



Schlussbericht 21.September 2012

LoReMA

Load Recognizing Meter and Actuator

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Koauftraggeber / Konsortium / Kofinanzierung:

iHomeLab - Hochschule Luzern, CH-6048 Horw-Luzern
BKW-FMB, CH-3000 Bern
EWZ, CH-8050 Zürich
Swisscom, CH-3050 Bern
Landis+Gyr, CH-6001 Zug
Feller - Schneider Electric, CH-8810 Horgen

Auftragnehmer:

iHomeLab - Hochschule Luzern
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw-Luzern
www.ihomelab.ch

Autoren:

Pascal Walther, iHomeLab – Hochschule Luzern, Pascal.Walther@iHomeLab.ch
Stephan Tomek, iHomeLab – Hochschule Luzern, Stephan.Tomek@iHomeLab.ch
Alexander Klapproth, iHomeLab – Hochschule Luzern, info@iHomeLab.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter: Roland Brüniger
BFE-Vertragsnummer: SI/500585-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

LoReMA	1
Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	5
Ausgangslage	8
Problemstellung	9
Ziel der Arbeit	9
Methode	10
Recherche	13
Evaluation Energiemess-Device	13
NIALM	13
Datenerfassung	15
Algorithmen	15
Entscheidungsmechanismen.....	16
Verbrauchertypen	17
Allgemeine Problemstellung der Lasterkennung.....	18
ZigBee Kommunikation	19
ZigBee Profile und Kombination von Smart Energy (SE) + Home Automation (HA)	19
Verwendung des ZigBee Smart Energy Profiles	20
Security des SE Profiles	20
Ergebnisse.....	21
Anforderungen an das System	21
Funktionale Anforderungen	21
Nichtfunktionale Anforderungen	22
Systemkomponenten	22
LoReMA Messknoten	22
LoReMA Koordinator	23
LoReMA Zentrale und Anzeigeeinheit.....	24
Funktionsablauf.....	25
Signalflussdiagramm	25
Bereitstellung der Energiemesswerte.....	27
Konzept der Energiemessung.....	27
Energiemesschip	27
Qualitätsziele	27
Messprinzip	27
Einfluss von Störgrößen.....	28
Schaltaktor	28
Komponentenwahl.....	28
Drahtloskommunikation.....	29
ZigBee Smart Energy Profile (SE Profile)	29
Evaluation eines passenden RF-Chips	29
ZigBee Devices	29
Netzwerkteilnehmer	29
Netzwerktopologie	30
SE Profile Cluster	30
Netzwerkaufbau.....	31
Zentrale	31
Aufbau der Firmware	31
Funktionsprinzip	32
Hardwareaufbau	34
Messknoten	34
Koordinator	34
Zentrale und Anzeigeeinheit.....	35
Gesamtsystem	35

Übersicht.....	35
Reaktionszeit und Echtzeitverhalten des Systems	35
Energieverbrauch	36
Validierung Messresultate	36
Lasterkennung mit NIALM Algorithmus	38
Verbraucherdatenbank.....	38
NIALM Algorithmustests	38
Prototyp im iHomeLab.....	41
Showcase-Aufbau im iHomeLab	41
Visualisierung	42
Schlussfolgerungen.....	43
Danksagungen	44
Symbolverzeichnis	46
Referenzen	46
Anhang A.....	47
Störeinflüsse und Netzurückwirkungen.....	47
Netzimpedanz.....	47
Netzurückwirkung	47
Normen und Richtlinien	48
Störeinflüsse auf das Versorgungsnetz.....	49

Zusammenfassung

Energie spielt eine zentrale und wichtige Rolle in unserem Leben. Aus heutiger Sicht wissen wir aber, dass die Energieressourcen immer knapper und teurer werden. Die meisten Privathaushalte sowie Nutzer von industriellen Gebäuden haben nur wenig oder gar kein Verständnis bezüglich ihres Energieverbrauchs und nur begrenzte Mittel diesen zu ermitteln, zu beurteilen oder zu optimieren. Konsumenten müssen sehen und verstehen, wie viel Energie von welchen Geräten verbraucht werden. Studien haben gezeigt, dass eine unmittelbare und detaillierte Visualisierung des Energieverbrauchs ein durchschnittliches Energiesparpotenzial von bis zu 5% in modernen Haushalten und Bürogebäuden bietet. Personen sind eher motiviert Energie zu sparen, wenn ihnen Informationen über ihren persönlichen Energieverbrauch zur Verfügung gestellt werden.

Das Projekt LoReMA hat zum Ziel, lückenlos von jeder einzelnen elektrischen Last in einem Gebäude den Energieverbrauch in Echtzeit zu erfassen, ohne Eingriff in den Verbraucher vorzunehmen oder jeden Verbraucher mit einer Messeinrichtung auszurüsten. Durch eine Visualisierung der aktuellen, präzisen und nach Verbrauchern aufgeschlüsselten Energieverbrauchszahlen, wird der Endanwender über seinen Energieverbrauch informiert und somit sensibilisiert. Ihm wird gezeigt, wie effizient bzw. ineffizient seine Gerätschaften und Aktivitäten sind. Gegebenenfalls kann er eine Strategie zur Effizienzsteigerung entwickeln und umsetzen.

