die Durchführung des Kommunikationstests mit dem Smart Plug Simulator und der verwendete Testaufbau sind in Abschnitt 7.3 beschrieben.

7.1 Smart Meter Kommunikation

Das Smart Meter ist die Basiskomponente eines intelligenten Messsystems an der Schnittstelle zwischen dem Haushalt und dem Niederspannungsverteilstromnetz. Als Schnittstellenkomponente übernimmt das Smart Meter die Aufgabe, hausinterne Geräte an das Automated Meter Management System anzubinden. Die Einbettung des Smart Meters in das Automated Meter Management System, das auch Advanced Metering Infrastructure (AMI) genannt wird, ist in Abbildung 9 dargestellt.

Im Allgemeinen ist ein Automated Meter Management System hierarchisch gegliedert und bietet über das Zentralsystem die notwendigen Zugangsmöglichkeiten für externe Systeme wie zum Beispiel Abrechnungssysteme oder Internetportale zur Kundeninformation. Generell werden die Daten der Smart Meter auf einer, dem Zentralsystem vorgelagerten, Ebene zusammengefasst. In einem elektrischen Verteilnetz entspricht diese Ebene den Trafostationen. Für die Verbindung der Datenkonzentratoren in den Trafostationen mit dem Zentralsystem werden vorwiegend Kommunikationssysteme mit

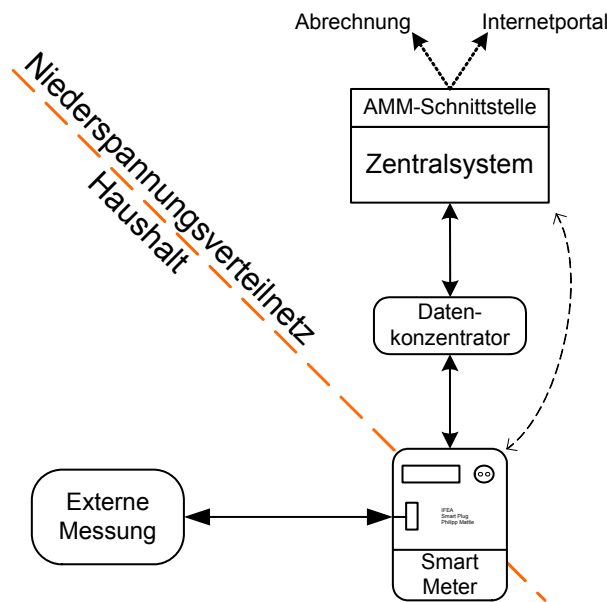


Abbildung 9: Schematischer Aufbau eines AMM Systems

WAN¹⁰-Technik, wie beispielsweise Mobilfunk- oder Glasfasernetze, und auf dem Internetprotokoll basierende Kommunikationsstandards genutzt. Daneben kommt auch eine direkte Verbindung des Smart Meters mit dem Zentralsystem in Frage, wie in Abbildung 9 dargestellt ist.[105, 132]

Bisher hat sich für die Kommunikationsschnittstellen in einem Automated Meter Management System noch kein Standard durchgesetzt. Um die Interoperabilität zwischen den Komponenten unterschiedlicher Hersteller in einem intelligenten Messsystem zu verbessern, hat die Europäische Kommission mit dem Standardisierungsauftrag M/441 [51] an die Normungsgremien CEN¹¹, CENELEC¹² und ETSI¹³ eine Vereinheitlichung in Europa in die Wege geleitet. Zur Bearbeitung des Standardisierungsauftrags M/441 wurde die Smart Metering Coordination Group (SM-CG) geschaffen, die mit dem Forschungsprojekt OPEN meter¹⁴ zusammenarbeitet.

Das Smart Meter kommuniziert über eine bidirektionale Verbindung zum Datenkonzentrator mit dem Automated Meter Management Zentralsystem. Über diese Schnittstelle erfolgt im intelligenten Stromnetz die Kommunikation zwischen dem Haushalt und der

¹⁰Wide Area Network

¹¹Europäisches Komitee für Normung

¹²Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung

¹³Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen

¹⁴Open Public Extended Network Metering

nächsten Trafostation. Für diese Verbindung bietet sich vor allem eine Datenübertragung über die Leitungen des Niederspannungsverteilsnetzes an, wie aus dem OPEN meter Projekt [132] hervorgeht. Die Nutzung der Leitungen des Niederspannungsverteilsnetzes für die Datenübertragung wird auch als Powerline Communication (PLC) oder Distribution Line Communication (DLC) bezeichnet. Die Begriffe Powerline Communication und Distribution Line Communication werden nicht einheitlich und vielfach als Synonym verwendet. Von Distribution Line Communication wird vorwiegend gesprochen, wenn das Niederspannungs- oder Mittelspannungsverteilsnetz als Übertragungsmedium zum Einsatz kommt. Powerline Communication ist grundsätzlich als Oberbegriff zu sehen und bezieht beispielsweise auch die Nutzung der Hausinstallationsleitungen mit ein.

Neben der Verbindung zu den höheren Ebenen des Automated Meter Management Systems bieten Smart Meter im Allgemeinen eine Schnittstelle zur Kommunikation mit hausinternen Messgeräten an. Unter hausinterne Messgeräte werden die unterschiedlichen im Haushalt eingesetzten Verbrauchszähler wie zum Beispiel Zähler für Gas, Fernwärme oder Wasser verstanden. Die Verbindung der verschiedenen Verbrauchszähler mit dem Smart Meter, als Schnittstelle zum Automated Meter Management System, erlaubt die Nutzung einer einzigen Kommunikationsinfrastruktur für die Abfrage und Verwaltung mehrerer Verbrauchszähler eines Haushalts. Diese Möglichkeit zur Kommunikation mit dem Smart Meter wird im Smart Plug System genutzt. Im konkreten Fall des Smart Plug Systems ist das hausinterne Messgerät ein Zähler für elektrische Energie. Jede Smart Plug Einheit stellt somit einen Elektrizitätszähler dar.

Diese Messgeräte erweitern das Automated Meter Management System in dem Sinn, dass die Kommunikationsinfrastruktur in den privaten Bereich des Haushalts weitergeführt wird, und werden insofern in Abbildung 9 als „Externe Messung“ bezeichnet.

In unterschiedlichen nationalen Spezifikationen wie dem Open Metering System [106], den Dutch smart meter requirements [85], dem österreichischen Leistungskatalog für fernauslesbare Smart Metering-Systeme im Bereich Strom [72] wird neben anderen im OPEN meter Projekt [131] angegebenen Kommunikationssystemen der M-Bus¹⁵ nach EN 13757 für die Verwendung zur hausinternen Kommunikation vorgegeben. Der M-Bus bietet, insbesondere für Messgeräte ohne Stromanschluss, den Vorteil einer Versorgung über die Busleitungen oder den Vorteil angepasster Funkkommunikation für den Batteriebetrieb.

¹⁵Metering Bus

Die Normengruppe EN 13757 definiert den M-Bus im OSI-Schichtenmodell¹⁶. Das OSI-Schichtenmodell stellt im Allgemeinen die Grundlage für Kommunikationssysteme und ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Norm spezifiziert für den M-Bus die Bitübertragungsschicht (Physical Layer) und die Verbindungs- beziehungsweise Sicherungsschicht (Data Link Layer) sowie die Anwendungsschicht (Application Layer).

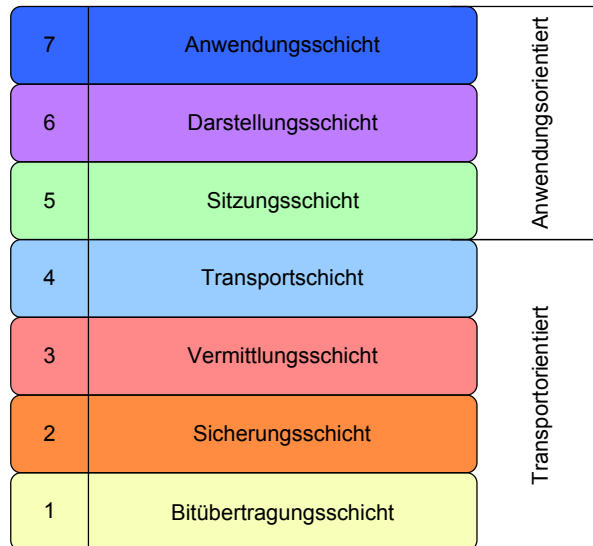


Abbildung 10: OSI-Schichtenmodell

Für den M-Bus wird sowohl eine kabelgebundene Variante in EN 13757-2 [55] als auch eine kabellose Variante in EN 13757-4 [63] angegeben. Damit werden zwei Umsetzungen der Bitübertragungsschicht mit unterschiedlichen Übertragungsmedien und der, jeweils auf die physikalischen Medien, angepassten Verbindungsschicht angeboten. Zudem wird in der Normengruppe die Anwendungsschicht definiert, wie aus Abbildung 11 zu erkennen ist.

¹⁶Open Systems Interconnection Reference Model

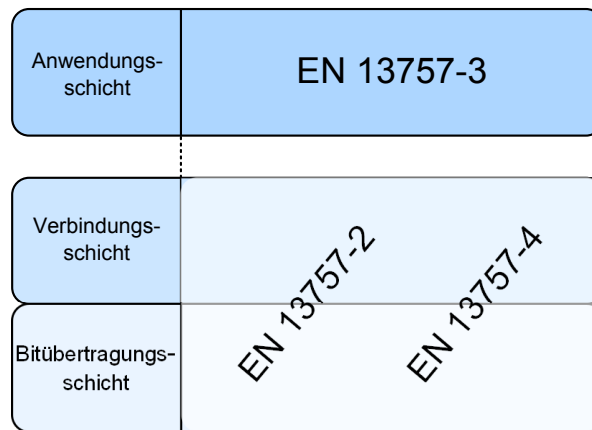


Abbildung 11: M-Bus im OSI-Schichtenmodell

Neben dem M-Bus stellt unter anderem die ZigBee Alliance einen kabellosen Kommunikationsstandard für die Schnittstelle von Automated Meter Management Systemen zu hausinternen Messgeräten, basierend auf den ZigBee Spezifikationen [142], zur Verfügung. ZigBee stellt grundsätzlich die Kommunikationsfunktionalität eines kabellosen Maschennetzes bereit. Mit ZigBee wird ein gesamter Protokollstapel (Stack) definiert. Aufbauend auf dem Standard IEEE 802.15.4, der die Bitübertragungsschicht und Verbindungsschicht nach dem OSI-Modell festlegt, spezifiziert die ZigBee Alliance die darüberliegenden Schichten für verschiedene Anwendungsfälle. Daher sind neben den Netzwerkfunktionen der ZigBee Pro Spezifikation auf Vermittlungsebene (Network Layer) und Transportebene (Transport Layer) auch Spezifikationen für anwendungsspezifische Kommunikationsprofile wie beispielsweise Hausautomatisierung oder Smart Energy verfügbar.

Für die Verwendung der Zigbee Protokollstapel in Automated Meter Management Systemen wird an einer Spezifikation zur Nutzung der COSEM¹⁷-Anwendungsschicht nach EN 62056-53 [62] gearbeitet. Dabei sollen die DLMS/COSEM Nachrichten über das ZigBee Netzwerk transportiert werden. Der Ansatz ist einen Datentunnel für die Anwendungsdaten der DLMS/COSEM Nachrichten durch das ZigBee Netzwerk aufzubauen, wie in [86] gezeigt wird. Zu diesem Zweck arbeiten die DLMS User Association zusammen mit der ZigBee Alliance an einer Spezifikation. Der Aufbau des ZigBee-Kommunikationssystems mit Unterstützung des DLMS/COSEM Standards, als sehr weit verbreiteten Standard für Zählerdatenaustausch, ist in Abbildung 12 zu sehen.[37]

¹⁷Companion Specification for Energy Metering

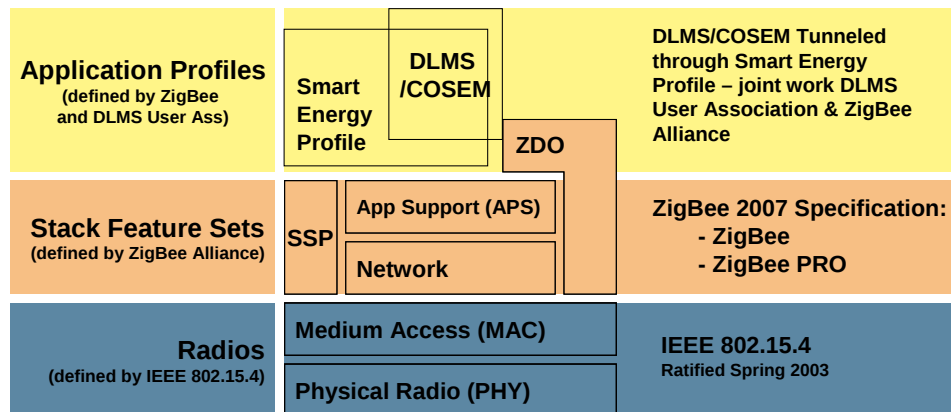


Abbildung 12: ZigBee Systemarchitektur [131]

Auf die Schnittstelle zwischen Automated Meter Management System und hausinternen Messgeräten zur externen Messung wird folgenden Abschnitt 7.2 näher eingegangen. Die Auswahl des Kommunikationssystems und die konkreten Kommunikationsparameter des Smart Plug Systems werden im Detail beschrieben.

7.2 Realisierung im Smart Plug System

Die Auswahl der Kommunikationsschnittstelle für das Smart Plug System nimmt zum Einen auf die formulierten Ziele des Kapitels 3 Rücksicht und beruht zum Anderen auf den Vorgaben des Smart Meters um die Anbindung des Smart Plug Systems zu verwirklichen.

Damit das Smart Plug System in vielen Haushalten zum Einsatz kommen kann, ist ein möglichst geringer Installationsaufwand wichtig. Um den Aufwand für die Installation des Systems gering zu halten, werden physikalische Übertragungsmedien, die bereits im Haushalt verfügbar sind, neu zu installierenden Übertragungsmedien vorgezogen. Infolgedessen stehen für die Übertragung grundsätzlich die elektrischen Hausinstallationsleitungen, die am Einsatzort des Smart Plug Systems direkt am Anschlussstecker des Geräts vorhanden ist, und der freie Raum als Übertragungsmedium zur Verfügung. Deshalb bieten sich sogenannte Powerline Communication Systeme sowie Funkübertragung für die Kommunikation an. Der freie Raum, in dem der Ausbreitung von Funkwellen nichts im Weg steht, wird als Übertragungsmedium für Funksysteme genutzt.

Von diesen beiden Optionen, Funk beziehungsweise Powerline Communication, wird momentan klar die Funkvariante für die Kommunikation zwischen Smart Meter und hausin-

ternen Messgeräten favorisiert, wie den Referenzen [131, 106, 85] zu entnehmen ist. Dies ist damit verbunden, dass Verbrauchszähler für beispielweise Gas oder Wasser grundsätzlich über keinen Anschluss an das Stromnetz verfügen. Deshalb weist der Einsatz der Powerline Communication Technology keinen Vorteil gegenüber einer anderen kabelgebundenen Übertragung auf und ist mit einem zusätzlichen Installationsaufwand für die Kommunikationsleitungen verbunden.

Infolgedessen wird im Smart Plug System eine auf Funk basierende Übertragung eingesetzt. Bezugnehmend auf die vorigen Abschnitt 7.1 beschriebenen Schnittstellen zur Kommunikation zwischen dem Automated Meter Management System und hausinternen Messgeräten über das Smart Meter, als Komponente an der Systemgrenze, stehen somit die Kommunikationsnorm des M-Bus zur Fernauslesung von Zählern nach EN 13757 und der Kommunikationsstandard ZigBee zur Verfügung. Dementsprechend wird im weiteren Verlauf ausschließlich auf die funkbasierende M-Bus Version nach EN 13757-4 eingegangen, da für die kabelgebundene Variante des M-Bus nach Norm EN 13757-2 eine Zweidrahtverbindung zu jeder Einheit notwendig ist.

Beide Kommunikationsstandards nutzen grundsätzlich die lizenzfreien ISM¹⁸-Bänder für die Funkübertragung. Im ZigBee-Standard ist sowohl der Betrieb bei 2,4 GHz als auch bei 868 MHz definiert. Die Nutzung der Frequenzen im Bereich von 2,4 GHz wird jedoch vorgezogen.[131] Für die kabellose Variante des M-Bus werden ausschließlich das Frequenzband bei 868 MHz genutzt. Im Allgemeinen erlauben niedrigere Frequenzen eine Übertragung über weitere Distanzen und eignen sich besser um Wände beziehungsweise Glas zu überwinden, da höhere Frequenzen grundsätzlich eine höhere Dämpfung aufweisen.[125] Für gewöhnlich weisen Funkempfänger für niedrigere Frequenzen zudem eine höhere Empfindlichkeit auf. Da der Frequenzbereich bei 2,4 GHz, aufgrund der beinahe weltweiten Lizenzfreiheit und sehr vielen Applikationen, außerdem sehr überfüllt ist, wird im Smart Plug System die Funkübertragung im Bereich von 868 MHz bevorzugt.[116] Eine große Übertragungsdistanz der Smart Plug Einheiten ist insofern wichtig, als dass die Smart Plug Einheiten beim realen Einsatz im Haushalt, aufgrund der Situierung der Haushaltsgeräte, weit entfernt vom Smart Meter platziert werden und trotzdem eine Kommunikationsverbindung aufbauen sollen.

Wie bereits im vorigen Abschnitt 7.1 beschrieben, setzen die bereits veröffentlichten Standards zur Kommunikation von Automated Meter Management Systemen (DSMR [85], OMS [106]) auf den M-Bus nach EN 13757 für die Kommunikation vom Smart

¹⁸Industrial, Scientific and Medical

Meter zu hausinternen Messgeräten auf. Für die Verwendung des M-Bus spricht zudem, dass diese Standards bereits in finalen Versionen vorliegen und die Spezifikationen für die Nutzung von DLMS/COSEM über ZigBee erst in der Entwurfsphase stehen.

Aufgrund der breiten Unterstützung des M-Bus als Schnittstelle für die hausinterne Kommunikation mit dem Smart Meter, kommt daher im Smart Plug System der kabellose M-Bus laut Europäischem Standard EN 13757-4 als Übertragungsschnittstelle zum Einsatz.

Für den kabellosen M-Bus stehen unterschiedliche Betriebsarten, die je nach Einsatzfall genutzt werden können, zur Verfügung. Die Betriebsarten werden in

- stationärer Betrieb „S“,
- häufiger Sendebetrieb „T“ und
- häufiger Empfangsbetrieb „R“

eingeteilt. Wichtige Parameter der Betriebsarten sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst. Die Norm definiert sowohl unidirektionale als auch bidirektionale Übertragungsarten. Um auf die begrenzten Energieressourcen von batteriebetriebenen Messgeräten Rücksicht zu nehmen, ist der Funkempfänger der Messgeräte nicht ständig aktiv. Der Empfang von Daten ist nur jeweils nach dem Senden eines Funktelegramms für eine kurze Dauer möglich. Da der Empfänger somit nur für eine kurze Zeitdauer nach dem Senden aktiv wird, kann das Funkmodul während den Sendepausen deaktiviert werden und damit der Energiebedarf minimiert werden. Dies ermöglicht im Fall von batteriebetriebenen Messgeräten eine lange Lebensdauer.

Die relative Einschaltdauer ist als die maximale Sendezeit auf einem Kanal innerhalb der Zeitperiode von einer Stunde definiert und wird in Prozent angegeben. Neben der relativen Einschaltdauer sind auch die Beschränkungen von maximaler Sendeperiode und minimaler Sendepause nach CEPT/ERC/REC 70-03 E zu beachten.

Die Beschränkungen der Sendezeit und die Übertragungsrate, die sich aus der vorgegebenen Chiprate und der Codierung ergibt, sind maßgeblich für die Übertragungskapazität der Betriebsarten. Neben der Limitierung der Übertragungskapazität stellen diese Einschränkungen im zeitlichen Ablauf für den kabellosen M-Bus nach EN 13757-4 eine Art der Kollisionsvermeidung dar. Da das verwendete Frequenzband lizenzfrei für verschiedenste Anwendungen zur Verfügung steht, kommt es zu einem Mehrfachzugriff auf das Übertragungsmedium. Dementsprechend treten bei gleichzeitigem Zugriff auf den

Tabelle 7.1: Betriebsarten des M-Bus Funk EN 13757-4

Betriebsart	S			T		R
Unterbetriebsart	S1	S1-m	S2	T1	T2	R2
typ. Frequenz in MHz	868,3	868,3	868,3	868,95	868,95 / 868,3	868,33
Relative Einschalt-dauer¹⁹	0,02%	0,02%	1%	0,10%	0,1% / 1%	1%
Chiprate in kchip/s	32,768	32,768	32,768	100	100 / 32,768	4,8
Übertragungsrate in kbit/s	16,38	16,38	16,38	66,67	66,67 / 16,38	2,4
Codierung	Man-chester	Man-chester	Man-chester	2 aus 3	2 aus 3	Man-chester
Übertragungs-richtungen	1	1	2	1	2	1
Anmerkung					Senden / Empfang	Mehrka-nalfähig

selben Funkkanal Kollisionen auf. Durch die Beschränkung der Sendezeit und vorgegebenen Werten für die Dauer einer Übertragung sowie definierten Pausen zwischen den Übertragungen, wird das dauerhafte Blockieren des Funkkanals verhindert. Die geringen relativen Einschalt Dauern im vom kabellosen M-Bus verwendeten Frequenzband sorgen dafür, dass ein Sender den Frequenzkanal nur für eine kurze Zeitdauer nutzt. Damit bleibt der Funkkanal während dem Großteil der Zeit für andere Sender frei und steht für deren Übertragungen zur Verfügung.

Da in der Norm EN 13757-4 keine darüberhinausgehenden Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung für den kabellosen M-Bus spezifiziert sind, ist den Sendern grundsätzlich auch nicht bekannt, wann ein anderer Sender den Funkkanal belegt. Damit können auch während laufenden Übertragungen, durch den Zugriff eines anderen Senders auf den selben Funkkanal, Kollisionen auftreten. Demzufolge ist für kurze Übertragungsdauern die Wahrscheinlichkeit einer Kollision während der Übertragung geringer. Somit wird die Anzahl der unbrauchbaren Übertragungen aufgrund von Kollisionen verringert. Die Betriebsart „S“ für den stationären Betrieb ist grundsätzlich für eine eher seltene Datenübertragung geeignet. Für die Unterbetriebsarten „S1“ und „S1-m“ sind geringe relative Einschalt Dauern angegeben, womit die Übertragungskapazität beschränkt wird. In der

Betriebsart „T“ für den häufigen Sendebetrieb werden kurze Datenblöcke, unter Einhaltung der relativen Einschaltdauer, im Abstand von wenigen Sekunden übertragen. Kurze Datenblöcke benötigen eine typische Übertragungszeit von wenigen Millisekunden. Durch die höhere Übertragungsrate dieser Betriebsart kann dieselbe Datenmenge in einer kürzeren Zeitdauer übertragen werden. Folglich wird der Funkkanal für eine kürzere Zeitdauer belegt und damit die Zeit, in der die Übertragung durch eine Kollision gestört werden kann, verkürzt. Häufiger Empfangsbetrieb in der Betriebsart „R2“ bedeutet, dass sich das Funkmodul generell in einem Energiesparmodus befindet und im Abstand von wenigen Sekunden auf eine Wecknachricht hört. Mit dem Empfang einer Wecknachricht bereitet sich der Zähler auf einen Datenaustausch mit dem Sender der Wecknachricht vor.

Im Bezug auf den Anwendungsfall der Kundeninformation aus Kapitel 4.1 und die diesbezügliche Forderung aus Kapitel 3, dass die Daten der Smart Plug Einheiten in quasi Echtzeit für eine Anzeige bereitstehen sollen, ist eine Übertragung in kurzen Zeitabständen Voraussetzung. Demzufolge sind die Unterbetriebsarten „S1“ und „S1-m“ angesichts ihrer eingeschränkten Übertragungskapazität infolge der geringen relativen Einschaltdauer nicht besonders geeignet.

Nachdem das Wesen der Betriebsart „R“ mit einem generell schlafenden Funkmodul und die Forderung nach quasi Echtzeit nicht vereinbar sind, stehen die Betriebsart „T“ und die Unterbetriebsart „S2“ zur weiteren Auswahl zur Verfügung.

Das Smart Plug System verwendet die Betriebsart „T“, da mit den Dutch Smart Meter Requirements (DSMR) [85] und dem Open Metering System (OMS) [106] beide bisher veröffentlichten Spezifikationen für die Anbindung von hausinternen Messgeräten an das Smart Meter die Betriebsart „T“ unterstützen. Mit der Festlegung auf Betriebsart „T“ gilt für die Kommunikation des Smart Plug Systems als Sender zum Smart Meter als Empfänger zusätzlich zur Einschränkung der Sendezeit, gegeben durch die relative Einschaltdauer, eine Beschränkung der maximalen Sendezeit pro Datenblock auf die Dauer von 0,72 s sowie eine ebenso lange minimale Pause zwischen aufeinanderfolgenden Übertragungen nach CEPT/ERC/REC 70-03 E.

Neben dem physikalischen Übertragungsmedium ist mit der Festsetzung der Betriebsart auch die Verbindungsschicht im OSI-Schichtenmodell definiert. Gemäß Abbildung 11 bleibt die Bestimmung der verwendeten Anwendungsschicht offen. Grundsätzlich können beliebige Anwendungsdaten übertragen werden. Die verwendete Anwendungsschicht und der Nachrichtenaufbau werden durch die Steuerinformation (CI-Feld) am Beginn der An-

wendungsdaten als Teil der Verbindungsschicht angegeben. Für die Betriebsart „T“ sind in der Norm EN 13757-4 Nachrichtenstrukturen unter Verwendung der M-Bus Anwendungsschicht EN 13757-3 festgelegt. Das Smart Plug System setzt aus diesem Grund auf die M-Bus Anwendungsschicht EN 13757-3 auf. Überdies wird diese Anwendungsschicht in beiden bisher fixierten Spezifikationen DSMR [85] und OMS [106] unterstützt.

Generell ist für die Datenübertragung mittels Funk zu beachten, dass ein öffentliches genutztes Übertragungsmedium verwendet wird. Demzufolge kann die Datenübertragung abgehört werden und Datensicherheit und -integrität können ohne zusätzliche Maßnahmen nicht gewährleistet werden. Um diesen Punkten zu begegnen, werden in der Regel Datenverschlüsselungsverfahren verwendet. Um dem Datensicherheitsgedanken Rechnung zu tragen, wird in der Norm EN 13757-3 eine kryptographische Verschlüsselung mithilfe des DES²⁰-Verfahrens nach [22] vorgeschlagen. Gemäß [84] ist die einfache DES-Verschlüsselung nicht zeitgemäß und sollte durch modernere Verschlüsselungsverfahren ersetzt werden.

Die aktuellen Spezifikationen für die Anbindung von hausinternen Messgeräten an das Smart Meter (DSMR [85], OMS [106]) definieren aktuellere Verschlüsselungsverfahren mittels AES²¹ nach [101], die als Ersatz für die DES-Verschlüsselung nach EN 13757-3 dienen. Im Smart Plug System werden entsprechend, den aktuellsten Spezifikationen für Smart Metering Systeme, dem Open Metering System die auf AES basierenden Verschlüsselungsverfahren laut OMS-Spezifikation Volume 2 [106], unterstützt.

Im Smart Plug Simulator, der für die Durchführung der, in Abschnitt 7.3 beschriebenen, Kommunikationstests realisiert wurde, ist der Verschlüsselungsmodus 5 nach OMS-Spezifikation Volume 2 [106] integriert. In diesem Verschlüsselungsmodus wird eine AES-Verschlüsselung mit einer Blocklänge von 16 Bytes und einem 128 Bit Schlüssel mit Cipher-Block-Chaining (CBC) verwendet. Für Cipher-Block-Chaining wird ein Initialisierungsvektor benötigt, wie Abbildung 13 zeigt. Für die 128 Bit AES-Verschlüsselung wird hier ein 16 Byte Initialisierungsvektor eingesetzt.

²⁰Data Encryption Standard

²¹Advanced Encryption Standard

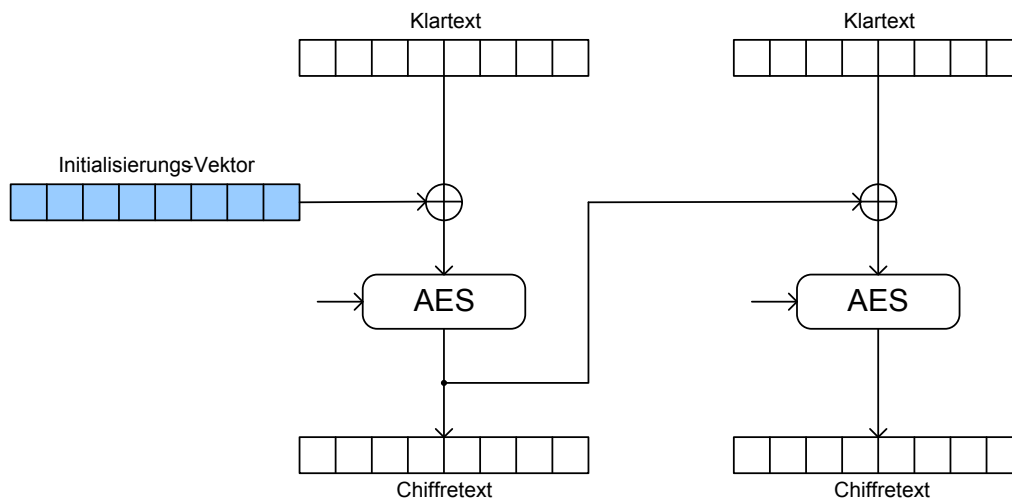


Abbildung 13: Cipher-Block-Chaining Mode

Der Programmteil zur Verschlüsselung der Anwendungsdaten im Smart Plug Simulator ist als Matlab-Code im folgenden Absatz gezeigt. Entsprechend der Angabe im Signature-Feld im Nachrichtenkopf erfolgt die Verschlüsselung gemäß Verschlüsselungsmodus 5. Im Datenfeld `df` müssen neben den Anwendungsdaten bereits zwei „Idle Filler“ Bytes zur Verifikation der Verschlüsselung im Sender zu Beginn des Datenfelds eingefügt sein, um den OMS-Spezifikationen Volume 2 [106] zu entsprechen.

```

1 % Encrypt Payload
2 if D.signat(2) == '5'
3 % Add idle filler to get N*16 Bytes for encryption
4 df = [df, sscanf(dec2hex(ones(1,(32-mod(length(df),32))/2)*47),'%s')];
5 % Add number of 16byte-blocks to the signature field
6 D.signat(3) = dec2hex(length(df)/32,1);
7 % Compile initialization vector
8 iv = [D.m_F, a_F, D.acc_nr, D.acc_nr, D.acc_nr, D.acc_nr, D.acc_nr,...
9       D.acc_nr, D.acc_nr, D.acc_nr ];
10 % Compute encrypted payload as string of hexadecimal numbers
11 df = sscanf(dec2hex(CryptAES('encode', df, Key, iv)),'%s');
12 end

```

Neben der Erweiterung des Datenfelds `df` auf ein Vielfaches von 16 Byte, wird in diesem Programmteil die Anzahl der verschlüsselten 16 Byte Blöcke in das Signature-Feld geschrieben. Der Aufbau des Initialisierungsvektors erfolgt entsprechend Tabelle 7 der OMS-Spezifikation [106]. Für die AES-Verschlüsselungsoperation wird auf die Implementierung der Funktion `CryptAES.m` [83] zurückgegriffen. Damit verfügt der Smart Plug Simulator über die Möglichkeit der Verschlüsselung, gemäß der OMS-Spezifikation

[106].