Non – Intrusive Appliance Load Monitoring (NIALM) ist die Methode welche im Projekt LoReMA verwendet wird, um Informationen über den Energieverbrauch einzelner Geräte zu erheben. NIALM dient somit zur Lastaufschlüsselung und die Daten lassen sich einfach in Feedback-Systeme integrieren. Proof-of-Concept erfolgte anhand einer Prototypeninstallation am iHomeLab der Hochschule Luzern T&A.

Während der Realisierung des Projekts konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Aus den Recherchen ging hervor, dass verschiedene Universitäten und Institute am Thema NIALM forschen. Obwohl bereits lange an NIALM geforscht wird, erschweren fehlende Standards den Durchbruch zu massentauglichen Systemen. In Bezug auf die Realisierung wurde für die drahtlose Kommunikation zwischen den einzelnen Messknoten das Smart Energy Profile eingesetzt. Auch hier hat sich gezeigt, dass das Profil derzeit noch nicht für den Einsatz von NIALM vorbereitet ist. Die Übermittlung der sogenannten Electrical Fingerprints ist im Standard nicht beschrieben. Für die Energiemessung der Verbraucher wurde ein Energiemesschip eingesetzt. Die Funktionalität des SoC bot die Möglichkeit, die Fast Fourier Transformation für die Berechnung der Stromoberwellen bereits auf dem Chip vorzunehmen. Als Schaltaktor wurde ein bistabiles-mechanisches Relais eingebaut, da es derzeit das einzige Bauelement ist, welches die Anforderung der tiefen Leistungsaufnahme von LoReMA erfüllt. Des Weiteren hat die Miniaturisierung des Prototyps gezeigt, dass die gesamte Hardware eines Messknotens in einer Steckerleiste untergebracht werden kann.

Résumé

L'énergie joue un rôle central dans notre vie. En l'état actuel des choses, nous savons cependant que les ressources énergétiques ne cessent de se raréfier et de se renchérir. La plupart des ménages privés de même que les usagers de bâtiments industriels ont très peu de visibilité voire aucune visibilité sur leur consommation d'énergie et disposent de moyens limités pour la calculer, l'évaluer et l'optimiser. Les consommateurs doivent pouvoir connaître et comprendre quelle quantité d'énergie est consommée et par quels appareils. Les études ont montré qu'une visualisation immédiate et détaillée de la consommation énergétique permettait de dégager un potentiel d'économies d'énergie allant jusqu'à 5% dans les ménages et les immeubles de bureaux d'aujourd'hui. Les personnes sont plutôt motivées à l'idée d'économiser l'énergie, dès lors qu'elles disposent d'informations sur leur consommation personnelle d'énergie.

Le projet LoReMA a pour objectif d'enregistrer en temps réel et de façon continue la consommation énergétique de chaque charge électrique dans un bâtiment, sans être intrusif pour l'utilisateur ni équiper chaque usager d'un dispositif de mesure. Visualiser les chiffres effectifs, précis et détaillés par usage de la consommation d'énergie permet à l'utilisateur final d'être informé et sensibilisé au sujet. Il peut constater à quel point ses appareils et ses activités sont efficaces ou non. Le cas échéant, il peut élaborer et mettre en application une stratégie pour maximiser son efficacité énergétique.

Non – Intrusive Appliance Load Monitoring (NIALM) est la méthode qui est mise en œuvre dans le projet LoReMA pour collecter les informations sur la consommation d'énergie des différents appareils. NIALM sert ainsi à détailler les charges. Les données recueillies sont facilement intégrées dans des systèmes de feedback. La démonstration de faisabilité a eu lieu à l'aide d'un prototype installé dans le laboratoire iHomeLab de la Haute Ecole T&A de Lucerne.

La réalisation du projet a livré d'importants enseignements. Les recherches ont fait ressortir que la méthode NIALM faisait l'objet d'études dans divers universités et instituts. Or, malgré ce long passif de recherches, l'absence de normes rend difficile l'émergence de systèmes généralisables. S'agissant de la réalisation, c'est le Smart Energy Profile qui a été utilisé pour la communication sans fil entre les différents nœuds de mesure. Et ici aussi, il s'est avéré que le profil n'était pour l'instant pas encore prêt pour la mise en œuvre de la méthode NIALM. La transmission de ce qu'on appelle les empreintes digitales électriques n'est pas décrite dans la norme. C'est une puce de mesure d'énergie qui a été utilisée pour mesurer l'énergie consommée par l'utilisateur. Grâce à la fonctionnalité du SoC (système sur puce), on a pu appliquer, déjà sur la puce, l'algorithme de la Transformée de Fourier rapide pour le calcul des harmoniques du courant. Un relais bistable mécanique a été mis en place comme actionneur de commutation: en effet, c'est pour lors le seul composant capable de satisfaire les critères de basse consommation électrique du projet LoReMA. Par ailleurs, la miniaturisation du prototype a montré qu'il était possible de loger tout l'équipement matériel d'un nœud de mesure dans une barrette de connexion.

Summary

Energy plays a central and important role in our lives. Today we know that the energy resources are getting short and expensive. Most private households and users of industrial buildings have little or even no understanding about their energy consumption and limited possibilities to seek, judge and optimize it. Consumers have to see and understand how much energy is consumed by the different appliances. Possible savings of up to 5% in households and office buildings are feasible. Studies have shown that through direct and detailed visualisation of the energy consumption users are motivated to keep energy goals. People are even more motivated to save energy when information about their personal consumption is available.

The aim of the project LoReMA was to collect data about the consumption of every single electrical load in a building in real-time with altering the infrastructure. A visualisation shows the actual and precise energy consumption of the devices. The end user is informed and aware about his own energy consumption. By this means, the users see how efficient or inefficient their devices are. Goal is to motivate the end user to develop and implement his own energy efficiency strategy.

Non - Intrusive Appliance Load Monitoring (abbreviated as NIALM) is the enabling technology used to get the energy consumption information. Furthermore, NIALM is an enabler for feedback systems to provide real time, summarized and categorized data to the end-users. Proof of concept was a prototype installation at the iHomeLab, which is part of the University of Applied Sciences and Arts in Lucerne.

During the project important insights have been gained. Investigations showed that several universities and research institutes working on the topic of NIALM. Although several years of research in the topic, missing standards making the breakthrough of a mass appeal system difficult. The prototype includes wireless communication based on the Smart Energy Profile between the single measurement nodes. The ZigBee Profile is at the moment not prepared for being used for NIALM. The transmission of the so called Electrical Fingerprints is not supported from the standard right now. For the measurement of the electrical consumption of the appliances an energy measurement chip was used. The on chip features offered the possibility to calculate the Fast Fourier Transformation direct on the measurement node. To switch the loads, a bistable mechanical relay was used. It is the only device currently that meets the requirement of the low power consumption of LoReMA. Further, miniaturization of the prototype has shown that all of the hardware of a measurement node fits into a socket outlet.

Ausgangslage

Der Energieverbrauch wie auch die Energieressourcen spielen eine immer wichtigere Rolle. Die Energieressourcen werden immer knapper und teurer, trotzdem ist der Verbrauch weiterhin am Steigen. Damit verbunden kommt den Schlagwörtern wie Energieeffizienz und Energieeinsparung eine immer grössere Bedeutung zu. Die Gesellschaft ist sich dieser Problematik grösstenteils bewusst. In den nächsten Jahren bahnen sich bei der Produktion, Vermarktung, Verteilung und Verbrauch von Energie umwälzende Veränderungen an, die zum Teil schon heute begonnen haben. Dabei sind 3 grosse Trends zu beobachten:

- Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes
- Das Zusammenwachsen der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) mit den Energiethemen
- Klimaschutzmassnahmen und Energieeffizienzziele (Schweiz, EU, weltweit)

Diese Trends bieten viel Potenzial für neue Entwicklungen, insbesondere auch im Bereich der Energieeffizienz. So haben Studien gezeigt, dass eine unmittelbare und detaillierte Visualisierung des Energieverbrauchs ein durchschnittliches Energiesparpotenzial von 5-15% in modernen Haushalten und Bürogebäuden ermöglichen. Während der Projektlaufzeit machten EKZ, CKW und EWZ Zahlen aus Pilotprojekten bekannt, welche ein reales Sparpotential von lediglich 2-3% zeigen. Die Informationen welche dem Benutzer zur Verfügung gestellt werden, können in die einzelnen Verbrauchergruppen wie Licht, Heizung /Klima, Weisswaren, Heimelektronik kategorisiert werden. Dies bietet dem Benutzer die Möglichkeit, mehr über seinen Energieverbrauch zu erfahren.

Gemäss der aktuellen Schweizerischen Elektrizitätsstatistik [2] betrug der Stromverbrauch in der Schweiz im Jahr 2010 an die 60TWh. Rund ein Drittel davon (31.2%) fiel auf private Haushalte. Im Zuge der Erarbeitung nach Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz hat man hier ein nicht unerhebliches Sparpotenzial identifiziert. Es soll in erster Linie durch folgende Massnahmen ausgeschöpft werden:

1. Ineffiziente Geräte identifizieren und durch effizientere Geräte ersetzen
2. Geräte und Dienste nur dann betreiben, wenn sie wirklich benötigt werden
3. Den Verbrauch im Betrieb im Sinne der Energieeffizienz optimieren
4. Änderung der generellen Gewohnheiten, um einen hohen Verbrauch zu vermeiden

Die meisten Privathaushalte sowie Nutzer von industriellen Gebäuden, haben nur wenig oder gar kein Verständnis bezüglich Ihres Energieverbrauchs und nur begrenzte Mittel diesen zu beurteilen und zu optimieren. Konsumenten müssen sehen und verstehen, wie viel Energie die einzelnen Geräte verbrauchen. Sie sind gespannt, ob ein neues Gerät oder die Änderung von Gewohnheiten den Energieverbrauch beeinflusst. Die stündlichen Energiemesswerte des Hauptzählers in industriellen Gebäuden und Privathaushalten können den Effekt oder das Muster einzelner Geräte nicht unterscheiden. Auch kleine Laständerungen sind nicht zu detektieren. Konsumenten haben ein Anrecht, zu wissen, wann und wie viel Energie die einzelnen Geräte verbrauchen.