Zum Abschluss dieses Abschnitts werden zusätzliche Vorteile der Verwendung des kabellosen M-Bus nach EN 13757-4 [63] aufgezeigt. Durch den Einsatz des kabellosen M-Bus ergibt sich zugleich eine Schnittstelle zu Hausautomatisierungssystemen die auf dem Konnex Standard der Normengruppe EN 50090 beruhen, da die selbe Bitübertragungs- und Verbindungsschicht zum Einsatz kommen. Dementsprechend unterscheiden sich ausschließlich die Anwendungsdaten, wie aus Abbildung 14 hervorgeht.[87]

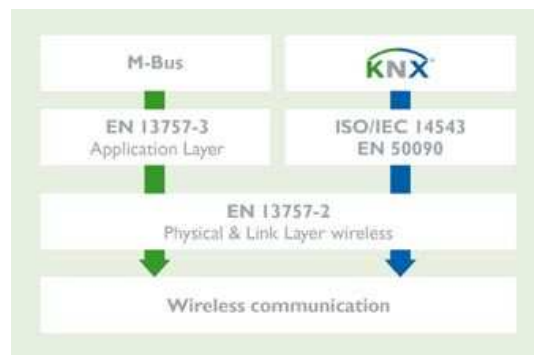


Abbildung 14: Interoperabilität zwischen M-Bus und KNX [87]

Des Weiteren stehen, durch die Verwendung des kabellosen M-Bus nach EN 13757-4, bereits am Markt erhältliche Standardkomponenten für die Nutzung mit dem Smart Plug System bereit. Beispielsweise ermöglicht ein erhältliches Funkmodul mit USB²²-Anschluss [21] eine Weiterverarbeitung der Messdaten der Smart Plug Einheiten mit einem Personal Computer und infolgedessen auch eine Nutzung des Smart Plug Systems ohne ein Smart Meter. Die Konformität des Smart Plug Systems zum OMS Standard gestattet darüberhinaus die Nutzung von unterschiedlichen Erweiterungskomponenten, wie zum Beispiel unabhängige In-Home-Displays, die direkt die Daten der Smart Plug Einheiten empfangen und anzeigen können.

Die tatsächliche Realisierung der Anbindung des Smart Plug Systems an ein Automated Meter Management System zeigt der folgende Abschnitt und demonstriert die Möglichkeit der Integration von einzelnen Haushaltsgeräten in das Smart Grid.

²²Universal Serial Bus

7.3 Kommunikationstest Smart Plug System

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Durchführung von Tests in Bezug auf die Verbindung des Smart Plug Systems mit der Schnittstelle eines Haushalts zum Smart Grid respektive zum Automated Metering System, dem Smart Meter. Der Testaufbau ist schematisch in Abbildung 15 dargestellt und zeigt die kommunikationstechnischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten. Die, in diesem Abschnitt, verwendeten Gerätebezeichnungen beziehen sich jeweils auf die in Tabelle 7.2 angegebenen Geräte.

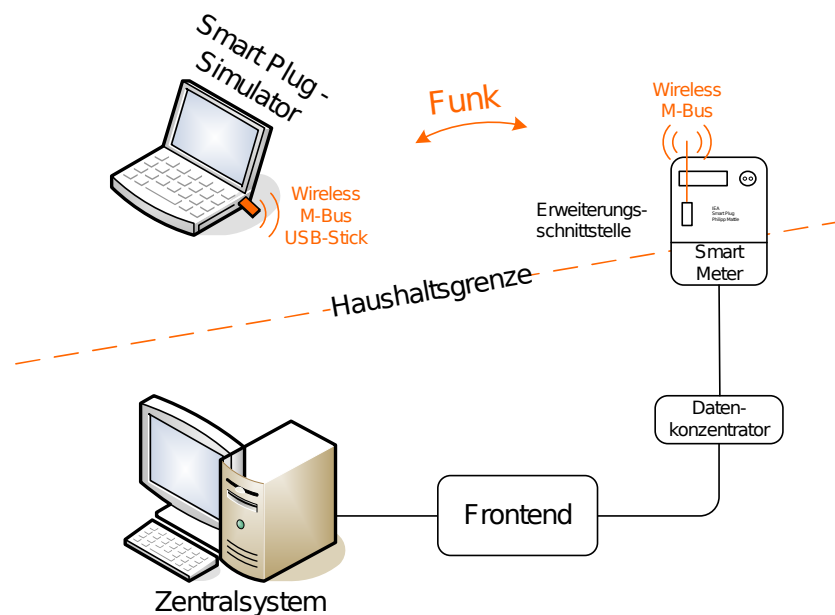


Abbildung 15: Schematischer Testaufbau für den Kommunikationstest

Für die Tests wird das Automated Meter Management System der Firma Siemens, AMIS²³, verwendet. Der grundsätzliche Aufbau des AMIS ist in Abbildung 16 dargestellt.

Der AMIS Testaufbau besteht aus den elementaren Komponenten eines Automated Meter Management Systems nach Abbildung 9 und ist in Abbildung 17 gezeigt. Im Testsystem, wie es Abbildung 17 zeigt, stehen neben dem Frontend und einem Datenkonzentrator, ein dreiphasiges und ein einphasiges Smart Meter sowie ein Lastschaltgerät zur Verfügung. Die eingesetzten Gerätetypen sind der Tabelle 7.2 zu entnehmen.

²³Automated Metering and Information System

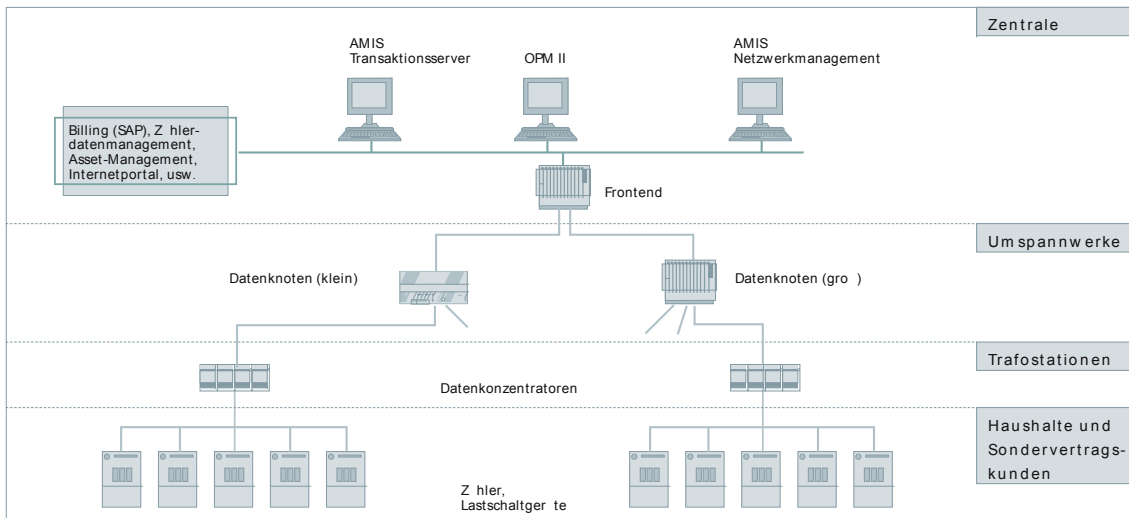


Abbildung 16: Systemaufbau des Automated Metering und Information System [113]

Das dreiphasige Smart Meter ist im Testaufbau mit einem Kommunikationsmodul für den kabellosen M-Bus nach Norm EN 13757-4, das in die Erweiterungsschnittstelle eingebaut wird, ausgestattet und wird dementsprechend für die Durchführung der Kommunikationstests verwendet.

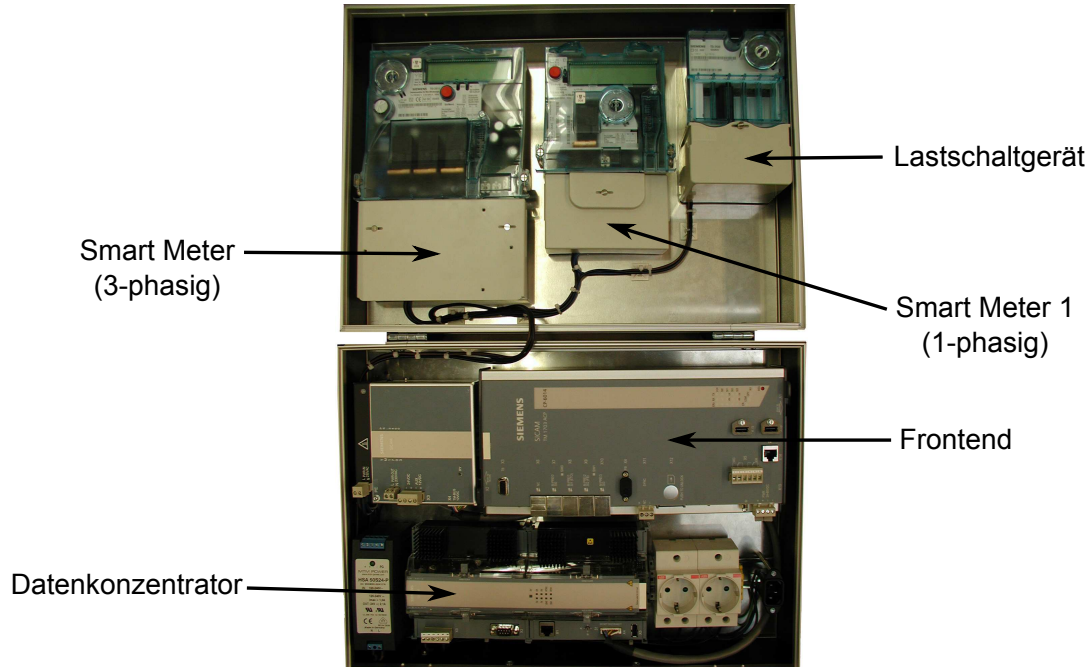


Abbildung 17: Testaufbau des Automated Metering und Information System

Tabelle 7.2: Verwendete Geräte und Software

Bezeichnung	Hersteller	Type	Funktion
Zentralsystem	Siemens AG (Wien, A)	AMIS Transaktionsserver Vers. 7.1	Abfragen, Datenhaltung, Parameterierung
Frontend	Siemens AG (Wien, A)	SICAM TM 1703 ACP / CP-6014	Schnittstelle zum Zentralsystem
Datenkonzentrator	Siemens AG (Wien, A)	SICAM TM1703 / CP-3410	Daten zusammenfassen, DLC-Kommunikation
Smart Meter	Siemens AG (Wien, A)	TD-3511	Dreiphasiges Smart Meter
Smart Meter 1	Siemens AG (Wien, A)	TD-3512	Einphasiges Smart Meter
Lastschaltgerät	Siemens AG (Wien, A)	TD-3520	Elektrische Verbraucher schalten
Kommunikationsmodul	Siemens AG (Wien, A)		Erweiterungsschnittstelle Funkkommunikation
Wireless M-Bus USB-Stick	AMBER wireless (Köln, D)	AMB8465-M	Kommunikation für Smart Plug Simulator
Matlab	MathWorks Inc. (Natick, US)	Matlab R2006a Vers. 7.2.0.294	Smart Plug Simulator



Für die Überprüfung der Realisierbarkeit der Kommunikation zwischen dem Smart Plug System und dem Smart Meter wird in dieser Arbeit ein Telegramm in Übereinstimmung mit den Normen EN 13757-3 und EN 13757-4 konstruiert. Zusätzlich sind die Spezifikationen des Open Metering System [106] im Telegrammaufbau berücksichtigt. Das Telegramm ist individuell auf das Smart Plug System abgestimmt und in Abbildung 18 ersichtlich.

Der Grundaufbau des Telegramms ist durch Definition der Verbindungsschicht in der Norm EN 13757-4 vorgegeben. Der erste Block, mit insgesamt 12 Bytes, enthält die Informationen zur Verbindungssteuerung. Alle folgenden Blöcke haben eine Länge von 18 Byte inklusive der CRC²⁴-Prüfsumme. Durch die Steuerinformation im ersten Byte des zweiten Blocks wird der weitere Telegrammaufbau und die Art der Anwendungsdaten festgelegt.

Da die Grundvariante des Smart Plug Systems rein zur Messung des Energieverbrauchs eingesetzt wird, ist grundsätzlich eine unidirektionale Übertragung der Messdaten von den Smart Plug Einheiten zum Smart Meter ausreichend. Infolgedessen zeigt das Steuerfeld (C-Feld) des Smart Plug Telegramms an, dass die Smart Plug Einheit Daten sendet aber keine Antworten erwartet.

²⁴Cyclic Redundancy Check

Block 1

L-Field	C-Field	M-Field		A-Field						CRC-Field	
0x34	0x44	0xA7	0x52	0x01	0x08	0x86	0x06	0x01	0x02	0xB8	0x50
Length	Meter data, No Reply	Manufr. TUG		Identnr. 0x 01088606				Ver-sion	Device type Electricity	16bit CRC	
		LSB	MSB	LSB			MSB			MSB	LSB

Block 2

CI-Field	Datafield														CRC-Field		
0x72	0x01	0x08	0x86	0x06	0xA7	0x52	0x01	0x02	0x03	0x00	0x00	0x00	0x04	0x03	0x6B	0x4D	0xC4
Resp. 12 Byte Header	Identnr. 0x 01088606			Manufr. TUG		Ver-sion	Device type Electricity	Access No.	Status	Signature		DIF	VIF	Value	16bit CRC		
	LSB		MSB	LSB	MSB				No Error	No Encryption		32 bit integer	Energy kWh	LSB	MSB	LSB	

Block 3

Datafield															CRC-Field		
0xC1	0x02	0x00	0x04	0x83	0x3C	0x0B	0x02	0x00	0x00	0x0B	0x2B	0x78	0x05	0x00	0x0B	0xDC	0x26
Value 180587 Wh		DIF	VIF	VIFE	Value 523 Wh				DIF	VIF	Value 578 W			DIF	16bit CRC		
	MSB	32 bit integer	Energy / kWh and Extens.	neg. Akku.	LSB		MSB	6 digit BCD	Power / W	LSB		MSB	6 digit BCD	MSB	LSB		

Block 4

Datafield												CRC-Field	
0xFF	0x01	0x34	0x00	0x00	0x04	0x6D	0x39	0x37	0x66	0x09	0xDF	0xC3	
VIF	VIFE	Value 34 VAR		DIF	VIF	Value 06.09.2003 23:57					16bit CRC		
Manuf. Speci.	React. Power / VAR	LSB	MSB	32 bit integer	Time Point	LSB	Minute	Hour	Month / Year	MSB	Day / Year	MSB	LSB

Abbildung 18: Smart Plug Telegramm

Die folgenden Absätze gehen auf einige wesentliche Elemente des Smart Plug Telegramms ein. Als eindeutige Hersteller-Identifikation (M-Field) wird die, noch nicht zugeteilte Kombination, „TUG“ unter Beachtung der in [41] veröffentlichten Herstellerkennungen festgelegt. Die Art der, im Telegramm enthaltenen, Verbrauchsinformation wird im Adressfeld (A-Field) als Gerätetyp-Identifikation (Device Type Identification) codiert und ist im vorliegenden Telegramm mit 0x02 für Elektrizität angegeben.

Mit der Steuerungsinformation (CI-Feld) 0x72 zu Beginn des zweiten Blocks wird die Nachricht als Antwort des Zählers unter Verwendung der dezidierten Anwendungsschicht nach EN 13757-3 deklariert. Zudem wird damit die Länge des Nachrichtenkopfs festgelegt. Im vorliegenden Telegramm wird ein vollständiger Nachrichtenkopf mit 12 Bytes verwendet, siehe Abbildung 18. Mit dem vollständigen Nachrichtenkopf wird, gemäß

OMS-Spezifikation Volume 2, die Verwendung eines Konverters zwischen kabelgebundenem und kabellosem M-Bus unterstützt.

Im Nachrichtenkopf werden neben der Adressinformation (A-Feld) und der Hersteller-Identifikation (M-Feld) zusätzliche Informationen zum Status und zu den Funktionen des Geräts sowie zum Inhalt des Telegramms und zur Übertragung laut OMS-Spezifikation [106] übermittelt. Im Status-Feld können Informationen zu Gerätefehlern gesendet werden. Mit dem Status-Feld 0x00 meldet die Smart Plug Einheit Fehlerfreiheit, wie im Smart Plug Telegramm in Abbildung 18 ersichtlich ist. Das Signature-Feld dient zur Angabe der verwendeten Verschlüsselung und enthält im Fall der Verwendung des Verschlüsselungsmodus 5 die Anzahl der verschlüsselten 16 Byte Blöcke, siehe Abschnitt 7.2. Zudem beinhaltet das Signature-Feld Angaben über die Erreichbarkeit des Absenders. Da in der Grundvariante des Smart Plug Systems eine unidirektionale Verbindung ausreichend ist, wird durch das Signature-Feld des Smart Plug Telegramms eine unidirektionale Verbindung angezeigt. Dies bedeutet, dass die Smart Plug Einheiten zu keiner Zeit Empfangsbereit ist. Der gesamte Aufbau des Signature-Felds ist der Tabelle 10 der OMS-Spezifikation Volume 2 [106] zu entnehmen.

Das Telegramm enthält vier Elemente mit Messdaten und zusätzlich einen Zeitstempel, der den Zeitpunkt der Übertragung angibt. Mit dem Telegramm werden kumulierte Werte für den Energieverbrauch (Wirkenergie) und Momentanwerte für Wirk- und Blindleistung übertragen. Neben dem Energieverbrauch wird der Momentanwert der Wirkleistung übertragen um den Vorgaben des Open Metering System [106] zu entsprechen. Gemäß dem Messbereich des Smart Plug Systems, siehe Kapitel 9, werden für die Übertragung von Wirk- und Blindleistung jeweils sechsstellige BCD²⁵ Werte in den Einheiten Watt beziehungsweise VAR vorgesehen. Die beiden Leistungsgrößen geben die mittlere Leistung seit der letzten Übertragung an. Da Wirk- und Blindleistung jeweils positive und negative Werte annehmen können, werden sechs Stellen verwendet, weil eine Stelle für die Darstellung von negativen Werten vorgesehen werden muss. Die Vorzeichenkonvention für die Leistungswerte richtet sich nach der IEEE Standard Definition für die Messung von elektrischen Leistungsgrößen [79]. Um die positiven und negativen Werte der Wirkleistung auch adäquat im Energieverbrauchswert berücksichtigen zu können, wird sowohl ein Wert für den Bezug von elektrischer Energie (A+) als auch ein Wert für die Lieferung von elektrischer Energie (A-) übertragen. Diese beiden Energiewerte werden als 32 Bit Integer, gemäß EN 13757-3, übertragen und sind in der

²⁵Binary-Coded-Decimal

Einheit Wattstunde angegeben.

Im Telegramm werden die Zahlendarstellung, der Wertebereich und die Einheit der genannten Datenpunkte durch die Angaben im „Data Information Block“ (DIB) und im „Value Information Block“ (VIB) angegeben. Diese beiden Datenblöcke werden jedem Messwert vorangestellt, um diesen im Empfänger zu identifizieren. Der „Data Information Block“ besteht zumindest aus einem „Data Information Field“ (DIF) und kann durch maximal zehn „Data Information Field Extensions“ (DIFE) erweitert werden. Diese Felder enthalten primär Informationen über den Datentyp. Zudem gibt das „Data Information Field“ Informationen über die Art des gesendeten Wertes, wie zum Beispiel Momentanwert oder Minimalwert. Die Felder des „Data Information Blocks“ dienen auch zur Angabe von Tarifinformationen und zur Identifikation der Datenwerte bei der Übertragung von gespeicherten und historischen Werten.

Der „Value Information Block“ besteht aus mindestens einem „Value Information Field“ (VIF) und kann durch maximal zehn „Value Information Field Extensions“ (VIFE) ergänzt werden. Die Angaben im „Value Information Block“ spezifizieren primär die Einheit des folgenden Messwerts und können noch Zusatzinformationen enthalten. Für eine darüberhinausgehende Beschreibung von DIB und VIB wird auf die Europäischen Norm EN 13757-3 für die dezidierte Anwendungsschicht des M-Bus verwiesen.

Die beim Kommunikationstest konkret verwendeten Kombinationen aus DIF und VIF können dem Smart Plug Telegramm aus Abbildung 18 entnommen werden und sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

Abgesehen vom „Value Information Block“ der Blindleistung sind im ausschließlich Smart Plug Telegramm standardisierte VIF / VIFE - Kombination enthalten. Da keine entsprechende Standardisierung für Blindleistung zur Verfügung steht, kommt eine Smart Plug System spezifische VIF / VIFE - Kombination zum Einsatz.

Das tatsächlich verwendete Telegramm besteht insgesamt aus 61 Datenbytes. Zusammen mit der Funkpräambel und einem Nachspann (Postambel) ergeben sich daraus mindestens 782 chips für die Übertragung. In der Betriebsart „T“ stehen für die Übertragung vom Smart Plug zum Smart Meter, wie Tabelle 7.1 zeigt, 100 kchip/s zur Verfügung. Dementsprechend wird für eine Übertragung des Telegramms aus Abbildung 18 eine Zeit von 7,82 ms benötigt. Aus der Beschränkung der relativen Einschaltdauer auf 0,1% ergeben sich 460 Übertragungen dieses Telegramms pro Stunde. Infolgedessen können bei die Messdaten alle 7,826 s periodisch übertragen werden.

Tabelle 7.3: DIF / VIF für die Smart Plug Messwerte

Bedeutung	DIF	VIF	VIFE
Kumulierter Energiewert für Bezug in Wh (Momentanwert) als 32 Bit Integer	0x04	0x03	
Kumulierter Energiewert für Lieferung in Wh (Momentanwert) als 32 Bit Integer	0x04	0x83	0x3C
Wirkleistung in W (Momentanwert) als sechsstellige BCD-Zahl	0x0B	0x2B	
Blindleistung in VAR (Momentanwert) als sechsstellige BCD-Zahl	0x0B	0xFF	0x01
Zeitpunkt der Übertragung (aktueller Wert) nach Typ F (Compound CP32) gemäß Norm	0x04	0x6D	

Aus diesem Grund wird beim Kommunikationstest ein Übertragungsintervall von 8s verwendet. Mit diesem Übertragungsintervall ist eine zeitnahe Information des Kunden möglich. Somit kann die Anforderung einer Information des Konsumenten in quasi Echtzeit mit dem Einsatz des kabellosen M-Bus in der Betriebsart „T“ im Smart Plug System realisiert werden.

Im Test wird eine Smart Plug Einheit mit einem Personal Computer und dem Wireless M-Bus USB-Stick kommunikationstechnisch nachgebildet, wie in Abbildung 15 angedeutet. Die Ablaufsteuerung der Kommunikation sowie die normgerechte Datenaufbereitung werden programmtechnisch unter Verwendung von Matlab realisiert.

Durch die Installation des Wireless M-Bus USB-Stick am Personal Computer wird für dessen Nutzung eine serielle Verbindung bereitgestellt. Über diese serielle Schnittstelle erfolgt sowohl die Konfiguration des Wireless M-Bus USB-Sticks als auch die Ausgabe der zu übermittelnden Daten. Die verwendete Konfigurationsroutine aus Matlab ist im folgenden Absatz gezeigt.

```

1 function init_AMB8465M( Mode, Block1, COM )
2 %init_AMB8465M( Mode, BLOCK1, COM )
3 % Function to initialize the AMB8465M wireless M-Bus USB-Stick
4 % Mode specifies the M-BUS mode to use as string e.g. 'T1'
5 % Block1 specifies if the M-Bus Block1 for the AMB8425 is part
6 % of the serial data; Block1=false means that Block1 is not given in the

```

```
7 % data
8 % COM specifies the serial port for the AMB8425M e.g. 'COM6'
9 % The acknowledge of the AMB8465M to the commands is printed in the Matlab
10 % command window
11
12 ErrID = ['MaPh:', mfilename];
13
14 % Check function call
15 if nargin ≠ 3
16     error(ErrID, '3 inputs required!');
17 end
18
19
20 % M-Bus mode T1 is supported for the Smart Plug communication test
21 if Mode ≠ 'T1'
22     error(ErrID, ['Specified M-Bus mode not supported']);
23 end
24
25 % Create serial port object
26 s = serial(COM');
27 fopen(s);
28
29 % AMB8465M - Command
30 tmp = sscanf('FF0903460105B7', '%2x'); % SET-PRESELECT-TO-T1-METER-REQ
31 tmp = uint8(tmp);
32
33 fwrite(s, tmp, 'uint8');
34 % AMB8465M - Acknowledge
35 A = fread(s, 7, 'uint8');
36 temp = dec2hex(A);
37 sscanf(temp, '%s')
38
39 if Block1
40 % AMB8465M - Command
41     tmp = sscanf('FF0903300101C5', '%2x'); % SET-BLOCK1-ADD-DISABLE-REQ
42     tmp = uint8(tmp);
43
44     fwrite(s, tmp, 'uint8');
45 % AMB8465M - Acknowledge
46     A = fread(s, 7, 'uint8');
47     temp = dec2hex(A);
48     sscanf(temp, '%s')
49 end
50
51 fclose(s);
52
53 return
```

Da eine unidirektionale Verbindung zur reinen Übertragung von Messdaten ausreichend ist und das Smart Plug Telegramm aus Abbildung 18 auch eine unidirektionale Verbindung anzeigt, wird der Wireless M-Bus USB-Stick für die Betriebsart „T1“ konfiguriert.

Damit werden der Funkkanal, die Chiprate und die Codierung, wie in Tabelle 7.1 angegeben, eingestellt. Neben diesen Parametern werden die Länge der Präambel und das Synchronisationszeichen parametrisiert sowie der Empfänger des Wireless M-Bus USB-Stick ausgeschaltet.

Der Smart Plug Simulator überträgt entsprechend dem vorher berechneten Übertragungsintervall in Abständen von 8s. Im Smart Plug Simulator werden die gemessenen Leistungswerte als auch die Anfangswerte der Zählregister durch Eingabe im Matlab Programmcode, der im nachfolgenden Absatz dokumentiert ist, vorgegeben.

```
1 % Befor executing this script connect the AMB8465M Wireless M-Bus USB-Stick
2 % and check the name of the created serial port - Subsequently execute the
3 % initialisation script init_AMB8465 e.g.
4 % init_AMB8465M( 'T1', 1, 'COM6' )
5
6 % ----- Smart Plug Simulator INPUT SECTION -----
7
8 P_ = 200;      % Active Power in W (Current Value)
9 Q_ = 10;      % Reactive Power in var (Current Value)
10 Ap_ = 735;   % Meter count Active energy import (A+) in Wh (Initial Value)
11 Am_ = 17;    % Meter count Active energy export (A-) in Wh (Initial Value)
12
13 COM      = 'COM6' % Specify the name of AMB8465M serial port
14 % -----
15
16 % Set variables global - for use in the callback function
17 global P; global Q; global Ap; global Am;
18 P = P_; Q = Q_; Ap = Ap_; Am = Am_;
19
20 % Add subdirectories
21 init_path();
22
23 % Create and open Matlab serial port object
24 global s;
25 s = serial(COM);
26 fopen(s);
27
28 % Start Timer for Energy calculation
29 tic
30
31 % Create timer object for periodical execution of the Smart Plug Simulator
32 % script with 8s cycle duration
33 t = timer('TimerFcn', 'Smart_Plug_Simulator', 'Period', 8, ...
34          'ExecutionMode', 'fixedSpacing');
35 % Start timer
36 start(t);
37
38 return
```



Mittels einer Timer-Funktion wird die Funktion Smart_Plug_Simulator.m in einem Abstand von 8 s aufgerufen. Damit werden alle 8 s neue Werte für die Zählregister, basierend auf der angegebenen elektrischen Wirkleistung und der, seit dem letzten Telegramm vergangenen, Zeit berechnet und entsprechend dem Smart Plug Telegramm aus Abbildung 18 aufbereitet. Nach der Überprüfung der Nachrichteninhalte auf Konsistenz und der Zusammenstellung des Telegramms werden die Daten an die serielle Schnittstelle des Wireless M-Bus USB-Sticks gesendet.

```
1 function Smart_Plug_Simulator
2 %Smart_Plug_Simulator
3 %   Callback function for periodical execution
4 %   Smart_Plug_Simulator calculates the current value of the meter count
5 %   variables for Active energy import / export according to the value of
6 %   the global variable P and the elapsed time since the last execution
7 %   Global variables used
8 %   P ... Actice Power in W
9 %   Q ... Reactive Power in var
10 %   Ap ... Meter count Active energy import (A+) in Wh
11 %   Am ... Meter count Active energy export (A-) in Wh
12 %   and timer startet with "tic" command
13
14 % Evaluate time since last execution
15 t = toc;
16 tic      % Restart timer
17
18 % Import global variables
19 global P; global Q; global Ap; global Am;
20
21 % Calculate current value of the meter count
22 % variables for Active energy import / export
23 if P > 0
24     Ap = Ap + t*P/3600;
25 else
26     Am = Am + t*P/3600;
27 end
28
29 % Compile Smart Plug fields according to EN 13757-4, EN 13757-4 and
30 % OMS-S Vol.2 Issue 2.0.0 (090720) with integer values for Ap, Am
31 D = Smart_Plug( floor(Ap), floor(Am), P, Q )
32
33 % Compiles an OMS-S Vol.2 Issue 2.0.0 (090720) compliant
34 % wireless M-Bus (EN13757-4) frame
35 OMS_Meter_D = OMS_meter( D, 0, 0 );
36
37 % Send Smart Plug Telegramm via an already opened serial port
38 global s;
39 serial_send( OMS_Meter_D, s )
40
41 return
```

Die verwendeten Matlab-Funktionen sind modular aufgebaut um die Anpassung an neue Anforderungen zu erleichtern. Die Festlegung der Felder des Smart Plug Telegramms erfolgt mittels der Funktion `Smart_Plug.m` und ist von der Überprüfung und Zusammenstellung des Telegramm getrennt. Mit der Funktion `OMS_meter.m` werden die einzelnen Felder des Smart Plug Telegramms zu einem OMS-Spezifikations [106] konformen Telegramm für den kabellosen M-Bus nach EN 13757-4 zusammengestellt.