Non – Intrusive Appliance Load Monitoring (abgekürzt als NIALM) ist die Technologie welche benutzt wird, um detaillierte Informationen zum Energieverbrauch zu erhalten. Weiter ist NIALM ein Bereitsteller für Feedback-Systeme, um in Echtzeit dem Endnutzer zusammengefasste und kategorisierte Daten zur Verfügung zu stellen. Erhöhter Energieverbrauch von Geräten, Alterung und veraltete Geräte können identifiziert werden. Nachdem Geräte identifiziert und bewertet wurden, können unterstützende Vorschläge an den Endverbraucher gemacht werden, um ihm bei der Entwicklung der eigenen Energieeffizienzstrategie zu helfen.

Durch die aktuelle Ressourcenentwicklung sowie der Energiepolitik, versuchen stetig mehr Firmen auf den vielversprechenden Zug der Energieeffizienz aufzuspringen. Dementsprechend drängen Immer mehr Produkte auf den Markt, die dem Benutzer beim Energiesparen helfen sollen. Der grosse Durchbruch wurde bisher aber noch nicht geschafft. Insbesondere das Fehlen von Standards macht die Entwicklung aufwendig und schwierig.

Problemstellung

Wie gross das allgemeine Energiesparpotenzial in Gebäuden ist, zeigen ein paar Statistiken der Schweizerischen Energie-Stiftung [5 & 6]:

- **Der Schweizer Gebäudepark beansprucht rund 50% des Energieverbrauchs:** Die ungefähr zwei Millionen Gebäude in der Schweiz bestehen zu rund 60% aus Wohnbauten und zu 40% aus Dienstleistungs- sowie öffentlichen Bauten.
- **Jährliches Sparpotenzial von 3.3 Mia. kWh (500 Mio. Franken) bei Beleuchtungen:** Mit dem konsequenten Einsatz von Stromsparlampen und effizienteren Beleuchtungssystemen, können mindestens 3.3 Mia. kWh oder Stromkosten von 500 Mio. Franken pro Jahr eingespart werden. Das ist mehr als das AKW Mühleberg produziert.
- **Insgesamt gut sechs Milliarden kWh Standby-Verluste:** Eine Untersuchung der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz (S.A.F.E.) hat den Standby-Stromverbrauch und die Leerlaufverluste von Büro- und Haushaltgeräten, künstlicher Beleuchtung sowie Geräten der Unterhaltungselektronik auf die ganze Schweiz hochgerechnet. Das Ergebnis: Zwei Mia. kWh pro Jahr. Dies entspricht 8% des gesamten Stromverbrauchs im Haushaltsektor oder einem Jahresstromverbrauch von rund 300'000 Haushalten. Doch das ist erst ein Teil des Stromleerlaufs. Die Standby- und Leerlaufverluste von elektrischen Geräten in Gewerbe, Dienstleistung, Industrie und Infrastrukturanlagen ergeben schätzungsweise nochmals rund vier Mia. kWh. Dieser ganze Stromleerlauf - auch «Betrieb ohne Nutzen» genannt - entspricht in der Summe der jährlichen Stromproduktion der zwei AKWs Mühleberg und Beznau I.
- **Ineffiziente Geräte im Haushalt:** Ein weiteres grosses Einsparpotential ist der Einsatz von effizienten Geräten im Haushalt. Ein Blick auf die „topten“ www.topten.ch. Webseite lässt schnell erahnen, wie viel dadurch eingespart werden kann. Ein ineffizienter Gefrierschrank der Klasse B zum Beispiel, verbraucht bereits doppelt so viel Energie pro Jahr wie ein Modell der Klasse A++.

Das Projekt LoReMA geht davon aus, dass durch Eigeninitiative der Bewohner von Privathaushalten ein nicht unerheblicher Teil dieser Energie eingespart werden kann. Doch den meisten Konsumenten fehlt das Bewusstsein für ihren persönlichen Energieverbrauch und somit die Motivation, Energie zu sparen. Woher sollten sie auch wissen, welche Geräte im Haushalt wie viel Energie benötigen und ein Gefühl dafür bekommen, welche „zu viel“ verbrauchen und wo man am besten sparen könnte.

LoReMA versucht nun diese Lücke zu schliessen. Der Bewohner soll mit einem System für seinen Energieverbrauch sensibilisiert werden. Mit dieser Massnahme wird dem Bewohner eines Privathaushalts bewusst, wie effizient oder ineffizient sein Energiekonsumverhalten ist. Damit soll er angeregt werden, auf seinen Energieverbrauch zu achten und wenn möglich Massnahmen zur Energieeinsparung zu treffen.

Ziel der Arbeit

Ziel des LoReMA Projekts ist es, lückenlos von jeder einzelnen elektrischen Last in einem Gebäude den Energieverbrauch in Echtzeit zu erfassen, ohne Eingriff in den Verbraucher vorzunehmen. Das Submetering von LoReMA ist in der Netzzuleitung zu den Geräten, z.B. in der Steckdose, einem Zwischenstecker oder einer Steckerleiste eingebaut. Die Erforschung und Entwicklung dieser massentauglichen „intelligenten“ Steckdose soll mithelfen, die Energieeffizienz im Haushalt zu steigern. Mit einem geeigneten System zur Energiemessung und einer aufschlussreichen Visualisierung, welche aktuelle und präzise nach Verbrauchern aufgeschlüsselte Energieverbrauchszahlen liefert, soll der Benutzer für seinen Energiehaushalt sensibilisiert werden. Eine Schaltaktorik erlaubt des Weiteren Automatisierungsfunktionen. So können ganze Lastgruppen (Zimmerbeleuchtung, Heimelektronik oder Weisswaren) geschaltet werden. Die Inbetriebnahme und Erweiterung

des Systems soll denkbar einfach sein, da die einzelnen Steckdosen drahtlos miteinander kommunizieren.

Die Entwicklung der Hard- und Firmware für die funkgesteuerte intelligente Steckdose erfolgt nach folgenden Merkmalen:

- Präzise Energiemessung mit schneller Abtastung erlaubt Lastaufschlüsselungsalgorithmen mit Erkennung der Last mittels Signatur
- Drahtlose Kommunikation basierend auf dem ZigBee Smart Energy Profile
- Schaltfunktion bis 10A
- Miniaturisierung der Hardware zur Integration in eine Steckdose
- PC-basierten Zentrale zur Steuerung und Visualisierung der Messdaten

Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine intensive Recherche zum Thema NIALM durchgeführt. Mit der wissenschaftlichen Recherche soll der Stand der Forschung im Bereich der Lasterkennung sowie der Lastaufschlüsselung analysiert werden.

Nachfolgende Abbildung zeigt das Gesamtsystem von LoReMA. Die wichtigsten Komponenten sind: der Messknoten in der Steckdose, der Koordinator, die Zentrale und die Anzeigeeinheit zur Visualisierung.

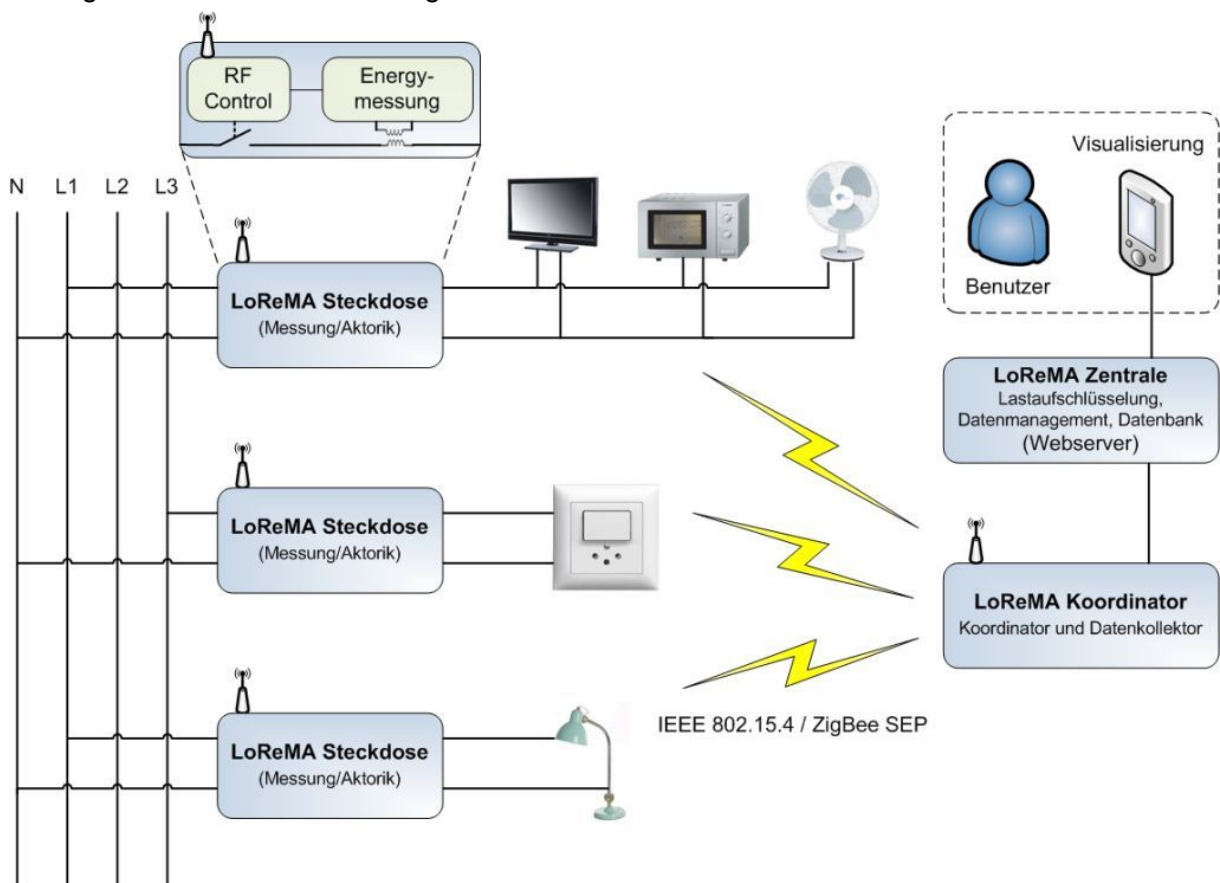


Abbildung 1: Gesamtsystem LoReMA

Methode

Das Projekt umfasst vier Phasen: Am Anfang steht die Konzeptphase, diese dient der Anforderungen und der Design-Spezifikation. In der zweiten Phase geht es um die schrittweise Systementwicklung. Dabei werden sowohl die drahtlose Kommunikation, die Energiemessung wie auch der Schaltaktor der Steckdose entwickelt. In einer weiteren Phase folgt die Entwicklung eines intelligenten und zuverlässigen NIALM Algorithmus zur Erkennung der elektrischen Verbraucher. Die letzte Phase vor der Verifikation des

Gesamtsystems bilden die Gesamtintegration aller Systemkomponenten und der damit verbundene der Bau von 10 Prototypen der LoReMA Steckdose.