Auf den Abdruck des weiteren Programmcodes wird verzichtet und der gesamte Programmcode der Arbeit in digitaler Form auf einer CD²⁶ beigelegt.

Im verwirklichten Testaufbau empfängt das Smart Meter die Daten des Smart Plug Simulators in 8 s Abständen und stellt die aktuellen Werte alle 60 s für eine Abfrage durch das Zentralsystem zur Verfügung. Dieser Wert kann im Grunde durch Parametrierung des Smart Meters verändert werden, ist jedoch im gegebenen Testaufbau vorgegeben. Das Ergebnis einer Realisierung des erfolgreichen Kommunikationstests ist in Abbildung 19 zu sehen. Für die Übertragung im Automated Metering and Information System werden die Messdaten des Smart Plug Systems im Smart Meter in sogenannte OBIS²⁷-Register nach Norm EN 62056-61 [61] abgebildet.

Das verwendete Automated Metering and Information System arbeitet, wie viele andere Automated Meter Management Systeme, nach dem Prinzip, dass grundsätzlich die Kommunikation vom Zentralsystem ausgeht und die untergeordneten Einheiten, wie die Smart Meter, nur auf Anfrage Daten an das Zentralsystem liefern. Nachdem die hausinternen Messgeräte mittels M-Bus im Allgemeinen das entgegengesetzte Prinzip nutzen und spontan ihre Messdaten an das Smart Meter senden, ist es notwendig eine Verbindung zwischen beiden Systemen zu schaffen.[131]

In konkreten Fall empfängt das Kommunikationsmodul die Messdaten des Smart Plug Simulators im Abstand von 8 s und speichert den aktuellen Wert im internen Speicher des Kommunikationsmoduls. Aufgrund der vorgegebenen Parametrierung werden die, im Kommunikationsmodul zwischengespeicherten Daten, im Abstand von 60 s durch das Smart Meter abgeholt und für eine Abfrage durch das Zentralsystem bereitgestellt. Die Umsetzung der M-Bus Anwendungsdaten nach EN 13757-3 und OMS-Spezifikation Volume 2 [106] auf die im AMIS-System verwendeten OBIS-Register erfolgt im Smart Meter. Die Zuordnung der einzelnen M-Bus Datenpunkte, gegeben durch die Kombination aus „Data Information Block“ und „Value Information Block“, zu den OBIS-

²⁶Compact Disc

²⁷Object Identification System

Kennungen aus Tabelle 9.1 erfolgt unter Einbeziehung der Adressinformationen, die im Block 1 der M-Bus Telegramme angegeben sind.

Das Smart Meter hält die, in 60 s Abständen aktualisierten, Messwerte des Smart Plug Simulators in den, in Tabelle 9.1 angegeben, OBIS-Registern in dessen Speicher. Damit werden die Messwerte für eine Abfrage durch das Zentralsystem bereitgestellt. Auf Anfrage des Zentralsystems sendet das Smart Meter die entsprechenden Daten als Antwort.

Eine reale Antwort auf die Abfrage der OBIS-Register des Smart Meters, die die Messwerte des Smart Plug Simulators enthalten, durch das Zentralsystem des Automated Metering and Information Systems, den AMIS Transaktionsserver, ist in Abbildung 19 dargestellt.

id	c.d.e	prevalue	integer	float	string	time	uid	crc	konfig	MbusLink
G23_511/849000146	1.9.0.	254	712	0	6860801	10-9-2010 11:03:00	0	0	0/0	1
G23_511/849000146	1.9.1.	254	15	0	6860801	10-9-2010 11:02:00	0	0	0/0	1
G23_511/849000146	1.9.2.	254	400	0	6860801	10-9-2010 11:02:00	0	0	0/0	1
G23_511/849000146	1.9.3.	254	30	0	6860801	10-9-2010 11:02:00	0	0	0/0	1
G23_511/849000146	1.9.4.	254	0	0	6860801	10-9-2010 11:02:00	0	0	0/0	1

Abbildung 19: : Smart Plug Messdaten im AMIS Transaktionsserver

Das AMIS Testsystem stellt die Daten mittels einer Weboberfläche zur Verfügung. Die Detailansicht der Antwort des Smart Meters auf den Auftrag zur Abfrage des Smart Plug Systems über das M-Bus Kommunikationsmodul in Abbildung 19 enthält neben den Messdaten diverse Informationen zur Abfrage. Die wesentlichen Informationen sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Tabelle 7.4: AMIS Transaktionsserver Informationen

Spalte	Bedeutung
id	Identifikationsnummer des Smart Meter
c.d.e	OBIS-Kennzahl
prevalue	Aktueller Wert (254) oder Vorwert
integer	Messdaten
string	Identifikationsnummer der Smart Plug Einheit
time	Zeitpunkt der letzten Änderung des Messwerts oder Zeitpunkt der Übertragung für OBIS-Kennzahl 1.9.4

Aus Abbildung 19 ist zu erkennen, dass die Smart Plug Messdaten im Testsystem auf die OBIS-Register 1.9.0 bis 1.9.4 abgebildet werden. Die genaue Zuordnung ist in Tabelle 7.5 angegeben.

Tabelle 7.5: Zuordnung OBIS-Kennzahl zu Smart Plug Messwert

OBIS-Kennzahl	Smart Plug Messwert
1.9.0	Kumulierter Energiewert für Bezug in Wh
1.9.1	Kumulierter Energiewert für Lieferung in Wh
1.9.2	Wirkleistung in W
1.9.3	Blindleistung in var
1.9.4	Zeitpunkt der Übertragung

Der erfolgreiche Kommunikationstest mit dem Smart Plug Simulator demonstriert die Möglichkeit der Integration des Smart Plug Systems in ein Automated Meter Management System über die Nutzung des kabellosen M-Bus als Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Smart Plug und Smart Meter. Mit der Einbindung des Smart Plug Systems wird somit eine Option zur Integration von elektrischen Einzelverbraucher in das Automated Meter Management System, respektive Smart Grid, gezeigt.

Nach der Festlegung der Kommunikation des Smart Plug Systems beschäftigen sich die folgenden Kapiteln mit dem mechanischen Aufbau der Smart Plug Einheiten sowie mit der Messung des Energieverbrauchs im Smart Plug.

8 Kapitel 8

8 Systemaufbau

Nachdem der Smart Plug auf Systemebene den Schwerpunkt der vorangegangenen Kapitel bildet, sind der mechanische Aufbau der Smart Plug Messeinheit und deren konkrete Installation im Haushalt die Hauptinhalte dieses Kapitels. Mit praktischen Überlegungen zum Einsatz des Smart Plug Systems liefert dieses Kapitel zudem den Ausgangspunkt für die systemischen Überlegungen in anderen Teilen der Arbeit. In Unterkapitel 8.1 wird auf die Varianten zur Implementierung des Smart Plug Systems eingegangen und die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten beurteilt. Aufbauend auf diese Bewertung wird in Abschnitt 8.2 die Auswahl der Umsetzungsvariante für das Smart Plug System begründet.

8.1 Umsetzungsmöglichkeiten

Vor der Darstellung von Umsetzungsmöglichkeiten wird in den folgenden Absätzen der Einsatzbereich des Smart Plug Systems im Haushalt näher beschrieben.

Die Mehrzahl der Haushaltsgeräte ist für einen einphasigen Anschluss an das Stromnetz vorgesehen. Dementsprechend werden für gewöhnlich bei der elektrischen Installation in Haushalten meisten Anschlussstellen einphasig ausgeführt.

In Europa wird laut Norm EN 50160 [57] eine Netzspannung mit dem Effektivwert von 230 V in Niederspannungsnetzen zur Versorgung von Haushalten verwendet. Dies trifft auf jene Länder zu, die Mitglied der CENELEC sind.

Messung

Der Energieverbrauch eines elektrischen Einzelverbrauchers kann prinzipiell über die Messung von Spannung und Strom am Anschlusspunkt des Geräts oder indirekt über die Messung anderer Energieformen, wie zum Beispiel Gas oder Fernwärme, bestimmt werden.

Da bei einer indirekten Messung nicht-elektrische Größen gemessen werden und grundsätzlich für die Weiterverarbeitung elektronische Informationssysteme eingesetzt werden,

ist es notwendig, das Messsignal anschließend in ein elektrisches Signal zu wandeln. Die indirekte Messung verlangt einen definierten Zusammenhang zwischen der gemessenen Größe und der gesuchten Größe. Ein exakt definierter Zusammenhang zwischen dem elektrischen Energieverbrauch des Geräts und einer aus dem Betrieb des Geräts resultierenden Energieform kann im Allgemeinen nicht angegeben werden, weshalb die indirekte Messung einer Approximation der gesuchten Größe entspricht.[76, 141]

Die direkte Messung hat überdies den Vorteil, dass die elektrische Leistung komponentenweise ermittelt werden kann, und die Aufschlüsselung des Energieverbrauchs in Wirkenergie und Blindenergie, wie in Kapitel 9 beschrieben ist, ermöglicht wird.

Der Anschlusspunkt des Geräts zur direkten Messung von Spannung und Strom ist eine leitfähige Komponente, die für die Verbindung des Geräts mit einem äußerem Leiter beziehungsweise hier mit dem Stromnetz vorgesehen ist.²⁸[134] Der Anschlusspunkt stellt somit die Schnittstelle zum Stromnetz dar und verkörpert für die Bestimmung des Energieverbrauchs die Systemgrenze des Geräts. Die Messung des Energieverbrauchs des Geräts kann äquivalent auf der Geräteseite oder der Netzseite des Anschlusspunktes durchgeführt werden. Für die Ausführung ergibt sich somit die Möglichkeit, die Messeinrichtung in das Gerät zu integrieren oder sie dem Anschlusspunkt netzseitig zuzuordnen.

In den beiden folgenden Absätzen ist zwischen den Begriffen elektrisches Gerät und elektrische Anlage zu unterscheiden, wobei die elektrische Anlage die Gesamtheit der elektrischen Betriebsmittel umfasst.²⁹[134] Es unterscheiden sich die anzuwendenden Normen für das Gerät und die elektrische Anlage, mit der in dieser Arbeit grundsätzlich die elektrische Hausinstallation gemeint ist. Die Integration der Messeinrichtung des Smart Plug Systems in das Gerät bedeutet jedenfalls, dass das Gerät für die Installation der Messeinrichtung geöffnet werden muss. Generell ist der Einbau der Messeinrichtung ein Eingriff in das Gerät und somit laut ÖVE/ÖNORM E 8701-1 [107] eine Änderung eines elektrischen Geräts, die von einer Fachkraft oder unter ihrer Verantwortung durchgeführt werden muss. Dies ist ein Nachteil dieser Variante, da die Installation nicht durch einen elektrotechnischen Laien selbst erfolgen kann.

Eine netzseitige Zuordnung bedeutet für Geräte mit festen Anschlusspunkten, dass die Messeinheit des Smart Plug Systems in die elektrische Hausinstallation eingefügt werden kann. Der Einbau ist folglich mit einem Eingriff in die elektrische Anlage verbunden. Arbeiten an elektrischen Anlagen sind generell laut Norm EN 50110-1 [108] von Elek-

²⁸IEV 151-12-12

²⁹IEV 826-10-01

trofachkräften durchzuführen. Damit ergibt sich für die Ausführungsvariante als System zum Einbau in die Hausinstallation der Nachteil, dass für die Installation des Systems eine Fachkraft erforderlich ist und somit der Benutzer auf Unterstützung angewiesen ist. Für alle steckbaren Anschlusspunkte bedeutet die netzseitige Zuordnung eine Installation der Messeinrichtung in oder an der Steckdose. Für den Anschluss von Geräten stehen etliche verschiedene Stecksysteme zur Verfügung. In vielen Staaten ist der Typ der Steckverbindung national vereinheitlicht. Im Gebiet der CENELEC, in dem grundsätzlich die Versorgungsspannung und die Frequenz in Niederspannungsnetzen gemäß EN 50160 [57] einheitlich sind, werden bereits mehrere unterschiedliche Steckertypen verwendet, wie in Abbildung 20 zeigt. Die Typenbezeichnung aus Abbildung 20 ist keine genormte Bezeichnung und stammt aus Referenz [103].

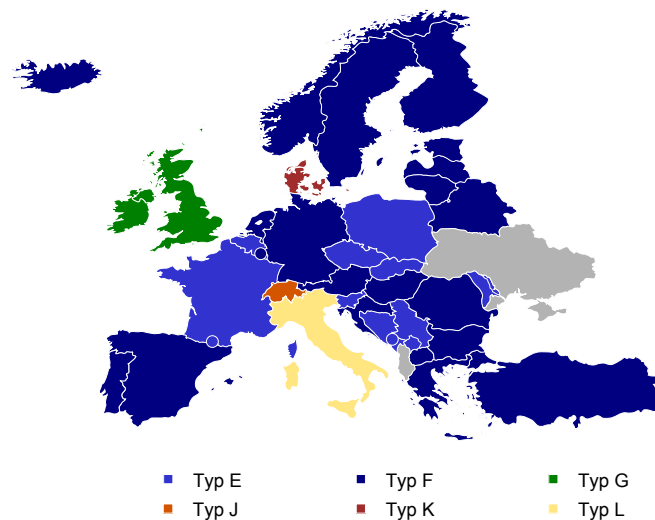


Abbildung 20: Steckertypen in Europa nach [103]

In Europa sind, wie aus Abbildung 20 zu entnehmen ist, Steckverbindungen des Typs F, die unter der Bezeichnung Schuko (Schutz-Kontakt) oder auch CEE³⁰ 7/4 bekannt sind, sehr verbreitet. Mit dem Stecksystem CEE 7/7 können Geräte sowohl an Steckdosen vom Typ E (CEE 7/5) als auch vom Typ F betrieben werden und sind somit für die meisten europäischen Länder geeignet. Ferner sind auch die Stecksysteme CEE 7/16 und CEE 7/17 ohne Schutzkontakt zum Schuko-System CEE 7/4 kompatibel.

Mechanischer Aufbau

Aufgrund der Verwendung von unterschiedlichen Stecksysteme in den verschiedenen Staaten bedeutet eine Festlegung auf ein System für die mechanische Ausführung des Smart Plug Systems eine Einschränkung des Einsatzgebietes. Alternativ kann das Smart Plug System in unterschiedlichen mechanischen Ausführungen realisiert werden. In diesem Fall sind die unterschiedlichen mechanischen Vorgaben der Systeme bereits bei der Ausführung der integrierten Schaltung zu berücksichtigen, wodurch mit einem höheren Konstruktionsaufwand zu rechnen ist. Die Schwierigkeit besteht darin, die unterschiedlichen mechanischen Erfordernisse der Steckersysteme so zu vereinen, dass ein einziges Design der integrierten Schaltung für möglichst viele Stecker- beziehungsweise Steckdosen-Bauformen verwendbar ist.

Die Messeinheit des Smart Plug Systems kann in die Steckdose integriert oder außerhalb der Steckdose realisiert werden. Wird die Messeinheit nicht direkt beim Fertigungsprozess in die Steckdose integriert, muss mit den verschiedenen mechanischen Aufbauten von

unterschiedlichen Herstellern von Installationsmaterialien umgegangen werden. Dadurch wird die Realisierung eines einziges Design der integrierten Schaltung weiter erschwert. Ferner bedeutet der Austausch der Steckdose oder der Einbau der Messeinheit in der Steckdose an einer elektrischen Anlage zu arbeiten, wodurch die Installation von einer Elektrofachkraft durchzuführen ist, wie bereits vorher in diesem Kapitel erwähnt wird.

Als vom Aufbau der Steckdose unabhängige Lösung lässt sich die Messeinheit des Smart Plug Systems bei der Realisierung als Ein-Chip-System (SoC³¹), das alle Funktionsblöcke in ein Plättchen zum Anbringen an die Steckdose integriert, in der Art des sogenannten Kinderschutzplättchens, aufbauen. Der geringe Platzbedarf ermöglicht die Verwendung dieser Umsetzungsvariante auch, wenn der Raum für die Steckvorrichtung begrenzt ist. Aufgrund der kleinen Abmessungen wird die Messeinrichtung kaum wahrgenommen und verändert damit das gewohnte Bild des Haushalts nicht. Die Anbringung der Messeinheit kann zudem durch den Benutzer selbst erfolgen und erfordert kein Werkzeug, da das Plättchen geklebt wird.

Die geringen Abmessungen bringen aber auch Einschränkungen mit sich. Bei einigen Stecksystemen, wie dem Schuko-System CEE 7/4 oder dem Französischen-System CEE 7/5, werden vertiefte Steckdosen eingesetzt, wodurch für den Einbau von externen Bauteilen

³¹System-on-Chip

neben dem Ein-Chip-System kein Raum mehr bleibt und damit die Auswahl eines Kommunikationssystems deutlich eingeschränkt wird, da beispielsweise keine Antenne für die Realisierung von Funkverbindungen mit ansprechender Reichweite eingesetzt werden kann. Das nachträglich Anbringen von Einrichtungen ist ohnedies nicht uneingeschränkt erlaubt. Die in Österreich verbindliche Norm ÖVE/ÖNORM IEC 60884-1 [109] besagt, dass Steckdosen nur als Sockel mit der dazugehörigen Abdeckung in Verkehr gebracht werden dürfen um die Einhaltung der geforderten Normmaße der Steckdosen sicherzustellen. Die Norm ÖVE/ÖNORM IEC 60884-1 legt fest, dass Steckdosen so gebaut sein müssen, dass das vollständige Einführen der zugehörigen Stecker nicht durch aus ihrer Eingriffsfläche herausragende Teile behindert wird. Der Abstand zwischen dem Stecker und der Eingriffsfläche der Steckdose darf entsprechend der Norm ,bei soweit als möglich in die Steckdose eingeführtem Stecker, 1 mm nicht überschreiten. Da zusätzliche Einrichtungen in Einheit mit der Steckdose, die ohne Zusatzeinrichtung der Norm entspricht, geprüft werden müssen, ist das Erreichen der Normmaße mit Zusatzeinrichtung kaum möglich.

Durch die Realisierung der Messeinrichtung des Smart Plug Systems als Zwischensteckvorrichtung mit einem Steckerteil und einer Steckdose wird das Einführen des Steckers nicht behindert und neben dem Ein-Chip-System ist Raum für benötigte externe Bauelemente. Die gesamte Zwischensteckvorrichtung ist eine mobile Einheit und ermöglicht laut Norm ÖVE/ÖNORM IEC 60884-1 die Zwischenschaltung von Hilfseinrichtungen.

Diese Umsetzungsvariante der Messeinheit ist zwar im Unterschied zum Plättchen oder einer im Gerät beziehungsweise in der Steckdose integrierten Messeinheit für den Benutzer direkt sichtbar, aber kann durch den geringen Platzbedarf der Messeinheit als Ein-Chip- System mit besonders geringen Abmessungen ausgeführt werden. Wenn kein separates Bedienteil oder eine Anzeige bei der Messeinheit realisiert werden, kann die Zwischensteckvorrichtung entsprechend kleiner als herkömmliche Zwischensteckvorrichtungen wie etwa Zeitschaltuhren aufgebaut werden.

Zuordnung der Messdaten zum Gerät

Die Einsatzszenarien aus Kapitel 4 zeigen, dass die Zuordnung der Messdaten zu einem bestimmten Gerät beziehungsweise zu einem Gerätetyp für viele Anwendungsfälle erforderlich ist. Eine derartige Zuordnung kann nun prinzipiell auf zwei Arten erfolgen. Einerseits können die Messdaten durch entsprechende Maßnahmen einem Gerätetyp fest zugeordnet werden oder der Gerätetyp wird andererseits aus der Analyse des gemessenen Energieverbrauchs bestimmt. Zur Bestimmung des Gerätetyps aus den Messdaten stehen

im Wesentlichen die in Kapitel 4.3 und 4.6 vorgestellten Möglichkeiten zur Verfügung. Eine feste Zuordnung bedeutet die Kennzeichnung der Messdaten mit einer eindeutigen Kennung, die bei der Installation vergeben wird und zugleich dezidiert mit einem Gerätetyp verbunden ist. Die feste Verbindung zwischen den Messdaten und dem Gerät ist demnach nur möglich, wenn die Messeinheit des Smart Plug Systems in das Gerät integriert ist oder der Zwischenstecker an das Gerät gebunden ist. In allen anderen Fällen können die Messdaten aufgrund der Platzierung der Messeinheit zwar einer bestimmten Steckdose zugeordnet werden, aber im Grunde können alle Geräte des Haushalts an diese Steckdose angeschlossen werden.

Die Variante mit der Erkennung des Gerätetyps aus den anonymen Daten bietet den Vorteil, dass bei der Installation frei über den Installationsort der Messeinheit entschieden werden kann. Allerdings ist in weiterer Folge eine laufende Analyse der Messdaten erforderlich, um mittels im Voraus gelernten Mustern und probabilistischen Modellen den Gerätetyp zu erkennen.[26]

Die feste Zuordnung geschieht durch die Verbindung der Identifikationsnummer einer Messeinheit mit einem Gerätetyp in der Auswerteeinheit. Im Fall der Verwendung einer Zwischensteckvorrichtung kann die Zuordnung durch eine Konfiguration bei der Inbetriebnahme vor Ort oder mittels einer Codierung der Messeinheiten bereits bei der Fertigung des Systems geschehen. Im Fall der Codierung bei der Fertigung erfolgt die Bindung einer Messeinheit zu einem Gerätetyp in der Auswerteeinheit schon vor der Inbetriebnahme. Damit erhält jede Zwischensteckvorrichtung vor der Auslieferung eine Beschriftung, die den Gerätetyp dem sie zugeordnet wurde angibt. Im Lieferumfang eines Systems sind bei dieser Ausführung Zwischenstecker für eine Vielzahl von Gerätetypen enthalten. Der Benutzer muss bei der Installation nur die Zwischensteckvorrichtung mit dem angegebenen Gerätetyp mechanisch verbinden und die Auswerteeinheit in Betrieb nehmen.

Zuordnung der Messdaten zur Steckdose

Die Zuordnung der Messeinheit zur Steckdose erlaubt eine konstante Stromversorgung der Messeinheit über das Stromnetz und damit eine permanente Betriebsbereitschaft der Einheit. Wird die Messeinheit mit dem Gerät verbunden, so besteht keine ständige Verbindung zum Stromnetz.. Damit der Energieverbrauch, sobald das Gerät mit dem Netz verbunden ist, bestimmt werden kann, ist eine schnelle Betriebsbereitschaft der Messeinheit notwendig. Im Bezug auf den Stromverbrauch der Messeinheit ist in diesem



Zusammenhang ein energiesparender Betriebsmodus für die Zeit, in der kein Gerät an dieser Steckdose betrieben wird, eine Option.

Die Verbindung der Smart Plug Messeinheit mit dem Gerät hat gegenüber der Verbindung mit der Steckdose den Vorteil, dass die Granularität der Messung durch die Auswahl der Gerätetypen bestimmt wird. Bei der Verbindung mit dem Gerät ist die Ausstattung aller Haushaltsgeräte keine zwingende Voraussetzung, da Kleinstverbraucher, wie beispielsweise ein elektrischer Rasierapparat oder eine elektrische Zahnbürste, kaum Potentiale für Energiesparmaßnahmen bieten und auch nicht interessant im Bezug auf automatisiertes Schalten sind. Im Gegensatz dazu bringt die Verbindung der Messeinheit mit der Steckdose die Notwendigkeit der Ausstattung aller Steckdosen im Haushalt mit sich, da die verschiedenen Geräte prinzipiell an alle Steckdosen angeschlossen werden können.

Weiterverarbeitung der Messdaten

Der Nutzen durch die Messung des Energieverbrauchs entsteht erst, wenn die Messdaten weiterverarbeitet werden können. In Kapitel 4 sind unterschiedliche Möglichkeiten gezeigt, wie die Datenübergabe von der Messeinheit zur weiterverarbeitenden Stelle durchgeführt werden kann. Im Grunde können die Möglichkeiten auf die laufende automatische Übertragung der Daten und das manuelle Auslesen der aufgezeichneten Daten in regelmäßigen Abständen oder am Ende der Aufzeichnung des Systems zusammengefasst werden. Die manuelle Auslesung kann, wie in Kapitel 4.5 beschrieben ist, durch einen wechselbaren Speicherbaustein erfolgen oder mittels einer Anzeige an der Messeinheit und Ablesen durch den Benutzer geschehen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Messeinheit für den Nutzer zugänglich ist und über den entsprechenden Platz für einen Wechselspeicher oder eine Anzeige verfügt. Damit kommt die Implementierung des Wechselspeichers nur für die Realisierungsvariante als Zwischensteckvorrichtung in Frage. Alternativ ist für die manuelle Auslesung eine Kommunikationsschnittstelle für ein Auslesegerät zu schaffen. Bei der manuellen Auslesung mittels Auslesegerät ist im Unterschied zur laufenden Übertragung die Beschränkung der Kommunikationsfähigkeit der Messeinheit auf deren nahe Umgebung vertretbar. Damit kann die Auslesung über eine temporäre Kabelverbindung oder eine Nahbereichsfunkschnittstelle erfolgen. Die laufende Übertragung erfordert jedenfalls eine Kommunikation über weitere Distanzen.

Die manuelle Auslesung stellt zwar geringere Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle, bringt aber den Aufwand mit sich, dass die Daten von den verteilten Messeinheiten erst gesammelt werden müssen. Eine laufende Übertragung ermöglicht hinge-

gen den Speicherbedarf der verteilten Messeinheiten gering zu halten, da die Speicherung in der zentralen Einheit erfolgen kann. Überdies stehen die Daten dem Nutzer dabei an einer zentralen Stelle zur Verfügung. Damit ermöglicht die laufende Übertragung eine bequeme Handhabung des Systems und bietet eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten im Bezug auf Kapitel 4. Außerdem wird dadurch vermieden, dass der Benutzer den Weg zu jeder Steckdose auf sich nehmen muss, um die Verbrauchsinformationen abzulesen. Darüberhinaus befinden sich nicht alle Steckdosen an Orten wo sie problemlos einzusehen oder zu erreichen sind. Die automatische Übertragung der Messdaten der Smart Plug Einheiten ist zudem besonders wichtig, da eine höhere zeitliche Auflösung implizit eine große Anzahl an Messwerten bedeutet und keine Benutzerakzeptanz zu erwarten ist, wenn bei minütiger Aufzeichnung pro Stunde mehr als 60 Werte pro Steckdose abgelesen werden müssten. Bei geringer zeitlicher Auflösung stehen im Vergleich nur höher aggregierte Werte zur Verfügung, was die Analysemöglichkeiten einschränkt, da bereits Information reduziert wurde. Außerdem sind Geräte mit kumulierter Energieanzeige bereits am Markt verfügbar, wie in Abschnitt 1.2 angeführt ist.

Im folgenden Abschnitt ist die Auswahl der Umsetzungsvariante für das Smart Plug System, basierend auf den Ausführungen dieses Unterkapitels, beschrieben.

8.2 Realisierung des Smart Plug Systems

Das Smart Plug System zur Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern soll möglichst vielseitig einsetzbar sein und damit vielen Personen den Einsatz des Systems ermöglichen. Aus diesem Grund soll das Smart Plug System für Konsumenten ohne besondere Kenntnisse bequem einsetzbar sein und keine besondere Installation erfordern.

Damit der Konsument als elektrotechnischer Laie das System grundsätzlich selbst installieren und in Betrieb nehmen kann, ist ein Einbau des Systems ohne Eingriff in die elektrische Anlage oder das Gerät erforderlich. Demzufolge werden die Varianten zur Integration der Messeinheit in das Gerät, die Hausinstallation oder die Steckdose in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Folglich kann der Energieverbrauch nur für Geräte mit steckbaren Anschlusspunkten bestimmt werden.

Dies bedeutet, dass eine Vielzahl von elektrischen Gerätschaften im Haushalt für die Messung in Frage kommen, jedoch nicht elektrische Verbraucher mit einem elektrischen Fixanschluss, wie beispielsweise der Großteil der Beleuchtung oder oftmals elektrische Warmwasserboiler.

Im vorigen Abschnitt wurde bereits auf die Problematik der unterschiedlichen Steckver-

bindungen hingewiesen. Da bereits in den 1990er Jahren die CENELEC kein Steckverbindungsdesign für den Betrieb mit allen in Europa existierenden Typen erreichen konnte, wird für die Realisierungs-Spezifikationen des Smart Plug System vorerst die Realisierung für den weit verbreiteten Steckverbindungstyp Schuko CEE 7/4 angestrebt.[82]

Elektrische Geräte mit einem dreiphasigen Netzanschluss, wie beispielsweise viele Elektroherde oder Backöfen, können durch die Umsetzung des Smart Plug Systems mit dem Steckverbindungstyp Schuko CEE 7/4 nicht erfasst werden. Damit beschränken sich die die Ausführungen zum Smart Plug System in weiterer Folge auf einphasige Einzelverbraucher. Dies soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass Geräte mit einem Elektrofixanschluss oder einem dreiphasigen Anschluss für einen beträchtlichen Teil des Haushaltsstromverbrauchs verantwortlich sein können, obwohl sie auf die Anzahl bezogen im Allgemeinen die Minderheit darstellen.

Durch die Kombination des Einzelverbrauchs der mit einer Smart Plug Messeinheit ausgestatteten Geräte und des Gesamtenergieverbrauchs des Haushalts, der durch den Elektrizitätszähler gegeben ist, kann ferner auf den Stromverbrauch der Geräte mit Fixanschluss oder dreiphasigem Anschluss rückgeschlossen werden.

Damit die Nutzung des Smart Plug Systems nicht durch normative Einschränkungen, wie in Abschnitt 8.1 beschrieben, beschränkt ist, wird die Messeinheit des Smart Plug Systems nicht als klebbares Plättchen zum Anbringen an der Steckdose sondern als Zwischensteckvorrichtung in den Realisierungs-Spezifikationen behandelt.

Um die Komplexität des Smart Plug Systems nicht weiter zu erhöhen, werden die Smart Plug Messeinheiten fest zu einem bestimmten Gerät zugeordnet, damit auf die Erkennung des Gerätetyps durch die Anwendung von Analysealgorithmen auf die Energieverbrauchsmessdaten verzichtet werden kann. Wenn die Smart Plug Messeinheiten bereits bei der Auslieferung an den Kunden mit einem definierten Gerätetyp verbunden sind, kann der Nutzer, aufgrund des am Gehäuse der Steckvorrichtung angegeben Gerätetyps, die Messeinheit entsprechend dieser Vorgabe installieren. Mit der fixen Zuordnung jeder Messeinheit zu einem Gerätetyp und einer eindeutigen Kennzeichnung der Messdaten jeder Messeinheit können die Energieverbrauchsdaten direkt einem Gerätetyp und in weiter Folge einem Gerät zugerechnet werden. Damit wird eine einfache Möglichkeit zur Auswertung auf Geräteebene geschaffen.

Bei der Installation soll konstruktiv eine Verbindung zwischen Zwischensteckvorrichtung und Geräteanschluss hergestellt werden, die nicht unabsichtlich gelöst werden kann, um

die eindeutige Zuordnung zu gewährleisten.

Eine bequeme Handhabung des Systems soll einerseits durch einen möglichst platzsparenden Aufbau der Zwischensteckvorrichtung mit integrierter Smart Plug Messeinheit und andererseits durch das Zusammenstellen der Informationen des Energieverbrauchs an einer zentralen Stelle im Haushalt erreicht werden. Damit wird eine gemeinsame Anlaufstelle für die Informationen zum Energieverbrauch der Geräte geschaffen und dem Nutzer der separate Weg zu jeder Smart Plug Einheit erspart. Mit einer laufenden Übertragung und einer zentralen Anzeige des Energieverbrauchs wird auch der Aufbau einer möglichst kleinen Zwischensteckvorrichtung unterstützt, da auf Anzeigeelemente und Bedienelemente direkt am Stecker verzichtet werden kann. Die Anzeige am Zwischenstecker ist ohnedies für viele Geräte nachteilig, da oft versucht wird den Geräteanschluss so zu platzieren, dass er nicht sichtbar ist. Damit ist der Zugang zum Zwischenstecker oder eine etwaige Ablesung nur umständlich möglich.

Durch die laufende Übertragung kann dies vermieden werden und die Information stattdessen ansprechend an zentraler Stelle präsentiert werden. Zudem ist die Erreichbarkeit des Systems zum Austauschen eines Wechselspeichers bei der laufenden Übertragung nicht erforderlich.

Mit der Umsetzung der Messeinheit als Ein-Chip-System, das alle Funktionseinheiten integriert, wird die Minimierung des Platzbedarfs des Zwischensteckers unterstützt und damit die Möglichkeit zur Installation der Smart Plug Messeinheit auch bei sehr beengten Platzverhältnissen am Anschlusspunkt des Geräts geschaffen. Die Messeinheit des Smart Plug Systems wird infolgedessen als Ein-Chip-System zur Messung des Energieverbrauchs am Anschlusspunkt der Geräts und mit laufender Datenübertragung zu einer Zentraleinheit in einer möglichst kleinen Zwischensteckvorrichtung umgesetzt.

Die Bestimmung des Energieverbrauchs erfolgt direkt durch die Messung von elektrischen Größen und nicht durch die Verwendung von Sensoren für andere Energieformen. Die Messung des Energieverbrauchs sowie die verwendeten elektrischen Größen sind in Kapitel 9 im Detail beschrieben. Ebenso werden die technischen Parameter für die Messung im Smart Plug im folgenden Kapitel 9 spezifiziert.

9

Kapitel 9

Messung

Für die Festlegung technischer Spezifikationen für die Messung von elektrischen Größen wird vor allem auf Richtlinien für elektrische Verbrauchszähler zurückgegriffen. Ein Grund für die Verwendung der Normative für Elektrizitätszähler als Grundlage ist die Möglichkeit der Kombination von Daten aus der Messung des Smart Plug Systems und der Elektrizitätszähler. Um eine entsprechende Genauigkeit zu erreichen und um das Endergebnis klassifizieren zu können, ist die Verwendung gleicher Fehlergrenzen von Vorteil.

Der Elektrizitätszähler liefert den Summenlastgang aller Geräte im Haushalt. Durch das Smart Plug System wird diese Information durch den Lastgang von Einzelgeräten ergänzt. Durch die Möglichkeit den Summenlastgang und die Einzellastgänge von Verbrauchern zu kombinieren, kann der Haushaltsenergieverbrauch sehr detailliert aufgeschlüsselt und analysiert werden.

Die Anforderungen an Elektrizitätszähler sind weithin anerkannte Werte. Dies ist ein weiterer Grund für die Nutzung der Elektrizitätszählernormen, da dadurch eine hohe Akzeptanz der Messwerte des Smart Plug Systems erwartet werden kann. Die bedeutenden Informationen zu Elektrizitätszählern sind in den europäischen Normen EN 50470-3 [59] und EN 50470-1 [58] enthalten.

Zur Auswahl der Spezifikationen für die Messung werden aufbauend auf eine Beschreibung unterschiedlicher Möglichkeiten Kriterien ausgewählt, die den Anforderungen an das Smart Plug System gerecht werden. Es wird der Weg von der physikalischen Messgröße hin zu einem, für die Weitergabe an nachfolgende Systemkomponenten geeigneten, Messwert beschrieben.

Dieses Kapitel beginnt mit einer allgemeinen Einführung und Begriffsdefinitionen in Punkt 9.1. Der folgende Abschnitt 9.2 gibt allgemeine Informationen zur systematischen Durchführung von Messungen wieder und leitet damit zu Teil 9.3 über, in dem die physikalischen Erscheinungen, die für die Energie- beziehungsweise Leistungsmessung ausgenutzt werden, beschrieben sind. Im Anschluss an die allgemein gültigen Informationen

dieser Abschnitte wird unter 9.4 eine Bewertung der Messmethoden und –prinzipien in Bezug auf den Einsatz im Smart Plug vorgenommen. Aufbauend auf die Theorie der Digitalisierung gibt Abschnitt 9.5 die Kriterien zur Auswahl der Parameter für die Analog- Digital-Wandlung an. Die Verarbeitung der digitalen Werte, um schlussendlich den Energieverbrauch zu erhalten, ist in Abschnitt 9.6 beschrieben. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Auswahl von definierten Eigenschaften für das Smart Plug System in Abschnitt 9.7.

9.1 Definitionen

Die Messung des Energieverbrauchs von Einzelverbrauchern ist die Kernaufgabe des Smart Plug Systems. Um spezifische Aussagen über die Messung treffen zu können, ist eine Definition der maßgeblichen Begriffe notwendig. Hierfür wird vor allem auf das International Electrotechnical Vocabulary [134][35] zurückgegriffen.

Energie

Die Energie E ist eine skalare Größe, welche die Fähigkeit [eines Systems kennzeichnet, Arbeit zu verrichten und bei beliebiger Umwandlung innerhalb des Systems erhalten bleibt.³²

Wirkenergie

Als Wirkenergie wird die elektrische Energie, die in eine andere Energieart umgewandelt werden kann, bezeichnet.³³

Ein Gerät zur Messung von Wirkenergie durch Integration der Wirkleistung über die Zeit wird Wirkverbrauchszähler oder Wattstundenzähler genannt.³⁴

Blindenergie

Die Blindenergie wird angegeben als die in Wechselstromnetzen gebundene Energie, die ständig zwischen den elektrischen und magnetischen Feldern des Netzes und der angeschlossenen Geräte ausgetauscht wird.³⁵

Ein Blindverbrauchszähler ist ein Gerät zur Messung der Blindenergie durch Integration der Blindleistung über die Zeit.³⁶

³²IEV 111-13-29

³³IEV 601-01-19

³⁴IEV 313-06-01

³⁵IEV 601-01-20

³⁶IEV 313-06-02

Entsprechend oben genannter Definition erfolgt die Messung des Energieverbrauchs mit dem Smart Plug System über eine Leistungsmessung im Zeitverlauf. Die Bestimmung des Energieverbrauchs von Einzelgeräten mit dem Smart Plug baut somit auf der Bestimmung der Leistung auf. Folgend werden daher die Begriffe im Zusammenhang mit elektrischer Leistung definiert.

Wirkleistung

Die Wirkleistung P ist unter periodischen Bedingungen der Mittelwert der Momentanleistung p über eine Periode T . Gleichung (1) zeigt die Berechnung der Wirkleistung.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt \quad (1)$$

P	Wirkleistung in W
p	Momentanleistung in W
T	Periodendauer in s
t	Zeit in s

Bei Sinusvorgängen ist die Wirkleistung der Realteil der komplexen Leistung.³⁷

Momentanleistung

Unter Momentanleistung p wird für ein zweipoliges Netzwerkelement oder einen Zweipol mit den Polen A und B das Produkt der elektrischen Spannung u_{AB} zwischen den Polen mal der elektrischen Stromstärke i in dem Netzwerkelement oder dem Zweipol verstanden. Die Bestimmung der Momentanleistung erfolgt nach Gleichung (2).

$$p = u_{AB} i \quad (2)$$

u_{AB}	Elektrische Spannung zwischen Punkt A und B in V
i	Elektrischer Strom in A

Dabei ist u_{AB} das Linienintegral der elektrischen Feldstärke von A nach B. Die elektrische Stromstärke durch das Netzwerkelement oder den Zweipol ist positiv anzunehmen, wenn die Stromrichtung von A nach B geht und negativ im umgekehrten Fall. Die Richtung des Stromes nach IEV 131-1-29 definiert. Im Allgemeinen ist in der Netzwerktheorie das elektrische Feld wirbelfrei und daher $u_{AB} = V_A - V_B$. Dabei sind V_A und V_B die elektrischen Potentiale an den Polen A und B.³⁸

³⁷IEV 131-11-42

³⁸IEV 131-11-30

Komplexe Leistung

Die komplexe Leistung oder komplexe Scheinleistung \underline{S} ergibt sich bei Sinusvorgängen aus dem Produkt der Zeiger \underline{U} , der die elektrische Spannung zwischen den Polen eines linearen zweipoligen Netzwerkelements oder Zweipols darstellt, mal die Konjugierte des Zeigers \underline{I} , der die elektrische Stromstärke in dem Element oder Zweipol darstellt.³⁹

Die Berechnung der komplexen Scheinleistung zeigt Gleichung (3).

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* \quad (3)$$

\underline{S}	Komplexe Scheinleistung in VA
\underline{U}	Komplexer Spannungszeiger in V
\underline{I}	Komplexer Stromzeiger in A

Scheinleistung

Die Scheinleistung S ist definiert als das Produkt des Effektivwerts der elektrischen Spannung U zwischen den Polen eines zweipoligen Netzwerkelements oder Zweipols mal dem Effektivwert der elektrischen Stromstärke I in dem Element oder dem Zweipol.

$$S = U I \quad (4)$$

S	Scheinleistung in VA
U	Effektivwert der elektrischen Spannung in V
I	Effektivwert des elektrischen Stroms in A

Bei Sinusvorgängen ist die Scheinleistung der Betrag der komplexen Leistung.⁴⁰

Ein Gerät zur Messung von Scheinenergie durch Integration der Scheinleistung über die Zeit wird als Scheinverbrauchszähler bezeichnet.⁴¹

Effektivwert

Der Effektivwert für eine zeitabhängige Größe $v(t)$ ist die positive Quadratwurzel aus dem arithmetischen Mittelwert des Quadrats der Größe innerhalb eines gegebenen Zeitintervalls. Für eine periodische Größe umfasst das Zeitintervall eine ganzzahlige Anzahl von Perioden und für eine sinusförmige Größe $a(t) = A_m \cos(\omega t + \theta_0)$ ist der Effektivwert

³⁹IEV 131-11-39

⁴⁰IEV 131-11-41

⁴¹IEV 313-06-03

$$A = A_m / \sqrt{2}^{42}.$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 \cdot dt} \quad (5)$$

V Effektivwert der zeitabhängigen Größe $v(t)$

Gleichung (5) entspricht der Berechnungsvorschrift für den Effektivwert einer zeitabhängigen Größe.

Gesamtblindleistung

Die Gesamtblindleistung Q_{\sim} ist eine Größe für ein zweipoliges Netzwerkelement oder einem Zweipol bei periodischen Bedingungen, welche gleich der Quadratwurzel aus der Differenz Quadrat der Scheinleistung S minus Quadrat der Wirkleistung P ist. Die Berechnung der Gesamtblindleistung unter periodischen Bedingungen ist durch Gleichung (6) gegeben.

$$Q_{\sim} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (6)$$

Q_{\sim} Gesamtblindleistung in var

Die Gesamtblindleistung wird in der SI Einheit Voltampere angegeben. Die IEC 60027-1 gibt als Einheitenname „Var“ und als Einheitenzeichen „var“ an. Bei Sinusvorgängen ist die Gesamtblindleistung gleich dem Betrag des Imaginärteils der komplexen Leistung.⁴³

Blindleistung

Die Blindleistung Q ist bei einem linearen zweipoligen Netzwerkelement oder Zweipol und bei Sinusvorgängen eine Größe gleich dem Produkt der Scheinleistung S mal dem Sinus des Phasenverschiebungswinkels φ . Entsprechend Gleichung (7) erfolgt die Berechnung der Blindleistung für sinusförmige Vorgänge.

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (7)$$

Q Blindleistung in var
 φ Phasenverschiebungswinkel

Der Betrag der Blindleistung entspricht der Gesamtblindleistung.

⁴²IEV 101-14-16

⁴³IEV 131-11-43

Phasenverschiebungswinkel

Der Phasenverschiebungswinkel φ ist bei Sinusvorgängen definiert als der die Phasenverschiebung zwischen der elektrischen Spannung an einem linearen zweipoligen Netzwerkelement und der elektrischen Stromstärke in dem Netzwerkelement. ⁴⁴

Leistungsfaktor

Unter dem Leistungsfaktor λ wird bei periodischen Bedingungen das Verhältnis des Betrags der Wirkleistung P zu Scheinleistung S verstanden, wie in Gleichung (8) angegeben.

$$\lambda = \frac{|P|}{S} \quad (8)$$

λ Leistungsfaktor

Zusätzlich zu den Begriffsabgrenzungen im Zusammenhang mit der Messgröße ist eine Begriffsbestimmung aus dem Bereich der Messtechnik notwendig, um ein gemeinsames Begriffsverständnis aufzubauen.

Messgröße

„Eine Messgröße ist die physikalische Größe, deren Wert durch eine Messung ermittelt werden soll.“ [91]

Messwert

„Der Messwert ist der gemessene spezielle Wert einer Messgröße. Er wird als Produkt aus Zahlenwert und Einheit angegeben.“ [38]

Messergebnis

Das Messergebnis ist ein einzelner Messwert, oder das mit Hilfe mathematischer Beziehungen aus mehreren Werten ermittelte Ergebnis. [76]

Messprinzip

„Messprinzip heißt die charakteristische physikalische Erscheinung, die bei der Messung benutzt wird.“ [38]

⁴⁴IEV 131-11-48

Messmethode

Unter Messmethode ist eine allgemeine Regel zur Durchführung einer Messung zu verstehen. Die Messmethode ist nicht an eine physikalischen Realisierung gebunden und damit von großer Allgemeingültigkeit.[76]

Messverfahren

Das Messverfahren ist die praktische Anwendung einer Messmethode unter Nutzung eines Messprinzips zur Gewinnung von Messwerten für eine bestimmte Messgröße.[76]

Prozentuale Messabweichung

Die Berechnung der prozentualen oder relativen Messabweichung für elektronische Wirkenergiezähler erfolgt entsprechend EN 50470-3 [59] mittels Gleichung (9).

$$\text{prozentuale Messabweichung} = \frac{\text{vom Smart Plug gemessene Energie} - \text{tatsächliche Energie}}{\text{tatsächliche Energie}} \quad (9)$$

Neben der prozentualen oder relativen Messabweichung wird ein Höchstwert für die Messabweichung, wie im nächsten Absatz definiert, angegeben.

Höchstzulässige Messabweichung

Die höchstzulässige Messabweichung MPE^{45} gibt den zulässigen Extremwert der Gesamtabweichung an und wird gemäß Kapitel 8.4 der Norm EN 50470-3 [59] berechnet.[58]

Referenzbedingungen

Als Referenzbedingungen werden die in der Norm EN 50470-3 [59] Tabelle 9.1 angegebenen Werte festgelegt. Die Referenzspannung wird mit 230 V angegeben und 50 Hz entspricht der Referenzfrequenz. Eine Umgebungstemperatur von 23 °C bedeutet Referenztemperatur.

Als dem Referenzwert entsprechend werden alle Werte mit folgenden Abweichungen betrachtet.

⁴⁵Maximum Permissible Error

Tabelle 9.1: Referenzbedingungen nach [59]

Einflussgröße	Referenzwert	Zulässige Grenzabweichung
Umgebungstemperatur	23 °C	±23 °C
Spannung	230 V	±1,0 %
Frequenz	50 Hz	±0,5 %
Kurvenform	Sinusförmige Spannungen und Ströme	Klirrfaktor kleiner als 3 %
Äußeres magnetisches Gleichfeld	Gleich Null	-
Netzfrequentes Magnetfeld äußeren Ursprungs	Gleich Null	Induktionswert, der eine Änderung der Messabweichung bewirkt nicht größer als ±0,3 %
Elektromagnetische HF-Felder, 30 kHz bis 2 GHz	Gleich Null	< 1 V/m
Von HF-Feldern induzierte, leitungsgeführte Störungen, 150 kHz bis 80 MHz	Gleich Null	< 1 V

Aufbauend auf die in diesem Kapitel verwendeten Begriffe beschreibt der nächste Abschnitt generelle Messmethoden zur Durchführung der Messung auf.

9.2 Messmethode

Eine Eingliederung von verschiedenen Messmethoden wird im diesem Unterkapitel gezeigt. Dabei werden die allgemeinen Regeln zur Messung von physikalischen Größen in verschiedene Gruppen wie folgt eingeteilt.

Direkte / Indirekte Messung

Bei der direkten Messung wird eine Messgröße unmittelbar mit einem die Einheit tragenden Maßstab verglichen. Die Messmethode der indirekten Messung bedeutet die Ermittlung der zu messenden Größe aus den Messdaten einer oder mehrerer anderer Größen, die mit der gesuchten Größe in einem definierten Zusammenhang stehen.[76]

Für die Bestimmung der elektrischen Leistung ist im Allgemeinen die Messung von Spannung und der Stromstärke notwendig. Daher entspricht die Leistungsmessung einer

indirekten Messung.

Daraus ergibt sich die Problematik, dass nur eine dieser Größen verbraucherseitig gemessen werden kann und die Messung der zweiten Größe durch die Messung der ersten Größe beeinflusst wird. Somit ist eine Entscheidung zwischen stromrichtiger oder spannungsrichtiger Messung zu treffen.

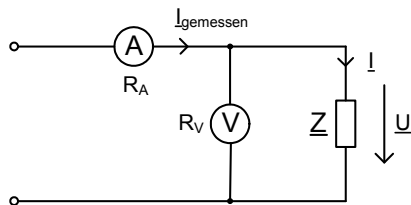


Abbildung 21: Verbraucherseitig spannungsrichtige Messung

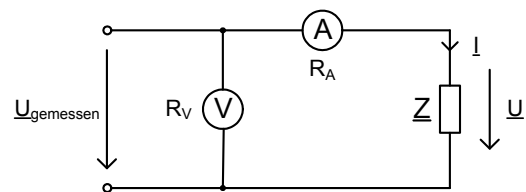


Abbildung 22: Verbraucherseitig stromrichtige Messung

Analoge / Digitale Messung

Bei der Einteilung der Messmethoden wird auch zwischen analog und digital unterschieden. Analoge Messmethoden sind durch die Darstellung der Messgröße als stetiger Messwert charakterisiert. In der Regel erfolgt die Anzeige auf einer Skalenanzeige. Bei digitalen Messmethoden werden die Messgrößen als in festgelegten Schritten quantisierter Messwert dargestellt. Dementsprechend ist eine Ausgabe in Form einer Ziffernanzeige häufig.[91]

Kontinuierliche / Diskontinuierliche Messung

Messmethoden werden zudem in kontinuierliche und diskontinuierliche Methoden unterteilt. Kontinuierliche Messung bedeutet die Erhebung und Darstellung von Messwerten ohne zeitliche Unterbrechung. Die diskontinuierliche Messung ist durch Messwerte zu diskreten Zeitpunkten charakterisiert. Daher wird der Messwert nur zu bestimmten Zeitpunkten abgetastet.[91]

Ausschlagmethode

Die Ausschlagmethode ist durch die direkte Umwandlung der Messgröße vom Aufnehmer (Sensor) in eine Anzeigegröße oder einen Ausgabewert gekennzeichnet. Auch wenn die Umwandlung mit Zwischenschritten erfolgt, wird von der Ausschlagmethode gesprochen. Die für die Messgrößenumwandlung benötigte Energie wird hier dem Messmedium oder dem Umfeld entnommen, was Rückwirkungen auf die zu messende Größe haben kann. Als Beispiel für die Anwendung der Ausschlagmethode sei die Federwaage genannt, bei

der die Hilfsenergie aus dem Schwerefeld der Erde stammt. Die Zahlendarstellung des Ausgabegröße kann als Sonderfall der Ausschlagmethode gesehen werden.[91, 76, 98]

Differenzmethode

Im Fall der Anwendung der Differenzmethode wird die Messgröße einer externen Vergleichsgröße gegenübergestellt. Während des gesamten Messvorgangs bleibt die Vergleichsgröße konstant um die Differenz zwischen Messgröße und Vergleichsgröße zur Anzeige zu bringen. Falls die Vergleichsgröße einer Sollgröße entspricht so entspricht der angezeigte Differenzwert der Abweichung.[76]

Kompensationsmethode

Bei der Kompensationsmethode wird von der zu messenden Größe eine durch eine Hilfsquelle erzeugte Kompensationsgröße subtrahiert. Ein Nullindikator zeigt an, ob die beiden Größen gleich groß sind. Die Messbarkeit und Verstellbarkeit der Kompensationsgröße werden vorausgesetzt. Die Kompensationsgröße kann auch eine andere physikalische Größenart als die Messgröße sein. Beispielsweise kann elektrischer Strom die messbare Kompensationsgröße zu einer Kraftwirkung darstellen.[76]

Die Hilfsenergie stammt bei den beiden letztgenannten Methoden nicht vom Messobjekt und erlaubt somit eine rückwirkungsfreie Messung. Die Reduzierung der Einflüsse von Störgrößen beim Erzeugen der Kompensationsgröße in einer zweiten gleichartigen Messstrecke ist neben der einfachen Realisierung von großen Messbereichen ein weiterer Vorteil bei Verwendung einer Hilfsquelle. Demgegenüber steht der größere gerätetechnische Aufwand bei Verwendung einer Hilfsquelle.[91]

Die zur Messung von elektrischer Leistung respektive Energie genutzten physikalischen Erscheinungen werden im nächsten Abschnitt 9.3 aufgezeigt und anschließend zusammen mit den allgemeinen Regeln dieses Unterkapitels zu einem Messverfahren vereint.

9.3 Physikalisches Messprinzip

Die unterschiedlichen physikalischen Erscheinungen, mit denen die Leistung gemessen werden kann, werden in diesem Kapitel beschrieben und die Möglichkeiten des jeweiligen Prinzips aufgelistet.

Thermische Leistungsmessung

Die Messung der Leistung kann auf einem rein thermischen Prinzip beruhen. In diesem Fall wird die Leistung an einer Last umgesetzt und dementsprechend eine messbare

Temperaturdifferenz hervorgerufen. Alternativ kann die Temperatur konstant gehalten werden und die aus der kontrollierten Senkung der Temperatur durch eine leichter messbare Form von Leistung, die elektrische Leistung, bestimmt werden. Die Multiplikation von Strom und Spannung ist von Natur aus verlässlich und durch die thermische Trägheit ist die Mittelwertbildung relativ einfach. Der Messbereich, in dem eine geeignete Messung durchgeführt werden kann, ist beschränkt. Neben der Tatsache, dass bei Anwendung dieses Prinzips die Leistung tatsächlich absorbiert wird, ist dies der größte Nachteil.[34]

Das Prinzip der thermischen Messung erlaubt nur die Messung der tatsächlich in Wärme umgesetzten Leistung und somit ausschließlich eine Wirkleistungsmessung.

Neben der Leistungsmessung durch die Wärmeentwicklung stehen andere nichtabtastende Methoden zur Verfügung, die elektrische Leistung durch Multiplikation von Strom und Spannung bestimmen. Diese Multiplikation kann sowohl elektronisch als auch nicht elektronisch erfolgen. Als Beispiel für ein Messverfahren mit nicht elektronischer Multiplikation soll das Dynamometer Wattmeter genannt werden.[34]

Elektrodynamisches Messwerk

Dieses elektrodynamische Messwerk gehört zu der Gruppe der Drehspulmesswerke. Durch eine feststehende Erregerspule fließt der zu messende Strom und erzeugt ein proportionales Magnetfeld. Eine drehbar gelagerte Spule, die im Magnetfeld der ersten Spule positioniert ist, wird über einen Vorwiderstand an die zu messende Spannung angeschlossen. Die Drehspule erfährt ein Drehmoment, das einerseits dem Strom durch die Erregerspule und andererseits dem, zur Spannung proportionalen Strom, durch die drehbar gelagerte Spule proportional ist. Durch die mittelwertbildende Eigenschaft des Messwerks ist die Auslenkung des an die Drehspule angebrachten Zeigers ein Maß für die Wirkleistung.[91, 76]

Bei der Leistungsmessung mittels des elektrodynamischen Messwerks ist neben der Messung der Wirkleistung unter Verwendung eines ohmschen Widerstands im Spannungspfad auch die Messung von Blindleistung durch die Verwendung einer Induktivität als Vorwiderstand für die Drehspule möglich. Für die Blindleistungsmessung wird dazu auf die Schaltungen von Hummel oder Polak zurückgegriffen.[76]

Die Multiplikation und Mittelwertbildung des elektrodynamischen Messwerks sind sehr zuverlässig obwohl die drehbar gelagerte Spule als Nachteil gesehen werden kann. Das Frequenzverhalten des Messwerks ist nicht geeignet, um Schaltvorgänge vermessen.[34]

Elektronische Leistungsmessung

Bei elektronischen Leistungsmessern werden jeweils Strom und Spannung separat gemessen und anschließend die notwendigen Rechenoperationen durchgeführt. Diese Vorgangsweise trifft sowohl auf abtastende als auch auf nichtabtastende Methoden zu.

Sowohl nichtabtastende elektronische Messkreise als auch Abtastschaltungen arbeiten im Allgemeinen mit Spannungen. Daher wird der Strom häufig über den Spannungsabfall an einem Messwiderstand erfasst. Alternativ ist eine Strommessung basierend auf der Wirkung des, den stromdurchflossenen Leiter, umgebenden Magnetfelds mittels Hallsonde möglich. Das Wirkprinzip der Hallsonde ist weiter unten im Detail beschrieben.

In nichtabtastenden Systemen wird der zum Messstrom proportionale Spannungsabfall sowie die Messspannung fallweise verstärkt und über einen Vier-Quadranten-Multiplizierer erfolgt die analoge Bildung von Wirk- und Blindleistung, wobei für die Bestimmung der Blindleistung eine Drehung der Spannungsphase von 90° benötigt wird. Die Phasendrehung von 90° ist jeweils nur für eine definierte Frequenz möglich und somit kann die Blindleistung nur für diese im Vorhinein definierte Frequenz bestimmt werden. In Abschnitt 9.6 sind weiterführende Information zur Bestimmung der Blindleistung angegeben.[76]

Die Mittelwertbildung der Leistungsgrößen kann mit einem Drehspulmesswerk oder durch Rückgriff auf Elemente der elektronischen Schaltungstechnik realisiert werden. Messsysteme die ausschließlich auf elektronischen Bauelementen beruhen sind in der Lage nichtperiodische Signalformen zu vermessen. Die analoge Leistungsmessung mit hoher Präzision fordert besondere Vorsicht beim Schaltungsdesign.[34]

Die in Kapitel 9.2 beschriebene Schwierigkeit bei der indirekten Messung, nur eine Größe zur Leistungsbestimmung korrekt ermitteln zu können, lässt sich bei der elektronischen Leistungsmessung und bei der Verwendung eines elektrodynamischen Messwerks kompensieren. Im elektrodynamischen Messwerk erfüllt eine Kompensationswicklung diesen Zweck. Die Kompensation bei elektronischer Leistungsmessung erfolgt durch eine Kompensationsoperation basierend auf der korrekt gemessenen Größe.

Hallsensor

Eine Hallsonde erzeugt eine dem zu messenden Strom proportionale Spannung. Diese Spannung ergibt sich durch die Wirkung des, aufgrund des Leiterstromflusses entstandenen, Magnetfelds auf ein Hallelement. Das Hallelement stellt somit das zentrale Bauteil der Hallsonde dar und ist als Halbleiterelement mit vier Anschlussdrähten für den

Speisestrom und die Ausgangsspannung aufgebaut. Der Halleffekt ist die Grundlage für dieses Messprinzip und beschreibt die physikalische Erscheinung, dass in einem stromdurchflossenen Halbleiterelement senkrecht zur Stromrichtung eine Spannung entsteht, wenn das Element senkrecht zu Strom und Spannung von einem Magnetfeld durchsetzt wird. Die Ladungsträger q , die sich hervorgerufen durch den Strom I_H im Halbleiter mit Geschwindigkeit v bewegen, werden durch die Lorentz-Kraft abgelenkt. Gleichung (10) zeigt die Berechnung des Kraftvektors.

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (10)$$

\vec{F}	Kraftvektor in N
q	Elektrische Ladungsmenge in C
\vec{v}	Vektor der Geschwindigkeit der Ladungsträger in m/s
\vec{B}	Vektor der magnetischen Flussdichte in T

Aufgrund dieser Ablenkung verringert sich die Ladungsträgeranzahl auf einer Seite des Plättchens und erhöht sich auf der gegenüberliegenden Seite. Daraus entsteht eine Potentialdifferenz die an den Kontakten als Hallspannung U_H zur Verfügung steht. Die Größe der Hallspannung ist durch die Gleichung (11) gegeben.[76]

$$U_H = \frac{1}{n \cdot e \cdot d} I_H B \quad (11)$$

U_H	Hallspannung in V
n	Ladungsträgerdichte in $1/m^3$
e	Elementarladung in C
d	Dicke des Hallelements in m
I_H	Hallelementstrom in A
B	Magnetische Flussdichte in T

Neben der reinen Strommessung mittels eines Hallsensors kann das Hallelement zudem für die analoge Multiplikation von Strom und Spannung für die Leistungsmessung verwendet werden. Für diesen Zweck wird ein der Spannung proportionaler Strom durch das Hallelement geführt und dadurch erreicht, dass das Produkt aus Spannung und Strom, entsprechend Gleichung (11), durch die Hallspannung U_H repräsentiert wird.[28, 30]

Optischer Stromsensor

Neben dem Halleffekt wird bei der Strommessung unter Ausnutzung des Faraday-Effekts in optischen Lichtwellenleitern ebenfalls auf das Magnetfeld eines stromführenden Leiters zurückgegriffen. Da sich das Licht als elektromagnetische Welle ausbreitet, spricht

man bei einer eindeutigen Schwingungsebene des elektrischen Feldes von linear polarisiertem Licht. Entspricht die Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls der z-Achse, wird der Winkel zwischen der Schwingungsebene und der x-y-Ebene als Polarisationswinkel bezeichnet.[96]

$$\alpha = V_c \cdot B \cdot L_{opt} \quad (12)$$

V_c	Verdet-Konstante in $1/(\text{m T})$
L_{opt}	Wegstrecke im optischen Medium in m

Der physikalische Effekt der Drehung der Polarisationssebene des Lichtstrahls in isotropen transparenten Medien durch ein Magnetfeld wird Faraday-Effekt genannt. Die Änderung des Polarisationswinkels ist proportional zur, der Ausbreitungsrichtung des Lichts parallelen, Komponente des Magnetfelds. Somit ist die Änderung des Polarisationswinkels ein Maß für den, dem Magnetfeld, zugrundeliegenden Strom. Gleichung (12) beschreibt den Zusammenhang zwischen Winkeländerung und Magnetfeld sowie optischem Weg.[127, 73]

Die beschriebenen Messmethoden und physikalischen Messprinzipien werden im folgenden Kapitel 9.4 zu Messverfahren kombiniert und deren Verwendung im Smart Plug System beurteilt.