LoReMA soll den Besuchern im iHomeLab durch einen Showcase nähergebracht werden.

Für die Realisierung des LoReMA Systems wurden nachfolgende Workpackages definiert.

Arbeitspaket	Inhalt
WP1: Anforderungen und Systemkonzept	<p>Die genauen Anforderungen an die LoReMA Infrastruktur erarbeiten und dokumentieren. Welche Anwendungsfälle sollen abgedeckt werden? Welche Messdaten werden für die Auswertung benötigt? Was sind die funktionalen sowie nichtfunktionalen Anforderungen (z.B. Reaktionszeiten, Datendurchsatz, externe Schnittstellen usw.)?</p> <p>Aufgrund der Anforderungen an das System eine Architektur entwerfen und spezifizieren. Eine kostengünstige Umsetzung steht dabei im Vordergrund. Aus diesem Grund soll die intelligente Steckdose die Messdaten nur so weit auswerten (und somit komprimieren), dass eine Übertragung zur Zentrale möglich wird.</p>
WP2: Drahtloskommunikation	<p>In einem ersten Schritt die ZigBee Technologie im Hinblick auf die LoReMA-Anwendung untersuchen. Das Ziel ist es, möglichst Standardkonform zu bleiben. Was also bietet ZigBee und sein Smart Energy Profile bereits? Was davon will man unterstützen, was nicht? Müssen Erweiterungen für zusätzliche Messwerte vorgesehen werden? Reicht die Übertragungsbandbreite?</p> <p>In einem zweiten Schritt sind die Systemaspekte zu untersuchen. Wie kann das ZigBee Netzwerk einfach aufgebaut werden? Welche Parameter müssen zwingend konfiguriert werden? Wie soll der Lifecycle eines solchen Netzwerks aussehen (Vorbereitung, Installation, Inbetriebnahme, Konfiguration, Bedienung, Stromausfall, Wartung, Reparatur)? Schliesslich soll eine ZigBee Hardwareplattform evaluiert und als Basis für einen Laboraufbau mit drei Funkknoten eingesetzt werden. Mit Hilfe dieses Aufbaus sollen erste Test zur Verifikation der ZigBee Funktionalität für LoReMA durchgeführt und dokumentiert werden. Dazu wird auch eine PC-basierte Zentrale entwickelt, welche bei den folgenden Arbeitspaketen gemäss den Anforderungen erweitert wird.</p>
WP3: Energiemessung	<p>In diesem Arbeitspaket geht es darum, die detaillierte Energiemessung zu konzipieren und aufzubauen. Man definiert die Rahmenbedingungen (Messdaten, Messintervalle, Präzision, Lasttypen, Eigenverbrauch etc.) und sucht nach möglichst einfachen und günstigen Möglichkeiten, die Messung umzusetzen. Als Basis soll ein Messchip von Landis+Gyr (L+G) verwendet werden. Ein Laboraufbau soll die Funktionstauglichkeit der Messeinrichtung zeigen und deren Konformität mit den zuvor spezifizierten Anforderungen sicherstellen. Sollte sich zeigen, dass der L+G Chip diese Anforderungen nicht erfüllen kann, muss nach Alternativen gesucht werden. In dieses Paket gehört auch die Auswertung der Messdaten, um eine effiziente Kommunikation zu ermöglichen. Die PC-basierte Zentrale wird zur Energiemessung und Visualisierung erweitert. dQ/dP Diagramme erlauben eine Beurteilung der Eignung für ereignisbasierte NIALM Algorithmen.</p>
WP4: Schaltaktor	<p>WP4 befasst sich mit dem Schalten von elektrischen Lasten. Dazu wird ein elektronischer Leistungsteil geplant und umgesetzt. Dieser soll einerseits den in WP1 spezifizierten elektrischen Anforderungen entsprechen und andererseits in seiner Bauform – unter Berücksichtigung thermischer Aspekte – relativ klein gehalten werden. Ein Laboraufbau soll auch hier die Funktion des Konzepts beweisen (Proof-of-Concept). Die PC-basierte Zentrale wird erweitert, um eine Steuerung des Schaltaktors zu</p>