9.4 Messverfahren

Für die Auswahl des am besten geeigneten Messverfahrens werden die unterschiedlichen Methoden und Prinzipien aus den Kapiteln 9.1 und 9.2 bewertet und dabei nicht nur auf die Messung an sich sondern vor allem auf die Funktionalität des Gesamtsystems Wert gelegt. Dieser Abschnitt enthält die Bewertung der Messmethoden und -prinzipien im Bezug auf den Einsatz im Smart Plug System.

Analoge / Digitale Messung

Eine maßgebliche Eigenschaft des Systems ist dessen Kommunikationsfähigkeit. Die durch die Smart Plug Einheiten gewonnene Information sollen für den Benutzer zentral zur Verfügung stehen um eine hohe Benutzerfreundlichkeit zu erreichen, wie bereits in Abschnitt 8.2 begründet wird.

Für die Integration von Kommunikationsmöglichkeiten stehen nun prinzipiell analoge und digitale Übertragungstechniken zur Verfügung. Verwendung finden heutzutage vor

allem digitale Übertragungstechniken, da diese bedeutende Vorteile gegenüber der Analogtechnik aufweist. Einer der entschiedensten Vorteile der Digitaltechnik ist die geringere Störanfälligkeit. Aufgrund der wenigen diskreten Signalzustände, die ein digitales Signal annehmen kann, ist eine vollständige Regenerierung auch bei stark verrauschten oder verzerrten Signalen möglich. Dies ermöglicht eine Übertragung ohne Informationsverlust, da die Originalnachricht komplett und unverändert am Empfänger zur Verfügung steht. Zudem können die Daten aus demselben Grund beliebig oft verstärkt, regeneriert, weiterübertragen und auch kopiert werden. Bei der Verwendung von physikalisch offen zugänglichen Medien wie es der freie Raum für Funk oder die Niederspannungsleitungen sind, gestattet die digitale Übertragungstechnik einen wirksamen Schutz vor unbefugtem Zugriff durch Verschlüsselung. Die Digitaltechnik ist kostenmäßig auch im Vorteil, da logische Funktionen digital billiger realisiert werden können als in Analogtechnik. Die hohe Integrationsdichte bei digitalen Schaltkreisen ermöglicht die Herstellung von kleinen und bei der Fertigung von hohen Stückzahlen im Allgemeinen auch günstigen Bauelementen mit hoher Funktionalität.[122]

Infolge der zahlreichen Vorteile der digitalen Übertragungstechnik und vor allem die Tatsache, dass durch das Smart Meter eine Schnittstelle mit einer digitalen Übertragung angeboten wird, kommt im Smart Plug System eine Messung mit Digitaltechnik zum Einsatz.

Kontinuierliche / Diskontinuierliche Messung

Die Verwendung von Digitaltechnik bedeutet, dass das kontinuierliche Messsignal abgetastet werden muss. Dementsprechend wird im Smart Plug System eine diskontinuierliche Messung umgesetzt. Infolgedessen kommen für die Messung auch nur diejenigen Messprinzipien aus Unterkapitel 9.3 in Frage, die eine einfache Digitalisierung ermöglichen.

Ausschlagmethode

Als Messmethode eignet sich die Ausschlagmethode, da keine Zwischengröße für die Beschaffung des Ausgabewertes erforderlich ist. Nachdem es sich bei den zu messenden Größen grundsätzlich um elektrische Größen handelt und hierfür keine Ausregelung wie bei der Kompensationsmethode notwendig ist, wird die Verwendung dieser Methode angestrebt.

Thermische Leistungsmessung

Die Leistungsmessung nach dem thermischen Prinzip ist für die Anwendung in Verbindung mit dem Smart Plug System ungeeignet, da die Leistungsaufnahme eines Geräts gemessen werden soll und beim thermischen Prinzip die Leistung ausschließlich am Messwiderstand umgesetzt wird. Somit ist diese Methode für die Bestimmung der, von Quellen abgegebenen, Leistung geeignet, jedoch nicht für den Zweck des Smart Plug Systems.

Elektrodynamisches Messwerk

Eine Messung nach dem Prinzip des elektrodynamischen Messwerks erlaubt im Unterschied zur thermischen Methode die Bestimmung der von einem Gerät aufgenommenen Leistung. Bei diesem Prinzip entsteht eine zur Leistung proportionale Rotation der drehbar gelagerten Spule. Um diese Form des Messwerts in digitale Werte zu wandeln ist eine Winkelmessung notwendig. Dies bedeutet die Verwendung eines Winkelsensors für die Wandlung der mechanischen Größe in eine elektrische Größe um diese in weiterer Folge zu digitalisieren. Überdies ist das Prinzip des elektrodynamischen Messwerks von Natur aus nicht besonders klein realisierbar, sodass es für den Einbau in das räumlich stark begrenzte Gehäuse der Smart Plug Messeinheit ungeeignet ist. Falls das Prinzip des elektrodynamischen Messwerks unter Verwendung von Mikromechanik (Micromachining) miniaturisiert werden kann, ist ein deutlich höherer Preis als bei integrierten Digital-schaltungen, aufgrund des aufwendigeren Herstellungsprozesses, zu erwarten. Deshalb ist dieses Messprinzip insgesamt als nicht zweckmäßig für den Einsatz im Smart Plug einzustufen.

Elektronische Leistungsmessung mittels Shunt-Widerstand

Beim Prinzip der elektronischen Leistungsmessung wird üblicherweise eine, dem Strom proportionale, Spannung für die Bestimmung der Leistung benötigt. Erfolgt die Bildung der stromproportionalen Spannung durch einen Messwiderstand (Shunt), ist die Messung mit dem Einbringen des Widerstands in den Stromkreis verbunden, da der Widerstand in Serie mit der Last zu schalten ist um vom selben Strom durchflossen zu werden.

Durch die elektrische Verbindung zwischen Messwiderstand und Gerätestromkreis ist die Messung mittels Widerstand per se nicht galvanisch getrennt möglich. Die nicht vorhandene galvanische Trennung macht dieses Messprinzip anfällig für Potentialverschiebungen. Eine Potentialtrennung kann hier durch nachgeschaltete Schaltungsteile erfolgen.[117]

Im Unterschied dazu erzeugt ein Hallsensor die stromproportionale Spannung ohne dem zusätzlichen Einbringen eines Bauteils in den Stromkreis. Wie im Abschnitt 9.3 beschrieben, beruht der Hallsensor auf der Kraftwirkung eines, den stromdurchflossenen Leiter umgebenden, Magnetfelds auf die Ladungsträger in einem Halbleitermaterial.

Hallsensor

Aufgrund des verbindungslosen Messprinzips eines Hallsensors ist eine galvanische Trennung zwischen Laststromkreis und Messstromkreis gegeben. Somit kann bei Hallsensoren auf eine eigene Schaltung zur galvanischen Trennung verzichtet werden. Neben den Vorteilen der verbindungslosen Messung bietet die Verwendung von Hallsensoren den Vorteil, dass diese gut für die Integration in Halbleiterschaltungen geeignet sind, da die Hallspannung durch die Dotierung von Halbleitern beeinflusst werden kann.[76]

Der Hallsensor kann zusammen mit einer gemischten⁴⁶ Elektronikschaltung integriert werden. Die Integration des Hallsensors in eine gemischte Elektronikschaltung bietet den Vorteil, dass die Messung und die analoge Signalaufbereitung, also auch die digitale Signalverarbeitung, auf einem einzigen Baustein mit einem Standard CMOS Prozess realisiert werden können. Durch die Integration aller Schaltungsteile auf einem Ein-Chip-System (SoC) entstehen Probleme, wie gegenseitige Beeinflussung durch Substratrauschen, die jedoch durch neue Fertigungstechnologien wie SOI⁴⁷ weitgehend vermieden werden können.[27]

Aufgrund ihrer Vorteile ist die Strommessung mittels Hallsensoren das häufiger verwendete Prinzip. Die gemeinsame Integration des Hallsensor mit anderen Schaltungsteilen, bietet für die Realisierung des Smart Plug Systems den Vorteil eines platzsparenden und einfachen Aufbaus, da Sensor, Analog- und Digitalteil in einer einzigen integrierten Schaltung zusammengefasst werden können.[117]

Da bei der Verwendung eines Hallsensors auf das, einen stromdurchflossenen Leiter umgebende, Magnetfeld zurückgegriffen wird, sind hierbei die Besonderheiten eines feldbasierten Messprinzips zu beachten. Für den Fall eines langen, geraden Leiters bilden die magnetischen Feldlinien konzentrische Kreise um den stromführenden Leiter. Das magnetische Feld nimmt entsprechend der Gleichung (13) mit $1/r$ ab. Somit ist der Abstand zwischen Hallsensor und Leiter eine maßgebliche Einflussgröße auf das Messergebnis.

⁴⁶Mixed-Mode / Mixed-Signal

⁴⁷Silicon-on-Insulator

Die Berechnung der magnetischen Feldstärke zeigt Gleichung (13).

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (13)$$

H Magnetische Feldstärke in A/m
 r Radius in m

Um den Wert des elektrischen Leiterstroms I bestimmen zu können, ist es notwendig einen Proportionalitätsfaktor aus einem Kalibrieraufbau abzuleiten. Die Abhängigkeit der Hallspannung vom Abstand r zwischen elektrischem Leiter und Hallsensor bedeutet somit eine Veränderung des Proportionalitätsfaktors entsprechend dem Abstand. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, ist somit die Aufrechterhaltung eines konstanten Abstands gefordert. Da das Smart Plug System für die Aufnahme des Energieverbrauchs von verschiedensten Haushaltsgeräten verwendet wird, ist mit unterschiedlichen elektrischen Leitern beziehungsweise Anschlusssteckern zu rechnen. Bei einem fixen mechanischen Aufbau erscheint durch die unterschiedlichen Leiterstärken ein konstanter Abstand zwischen elektrischem Leiter und Hallsensor daher nicht realistisch.

$$\theta = \sum_{i=1}^n I_i \quad (14)$$

θ Magnetische Durchflutung in A
 I_i Strom in A

Unter der Verwendung der Durchflutung θ aus Gleichung (14) kann vom magnetischen Feld auf den zugrundeliegenden Strom geschlossen werden. Der Durchflutungssatz aus Gleichung (15) besagt, dass die Durchflutung einer Fläche dem Umlaufintegral der magnetischen Feldstärke längs der Berandung der Fläche bestimmt ist. Folglich erlaubt die Vermessung des Magnetfelds längs einer geschlossenen Raumkurve im Prinzip die Bestimmung der Durchflutung. Dies ist aber praktisch nicht durchführbar. Deshalb wird das Magnetfeld durch einen magnetischen Kreis auf einem definierten Weg um den Leiter geführt und aus der Messung des Felds an einer Stelle des magnetischen Kreises der Wert des gesamten Umlaufintegrals bestimmt.

$$\theta = \oint \vec{H} d\vec{s} \quad (15)$$

\vec{H} Vektor der magnetischen Feldstärke in A/m
 \vec{s} Vektor des Wegelements in m

Ein Magnetfeldkonzentrator, der als Ring um den Leiter angeordnet ist und aus einem ferromagnetischen Material besteht, kann folglich zur Reduzierung des Einflusses von variablen Leiterdicken eingesetzt werden. Ferromagnetische Materialien besitzen eine deutlich höhere Permeabilität als Luft und eignen sich damit besonders gut für die Ausbreitung des magnetischen Felds. Daher werden diese Materialien auch als magnetische Leiter bezeichnet. Aufgrund der guten magnetischen Leitfähigkeit der ferromagnetischen Materialien breiten sich nahezu die gesamten Feldlinien im Magnetfeldkonzentrator aus. Materialien mit hoher Permeabilität und niedriger Koerzitivfeldstärke werden verwendet.

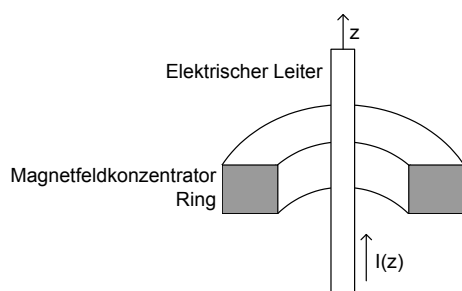


Abbildung 23: Magnetfeldkonzentrator-Schnittdarstellung

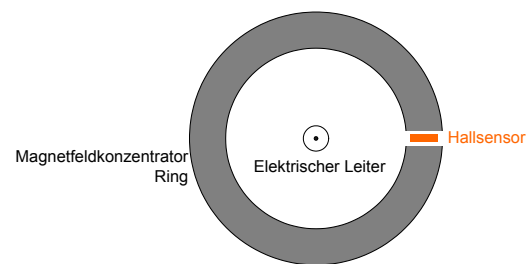


Abbildung 24: Magnetfeldkonzentrator-Draufsicht

Durch Ausnutzung dieses Effekts kann weitgehend eine Unabhängigkeit von der Position des Leiters innerhalb des Feldkonzentratorrings erreicht werden. Der Aufbau ähnelt stark einer Strommesszange und ist in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt.

Die Verwendung von ferromagnetischen Materialien erhöht darüberhinaus die Empfindlichkeit der Messanordnung. Nachteilig wirkt sich das Sättigungsverhalten von ferromagnetischen Stoffen auf den Messbereich aus, da ein linearer Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke H und magnetischer Flussdichte B nur im Bereich ohne Sättigungserscheinungen vorhanden ist.[45, 29]

Optischer Stromsensor

Die optische Messung mit Lichtwellenleiterfasern bietet den Vorteil, dass als Messmedium ein elektrischer Isolator verwendet wird. Diese Eigenschaft ist speziell für Hochspannungsanwendungen nützlich. Der dielektrische Lichtwellenleiter ist daher ebenso unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen im Funkbereich und induktive Kopplung.[127]

Aufgrund der Verwendung von Lichtwellen zur Messung, ist eine elektrooptische Wandlung notwendig. Da die Messinformation im Polarisationswinkel steckt, wird ein Polarisationsanalysator für die Gewinnung eines elektrischen Messsignals verwendet. Folglich sind im Unterschied zur Verwendung eines Hallsensors zusätzliche Elemente im Messkreis für die Signalwandlung nötig, was einen Mehraufwand bedeutet.

Da das Smart Plug System im Haushaltsbereich eingesetzt wird und demzufolge keine außergewöhnlich hohen Anforderungen an die Isolationsfestigkeit bestehen, weil Niederspannung verwendet wird, ist die Verwendung eines dielektrischen Materials eher als Nachteil zu sehen, zumal die Integration von Lichtwellenleitermaterial in einen Halbleiterschaltkreis problematischer ist als die Realisierung eines Hallsensor. Zusätzlich bedeutet eine Miniaturisierung, dass die damit verbundene Verkürzung des, durch das Magnetfeld beeinflussten, optischen Wegs eine Verringerung der Winkeländerung bewirkt, wie Gleichung (12) beschreibt. Infolgedessen ist die Verwendung eines optischen Stromsensors im Smart Plug nicht zu empfehlen, da ein Hallsensor die bessere Alternative darstellt.

9.5 Abtastung und Quantisierung

Der Übergang von analogen zu digitalen Messwerten besteht aus den Schritten Abtastung, Quantisierung und Codierung, wie in Abbildung 25 gezeigt. Das zeit- und wertkontinuierliche analoge Signal wird in eine Folge zeit- und wertdiskreter digitaler Werte gewandelt.[98]

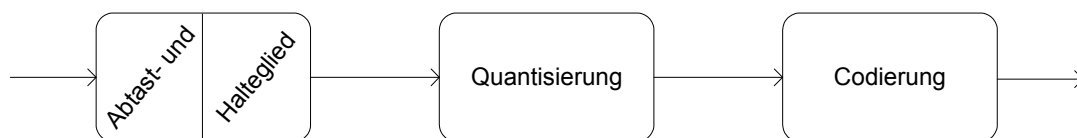


Abbildung 25: Blockschaltbild Analog-Digital-Umsetzer

Dieser Abschnitt beschreibt wichtige Aspekte im Zusammenhang mit der Digitalisierung der analogen Messsignale. Wichtige Faktoren für die Wandlung des Analogsignals in ein Digitalsignal sind die Abtastrate und die Quantisierungsstufenbreite. Mit diesen Parametern werden die Zeitauflösung und die Amplitudenauflösung maßgeblich bestimmt.

Die Abtastrate wird einerseits durch die maximal auftretende Signalfrequenz bestimmt und andererseits fließt die geforderte Genauigkeit in die Bestimmung mit ein, da durch

Überabtasten⁴⁸ die Amplitudenaufösung erhöht werden kann.

Für die Quantisierung ist vor allem die geforderte Genauigkeit maßgeblich. Das Quantisierungsrauschen muss bei der Bestimmung der prozentualen Messabweichung berücksichtigt werden. Da das Quantisierungsrauschen nur einen Teil der Messabweichung darstellt, ist bei der Bestimmung der Quantisierungsstufen auf die Toleranzen der anderen Elemente der Messkette Bedacht zu nehmen.

Zeitliche Auflösung

Im Allgemeinen wird für die Wandlung eines zeitkontinuierlichen Signals in sein zeitdiskretes Abbild die periodische Abtastung eingesetzt, wenngleich auch andere Möglichkeiten anwendbar sind.[20]

Das Abtasttheorem nach Shannon besagt, dass für eine vollständige Rekonstruktion eines zeitkontinuierlichen Signals aus einem abgetasteten Signal, eine Abtastrate, die mindestens dem Doppelten der höchsten auftretenden Signalfrequenz entspricht, verwendet werden muss. Das Abtasttheorem nach Shannon wird auch als Nyquist-Kriterium bezeichnet und ist in Gleichung (16) dargestellt.

$$f_a < 2f_{smax} \quad (16)$$

f_a	Abtastrate in Abtastwerte/s
f_{smax}	Maximal auftretende Signalfrequenz in Hz

Aufgrund von nicht-linearen Lasten in elektrischen Netzen treten neben der Grundschwingung der Netzfrequenz ebenso Oberschwingungen auf. Die höherfrequenten Oberschwingungen definierten somit die höchste auftretende Frequenz.

Eine Abtastung mit einem M-fachen des Doppelten der maximal auftretenden Signalfrequenz $M \cdot 2f_{smax}$ erhöht die Genauigkeit der Umsetzung, da zwischen zwei Quantisierungsstufen, durch Mittelwertbildung, ein Zwischenwert eingefügt werden kann. Dadurch bewirkt eine Verdoppelung der Abtastrate eine um ein Bit erhöhte Genauigkeit. Folglich wird damit auch die Quantisierungsrauschspannung verringert.

Da die Abtastung eines Signals eine periodische Wiederholung des kontinuierlichen Spektrums bewirkt, ergeben Frequenzkomponenten, die über der halben Abtastrate $f_a/2$ liegen, Verzerrungen im rekonstruierten Signal, die als Aliasing bezeichnet werden. Nicht nur hochfrequente Komponenten sondern auch breitbandiges Rauschen führen zu Ali-

⁴⁸Oversampling

asing. Um diese Verzerrungen zu vermeiden wird ein zeitkontinuierliches Tiefpassfilter vor das Abtastglied geschaltet. Dieses, als Anti-Aliasing-Filter bezeichnete, Tiefpassfilter soll eine sehr hohe Steilheit aufweisen um so ein ideales Tiefpassfilter mit der Grenzfrequenz bei f_{smax} möglichst gut nachzubilden. Da Filter mit hoher Steilheit nur schwierig und kostenaufwendig realisierbar sind, wird mit einem Vielfachen der notwendigen Abtastrate f_a abgetastet, um die Anforderungen an das Anti-Aliasing-Filter zu reduzieren. Die tatsächliche Abtastrate wird als Abtastrate bezeichnet und entspricht der M -fachen Abtastrate $M \cdot f_a$. [20]

Durch die Überabtastung verteilt sich die Rauschleistung auf ein größeres Frequenzband und tritt nicht als Aliasing im Nutzspektrum auf. Das Anti-Aliasing-Filter kann, durch die erhöhte Abtastrate, eine weniger steile Flanke aufweisen. Dies ist gleichbedeutend mit zunehmender Dämpfung ab der Filtergrenzfrequenz f_{smax} und deutlicher Abschwächung bei der halben Abtastrate. Die geringeren Anforderungen an das Anti-Aliasing-Filter ergeben sich daraus, dass nach der Abtastung, mit einem Vielfachen der Abtastrate $M \cdot f_a$, eine Anti-Aliasing-Filterung mit hoher Steilheit im zeitdiskreten Bereich durchgeführt wird. Für die weitere Verarbeitung wird im Anschluss an die zeitdiskrete Filterung die Abtastrate um den Faktor M reduziert, damit die zeitdiskrete Weiterverarbeitung mit der niedrigen Abtastrate erfolgen kann. Dadurch wird der Rechenaufwand verringert. [20]

Die Anti-Aliasing-Filterung im zeitdiskreten Bereich zusammen mit der Reduktion der Abtastrate wird auch als Dezimationsfilter bezeichnet. Eine flexible und effiziente Umsetzung eines Dezimationsfilters ist als CIC⁴⁹-Filter bekannt. Die Hauptbestandteile eines CIC-Filters sind ein Integrator und ein sogenanntes Kammfilter (comb). Das CIC-Filter muss so abgestimmt werden, dass das Filter eine Grenzfrequenz von π/M aufweist und somit Aliasing vermieden wird. [77, 42]

Amplitudenauflösung

Die Quantisierung stellt den Übergang eines wertkontinuierlichen, analogen Signals in eine wertdiskrete, digitale Darstellung dar. Der abgetastete analoge Wert wird in eine Zahl mit endlicher Auflösung umgewandelt. Dies bedeutet, dass durch die Approximation eine Folge endlich genauer Abtastwerte entsteht. Da die Wandlung im Allgemeinen nicht unmittelbar stattfindet, wird ein Abtast- und Halteglied verwendet. Durch das Halteglied wird der Abtastwert während einer Abtastperiode konstant gehalten. Das Abtast- und Halteglied sollte die Abtastung möglichst schnell durchführen und den Wert möglichst

⁴⁹Cascaded Integrator-Comb

konstant für den Quantisierer halten.[20]

Die Quantisierung kann prinzipiell gleichmäßig oder ungleichmäßig unterteilt erfolgen. In Systemen, in denen die digitalisierten Werte für Berechnungen verwendet werden, kommt typischerweise eine gleichmäßig verteilte oder lineare Quantisierung zum Einsatz. Zu beachten ist außerdem, ob unipolare oder bipolare Abtastwerte in Frage kommen. In vielen Fällen erfolgt die Codierung der Abtastwerte in einem Schritt mit der Quantisierung. Aufgrund der digitalen Repräsentation der Abtastwerte im Binärcode, ist die Anzahl der Quantisierungsstufen grundsätzlich eine Potenz von Zwei. Die Darstellungsform im Binärcode bringt mit sich, dass nur eine gerade Stufenanzahl abgebildet werden kann. Infolgedessen ist bei bipolaren Werten nicht möglich, gleich viele positive wie negative Werte darzustellen und gleichzeitig eine Quantisierungsstufe für eine Amplitude mit dem Wert Null zu erhalten. Für die binäre Darstellung von bipolaren Werten wird für gewöhnlich das Zweier- Komplement-Zahlensystem, bei dem das höchstwertige Bit das Vorzeichen angibt, angewandt.[20, 98]

Aus der Anwendung der binären Darstellung folgt, dass der maximale Aussteuerungsbereich des Analog-Digital-Umsetzers in 2^B Stufen unterteilt wird. Die Quantisierungsstufenbreite ist daher durch die Gleichung (17) gegeben.

$$\Delta = \frac{X_m}{2^B} \quad (17)$$

Δ	Quantisierungsstufenbreite
X_m	Maximaler Aussteuerungsbereich
B	Anzahl der Bit (1, 2, 3, ... n)

Folglich ergibt sich die kleinste Quantisierungsstufe und somit der kleinste unterscheidbare Wert zu $\pm\Delta$. Da physikalische Größen im Allgemeinen kontinuierliche Werte sind und die Quantisierung nur eine beschränkte Auflösung hat, unterscheiden sich die Abtastwerte vom wahren Wert. Diese Differenz wird Quantisierungsfehler genannt. Kann ein Übersteuern des Analog-Digital-Umsetzers, bei dem das Eingangssignal größer als der Aussteuerbereich des Analog-Digital-Umsetzers ist, vermieden werden, ist der Quantisierungsfehler auf $\pm\Delta/2$ beschränkt.[137]

Unter den Voraussetzungen, dass das Ursprungssignal genügend komplex ist und die Quantisierungsstufen genügend klein sind, kann der Quantisierungsfehler als stationärer Zufallsprozess angenommen werden. Die Voraussetzungen sind erfüllt, wenn die Amplitude des Ursprungssignals von einem Abtastwert zum nächsten wahrscheinlich viele

Quantisierungsstufen durchläuft. Der Zufallsprozess ist gekennzeichnet durch eine konstante Wahrscheinlichkeitsverteilung innerhalb des Fehlerbereichs $\pm\Delta/2$. Darüberhinaus korreliert der Quantisierungsfehler nicht mit dem Ursprungssignal und die Zufallsvariablen sind untereinander unkorreliert. Somit kann das Quantisierungsrauschen als gleichverteiltes weißes Rauschen angenommen werden.[20]

Da der Quantisierungsfehler als additives Rauschen auftritt, wird in diesem Zusammenhang auch von einem Signal-Rausch-Abstand gesprochen, der das Verhältnis zwischen Leistung des Signals und der Rauschleistung angibt. Für eine optimale Ausnutzung der Möglichkeiten des Analog-Digital-Umsetzers und um einen möglichst hohen Signal-Rausch-Abstand zu erreichen, ist auf eine Anpassung des Eingangssignals auf die maximale Aussteuerung des Umsetzers zu achten.[20]

Die Quantisierungsstufenbreite ist daher ein Maß für die Amplitudenauflösung der Analog-Digital-Umsetzung und wird grundsätzlich in Bit angegeben.

Parameterauswahl

Die Auswahl von geeigneten Parametern für die Wandlung des analogen Signals in digitale Folgenwerte wird, wie bereits in den vorigen Kapiteln, in Anlehnung an Anlehnung an die europäischen Normen für Elektrizitätszähler vorgenommen.

Für die zeitliche Auflösung, und damit auch für die Abtastrate, ist die maximal auftretende Signalfrequenz die bestimmende Größe. Bei der Messung elektrischer Leistung zur Bestimmung der Energieaufnahme von Einzelverbrauchern ist die höchste auftretende Frequenz durch, die vom Gerät verursachten, Oberschwingungen oder durch netzseitige Oberschwingungen gegeben.

Die Oberschwingung ist ein sinusförmiger Term der Fourier Reihe einer periodischen Größe mit einer höheren Ordnungszahl als Eins.⁵⁰ Wobei die Ordnungszahl ein ganzzahliges Verhältnis der Frequenz einer Oberschwingung zur Grundfrequenz der Schwingung darstellt.⁵¹[134]

Die netzseitigen Oberschwingungen sind in der europäischen Norm für Merkmale von Spannungen in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen EN 50160 [57] geregelt. Die Limits für Oberschwingungen sind relativ zur Spannung der Grundschwingung angegeben und werden bis zur Frequenz der 25. Harmonischen berücksichtigt, da in der Norm davon ausgegangen wird, dass für gewöhnlich höhere Frequenzanteile nur sehr niedrige

⁵⁰IEV 101-14-51

⁵¹IEV 101-14-52

Amplituden aufweisen. Bei der Gesamtbewertung der Oberschwingungsspannungen mittels des Gesamtüberschwingungsgehaltes werden Frequenzen bis zur 40. Harmonischen der Grundfrequenz mit einbezogen.

Die durch elektrische Geräte mit einem Eingangsstrom $< 16\text{ A}$ verursachten Oberschwingungen werden in der Norm für elektromagnetische Verträglichkeit EN 61000-3-2 [65] geregelt. Die Beurteilung der Störaussendungen von Geräten findet in unterschiedlichen Klassen statt. Dazu werden normgerecht Frequenzen bis zur 40. Harmonischen der Grundfrequenz zur Beurteilung herangezogen. Für elektronische Wirkverbrauchszähler sind in den Normen EN 50470-1 [58] und EN 50470-3 [59] keine direkten Frequenzgrenzen für die Prüfung ihrer Funktion angegeben. Vielmehr werden bestimmte Kurvenformen angegeben, für welche die Einhaltung der Messfehlergrenzen vorgeschrieben ist. Von den beschriebenen Prüfkurvenformen für das Oberwellenverhalten von elektronischen Elektrizitätszählern ergeben sich für die Kurvenform „Phasenanschnitt“ die stärksten Anteile für Harmonische mit höheren Frequenzen. Für die Beurteilung der Auswirkungen hochfrequenter Harmonischer auf das Messergebnis soll die in [59] beschriebene Kurvenform „Phasenanschnitt“ herangezogen werden.

Die Genauigkeit der Messung von Elektrizitätszählern wird durch ihre relative Messabweichung beschrieben. Aus diesem Grund erfolgt die Analyse der Effekte der Beschränkung der Eingangsfrequenzen, durch eine Tiefpassfilterung zur Vermeidung von Aliasing bei der Abtastung, anhand der relativen Messabweichung. Wie in [59] angedeutet ist, werden für die Untersuchung der Folgen einer Frequenzbeschränkung des Eingangssignals neben der Grundschwingung, Harmonische bis zur Ordnungszahl 21, für die Leistungsberechnung herangezogen.

Abbildung 26 zeigt die Prüfkurvenform Phasenanschnitt zusammen mit der Referenzkurvenform. Das Amplitudenspektrum der Kurvenform Phasenanschnitt ist in Abbildung 27 gezeigt und lässt erkennen, dass mit steigender Frequenz die Amplituden, wie zu erwarten, stark abnehmen. Demzufolge ist der Anteil der Harmonischen mit höherer Ordnungszahl als 21 am Gesamtsignal relativ gering, wie das Amplitudenspektrum zeigt.

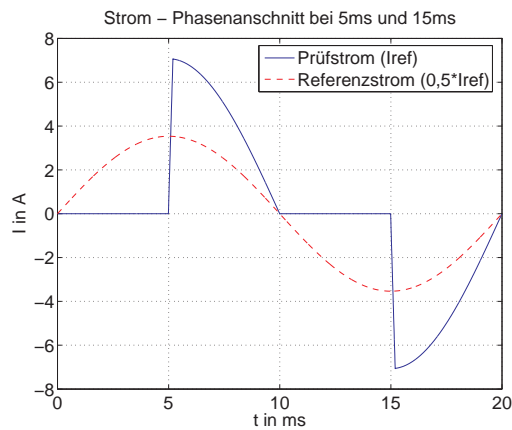


Abbildung 26: Prüfkurvenform Phasenanschnitt bei 5 ms und 15 ms

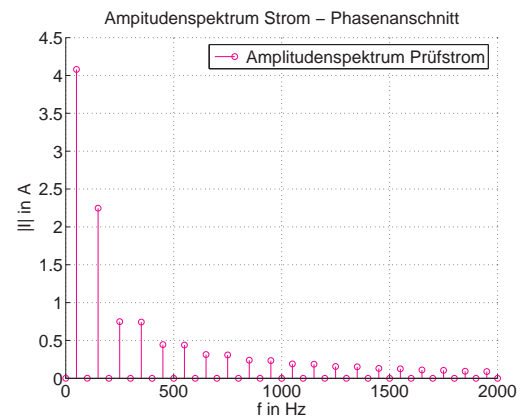


Abbildung 27: Amplitudenspektrum der Prüfkurvenform „Phasenanschnitt“

Für die Prüfung laut [59] ist der Klirrfaktor der Spannung, entsprechend Gleichung (18), kleiner 1% zu wählen. Um den Extremwert der relativen Messabweichung zu ermitteln, wird angenommen, dass die gesamten Oberschwingungen der Spannung von Harmonischen mit höheren Ordnungszahlen als 21 stammen. Aus der Berechnung der Effektivwerte der Oberschwingungen mit einer Ordnungszahl größer als 21 von Spannung und Strom, wird der zugehörige Leistungsanteil bestimmt. Da dieser Teil der Leistung bei einer Beschränkung der Eingangsfrequenzen auf Oberschwingungen mit einer Ordnungszahl bis 21 vernachlässigt wird, stellt dieser Anteil den Unterschied zwischen tatsächlicher Leistung und gemessener Leistung dar. Die berechnete Leistung ist als maximaler Wert einzuschätzen, da bei der Berechnung davon ausgegangen wird, dass alle Frequenzkomponenten von Spannung und Strom bei den selben Frequenzen auftreten und somit alle zur Leistung beitragen.

Für die Prüfkurvenform Phasenanschnitt aus Abbildung 26 und einem Klirrfaktor von 1% für die Spannung ergibt sich eine relative Messabweichung gemäß (9) von kleiner 1‰. Für die Berechnungen wurden Frequenzanteile bis zu 51,2 kHz berücksichtigt und eine 2048-Punkte-FFT⁵² zur Bestimmung des Frequenzspektrums der mit 102,4 kHz abgetasteten Prüfkurvenform verwendet.

⁵²Fast Fourier Transform

Der Berechnung des Klirrfaktors THF^{53} der Spannung zeigt Gleichung (18).

$$THF = \sqrt{\frac{\sum_{k>2}(U_k)^2}{\sum_{k>1}(U_k)^2}} \quad (18)$$

U_1 Grundschiwingung der elektrischen Spannung
in V

U_2, \dots, U_n Oberschwingungen der elektrischen Spannung
in V

$k \in \mathbb{N}$

Neben der zeitlichen Auflösung bedarf es einer geeigneten Wahl der Amplitudenauflösung zur Digitalisierung des Messsignals. Da die Quantisierungsstufenbreite der kleinsten noch unterscheidbaren Amplitude entspricht und somit direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Messung nimmt, ist der maximal erlaubte Messfehler für die Bestimmung der Quantisierungsstufen maßgeblich.

Weil die digitalisierten Werte von Spannung und Strom zur Berechnung der Leistung gebraucht werden, ist die Verwendung einer linearen Quantisierung von Vorteil. Da es sich, bei den zu messenden Größen, um Wechselgrößen handelt, ist es notwendig bipolare Werte darstellen zu können. Aus diesem Grund ist das Vorzeichen bei der Codierung der Abtastwerte zu berücksichtigen.

Zur Bestimmung der erforderlichen Auflösung der Quantisierung wird abermals von der geforderten relativen Messabweichung laut Gleichung (9) ausgegangen. Aufgrund der Angabe der Abweichung relativ zum Messwert tritt der kleinste Fehler bei der kleinsten spezifizierten Energie bzw. Leistungseinheit auf. Da bei netzversorgten Geräten grundsätzlich eine konstante Spannung angenommen wird, erfolgt die Angabe der minimalen Leistungseinheit in [58] durch den Mindeststrom I_{min} .

Gemäß Gleichung (17) ergibt sich die Quantisierungsstufenbreite aus dem maximalen Aussteuerbereich und der Stufenanzahl. In [58] ist für den Messbereich der Zusammenhang zwischen Mindeststrom I_{min} und Grenzstrom I_{max} entsprechend Gleichung (19) angegeben.

$$I_{max} = 100I_{min} \quad (19)$$

I_{max} Grenzstrom in A (Effektivwert)

I_{min} Mindeststrom in A (Effektivwert)

⁵³Total Harmonics Factor

Der Quantisierungsfehler, der zur prozentualen Messabweichung beiträgt, ergibt sich direkt aus der Quantisierungsstufenbreite. Unter Berücksichtigung der Bipolarität der Messsignale ergibt der Zusammenhang zwischen Quantisierungsfehler und prozentualer Messabweichung in Gleichung (20).

$$\frac{1}{2} \frac{2U_n}{2^B} \cdot \frac{1}{2} \frac{2 \cdot 100I_{min}}{2^B} = I_{min}U_N \cdot \text{proz. Messabweichung} \quad (20)$$

$$2^{-2B} = \frac{\text{proz. Messabweichung}}{100} \quad (21)$$

U_N Referenzspannung in V (Effektivwert)

Nachdem alle Werte in Gleichung (20) als Effektivwerte eingesetzt werden, kann auf den Spitzenwertfaktor zur Berechnung der tatsächlichen maximalen Aussteuerung verzichtet werden, und es ergibt sich nach Vereinfachung die Anzahl der Bit nach Gleichung (21).

Neben der Messabweichung spielt auch die Anlaufstromstärke I_{st} , die den kleinsten Wert, der registriert werden soll, beschreibt, bei der Bestimmung der Auflösung der Quantisierung eine Rolle. Für elektronische Wirkenergiezähler wird in [58] die Anlaufstromstärke als $I_{st} = 0,1I_{min}$ Gleichung (22) zeigt den Zusammenhang zwischen Anlaufstrom, Stufenanzahl und maximalem Aussteuerbereich unter Verwendung des Grenzstroms I_{max} .

$$\frac{2 \cdot 1000I_{min}}{2^B} = I_{min} \quad (22)$$

Für die Bestimmung der notwendigen Bitanzahl der Quantisierung ist jeweils eine Rundung auf den nächst höheren ganzzahligen Wert durchzuführen, da nur ganze Bit realisiert werden können.

Die digitalisierten Messsignale von Spannung und Strom bieten in weiterer Folge mehrere Möglichkeiten für die Berechnung der Leistung, wie im folgenden Kapitel gezeigt wird.

9.6 Leistungsberechnung

Die digitalen Messsignale in Verbindung mit moderner Signalverarbeitung schaffen unterschiedliche Möglichkeiten zur Bestimmung der Leistung. Grundsätzlich kann zwischen der Analyse im Zeit- und im Frequenzbereich unterschieden werden. Im Zeitbereich läuft die Bestimmung der Leistung auf eine numerische Integration hinaus, während die Leistungsberechnung im Frequenzbereich die Bestimmung des Mittelwerts des aktuellen

Leistungsspektrums erfordert.[94]

Für beide Varianten gilt es zu definieren, welches Zeitintervall für die Bestimmung der Leistung herangezogen wird. Dieses Zeitintervall entspricht der Messperiode für die Berechnungsvorschriften.

Durch die Definition der Wirkleistung in Kapitel 9.1, ist die Messperiode als eine Periode der Wechselgröße festgelegt. Infolgedessen richtet sich die Messperiode nach der Periodendauer der Netzwechselspannung. Für das Europäische Verbundnetz der ENTSO-E⁵⁴ bedeutet daher eine Netzfrequenz von 50 Hz eine Messperiode von 20 ms für die Bestimmung der Wirkleistung.[50]

Sowohl bei der Leistungsberechnung im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich entstehen Messfehler, falls die Messperiode von der Periodendauer der Messsignals abweicht. Diese Abweichung steht infolgedessen im direkten Zusammenhang mit der Frequenz des Messsignals und der Abtastfrequenz. Um diese Abweichung zu vermeiden, ist eine Synchronisation Abtastfrequenz und Signalfrequenz durchzuführen, sodass die Abtastung kohärent mit der Signalfrequenz ist. Die Auswirkungen einer nicht kohärenten Abtastung werden im folgenden Teil zusammen mit den Berechnungsvorschriften behandelt.

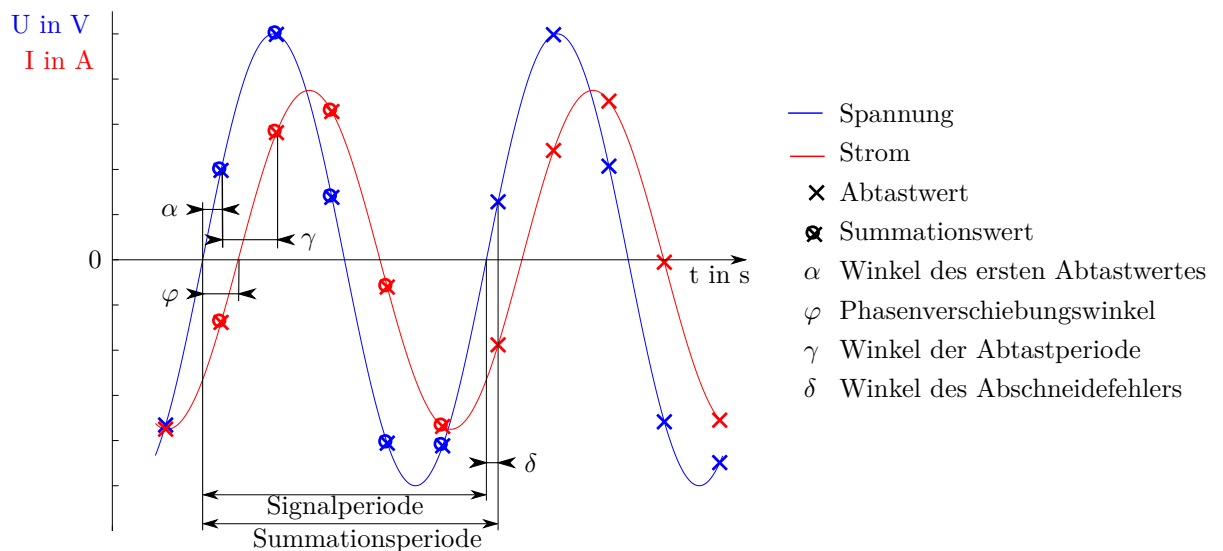


Abbildung 28: Abschneidefehler

Abbildung 28 veranschaulicht die Problematik von unterschiedlichen Periodendauern

⁵⁴European Network of Transmission System Operators for Electricity

von Messsignal und Leistungsberechnung und zeigt die in diesem Zusammenhang wichtigen Größen. In dieser Abbildung sind die Abtastperiode mit γ und die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung mit φ gekennzeichnet. Die nicht kohärente Abtastung zeigt sich durch den Unterschied zwischen Mess- und Signalperiode, der in Abbildung 28 mit δ angegeben ist. Der Unterschied zwischen erstem Abtastwert der Signalperiode und dem Nulldurchgang der Spannung ist hier mit α angegeben.

Primär wird bei der Leistungsberechnung auf die Wirkleistung eingegangen. Das Thema des letzten Teils dieses Kapitels ist die Bestimmung der Blindleistung, die vor allem bei nicht- sinusförmigen Größen eine Herausforderung darstellt.

Zeitbereich

Mit den digitalen Messwerten wird das Integral der Gleichung (1) durch die Summe von endlichen vielen Werten der Momentanleistung p , wie in Gleichung (23) angegeben, approximiert. Anders ausgedrückt, erfolgt die Annäherung durch eine Reihe von zeitlich gleich verteilten Augenblickswerten von u und i .

$$P \cong \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} p(t_j) \quad (23)$$

Eine numerische Integration, wie in (23) gezeigt, bedeutet eine Annäherung der Integralfläche durch Rechtecke, die durch die Abtastpunkte begrenzt sind. Die Genauigkeit der Approximation kann neben einer Erhöhung der Summationswerte auch durch komplexere Algorithmen zur numerischen Integration erhöht werden. In anderen Algorithmen können unter anderem statt Rechtecken Dreiecke oder Trapeze für die Näherungsoperation eingesetzt werden.[120]

Generell wird bei der Berechnung der Momentanleistung gemäß Gleichung (2) davon ausgegangen, dass Spannungs- und Stromwert des gleichen Zeitpunkts vorliegen. Dementsprechend erfolgt die Abtastung der beiden Signale u , i zu gleichen Zeitpunkten. Entsprechend der Definition der Wirkleistung ist genau eine Periode für die Berechnung heranzuziehen. Damit ist gefordert, dass die N Abtastwerte, die für die Approximation durch Gleichung (23) verwendet werden, auch genau einer Periode entsprechen. Abweichungen von der Periodendauer der Messsignale führen zu einem Messfehler.

Der Messfehler geht zurück auf den Unterschied zwischen Signalperiode und Messperiode, wie in Abbildung 28 dargestellt. Dieser Unterschied δ wird auch als Abschneidefehler bezeichnet.

Die Messabweichung, aufgrund des Abschneidefehlers, hängt entsprechend Gleichung (24) von unterschiedlichen Signal- und Abtastparametern ab. Die entsprechenden Parameter sind in Abbildung 28 dargestellt. Kann davon ausgegangen werden, dass die Abtastfrequenz deutlich höher als Signalfrequenz ist und der erste Abtastwert den Beginn einer Periode kennzeichnet, stellen der Abschneidefehler und die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Messabweichung dar, weil die Winkel α und γ dadurch verschwinden beziehungsweise sehr klein werden. Eine Analyse der Auswirkungen der Parameter Phasenverschiebung φ und Abschneidefehler δ ist in [94] gezeigt.

$$E = \frac{UI \sin \delta}{2n \sin \gamma} \cos(2\alpha + \varphi - \delta - \gamma) \quad (24)$$

α	Winkel des ersten Abtastwerts der Periode
φ	Phasenverschiebungswinkel zw. Spannung und Strom
γ	Winkel der Abtastperiode
δ	Winkel des Abschneidefehlers

Eine Herleitung der, durch den Abschneidefehler entstandenen, Abweichung aus Gleichung (24) vom wahren Leistungswert ist in [94] und [129] gegeben. Um die Messabweichung aufgrund des Abschneidefehlers zu vermeiden, ist eine kohärente Abtastung notwendig. Wird die Synchronisation zwischen der Periode der Eingangssignale und der Summationsperiode zumindest so durchgeführt, dass der Abschneidefehler, gegeben durch δ , kleiner bleibt als der Winkel der Abtastperiode γ , wird der maximale Fehler aufgrund des Abschneidefehlers durch die Anzahl der Abtastpunkte N bestimmt, wenn $\gamma < \pi/2$ ist. Für diesen Fall zeigt Gleichung (23) die maximale Abweichung E_{max} aufgrund nicht-kohärenter Abtastung.[129]

$$|E_{max}| = \frac{UI}{2N} \quad (25)$$

Bei gänzlichem Verzicht auf Synchronisation kann, speziell bei großen Phasenverschiebungswinkeln, die relative Messabweichung bei bestimmten Verhältnissen von Messperiode zu Signalperiode sehr groß werden, wie in Referenz [94] gezeigt wird. Möglichkeiten zur Reduzierung der Messabweichung durch die Anwendung von geeigneten Fensterfunktionen sind ebenfalls in [94] gezeigt.

Nicht nur die Methoden mit gleichzeitiger Abtastung von Strom und Spannung können für die Leistungsmessung eingesetzt werden. Der Verzicht auf gleichzeitiges Abtasten der

Signale ermöglicht eine Reduktion der Anforderungen an den Analog-Digital-Wandler, da bei nicht simultaner Abtastung ein Wandler beide Werte im Multiplexverfahren digitalisieren kann. Bei dieser Digitalisierungsmethode entsteht ein zusätzlicher Fehler durch die unterschiedlichen Abtastzeitpunkte von Strom und Spannung. Dieser Fehler kann durch ein kontinuierliches Wechseln der Abtastreihenfolge von Spannung und Strom minimiert werden. Der zusätzliche Fehler durch die nicht gleichzeitige Abtastung von Spannung und Strom ist durch Gleichung (26) gegeben.[71]

$$E_{ns} = \frac{UI}{2n} \zeta \frac{\sin n\gamma}{\sin \gamma} \sin(2\alpha + n\gamma - \varphi - \gamma) \quad (26)$$

ζ Winkel zwischen der Abtastung von Spannung und Strom

Die Verwendungsmöglichkeit der Methode mit nicht simultanen Abtastzeitpunkten für die Messung von nichtsinusförmigen Schwingungsverläufen zeigt [90] anhand von Experimenten.

An dieser Stelle sei noch auf die Möglichkeit der Leistungsmessung anhand von gleichgerichteten Größen hingewiesen. Hier werden Spannung und Strom gleichgerichtet und deren Scheitelwert gemessen. Anschließend wird dieser Wert durch $\sqrt{2} \cong 1,41$ geteilt und durch Multiplikation dieser Werte die Scheinleistung berechnet. Der große Nachteil dieser Messung ist, dass der Faktor 1,41 zwischen Effektivwert und Scheitelwert nur bei einem rein sinusförmigen Verlauf anwendbar ist. Daher ist dieses Messverfahren auf ebendiesen Signalverlauf begrenzt und schränkt die Einsetzbarkeit damit stark ein.[122]

Frequenzbereich

Neben der Berechnung der Wirkleistung im Zeitbereich über eine numerische Integration besteht die Möglichkeit der Leistungsbestimmung im Frequenzbereich. Im Frequenzbereich bedeutet die Berechnung der Wirkleistung, den Mittelwert aus dem aktuellen Leistungsspektrum zu bestimmen.[94]

Für die Leistungsbestimmung im Frequenzbereich bedarf es vorangehend einer Transformation um, aus der zeitlichen Folge der Abtastwerte, Frequenzinformationen zu erhalten. Die diskreten Abtastwerte werden mittels der diskreten Fouriere Transformation DFT⁵⁵ in ein Frequenzspektrum gewandelt. Das DFT-Spektrum entspricht einer im Frequenzbereich abgetasteten Version der DTFT⁵⁶, wie in [20] im Detail beschrieben wird. Somit

⁵⁵Discrete Fourier Transform

⁵⁶Discrete-Time Fourier Transform

besteht das Spektrum aus N Amplitudenwerten bei den Vielfachen der Frequenz f_a/N , wobei N die Länge DFT angibt und f_a der Abtastfrequenz entspricht. Das Spektrum einer mittels DFT transformierten Folge besteht im Fall einer realen Eingangsfolge aus zwei gespiegelten Teilen, die den positiven beziehungsweise negativen Signalfrequenzen entsprechen. Die Auswahl von N Elementen aus der gesamten Folge für die Transformation bedeutet eine Fensterung des Signals mit einem Rechteckfenster. Die verwendete Fensterfunktion hat Einfluss auf die spektrale Auflösung, die erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang wird vom sogenannten Leckeffekt⁵⁷ gesprochen, wenn es durch die, aufgrund der Fensterung entstandenen, Nebenkeulen gewissermaßen zu einem „Abfließen“ von Signalenergie von der eigentlichen Signalfrequenz zu anderen Spektrallinien kommt. Durch diesen Effekt ist ein „Verwischen“ der Frequenzanteile zu beobachten.[20]

Zur Berechnung der Wirkleistung im Frequenzbereich können unterschiedliche Berechnungsweisen verwendet werden. Eine Möglichkeit stellt die Bestimmung des Spektralanteils mit der Frequenz Null aus dem Spektrum der Momentanleistung aus Gleichung (2) dar.[19]

Bei kohärenter Abtastung und sinusförmigen Größen u und i ohne Oberschwingungen setzt sich das Spektrum der Momentanleistung aus einem Gleichanteil mit der Frequenz Null und einer Harmonischen mit der doppelten Frequenz von Strom und Spannung zusammen. Der Gleichanteil des Spektrums stimmt mit dem zeitlichen Mittelwert aus Gleichung (23) überein und stellt somit die korrekte Wirkleistung dar. Im Fall der kohärenten Abtastung werden genau die Abtastwerte einer Signalperiode zur Berechnung der Signalspektrums verwendet. Obwohl dies, einem Ausschneiden einer Periode aus dem Signal und somit einer Rechteckfensterung, entspricht, wird im Grunde kein Fenster verwendet, da die DFT- Berechnung eine periodische Fortsetzung der Eingangsfolge fingiert.

Da bei der nicht-kohärenten Abtastung eine periodische Fortsetzung der Folge nicht dem periodischen Eingangssignal entspricht, ist eine Berücksichtigung der Fensterung erforderlich. Die nicht-kohärente Abtastung bewirkt, dass das DFT-Spektrum nicht mehr auf nur zwei Spektrallinien beschränkt ist.

Nach Referenz [94] befinden sich, durch eine nicht-kohärente Abtastung, zumindest vier Spektrallinien in der Hauptkeule des spektralen Fensters. Aufgrund der Überlappung der spektralen Fenster kommt es zu einem Verschmelzen von Spektralanteilen. Das Rechteckfenster hat im Vergleich zu anderen Fenstern die schmalste Hauptkeule mit den stärksten

⁵⁷Leackage Effect

Seitenschwingern. Insofern ergibt sich bei breiteren Hauptkeulen auch eine stärkere Überlappung der spektralen Fenster bei geringen Frequenzunterschieden. Wegen der starken Seitenschwingungen beim Rechteckfenster ergeben sich durch den Leckeffekt jedoch größere Auswirkungen auf Spektrallinien mit einem größeren Frequenzabstand. Durch die Verwendung einer anderen Fensterung kann dieser Effekt verringert werden.

Die Spektralanteile mit niedrigen Frequenzen beeinflussen durch ihre Seitenschwingungen den Gleichanteil stärker als höhere Frequenzen und sind für die Bestimmung der Wirkleistung, die dem Gleichanteil im Spektrum der Momentanleistung entspricht, daher besonders ungünstig, da diese Veränderung den Messfehler darstellt.[94]

Eine andere Berechnungsmethode für die Wirkleistung im Frequenzbereich beruht auf der Auswertung der spektralen Verteilung von Spannung und Strom. Aus den Frequenzanteilen von Spannung und Strom werden die individuellen Harmonischen der Wirkleistung gemäß der Gleichungen (27) bestimmt.[19, 97]

$$P(k) = U(k)I(k) \cdot \cos \varphi_k \quad (27)$$

$P(k)$	Wirkleistung der Harmonischen mit Ordnungszahl k in W
$U(k)$	Effektivwert der elektrischen Spannung der Harmonischen mit Ordnungszahl k in V
$I(k)$	Effektivwert des elektrischen Stroms der Harmonischen mit Ordnungszahl k in A
φ_k	Phasenwinkel zwischen den Harmonischen mit der Ordnungszahl k von U und I
$k \in \mathbb{N}$	

Die Komponenten der spektralen Verteilungen von Spannung und Strom werden wiederum durch die Anwendung der DFT berechnet. Die DFT-Berechnung der Frequenzkomponenten kann für beide Größen separat erfolgen oder durch Kombination der realen Folgen von Spannung und Strom zu einer komplexen Folge in einem Rechengang durchgeführt werden.[97]

Alternativ zur Schreibweise von Gleichung (27) kann dieser Zusammenhang durch die Real- und Imaginärteile von Spannung und Strom angegeben werden. Die Berechnung mit Real- und Imaginärteilen ist im Allgemeinen einfacher zu realisieren, da die DFT-Komponenten oft in kartesischer Form vorliegen. Gleichung (28) zeigt die Berechnung

der Wirkleistung mittels komplexer Größen in kartesischer Form.

$$P(k) = \Re\{U(k)\}\Re\{I(k)\} + \Im\{U(k)\}\Im\{I(k)\} \quad (28)$$

$$k \in \mathbb{N}$$

Bei den Berechnungen, die auf dem DFT-Spektrum aufbauen, ist zu berücksichtigen, dass die Werte der DFT mit der DFT-Länge N skalierte Versionen der Koeffizienten der diskreten Fourier Reihe sind. Um die tatsächlichen Fourierkoeffizienten der Fourierreihe zu erhalten, ist daher eine Skalierung mit N notwendig.

Bei einer einseitigen Auswertung eines Leistungsspektrums ist zu beachten, dass aufgrund der zwei gespiegelten Versionen für positive und negative Frequenzen bei einer reellen Eingangsfolge, die Spektralanteile außer der Gleichanteil zu verdoppeln sind, damit die Signalenergie erhalten bleibt. Gleichermaßen entspricht die Umrechnung der komplexen, zweiseitigen Fourierkoeffizienten in reelle, einseitige Koeffizienten für eine reelle Eingangsfolge einer Verdoppelung der Werte des Spektrums.

Die Gleichungen in diesem Kapitel geben die Zusammenhänge mit Effektivwerten von Spannung und Strom wieder. Die digitalisierten Werten sind jedoch im Allgemeinen als Spitzenwerte. Daher sind die Zusammenhänge für die Verwendung der ermittelten Abtastwerte entsprechend anzupassen.

Die gesamte Wirkleistung ergibt sich aus der Summe der Wirkleistungskomponenten der Harmonischen und ist durch Gleichung (29) gegeben.

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k \geq 1} P(k) \quad (29)$$

U_0 Gleichanteil der elektrischen Spannung in V

I_0 Gleichanteil des elektrischen Stroms in A

$k \in \mathbb{N}$

Aus den Gleichungen (27) und (29) ist zu erkennen, dass nur Teilschwingungen von Spannung und Strom mit gleicher Frequenz zur Wirkleistung beitragen. Als Grundschwingungswirkleistung wird die Wirkleistung der ersten Harmonischen gemäß Gleichung (30) bezeichnet. Die Gesamtheit der anderen Leistungskomponenten der Oberschwingungen wird Oberschwingungsleistung genannt. In Referenz [79] wird der Gleichanteil ebenso

zur Oberschwingungsleistung gezählt.

$$P_1 = U_1 I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (30)$$

P_1	Wirkleistung der Grundschiwingung in W
U_1	Effektivwert der Grundschiwingung der elektrischen Spannung in V
I_1	Effektivwert der Grundschiwingung des elektrischen Stroms in A
φ_1	Phasenwinkel zw. der Grundschiwingung von U und I

Die Auswirkungen einer nicht-kohärenten Abtastung treten bei dieser Berechnungsmethode bereits in den spektralen Verteilungen von Spannung und Strom auf. Die Veränderung der Messperiode durch den Abschneidefehler δ führt zu einem „Zerfließen“ der Singalkomponenten aufgrund des Leckeffekts. Dies bedeutet eine Veränderung von Amplitude und Phase. Beide Komponenten tragen zum Fehler der Leistungsberechnung bei nicht-kohärenter Abtastung bei. In [19] und [18] wird eine Möglichkeit zur Schätzung der unveränderten Werte von Amplitude und Phase im Spektrum gezeigt. Ein Vergleich von Näherungsverfahren für die, in diesem Kapitel, vorgestellten Berechnungsmethoden für die Wirkleistung bei nicht-kohärenter Abtastung ist in [19] vorgestellt und zeigt, dass durch die notwendige Schätzung von zwei Parametern bei der Bestimmung der Harmonischen der Wirkleistung eine größere Abweichung entsteht als bei Näherungsverfahren für andere Berechnungsmethoden im Zeit- beziehungsweise Frequenzbereich.

Blindleistung

Die Definition von Blindleistung unter 9.1 in Gleichung (1) ist auf sinusförmige Größen beschränkt. In [79] wird daher die Gesamtblindleistung entsprechend Gleichung (6) für den nicht-sinusförmigen Fall definiert. Bei sinusförmigen Größen wird die momentane Wirkleistung als der Teil der Momentanleistung definiert, der durch die Komponente des Stroms, die in Phase mit der Spannung ist, hervorgerufen wird. Gleichmaßen ist die momentane Blindleistung der Teil der Momentanleistung, der durch den Strom, der in Gegenphase mit der Spannung ist, hervorgerufen wird.[79]

Im nicht-sinusförmigen Fall ist die Definition der Blindleistung ein viel diskutiertes Thema. Die meisten Messgeräte für Blindleistung unter nicht-sinusförmigen Bedingungen nutzen eine Phasenverschiebung von Spannung oder Strom um 90° für die Bestimmung der Blindleistung.[33, 121]

In den relevanten Normen für Wechselstrom Elektrizitätszähler zur Messung von Blind-

verbrauch EN 62053-23 [54] und EN 62052-11 [53] sind ausschließlich Angaben für sinusförmige Bedingungen gegeben. Es sind keine Angaben zu Messabweichungen beziehungsweise Prüfungen, wie für Wirkverbrauchszähler, enthalten. Für nicht-sinusförmige Größen verlieren die Genauigkeitsanforderungen der Normen ihre Aussagekraft. Die Genauigkeit ist in der Norm durch die relative Messabweichung, wie in 9.1 definiert, angegeben und gibt die Messabweichung im Verhältnis zur tatsächlichen Größe an. Da es für die Blindleistung unter nicht-sinusförmigen Bedingungen keine allgemein anerkannte Definition gibt, ist es nicht möglich, die tatsächliche Größe als Referenzwert einzusetzen.[33]

In der Vorgängernorm EN 61268 zu EN 62053-23 [54] waren Angaben zur Genauigkeit von Blindverbrauchszähler bei vorhandenen Oberschwingungen enthalten, die aber nicht in die neue Norm aufgenommen wurden.[25]

Basierend auf der Tatsache, dass unter nicht-sinusförmigen Bedingungen die Momentanleistung einige Terme enthält, die nicht zum Netto-Energietransport beitragen, haben sich unterschiedliche Ansätze betreffend dieser Terme entwickelt. Eine Zusammenstellung unterschiedlicher Ansätze findet sich in Referenz [69]. Ein Weg zur Definition der Blindleistung, der zum Teil auch als klassische Definition bezeichnet wird, geht zurück auf Budeanu.[69] Diese Definition ist angelehnt an die Definition der Wirkleistung gemäß Gleichung (29), die sich auch in [79] als Definition der Wirkleistung unter nicht-sinusförmige Bedingungen findet und durch Gleichung (31) und (32) beschrieben wird.[121, 69, 40]

$$Q(k) = U(k)I(k) \cdot \sin \varphi_k \quad (31)$$

$$Q = \sum_{k \geq 1} Q(k) \quad (32)$$

$Q(k)$ Blindleistung der Harmonischen mit Ordnungszahl k in var

$k \in \mathbb{N}$

Gleichung (31) zeigt die Berechnung der Harmonischen der Blindleistung. Die Summe der Harmonischen der Blindleistung ergibt die gesamte Blindleistung gemäß Gleichung (32).