	ermöglichen.
WP5: Integration und Steckdosenbau	In WP5 werden die in den WP2...WP4 entstandenen Laboraufbauten in einem umfassenden Konzept integriert und umgesetzt. Konnte das Zusammenspiel von Kommunikation, Messung und Lastschaltung auf dem Labortisch gezeigt und Lastwechsel-Ereignisse ausreichend genau erkannt werden, wird die eigentliche LoReMA Hardware für den Steckdosen-Prototyp entworfen. Schliesslich wird die daraus entstandene finale Schaltung in einem Layout umgesetzt und 10 solcher LoReMA Steckdosen gebaut und getestet.
WP6: Zentrale und NIALM	Nachdem die Hardware bereit steht und integriert wurde, folgt die Erweiterung der Zentrale. Diese soll eine einfache grafische Auswertung ermöglichen. Des Weiteren werden einfache NIALM Algorithmen entworfen und auf der Zentrale implementiert sowie getestet. Es werden einfache, charakteristische im iHomeLab vorhandene Verbraucher eingebunden (Bsp.: Sparlampe und Kühlschrank) und der Versuch unternommen, diese mit verschiedenen Verfahren möglichst zuverlässig zu erkennen und zu identifizieren. Ist es auch möglich verschiedene Verbraucher, die an derselben LoReMA Steckdose angeschlossen sind, zuverlässig zu erkennen? Zur Kontrolle werden gleichzeitig eine Teilmessung und eine Summenmessung gemacht.
WP7: Prototyp	Das Netzwerk, bestehend aus 10 LoReMA Steckdosen-Prototypen, wird in Betrieb genommen und an die PC-basierte Zentrale gebunden. Dieses Netzwerk wird schliesslich in das iHomeLab integriert und als Datenlieferant für die Energievisualisierung des bereits implementierten MEGA-Showcase dienen.
WP8: Verifikation und Abschluss	Das System wird anhand der Anforderungen verifiziert und das Projekt mit einem Bericht abgeschlossen.

Recherche

Evaluation Energiemess-Device

Für die Energiemessung in der Steckdose wurde ein passendes Energiemess-Device evaluiert, welches die Anforderungen von LoReMA am besten erfüllt. Im allgemeinen wird zwischen einem Energiemesschip (SoC) und einem Energiemess-IC unterschieden. Die Wahl des Devices hatte auch starken Einfluss auf die System-Architektur. Bei einem Energiemess-IC muss die Messwertverarbeitung und Aufbereitung auf einen zusätzlichen Chip ausgelagert werden, was eine 3-Chip Lösung zur Folge hat (Energiemessung + Verarbeitung + RF-Frontend). Dies bedeutet mehr Aufwand in der Kommunikation zwischen den einzelnen Chips. Ein SoC bietet die Möglichkeit, die Messwerte auf dem Chip zu verarbeiten.

Die Marktrecherche hat folgende möglichen Devices für die Energiemessung hervorgebracht.

Energiemesschips

- TERDIAN: 72M65xx
- Analog Devices: ADE5169
- TI: MSP430F47x3
- Microchip: PIC18F87J72

Energiemess-IC's

- Landis+Gyr: MMI3
- Microchip: MCP3906A
- Analog Devices: ADE7763
- ST Microelectronics: STPM01
- IDT: 90E21/22/23/24
- CIRRUS LOGIC: CS5463

Zu den wichtigsten Kriterien für die Wahl des richtigen Devices zählten:

- **Evaluations-Board:** Um schnell die ersten Energiemesswerte sammeln zu können, sollte das Device über ein Evaluations-Board verfügen. Idealerweise verfügt es zusätzlich über eine Demo-Software, um den Einstieg zu erleichtern.
- **Hohe Abtastung und Ausgabe der Samples (Waveform):** Um den Lastgang eines Verbrauchers detailliert aufnehmen zu können, ist eine genügend hohe Abtastrate notwendig. Anhand des Shannon-Abtasttheorems beträgt diese für LoReMA $\geq 1.2\text{kHz}$ (Sampling bis zur 11. Stromoberwelle reicht für Haushaltsgeräte). Des Weiteren sollten die aktuellen Strom- und Spannungssamples aus den internen Registern herausgelesen werden können.
- **Versorgungsspannung $\leq 3.3\text{V}$:** Aufgrund der maximalen Standby Verlustleistung der Steckdose von 300mW , war das Ziel ein System mit 3.3V Versorgungsspannung zu realisieren.

Die Auswertung der Kriterien hat gezeigt, dass der Energiemesschip ADE5169 von Analog Devices als geeignetste Lösung für die Entwicklung des LoReMA Systems ist. Gegenüber einem Energiemess-IC können Teile der Messwertaufbereitung und -auswertung auf dem Energiemesschip implementiert und berechnet werden, so zum Beispiel die Stromoberwellen. Der ADE5169 ermöglichte es einfach und schnell an erste Energiemesswerte zu kommen. Dies war möglich Dank des Evaluations-Board und der dazugehörigen Evaluations-Software. Darüber hinaus kann der Chip mit 3.3V betrieben werden und ist mit einem Energieverbrauch von $\sim 15\text{mW}$ auch tief in seiner Leistungsaufnahme.