Die 90° Phasendrehung von Spannung oder Strom zur Bestimmung der Blindleistung kann im Zeitbereich mittels einer Phasendrehung beziehungsweise Zeitverschiebung um eine Viertelperiode oder durch einen Integrator realisiert werden. Die Umsetzung der

Phasendrehung hat aber direkten Einfluss auf die Berechnungsvorschrift der Blindleistung, wie in Referenz [33] gezeigt wird.

Zur Berechnung der Blindleistung nach den Gleichungen (31) und (32) ist in derselben Weise, wie im vorigen Kapitel, eine Bestimmung des Spektrums von Spannung und Strom notwendig. Aus den komplexen Koeffizienten des Spektrums lassen sich die Harmonischen der Blindleistung mit Gleichung (33) in kartesischer Darstellung berechnen.

$$Q(k) = \Im\{U(k)\}\Re\{I(k)\} + \Re\{U(k)\}\Im\{I(k)\} \quad (33)$$

$$k \in \mathbb{N}$$

Eine Gegenstück von Gleichung (33) im Zeitbereich ist in [121], in Anlehnung an die Berechnung der Blindleistung mittels einer phaseverschobenen Spannung, gegeben. Diese Beschreibung bedient sich zwar der Phasenverschiebung im Zeitbereich, bezieht sich dabei aber auf jede Harmonische der Spannung einzeln, da die Phasenverschiebung des gesamten Signals um ein Viertel der Grundperiode zu einem anderen Ergebnis führen würde, wie in [33] erläutert wird.

Das Vorzeichen der Blindleistung ergibt sich gemäß [79] durch den Phasenverschiebungswinkel φ und ist positiv für induktive Lasten und negativ für kapazitive Lasten zu zählen. Für die Fehlerbestimmung der Blindleistung, aufgrund von nicht-kohärenter Abtastung, gelten die selben Aussagen wie für die Wirkleistung. Daher wird auf den Inhalt der vorigen Abschnitte verwiesen.

In [79] sind Definitionen für die Messung von elektrischen Parametern unter sinusförmigen, nicht-sinusförmigen, symmetrischen und nicht-symmetrischen Bedingungen angegeben. Der Standard baut auf dem Konzept der Separation der Grundschwingung von den Harmonischen auf. In diesem Sinn ist die Grundschwingungsblindleistung für nicht-sinusförmige Größen entsprechend Gleichung (34) definiert.[25]

$$Q_1 = U_1 I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (34)$$

$$Q_1 \quad \text{Blindleistung der Grundschwingung in var}$$

Aus Dokumenten eines aktuellen Standardisierungsprozesses für Blindverbrauchszähler geht laut [33] hervor, dass die Grundschwingungsblindleistung als Referenzgröße bei

der Berechnung der relativen Messabweichung auch unter nicht-sinusförmigen Bedingungen herangezogen wird. Somit wird davon ausgegangen, dass im Sinne von [79] die Grundschwingungsblindleistung als Bezugsgröße für die Messung beziehungsweise zur Verrechnung verwendet wird.[25]

9.7 Realisierung im Smart Plug

Nachdem die vorigen Abschnitte dieses Kapitels die einzelnen Schritte zur Gewinnung der Messergebnisse enthalten und die verschiedenen Umsetzungsvarianten bewertet beziehungsweise Kriterien für die Auswahl von Parametern beleuchtet, werden hier diese Informationen zur Auswahl und Definition von spezifischen Eigenschaften des Smart Plug Systems genutzt. Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, werden hauptsächlich Angaben aus den Normen für Elektrizitätszähler zur Festlegung der Systemeigenschaften verwendet, da ein hohes Maß an Vergleichbarkeit zur Messaufgabe des Smart Plug Systems gegeben ist.

Das Smart Plug System wird entsprechend den Folgerungen in Abschnitt 9.4 als digitales Messsystem ausgeführt. Die Aufgaben des Messsystems im Smart Plug sind aus dem Blockschaltbild eines digitalen Messsystems in Abbildung 29 ersichtlich.

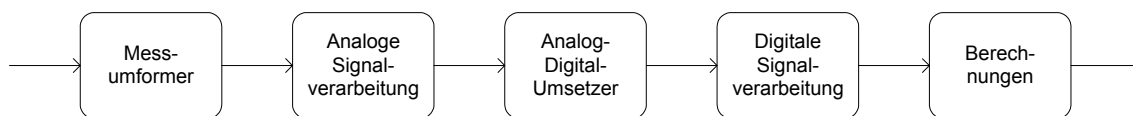


Abbildung 29: Blockschaltbild eines digitalen Messsystems

Zu Beginn dieses Kapitels werden allgemeine Vorgaben zur Umsetzung der Messkomponenten des Smart Plug Systems dargelegt. Darauf aufbauend ergeben sich spezielle Realisierungs-Spezifikationen für den Smart Plug.

Allgemeine Vorgaben

Dieser Abschnitt dient der Angabe von Vorgaben zur Messung des Energieverbrauchs, die unabhängig von einer bestimmten Realisierung des Messsystems sind. Die Vorgaben betreffen die Definition und die Angabe von einzuhaltenden Größen. Die angegebenen Werte für Spannung und Strom entsprechen in diesem Abschnitt grundsätzlich Effektivwerten, insofern keine anders lautenden Angaben gemacht werden.

Die Wahl der Betriebsgrenzen und Nennbetriebsparameter der Smart Plug Messeinheit

werden anhand von Normwerten für Elektrizitätszähler und unter Berücksichtigung der für einen Haushalt typischen Geräte durchgeführt.

Die Referenzspannung U_N gibt den Wert der Spannung an, für den die relevante Leistung des Smart Plug Systems festgelegt wird. Der Normwert der Spannung für direkt angeschlossene Elektrizitätszähler liegt bei 230 V und wird für den Smart Plug verwendet.[58]

Im Unterschied zu herkömmlichen Elektrizitätszählern, die im Allgemeinen für die Aufzeichnung des Stromverbrauchs von gesamten Anlagen, wie Haushalten, ist der Anwendungsbereich des Smart Plug Systems die Messung des Energieverbrauchs von Einzelgeräten. Die Leistungsaufnahme von Einzelgeräten ist grundsätzlich kleiner oder maximal gleich der Summe der Leistungsaufnahme aller Geräte. Aus diesem Grund kommt bei der Wahl des Messbereichs für den Smart Plug der untere Leistungsbereich der Elektrizitätszähler laut Norm EN 50470-1 [58] in Frage.

Dementsprechend gilt für den Smart Plug 0,25 A als Mindeststrom I_{min} . Der Mindeststrom ist der kleinste Wert für den die in weiterer Folge definierten Genauigkeitsanforderungen gelten. Der höchste Wert für den die Genauigkeitsanforderungen gelten, wird als Grenzstrom I_{max} bezeichnet und liegt für den Smart Plug entsprechend ebendieser Norm bei 25 A. Neben dem Mindeststrom gibt die Norm einen Anlaufstrom I_{start} an, der dem kleinsten Wert des Stroms, bei dem elektrische Wirkenergie bei Leistungsfaktor 1 registriert wird, entspricht. Der Anlaufstrom entspricht laut Norm EN 50470-1 einem Zehntel des Mindeststroms und wird daher mit 0,025 A für den Smart Plug angegeben.[58]

Die Genauigkeitsanforderungen gelten somit von einer minimalen Leistung von 57,5 W bis zu einer maximalen Leistung von 5.750 W. Da der Smart Plug prinzipiell für den Einsatz im Haushalt konzipiert ist, erscheint dieser Leistungsbereich als sinnvoll, da die Leistung der maßgeblichen Verbraucher in diesem Bereich liegt.[89]

Die Einteilung von Wechselstrom-Elektrizitätszählern für Wirkenergie erfolgt unter anderem nach Genauigkeitsklassen. Die Genauigkeitsklasse definiert dabei eine Gruppe von Grenzwerten für die relative Messabweichung bei Referenzbedingungen, unter Einwirkung von Einflussgrößen und die maximale Messabweichung.[58]

Es werden die Genauigkeitsklassen A, B, C in der Norm EN 50470-3 [59] in Übereinstimmung der Messgeräterichtlinie des Europäischen Parlaments und Rats [67] definiert. Die Messgeräterichtlinie des Europäischen Parlaments und Rats gibt darüberhinaus an, dass ohne eine spezielle Regelung eines Mitgliedsstaates die Messung des Energieverbrauchs im Haushalt ein Zähler der Genauigkeitsklasse A erlaubt ist. Entsprechend dieser Vor-

gaben ist der Smart Plug der Genauigkeitsklasse A zuzuordnen. Die charakteristischen Anforderungen dieser Klasse werden im Folgenden beschrieben.

Unter Referenzbedingungen darf die prozentuale Messabweichung für den Smart Plug maximal $\pm 2\%$ für Wirkenergie betragen, wenn der Leistungsfaktor zwischen 0,5 induktiv und 0,8 kapazitiv und der Strom zwischen der Übergangsstromstärke I_{tr} und der Maximalstromstärke I_{max} liegt. Wobei der Übergangstrom I_{tr} dem doppelten Minimalstrom I_{min} und somit 0,5 A entspricht. Für kleine Ströme zwischen I_{min} und I_{tr} gelten erleichterte Genauigkeitsanforderungen. In diesem Bereich wird die Einhaltung von $\pm 2,5\%$ für die prozentuale Messabweichung vom Smart Plug gefordert. Die Referenzbedingungen sind in Abschnitt 9.1 angegeben und können in EN 50470-3 nachgelesen werden.

Bei Abweichungen von den Referenzbedingungen werden zusätzliche prozentuale Messabweichungen entsprechend EN 50470-3 Tabelle 7.5 toleriert. Trotzdem darf die höchstzulässige Messabweichung MPE von $\pm 3,5\%$ im Temperaturbereich von $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ durch den Smart Plug nicht überschritten werden.

Zur Prüfung dieser Vorgaben sind die Angaben und Vorschriften der Norm EN 50470-3 anzuwenden und für den Smart Plug gültig.

Spezifische Vorgaben

Auf Basis der Angaben des vorigen Abschnitts werden in diesem Teil spezielle Anforderungen und Umsetzungsvorgaben an den Smart Plug definiert. Die unterschiedlichen Aspekte werden in der Reihenfolge des Kapitels 8 behandelt und beginnen somit beim ersten Teil im Messsystem, der Messwertumformung.

Wie in Abschnitt 9.4 beschrieben wird, bietet der Einsatz eines Hallsensors für die Messung des Stroms einige Vorteile. Für die Umsetzung des Smart Plug Systems als integrierte Schaltung ist die Integrationsmöglichkeit der Systembausteine in eine, auf Silizium basierende, Herstellung ein besonders wichtiger Faktor. Ein nicht invasives Messprinzip bringt außerdem den Vorteil, dass nicht in den Messstromkreis eingegriffen werden muss und daher die elektrische Verbindung zum Stromkreis an den Trennstellen kein Thema ist. Zudem ist dadurch eine Potentialtrennung vom Messobjekt gegeben.

Dementsprechend wird für die Realisierung der Messfunktionen des Smart Plug Systems ein Hallsensor zur Messung des elektrischen Stromes eingesetzt.

Die Integration eines Hallsensors in die Fertigung einer gemischten Halbleiterschaltung ist in diversen Projekten [27, 28, 29, 112, 110, 70] gezeigt worden. Prinzipiell werden in

der Fertigung CMOS⁵⁸-Prozesse eingesetzt. Hallensoren können unterschiedliche Strukturen in einer CMOS-Schaltung, wie in den genannten Referenzen dargestellt ist, aufweisen.

Wie bereits in Abschnitt 9.4 angedeutet ist, kann kein konstanter Abstand zwischen dem stromdurchflossenen Leiter und dem Hallelement angenommen werden. Um daraus resultierende Veränderungen des Proportionalitätsfaktors für die Strommessung zu vermeiden, wird das, den stromdurchflossenen Leiter umgebende, Magnetfeld in einem magnetisch leitenden Ring konzentriert und somit vom Abstand weitgehend entkoppelt. Die Feldkonzentraterringe können wie in [29, 115, 45] beschrieben, zusammen mit Hall-elementen als Halbleiterschaltung realisiert werden. Die Feldkonzentratoren können auf die Oberfläche des Halbleitermaterials aufgebracht werden. Die Anordnung von Hallelement und Feldkonzentratoren wurde beispielsweise in [115], wie in Abbildung 30 gezeigt, umgesetzt. Im Bereich des Spalts des Flusskonzentratoren hat das Magnetfeld an den Kanten eine starke vertikale Komponente, die durch ein Hallelement direkt unter dem Feldkonzentratoren in der Nähe des Luftspalts gemessen werden kann. Eine derartige Anordnung wird in [29] vorgestellt. Bei der Wahl des Materials für den Feldkonzentratoren und dessen Form ist auf die Sättigungserscheinung von magnetischen Leitern Bedacht zu nehmen. Eine Untersuchung der Auswirkungen von unterschiedlichen Formen, speziell im Bereich des Hallelements, ist in [45] angegeben.

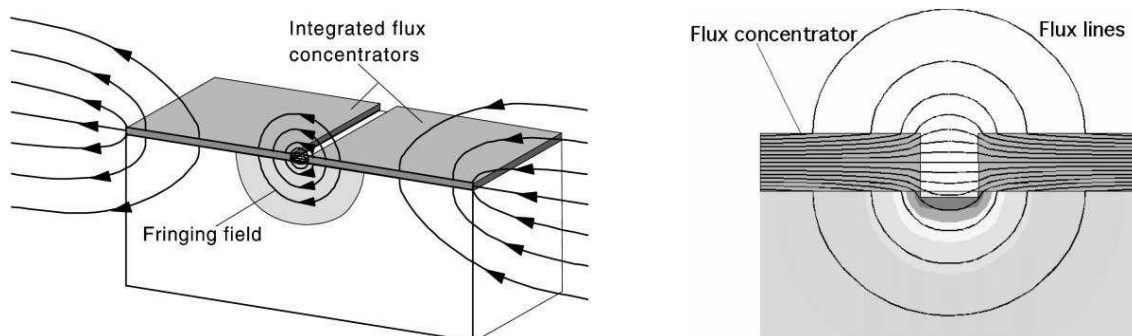


Abbildung 30: Integrierter Feldkonzentratoren [115]

Im Smart Plug wird der Hallensensor mit einer konstanten Versorgung betrieben und nicht die multiplizierende Eigenschaft von Hallelementen zur Bildung der Momentanleistung genutzt, wie in [28] und [27] beschrieben wird.

Infolgedessen werden im Smart Plug zwei getrennte Messpfade für Spannung und Strom

⁵⁸Complementary Metal Oxide Semiconductor

ausgeführt. Grundsätzlich werden folglich auch zwei getrennte Analog-Digital-Umsetzer verwendet. Ergibt sich im Design der integrierten Schaltung, durch die Ausführung von zwei separaten Analog-Digital-Umsetzern, ein beträchtlicher Mehraufwand, besteht die Möglichkeit der Verwendung eines Multiplex-Bausteins, damit Spannung und Strom aufeinanderfolgend in digitale Werte konvertiert werden können. In diesem Fall ist darauf zu achten, dass Spannung und Strom trotzdem zu gleichen Zeitpunkten abgetastet werden um den, in Abschnitt 9.6 beschriebenen, zusätzlichen Fehler durch nicht-gleichzeitiges Abtasten zu vermeiden.

Durch eine geeignete Anpassung ist im Schaltungsdesign dafür zu sorgen, dass die Ausgangsspannung des Hallsensors und die Netzspannung auf den Aussteuerbereich des Analog-Digital-Umsetzers angepasst werden. Bei dieser Anpassung ist mit dem Auftreten von erhöhten Spannungen und Strömen zu rechnen. Für die Spannung wird entsprechend Norm EN 50160 [57] eine Spannungsüberhöhung von +10% miteinkalkuliert. Hinsichtlich einer zehn prozentigen Spannungsüberhöhung tritt bei einer rein ohmschen Last ein um 10% erhöhter Strom auf. Um diesen Fall zu berücksichtigen ist auch für die Anpassung an den Aussteuerbereich des Analog-Digital-Konverters im Strommesskreis mit einem um 10% höheren Maximalstrom zu rechnen. Neben der Bereichsanpassung ist in der analogen Vorverarbeitung auf den Schutz nachfolgender Teile zu achten und entsprechende Maßnahmen einzuplanen damit Überspannungen beziehungsweise Stromspitzen zu keinem Schaden führen.

Die erhöhten Bereiche der Eingangssignale beeinflussen über die Definition der Quantisierungsstufe aus Gleichung (17) direkt die Amplitudenauflösung des Analog-Digital-Umsetzers. Um die Genauigkeitsanforderungen, die im vorigen Abschnitt definiert wurden, einzuhalten ist die Auflösung der Quantisierung anhand von Gleichung (21) auszuwählen. Beim Minimalstrom I_{min} , der für Auflösung maßgeblich ist, wird eine prozentuale Messabweichung von $\pm 2,5\%$ gefordert. Unter Berücksichtigung der um 10% erhöhten Maximalwerte für Spannung und Strom ergibt sich mit der gegebenen prozentualen Messabweichung für die Quantisierung eine minimale Auflösung $6,12 \cong 7$ Bit. Bei dieser Berechnung ist zu berücksichtigen, dass das Ergebnis 6,12 Bit einen maximalen Quantisierungsfehler in der Höhe der geforderten prozentualen Messabweichung zur Folge hat und infolgedessen alle anderen Komponenten der Messkette keinerlei Abweichung vom tatsächlichen Wert verursachen dürfen um die geforderte Genauigkeit zu erreichen.

In Abschnitt 9.5 ist ein zweites Kriterium für die Auflösung definiert, das auf der Anlaufstromstärke beruht. Mit einem gewählten Minimalstrom von 0,25 A ergibt sich eine

Anlaufstromstärke von 0,025 A und die minimale Auflösung der Quantisierung ergibt sich gemäß Gleichung (22) unter Berücksichtigung eines um 10% höheren Maximalstroms zu $11,1 \cong 12$ Bit.

Folglich wird im Smart Plug ein Analog-Digital-Umsetzer mit einer minimalen Auflösung von 12 Bit zur Strommessung eingesetzt. Aus Gründen der Einheitlichkeit und unter Beachtung einer Quantisierung im Multiplexverfahren wird für die Spannungsmessung im Smart Plug ebenso ein 12 Bit Analog-Digital-Umsetzer verwendet.

Anhand der Kriterien aus Abschnitt 9.5 erfolgt die Bestimmung der zeitlichen Auflösung der Messung des Smart Plug Systems. Aufgrund der unterschiedlichen Angaben betreffend der Oberschwingungen in den geltenden europäischen Normen [57][59][65] wird die zeitliche Auflösung entsprechend gewählt, dass möglichst alle Vorgaben der Normen Berücksichtigung finden.

In der Norm EN 50160 ist angegeben, dass Oberschwingungen der Spannung mit einer Ordnungszahl größer als 25 an der Übergabestelle für gewöhnlich kleine Werte annehmen. Wohingegen in der Norm EN 61000-3-2 [65] Oberschwingungen des Stromes mit einer Ordnungszahl bis 40 in die Beurteilung von Geräten mit einbezogen werden. Übliche Vereinbarungen zur Berechnung des Oberschwingungsgehaltes oder des Klirrfaktors verwenden genauso Oberschwingungen bis zur Ordnungszahl 40. Aus diesem Grund soll mit dem Smart Plug eine Frequenzauflösung bis zur 40. Harmonischen der Netzfrequenz (50 Hz) möglich sein. Unter Einhaltung des Abtasttheorems aus Gleichung (16) wird im Smart Plug ein Analog-Digital-Umsetzer mit einer Abtastfrequenz von mindestens $50 \text{ Hz} \cdot 40 \cdot 2 = 4 \text{ kHz}$ eingesetzt.

Wird berücksichtigt, dass gewisse Berechnungen, wie beispielsweise die FFT, erfordern, dass die Anzahl der Werte eine Potenz von Zwei darstellt, ist die Abtastfrequenz passend anzupassen. Es wird daher die nächst höhere Frequenz, die der Gleichung (35) entspricht, für die Abtastung herangezogen.

$$f_a = 50 \text{ Hz} \cdot 2^B \quad (35)$$

Mit 128 Abtastwerten je Periode der Netzfrequenz ergibt sich eine minimale Abtastfrequenz für die Analog-Digital-Umsetzer im Messkreis des Smart Plug Systems von 6,4 kHz.

Die Abtastfrequenz soll aber jedenfalls an die Netzfrequenz gekoppelt werden, sodass

eine kohärente Abtastung umgesetzt werden kann. Daher ist eine Synchronisation der Abtastfrequenz mit der Netzfrequenz in der Art durchzuführen, dass bei der Verwendung von 6,4 kHz als Abtastfrequenz genau 128 Abtastwerte während einer Periode der Netzfrequenz, auch bei Veränderungen der Netzfrequenz, zur Verfügung stehen. Dies ist notwendig, da sich die Netzfrequenz laut Norm EN 50160 bei einer synchronen Verbindung zum Verbundnetz im Bereich von 47 Hz bis 52 Hz ändern kann. Die Synchronisierung der Abtastfrequenz mit der Netzfrequenz hat zum Zweck, dass die, in Abschnitt 9.6 beschriebene, Messabweichung aufgrund des Abschneidefehlers beziehungsweise des Leckeffekts im Smart Plug vermieden werden kann.

Zur Vermeidung von Aliasing wird im Zuge der analogen Vorverarbeitung ein Anti-Aliasing Filter umgesetzt, dessen Grenzfrequenz entsprechend der eingesetzten Abtastfrequenz zu wählen ist. Im Zuge dessen ist zu berücksichtigen, dass der Frequenzbereich ab 3 kHz für die Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsanlagen entsprechend der Norm EN 50065 [60] freigegeben ist.

Im Anschluss an die Digitalisierung von Spannung und Strom werden die Folgenwerte zur Berechnung der Leistung genützt. Wie in Abschnitt 9.6 beschrieben wird, stehen dazu prinzipiell Berechnungsmethoden im Zeitbereich und im Frequenzbereich zu Verfügung. Zur Analyse des Energieverbrauchs von Haushalten im Bezug auf Kosteneinsparungen ist vor allem die Wirkenergie bedeutend, da für gewöhnlich in Haushalten ausschließlich die Wirkenergie zur Verrechnung gelangt. Die Erhebung der Blindleistung bringt ferner ein Mehr an Information zum tatsächlichen Verbrauchsverhalten des Geräts. Bei einer automatisierten Erkennung von Geräten beziehungsweise Gerätetypen wird durch die zusätzliche Information eine Klassifizierung erleichtert.

Die Berechnung der Wirkleistung lässt sich, wie in Abschnitt 9.6 beschrieben, sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich mit dem selben Ergebnis durchführen. Die Berechnungsmethoden die für Wirkleistung können im Hinblick auf die Messabweichung als äquivalent betrachtet werden, wenn von einer kohärenten Abtastung, gemäß Abschnitt 9.6, ausgegangen wird. Die Varianten zur Bestimmung der Wirkleistung im Frequenzbereich sind als grundsätzlich rechentechnisch aufwendiger einzustufen, da für die Ermittlung das Frequenzspektrum die DFT-Transformation notwendig ist.

Aufgrund der nicht einheitlichen Deutung der Blindleistung für nicht-sinusförmige Bedingungen ergeben sich hierbei unterschiedliche Wege für die Berechnung im Zeit- beziehungsweise Frequenzbereich. In weiterer Folge wird nicht auf die Berechnung von Leistungskomponenten aus der Analyse des Spektrums der Momentanleistung, wie un-

ter Punkt 9.6 beschrieben wird, referenziert, da diese Darstellung dieselben Information enthält wie bereits die Momentanleistung im Zeitbereich liefert. Nichtsdestotrotz ist diese Darstellungsform wertvoll um die Zusammensetzung der Leistung zu analysieren.

Das IEV [134, 35] und die IEEE Standard Definition für die Messung von elektrischen Leistungsgrößen [79] enthalten für die Blindleistung eine Definition, die nur auf sinusförmige Größen anzuwenden ist, wie unter Punkt 9.1 angegeben wird. Die Gesamtblindleistung ist laut Definition nicht mehr auf den sinusförmigen Fall beschränkt und gilt für periodische Größen jeglicher Art. Zur Bestimmung der Gesamtblindleistung werden die Scheinleistung und die Wirkleistung benötigt. Diese beiden Größen können sowohl aus den Signalen im Zeitbereich als auch aus dem Amplitudenspektrum bestimmt werden, wobei der Gesamteffektivwert aus dem Amplitudenspektrum laut Gleichung (36) berechnet wird.

$$V = \sqrt{V_0 + \sum_{k \geq 1} (V_k)^2} \quad (36)$$

V_0 Gleichanteil der zeitabhängigen Größe $v(t)$
 V_k Effektivwert der Harmonischen mit Ordnungszahl k der zeitabhängigen Größe $v(t)$

Die Berechnung im Frequenzbereich bringt dazu noch die Möglichkeit die Blindleistung nach der klassischen Definition von Budeanu, wie in Abschnitt 9.6 beschrieben, zu berechnen.[69] Infolgedessen ermöglicht die Umsetzung der Berechnungsschritte der Leistungskomponenten auf Basis der spektralen Verteilung von Spannung und Strom die Bestimmung aller bedeutsamen Größen und ist damit der universellste Berechnungsweg.

Jedoch bedeutet die Berechnung im Frequenzbereich einen höheren Rechenaufwand, aufgrund der notwendigen DFT-Transformation. Es stehen äußerst effiziente Algorithmen für die Berechnung der DFT, die sehr gut für Parallelstrukturen geeignet sind, zur Verfügung. Als Beispiel sei an dieser Stelle die FFT genannt.

Unter Ausnutzung dieser Möglichkeiten und in Anbetracht der Universalität dieses Berechnungswegs erscheint der höhere Rechenaufwand als nützlich. Dementsprechend werden im Smart Plug die Leistungsdaten über die Bildung des Spektrums von Spannung und Strom bestimmt.

Der Energieverbrauch wird in weiterer Folge durch die Integration der Leistung über die Zeit bestimmt. Das Integrationsintervall ist durch die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messdatenübertragungen gegeben.

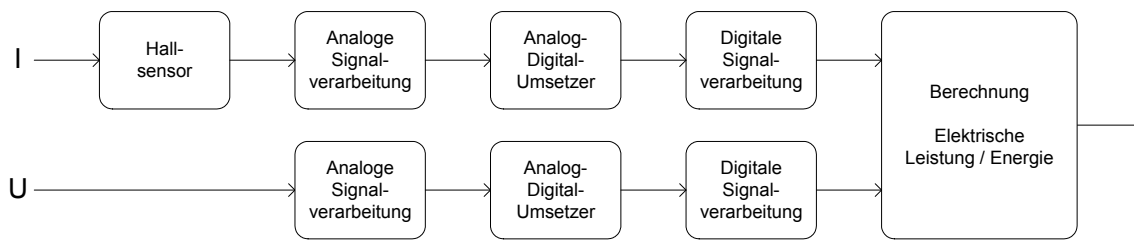


Abbildung 31: Blockschaltbild Smart Plug Messsystem

Das Smart Plug Messsystem setzt sich dementsprechend aus einem Spannungs- und einem Strommesspfad zusammen. Der Gesamtaufbau des Messsystems im Smart Plug ist in Abbildung 31 gezeigt und stellt die einzelnen Funktionseinheiten der Messung als Blockschaltbild dar.

10

Kapitel 10

Zusammenfassung

Der Smart Plug soll, mit der Information über den Energieverbrauch des angeschlossenen Haushaltsgeräts in nahezu Echtzeit, dem Konsumenten ein Werkzeug für das Erkennen von Energiesparpotentialen im täglichen Umgang mit elektrischer Energie geben. Aufbauend auf einer Analyse von Umsetzungsvarianten für ein System zur Messung des elektrischen Energieverbrauchs von elektrischen Einzelverbrauchern auf konzeptioneller Ebene werden Spezifikationen für die Realisierung des Smart Plug Systems entwickelt.

Die Umsetzung des Smart Plug Systems ergibt sich, aufgrund der Anordnung der Geräte im Haushalt, als verteiltes System mit einer zentralen Informationsschnittstelle zum Anwender. Als Schnittstelle zum Benutzer dient das Smart Meter mit seinen diversen Anzeigemöglichkeiten, sowie die Darstellung auf einem „In-Home Displays“. Über das Smart Meter, als Kommunikationsschnittstelle zwischen Haushalt und Stromnetz, wird darüberhinaus eine Integration von elektrischen Einzelverbrauchern in das zunehmend intelligente Stromnetz - Smart Grid ermöglicht. Die Verbindung des Smart Plug Systems mit dem Smart Meter wird über dessen Kommunikationsmodul für hausinterne Messgeräte realisiert. Um einen geringen Installationsaufwand für das System zu erreichen, wird dabei der kabellose M-Bus nach Norm EN 13757-4 eingesetzt. Kommunikationstests demonstrieren die mögliche Realisierung der Integration des Smart Plug Systems in eine Automated Meter Management System.

Die Ausführung der Smart Plug Einheiten als Zwischensteckvorrichtung erlaubt eine Installation des System durch den Konsumenten ohne externe Unterstützung. Durch eine mechanische Kopplung von Zwischenstecker und Geräteanschlussstecker wird die Bindung einer Smart Plug Einheit an ein bestimmtes Gerät realisiert, um eine Gerätezuordnung für die Auswertung zu erreichen.

Das wesentliche Element einer Smart Plug Einheit ist eine integrierte Schaltung, die als Ein-Chip-System (SoC) sowohl die Messfunktionen als auch die Kommunikationsfunktionen in einem Baustein vereint. In diesen Baustein ist ein Hallsensor zur Messung des, an das Gerät abgegebenen, Stroms integriert. Für die Bestimmung der Leistung



wird ein separater Spannungsmesspfad ausgeführt. Die beiden Messsignale werden zu gleichen Zeitpunkten abgetastet und digitalisiert, wobei auf eine Synchronisation von Abtastfrequenz und Netzfrequenz zu achten ist, um Fehler bei der Leistungsberechnung zu vermeiden.

Mit der Integration der elektrischen Wirkleistung über die Zeit wird der Energieverbrauch bestimmt. Sowohl die Wirk- als auch die Blindleistung werden über ihre spektralen Komponenten berechnet, damit nicht-sinusförmiges Lastverhalten entsprechende Berücksichtigung findet. Der Energieverbrauch wird gemeinsam mit den berechneten Leistungsinformationen und einem Zeitstempel übertragen. Mit der Nutzung der, in der Norm EN 13757-3 festgelegten, Anwendungsschicht lassen sich kurze Telegramme für die Übertragung realisieren und somit unter Einhaltung der vorgegebenen Funkbeschränkungen eine zeitnahe Energieverbrauchsinformation für den Konsumenten bereitstellen.

11

Kapitel 11

Ausblick

Abschließend werden weitere Schritte zur Realisierung des Smart Plug Systems genannt und auf Bereiche, in denen noch Forschungsbedarf besteht, hingewiesen. Auf der Basis der in dieser Arbeit entwickelten Spezifikationen ist der nächste Schritt, auf dem Weg zur Umsetzung des Systems, der Entwurf der integrierten Schaltung mit Messfunktion und Kommunikationsmodul. Die Energieversorgung der integrierten Schaltung bedarf besonderer Aufmerksamkeit bei der Entwicklung der Schaltung, da eine 230 V Wechselspannung zur Verfügung steht und eine platzsparende Lösung mit möglichst wenigen externen Bauelementen gefordert wird. Zudem ist die tatsächliche Umsetzung des Magnetfeldkonzentratorrings mit Bedacht auf den mechanischen Einbau der integrierten Schaltung im Gehäuse zu entwickeln.

Im Bezug auf die Kommunikation ist das Übertragungsverhalten eines Systems, bestehend aus mehreren Smart Plug Einheiten von besonderem Interesse, da trotz der relativ großen zeitlichen Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Übertragungen mit Kollisionen zu rechnen ist. In wie weit die Forderung einer quasi Echtzeitübertragung beim Auftreten von Kollisionen umgesetzt werden kann, ist mit weiteren Kommunikationstests zu klären. Aus einer Analyse der Kommunikation eines Systems mit mehreren Smart Plug Einheiten lassen sich Informationen zu Kollisionen bei der Funkübertragung gewinnen. Unter Umständen zeigen die Versuche die Notwendigkeit der Einführung von zusätzlichen Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung, wie zum Beispiel eine variierende Länge der Sendepause zwischen zwei aufeinanderfolgenden Übertragungen.

Da in der vorgeschlagenen Betriebsart „T“ des kabellosen M-Bus nach EN 13757-4 neben der unidirektionalen Übertragung der Messdaten mit Betriebsart „T1“ ebenso eine Übertragung von Befehlen vom Smart Meter zum Smart Plug realisierbar ist, kann die Untersuchung der bidirektionalen Betriebsart „T2“ den Ausgangspunkt für die Integration einer Schaltfunktion in das Smart Plug System liefern. Die Schaltfunktion betreffend ist zudem die Erarbeitung von zusätzlichen Spezifikationen notwendig.

Mit der Umsetzung einer bidirektionalen Verbindung kann zudem eine Zeitsynchroni-



sierung der einzelnen Smart Plug Einheiten realisiert werden. Für die Umsetzung der Zeitsynchronisierung stellt das Open Metering System [106] eigene Nachrichten zur Verfügung.

Darüberhinaus stellen die Datensicherheit bei der Übertragung und der Datenschutz bei der Vernetzung von Haushalt und Smart Grid künftige Forschungsfragen dar.

Literaturverzeichnis

- [1] *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 14 - 16, 1991, Omni Hotel at CNN Center, Atlanta, Georgia*, Band 91 der Reihe *IMTC*, New York, NY, 1991. IEEE.
- [2] *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Metropolitan, NY, 1992. IEEE.
- [3] *Smart connectivity: integrating measurement and control: Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Hilton Hotel and Towers, Baltimore, Maryland, USA, May 1 - 4, 2000*, Piscataway, NJ, 2000. IEEE Service Center.
- [4] *Proceedings of IEEE sensors 2002*, Piscataway, NJ, 2002. IEEE Operations Center.
- [5] *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC): Ottawa, Ontario, Canada, 16 - 19 May 2005*, Piscataway, NJ, 2005. IEEE Operations Center.
- [6] *IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing, 2005: Sept. 1 [- 3] 2005, [Faro, Portugal]*, Piscataway, NJ, 2005. IEEE Service Center.
- [7] *IEEE Power Engineering Society general meeting, 2006: 18 - 22 June 2006, [Montreal, QC, Canada]*, Piscataway, NJ, 2006. IEEE Operations Center.
- [8] *2007 IEEE sensors: Atlanta, GA, 28 - 31 October 2007 ; [the Sixth IEEE Conference on Sensors]*, Piscataway, NJ, 2007. IEEE Service Center.
- [9] *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007: ICIEA 2007 ; 23 - 25 May 2007, Shangri-La Hotel, Harbin*, Piscataway, NJ, 2007. IEEE Operations Center.
- [10] *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference proceedings, 2007: [Warsaw, Poland], 1 - 3 May 2007*, Piscataway, NJ, 2007. IEEE Service Center.

- [11] *13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2008: EPE-PEMC 2008 ; 1 - 3 Sept. 2008, [Poznan, Poland ; proceedings]*, Piscataway, NJ, 2008. IEEE.
- [12] *IEEE 2nd International Power and Energy Conference, 2008: PCon 2008 ; Johor Bahru, Malaysia, 1 - 3 Dec. 2008*, Piscataway, NJ, 2008. IEEE.
- [13] *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008: POWERCON 2008 ; 12 - 15 Oct. 2008, New Delhi, India*, Piscataway, NJ, 2008. IEEE.
- [14] *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation: ETFA 2009 ; Palma de Mallorca, Spain, 22 - 25 September 2009*, Piscataway, NJ, 2009. IEEE.
- [15] *International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2009: IPSN 2009 ; San Francisco, California, USA, 13 - 16 April 2009*, Piscataway, NJ, 2009. IEEE.
- [16] *Proceedings of the 11th International Conference on Ubiquitous Computing: September 30 - October 3, 2009, Orlando, Florida, USA*, New York, NY, 2009. ACM.
- [17] ACKERMANN, THOMAS, GÖRAN ANDERSSON und LENNART SÖDER: *Distributed generation: a definition*. Electric Power Systems Research, 57:195–204, 2001.
- [18] AGREZ, D.: *Weighted multi-point interpolated DFTF to improve amplitude estimation of multi-frequency signal*. In: *Smart connectivity: integrating measurement and control*, Band 2, Seiten 998–1003, Piscataway, NJ, 2000. IEEE Service Center.
- [19] AGREZ, D.: *Active Power Estimation in the Non-coherent Sampling: A Comparative Study*. In: *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC)*, Seiten 720–725, Piscataway, NJ, 2005. IEEE Operations Center.
- [20] ALAN V, OPPENHEIM, SCHAFER RONALDW und BUCK JOHN R.: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. Pearson Education Deutschland GmbH., München, 2. Auflage Auflage, 2004.
- [21] AMBER WIRELESS GMBH: *Wireless M-Bus USB-Stick*, 2009.
- [22] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI): *Data Encryption Algorithm*, 1981.
- [23] AUSTRIAN ENERGY AGENCY: *Outlook "Life Style 2030"*.

- [24] BACHHIESL, UDO und INSTITUT FÜR ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT UND ENERGIEINNOVATION <GRAZ> (Herausgeber): *Alte Ziele - Neue Wege: 11. Symposium Energieinnovation, 10. - 12. Februar 2010, TU Graz*, Graz, 2010. Verl. der Techn. Univ. Graz.
- [25] BARBARO, P. V., A. CATALIOTTI, V. COSENTINO und S. NUCCIO: *Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems*. In: IMEKO - INTERNATIONAL MEASUREMENT CONFEDERATION (Herausgeber): *Proceedings of XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development*,, Seiten 17–22, Rio de Janeiro, Brazil, 2006.
- [26] BERGES, MARIO, ETHAN GOLDMAN, H. SCOTT MATTHEWS und LUCIO SOBELMAN: *Learning Systems for Electric Consumption of Buildings*. In: CALDAS, CARLOS H. und WILLIAM J. O'BRIEN (Herausgeber): *Computing in civil engineering*, Seiten 1–10, Reston, Va, 2009. ASCE.
- [27] BLAGOJEVIC, M., M. KAYAL, M. GERVAIS und D. DE VENUTO: *SOI Hall-Sensor Front End for Energy Measurement*. IEEE Sensors Journal, 6:1016–1021, 2006.
- [28] BLAGOJEVIC, M., D. DE VENUTO und M. KAYAL: *SOI Hall Sensor Based Solid State Meter for Power and Energy Measurements*. In: ROCHA, DANIEL (Herausgeber): *Proceedings of IEEE sensors 2004*, Band 2, Seiten 1040–1043, Piscataway, NJ, 2004. IEEE Service Center.
- [29] BLANCHARD, H., F. DE MONTMOLLIN, J. HUBIN und R. S. POPOVIC: *Highly sensitive Hall sensor in CMOS technology*. Sensors and actuators. A, Physical, 82, 2000.
- [30] BULMAN, W.E.: *Applications of the Hall Effect*. Solid State Electronics, 9:361–372, 1966.
- [31] BUNDESMINISTERS FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT: *Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit, mit der eine Verordnung über Messgeräte erlassen wird (Messgeräteverordnung) und die Verordnung über die gegenseitige Anerkennung auf dem Gebiet des Maß- und Eichwesens, die Schankgefäßverordnung, die Eich-Zulassungsverordnung und die Verordnung betreffend die Anerkennung von eichtechnischen Prüfungen geändert werden: BGBl. II Nr. 274/2006*.
- [32] CALDAS, CARLOS H. und WILLIAM J. O'BRIEN (Herausgeber): *Computing in civil engineering: Proceedings of the 2009 ASCE International Workshop on Com-*



puting in Civil Engineering ; June 24 - 27, 2009, Austin, Texas, Reston, Va, 2009. ASCE.

- [33] CATALIOTTI, A., V. COSENTINO und S. NUCCIO: *The metrological characterization of the static meters for reactive energy in the presence of harmonic distortion*. In: *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference proceedings, 2007*, Seiten 1–6, Piscataway, NJ, 2007. IEEE Service Center.
- [34] CLARKE, F. J. J. und J. R. STOCKTON: *Principles and theory of wattmeters operating on the basis of regularly spaced sample pairs*. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 15:645–652, 1982.
- [35] COMMISSION, IEC INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL: *Electropedia: IEC Online*.
- [36] CORPORATION, P3 INTERNATIONAL: *Kill a Watt*.
- [37] CRAEMER, KLAAS DE und GEERT DECONINCK: *Analysis of State-of-the-art Smart Metering Communication Standards*. Leuven, Belgium, 2010.
- [38] DEUTSCHE INDUSTRIE NORM: *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*.
- [39] DIGITAL LIVING NETWORK ALLIANCE DLNA: *Digital Living*, 2010.
- [40] DJOKIC, B., P. BOSNJAKOVIC und M. BEGOVIC: *New method for reactive power and energy measurement*. In: *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 14 - 16, 1991, Omni Hotel at CNN Center, Atlanta, Georgia*, Band 91 der Reihe *IMTC*, Seiten 175–179, New York, NY, 1991. IEEE.
- [41] DLMS USER ASSOCIATION: *FLAG Manufacturers ID*, 31.08.10.
- [42] DONADIO, MATTHEW P.: *CIC Filter Introduction*, 2000.
- [43] DR. HARALD PROIDL: *Heizen in Österreich-Die Förderkulisse im Spannungsfeld von Ökonomie, Ökologie und sozialer Verantwortung*, 08.10.2008.
- [44] DRIESEN, J. und R. BELMANS: *Distributed generation: challenges and possible solutions*. In: *IEEE Power Engineering Society general meeting, 2006*, Seiten 1–8, Piscataway, NJ, 2006. IEEE Operations Center.
- [45] DRLJACA, P. M., F. VINCENT, P. A. BESSE und R. S. POPOVIC: *Design of planar magnetic concentrators for high sensitivity Hall devices*. Sensors and actuators. A, Physical, 97:10–14, 2002.

- [46] E-CONTROL GMBH: *Studie Dezentrale Erzeugung in Österreich*, 2005.
- [47] ELECTRONIC EDUCATIONAL DEVICES, INC.: *Watts up?*
- [48] ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V., VDE VERBAND DER: *Lastenheft MUC: Multi Utility Communication*, 05.08.2009.
- [49] EMANUEL, A. E.: *Powers in nonsinusoidal situations-a review of definitions and physical meaning*. IEEE Transactions on Power Delivery, 5:1377–1389, 1990.
- [50] ENTSO-E - EUROPEAN NETWORK OF TRANSMISSION SYSTEM OPERATORS FOR ELECTRICITY: *50 Hertz: a delicate balance*.
- [51] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Standardisation mandate to CEN, CENELEC and ETSI in the field of measuring instruments for the development of an open architecture for utility meters involving communication protocols enabling interoperability: M/441 EN*, 12.03.2009.
- [52] EUROPÄISCHE KOMMISSION (Herausgeber): *ENERGY EFFICIENCY IN DOMESTIC APPLIANCES AND LIGHTING PROCEEDINGS OF THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE EEDAL '06*, Luxemburg, 2006. Europäische Gemeinschaft.
- [53] EUROPÄISCHE NORM: *Wechselstrom-Elektrizitätszähler - Allgemeine Anforderungen, Prüfungen und Prüfbedingungen Teil 11: Messeinrichtungen*, 01.01.2004.
- [54] EUROPÄISCHE NORM: *Wechselstrom-Elektrizitätszähler - Besondere Anforderungen - Teil 23: Elektronische Blindverbrauchszähler der Genauigkeitsklassen 2 und 3*, 01.01.2004.
- [55] EUROPÄISCHE NORM: *Communication systems for and remote reading of meters - Part 2: Physical and link layer*, 01.04.2005.
- [56] EUROPÄISCHE NORM: *Communication systems for and remote reading of meters - Part 3: Dedicated application layer*, 01.04.2005.
- [57] EUROPÄISCHE NORM: *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*, 01.05.2008.
- [58] EUROPÄISCHE NORM: *Wechselstrom-Elektrizitätszähler - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Prüfungen und Prüfbedingungen - Messeinrichtungen (Genauigkeitsklassen A, B und C)*, 01.07.2007.
- [59] EUROPÄISCHE NORM: *Wechselstrom-Elektrizitätszähler - Teil 3: Besondere Anfor-*

derungen - Elektronische Wirkverbrauchszähler der Genauigkeitsklassen A, B und C, 01.07.2007.

- [60] EUROPÄISCHE NORM: *Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz - Teil 2-3: Störfestigkeitsanforderungen an Netz-Datenübertragungsgeräte und -systeme, die im Frequenzbereich 3 kHz bis 95 kHz betrieben werden und für den Gebrauch durch Stromversorgungs- und -verteilungsunternehmen bestimmt sind*, 01.08.2003.
- [61] EUROPÄISCHE NORM: *Electricity metering - Data exchange for meter reading Part 61: Object identification system (OBIS)*, 01.09.2007.
- [62] EUROPÄISCHE NORM: *Electricity metering - Data exchange for meter reading, tariff and load control Part 53: COSEM application layer*, 01.09.2007.
- [63] EUROPÄISCHE NORM: *Kommunikationssysteme für Zähler und deren Fernableseung Teil 4: Zählerauslesung über Funk (Fernauslesung von Zählern im SRD-Band von 868 MHz bis 870 MHz)*, 01.10.2005.
- [64] EUROPÄISCHE NORM: *Kommunikationssysteme für Zähler und deren Fernableseung - Teil 1: Datenaustausch*, 01.11.2003.
- [65] EUROPÄISCHE NORM: *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangstrom ≤ 16 A je Leiter) (IEC 61000-3-2:2005)*, 01.12.2006.
- [66] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, 20 und 20 bis 2020, Chancen Europas im Klimawandel*.
- [67] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: *RICHTLINIE 2004/22/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES: 2004/22/EG*.
- [68] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: *RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES ÜBER GEMEINSAME VORSCHRIFTEN FÜR DEN ELEKTRIZITÄTSBINNENMARKT UND ZUR AUFHEBUNG DER RICHTLINIE 2003/54/EG: RICHTLINIE 2009/72/EG*.
- [69] FILIPSKI, P.S. und P.W. LABAJ: *Evaluation of reactive power meters in the presence of high harmonic distortion*. IEEE Transactions on Power Delivery, 7:1793–1799, 1992.

- [70] FRICK, V., L. HEBRARD, P. POURE, F. ANSTOTZ und F. BRAUN: *CMOS microsystem for AC current measurement with galvanic isolation*. In: *Proceedings of IEEE sensors 2002*, Band 2, Seiten 1445–1450, Piscataway, NJ, 2002. IEEE Operations Center.
- [71] GJUMLICH, HUGO CALLEJA und JORGE LEMUS ARMAS: *Digital Power Measurement with non-simultaneous sample pairs*. In: *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 14 - 16, 1991, Omni Hotel at CNN Center, Atlanta, Georgia*, Band 91 der Reihe *IMTC*, Seiten 520–524, New York, NY, 1991. IEEE.
- [72] GMBH, ENERGIE-CONTROL: *Leistungskatalog für fernauslesbare Smart Metering-Systeme im Bereich Strom: Öffentliches Konsultationspapier*, Juni 2010.
- [73] GONGDE LI, M. G. KONG, G. R. JONES und J. W. SPENCER: *Sensitivity Improvement of an Optical Current Sensor with Enhanced Faraday Rotation*. *Journal of Lightwave technology*, 15, 1997.
- [74] GRUBER, EDELGARD: *Stromsparen im Haushalt: Potentiale und Probleme*, 27.11.2006.
- [75] HART, G. W.: *Nonintrusive appliance load monitoring*. *Proceedings of the IEEE*, 80:1870–1891, 1992.
- [76] HOFFMANN, JÖRG: *Taschenbuch der Messtechnik: Mit 62 Tabellen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., München, 4. Aufl. Auflage, 2004.
- [77] HOGENAUER, EUGENE B.: *An Economical Class of Digital Filters for Decimation and Interpolation*. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ASSP-29(2):155–162, 1981.
- [78] HONG-TZER, YANG, CHANG HSUEH-HSIEN und LIN CHING-LUNG: *Design a Neural Network for Features Selection in Non-intrusive Monitoring of Industrial Electrical Loads*. In: SHEN, WEIMING (Herausgeber): *11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2007*, Seiten 1022–1027, Piscataway, NJ, 2007. IEEE Service Center.
- [79] IEEE: *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*.
- [80] IEEE (Herausgeber): *Fourth International Conference on Developments in Power Protection*, Edinburgh , UK, 1989.

- [81] IMEKO - INTERNATIONAL MEASUREMENT CONFEDERATION (Herausgeber): *Proceedings of XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development*, Rio de Janeiro, Brazil, 2006.
- [82] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION IEC: *International standardization of electrical plugs and sockets for domestic use*.
- [83] JAN SIMON: *CryptAES*, 2009.
- [84] KEEMINK, SANDER und BART ROOS: *Security analysis of Dutch smart metering systems*, 07.10.2008.
- [85] KEMA CONSULTING: *P2 Companion Standard: Dutch Smart Meter specification and tender dossier*, 04.02.2008.
- [86] KISTLER, R., M. BIERI, R. WETTSTEIN und A. KLAPPROTH: *Tunneling Smart Energy protocols over ZigBee*. In: *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, Seiten 1–8, Piscataway, NJ, 2009. IEEE.
- [87] KNX ASSOCIATION CVBA: *KNX & M-bus*, 2010.
- [88] KOMMISSION, EUROPÄISCHE: *E-Communications Haushaltsumfrage*, Juni 2008.
- [89] KOMMISSION, EUROPÄISCHE: *Kosten und CO₂ –Verbrauch Ihrer Haushaltsgeräte*, o.J.
- [90] LEMUS-ARMAS, JORGE A. und GILDARDO JIMÉNEZ-MUNGULA: *Electric Power Measurements for non-sinusoidal input signals*. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Seiten 573–576, Metropolitan, NY, 1992. IEEE.
- [91] LERCH, REINHARD: *Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren*. Springer-Lehrbuch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 4., neu bearb. Aufl. Auflage, 2007.
- [92] LESLIE K., NORFORD und LEEB STEVEN B.: *Non-intrusive electrical load monitoring in commercial buildings based on steady-state and transient load-detection algorithms*. *Energy and Buildings*, 24:51–64, 1996.
- [93] LIMITED, ENERGY OPTIMIZERS: *Plogg: wireless energy management*.
- [94] MARTIN, NOVOTNY und SEDLACEK MILOS: *Measurement of active power by time domain digital signal processing*. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 42(8):1139–1152, 2009.

- [95] MCMAKIN, ANDREA H., ELIZABETH L. MALONE und REGINA E. LUNDGREN: *Motivating residents to conserve energy without financial incentives*. Environment and Behavior, 34(6):848–863, 2002.
- [96] MESCHÉDE, DIETER: *Optik, Licht und Laser*. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 3., durchgesehene Auflage. Auflage, 2008.
- [97] MONANO ASQUERINO, JUAN CARLOS, MANUEL CASTILLA IBAREZ, JAIME BENITEZ GUTIERREZ und ANTONIO OJEDA LOPEZ: *Measurement of Apparent Power Components in the Frequency Domain*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 39:583–588, 1990.
- [98] MÜHL, THOMAS: *Einführung in die elektrische Messtechnik: Grundlagen, Messverfahren, Geräte*. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2., durchgesehene Auflage. Auflage, 2006.
- [99] NAJMEDDINE, H., K. EL KHAMLIHI DRISSI, C. PASQUIER, C. FAURE, K. KERROUM, A. DIOP, T. JOUANNET und M. MICHOU: *State of art on load monitoring methods*. In: *IEEE 2nd International Power and Energy Conference, 2008*, Seiten 1256–1258, Piscataway, NJ, 2008. IEEE.
- [100] NAKANO, YUKIO, HIROSHI MURATA, KATSUHISA YOSHIMOTO, SHINICHIRO HIDAKA, MASAYUKI TADOKORO und KEN NAGASAKA: *Non-Intrusive Electric Appliances Load Monitoring System Using Harmonic Pattern Recognition - Performance Test Results at Real Households*. In: EUROPÄISCHE KOMMISSION (Herausgeber): *ENERGY EFFICIENCY IN DOMESTIC APPLIANCES AND LIGHTING PROCEEDINGS OF THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE EEDAL'06*, Seiten 477–487, Luxemburg, 2006. Europäische Gemeinschaft.
- [101] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *Federal Information Processing Standards Publication FIPS PUB 197 Advanced Encryption Standard (AES)*, 2001.
- [102] NORBERT BREITSCHOPF: *E.I.S - Energie Informations System in der Praxis*. In: BACHHIESL, UDO und INSTITUT FÜR ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT UND ENERGIEINNOVATION <GRAZ> (Herausgeber): *Alte Ziele - Neue Wege*, Graz, 2010. Verl. der Techn. Univ. Graz.
- [103] OFFICE OF TRADE AND INDUSTRY INFORMATION und INTERNATIONAL TRADE

ADMINISTRATION: *Electric Current Worldwide.*

- [104] OPEN METERING WORKING GROUP: *Open Metering.*
- [105] OPEN METERING WORKING GROUP: *OMS - Open Metering System Specification: Volume 1 - General Part*, 17.07.2009.
- [106] OPEN METERING WORKING GROUP: *OMS - Open Metering System Specification: Volume 2 - Primary Communication*, 20.07.2009.
- [107] ÖVE/ÖNORM: *Prüfung nach Instandsetzung und Änderung und Wiederkehrende Prüfung elektrischer Geräte Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, 01.01.2003.
- [108] ÖVE/ÖNORM: *Betrieb von elektrischen Anlagen Teil 1: Europäische Norm*, 01.09.2008.
- [109] ÖVE/ÖNORM IEC: *Stecker und Steckdosen für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, 01.09.2005.
- [110] PASCAL, J., L. HEBRARD, J. B. KAMMERER, V. FRICK und J. P. BLONDE: *A Vertical Hall Device in Standard Submicron CMOS Technology*. In: *2007 IEEE sensors*, Seiten 1480–1483, Piscataway, NJ, 2007. IEEE Service Center.
- [111] PEPERMANS, G., J. DRIESEN, D. HAESLONCKX, R. BELMANS und W. D'HAESELEER: *Distributed generation: definition, benefits and issues*. *Energy Policy*, 33:787–798, 2005.
- [112] POPOVIC, R. S., Z. B. RANDJELOVIC und D. MANIC: *Integrated Hall-effect magnetic sensors*. *Sensors and actuators. A, Physical*, 91:46–50, 2001.
- [113] POWER DISTRIBUTION DIVISION: *Information mit System: Das Automatisierte Verbrauchsdatenerfassungs und Informationssystem AMIS*. Erlangen, 2008.
- [114] PRESSEAGENTUR, DEUTSCHE: *Die CE-Highlights der IFA 2010*.
- [115] RANDJELOVIC, Z. B., M. KAYAL, R. POPOVIC und H. BLANCHARD: *Highly sensitive Hall magnetic sensor microsystem in CMOS technology*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 37:151–159, 2002.
- [116] REINISCH, C., W. KASTNER, G. NEUGSCHWANDTNER und W. GRANZER: *Wireless Technologies in Home and Building Automation*. *Industrial Informatics*, 2007 5th IEEE International Conference on, Seiten 93–98, 2007.
- [117] RICHTER, F. und C. SOURKOUNIS: *Wide Range Low Noise Current Sensor*. In:

- 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2008*, Seiten 1398–1401, Piscataway, NJ, 2008. IEEE.
- [118] ROCHA, DANIEL (Herausgeber): *Proceedings of IEEE sensors 2004: [IEEE Sensors 2004 Conference] ; October 24 - 27, Vienna University of Technology, Vienna, Austria*, Piscataway, NJ, 2004. IEEE Service Center.
- [119] SARAH DARBY: *The effectiveness of feedback on energy consumption: A review for DEFRA of the literature on metering, billing and direct displays.*, April 2006.
- [120] SARKAR, ARGHYA und S. SENGUPTA: *Design and Implementation of a High Accuracy Sampling Wattmeter under Non-sinusoidal and Time Varying Environments*. In: *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008*, Seiten 1–7, Piscataway, NJ, 2008. IEEE.
- [121] SARKAR, ARGHYA und S. SENGUPTA: *On-line tracking of single phase reactive power in non-sinusoidal conditions using S-ADALINE networks*. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 42:559–569, 2009.
- [122] SCHULZ, DETLEF: *Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker ; mit 300 Tabellen*. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 5., korrigierte Auflage. Auflage, 2009.
- [123] SERRA, H., J. CORREIA, A. J. GANO, A. M. DE CAMPOS und I. TEIXEIRA: *Domestic power consumption measurement and automatic home appliance detection*. In: *IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing, 2005*, Seiten 128–132, Piscataway, NJ, 2005. IEEE Service Center.
- [124] SHEN, WEIMING (Herausgeber): *11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2007: Melbourne, Australia, 26 - 28 April 2007*, Piscataway, NJ, 2007. IEEE Service Center.
- [125] SHREHARSHA, RAO: *Estimating the ZigBee transmission-range ISM band*. *EDN*, Seiten 67–72, 2007.
- [126] STATISTIK AUSTRIA: *Energiebilanzen*, 26.04.2010.
- [127] STEER, A.P., S. J. TURNER, P. R. B. FARRIE, R. P. TATAM, A. N. TOBIN, J. D. C. JONES und D. A. JACKSON: *Optical fibre current sensor for circuit protection*. In: IEEE (Herausgeber): *Fourth International Conference on Developments in Power Protection*, Seiten 296–300, Edinburgh , UK, 1989.

- [128] STENBAKKEN, G. N. und A. DOLEV: *High-accuracy sampling wattmeter*. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Seiten 568–572, Metropolitan, NY, 1992. IEEE.
- [129] STENBAKKEN, GERARD N.: *A Wideband Sampling Wattmeter*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, PAS-103:2919–2926, 1984.
- [130] STERN, PAUL C.: *Information, Incentives, and Proenvironmental Consumer Behavior*. Journal of Consumer Policy, 22(4):461–478, 1999.
- [131] THE OPEN METER CONSORTIUM: *Design of the overall system architecture: D 3.1*, 08.02.2010.
- [132] THE OPEN METER CONSORTIUM: *Specification of OPEN meter OSI layers and multimetering network interfaces: D 3.2*, 15.07.2010.
- [133] TING, K. H., MARK LUCENTE, GEORGE S. K. FUNG, W. K. LEE und S. Y. R. HUI: *A Taxonomy of Load Signatures for Single-Phase Electric Appliances*, 2005.
- [134] VDE, DKE DEUTSCHE KOMMISSION ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK IM DIN UND: *DKE-IEV Deutsche Online-Ausgabe des IEV*, 2010.
- [135] WEIGANG FU, MINGGUANG WU und QINGMIN AN: *Design of a SoC Chip for Appliance Control based on Home Network*. In: *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007*, Seiten 2644–2648, Piscataway, NJ, 2007. IEEE Operations Center.
- [136] WEISSGERBER, WILFRIED: *Elektrotechnik für Ingenieure*. Viewegs Fachbücher der Technik. Vieweg, Wiesbaden, 6., überarb. Aufl. Auflage, 2007.
- [137] WERNER, MARTIN: *Nachrichtentechnik: Eine Einführung für alle Studiengänge ; mit 40 Tabellen*. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Auflage, 2006.
- [138] WÖLFLE, DIRK und FRIEDRICH SCHNEIDER: *Funktionsüberwachung von Buskomponenten am Beispiel eines Intelligenten Zwischensteckers für den Europäischen Installationsbus (EIB)*, 2002.
- [139] WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT: *Energy Efficiency in Buildings: Business realities and opportunities*, 2007.
- [140] XIAOFAN, JIANG, STEPHEN, DAWSON-HAGGERTY, DUTTA PRABAL und CUL-



- LER DAVID: *Design and Implementation of a High-Fidelity AC Metering Network*. In: *International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2009*, Seiten 253–264, Piscataway, NJ, 2009. IEEE.
- [141] YOUNGHUN, KIM, THOMAS SCHMID, M. CHARBIWALA ZAINUL und SRIVASTAVA MANI B.: *ViridiScope: design and implementation of a fine grained power monitoring system for homes*. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Ubiquitous Computing*, Seiten 245–254, New York, NY, 2009. ACM.
- [142] ZIGBEE ALLIANCE: *ZigBee ZigBee Specification (Rev. 17)*.