NIALM

Advanced Metering Infrastructures (AMI) sind integrierte Systeme, die Energiedaten messen, sammeln und verarbeiten. Mit NIALM werden Softwarealgorithmen bezeichnet, die anhand

der gemessenen Energiedaten eine Lasterkennung durchführen. Ziel ist, die einzelnen an das Stromnetz angeschlossenen Verbraucher zu identifizieren. Eine mögliche Identifikation erfolgt über die Analyse elektrischer Parameter, wie beispielsweise die Wirkleistung, die Blindleistung oder die Stromoberwellen. Jeder Verbraucher besitzt seine eigenen individuellen elektrischen Charakteristiken. Anhand der Schaltmuster beim Schalten und den einzelnen Zuständen der Verbraucher, auch „Fingerprint“ oder „Signatur“ genannt, lassen sich Lastprofile der einzelnen betriebenen Geräte erstellen, mit deren Hilfe die NIALM Algorithmen die einzelnen Geräte identifizieren.

In den vergangenen 30 Jahren wurden verschiedener Ansätze der NIALM Algorithmen entwickelt. Die Hauptunterschiede liegen in:

- Art und Anzahl der Messgrößen
- der Häufigkeit bzw. zeitlichen Auflösung der Messung
- der Vielfalt der zu erkennenden Verbraucher

Die ersten NIALM Systeme wurden Anfang der 90er in den USA am Massachusetts Institute of Technology (MIT) unter Federführung von George W. Hart entwickelt. Hart's Lasterkennung basierte damals auf der Erkennung der Steady-State-Wechsel während den Ein- und Ausschaltphasen. Dieses Verfahren der Identifikation wird „Event Based“ genannt. Weitere Verfahren der Identifikation sind: „Non Event Based“ und „High Frequency“.

Ein Teil der heute existierenden Methoden verwenden zweidimensionale Signaturen-Räume, mit dem aktiven und reaktiven Leistungsanteil (ΔP - ΔQ Ebene), für die Lasterkennung. Die Kombination durch die dritte Harmonische des Stromes (3.Oberwelle) ermöglicht die Lastaufschlüsselung in einem dreidimensionalen Koordinatensystem (vgl. Abbildung 2 als Beispiel). Diese Erweiterung bietet speziell für nichtlineare Lasten eine genauere Bestimmung der Last. Weiter Oberwellen können zur Lasterkennung zugezogen werden. Der ansteigende Speicherbedarf ist jedoch zu berücksichtigen. Für die Lasterkennung von elektrischen Geräten im Haushalt sind die ersten 11 Stromoberwellen ausreichend.

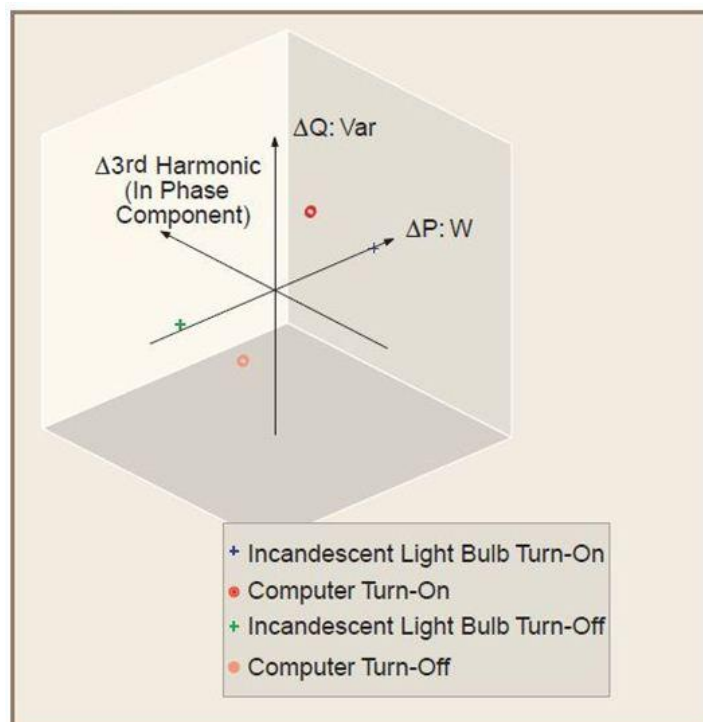


Abbildung 2: Beispiel eines NIALM Systems: Ein Computer und eine Reihe von Glühlampen in einem dreidimensionalen Koordinatensystem mit den Größen ΔQ , ΔP und der $\Delta 3rd$ harmonischen [10].

In den vergangenen 20 Jahren ist die Anzahl der nichtlinearen Verbraucher (z.B getackete Netzteile) im Haushalt stark angestiegen, und somit auch der Anteil der höheren Oberwellen. Diese Nichtlinearität macht das Erkennen der Verbraucher deutlich schwieriger und ist mit der klassischen ΔP - ΔQ Signatur alleine nicht mehr möglich. Neue Lösungswege müssen

erarbeitet werden. Lösungswege könnten hier, wie bereits erwähnt, die Auswertung der Stromoberwellen oder die Transienten-Verläufe der einzelnen Verbraucher sein.

Die unterschiedlichen Methoden zur Lasterkennung, setzen meist ein spezifisches Datenset für die Messwerte voraus. Im nachfolgenden Unterkapitel wird auf diese Verfahren und die benötigten Datensets eingegangen:

Datenerfassung

- **Wirk- und Blindleistung (PQ):** Die Auswertung der Wirk- und Blindleistung ist die älteste und am meisten verwendete Signatur für die Lasterkennung.
- **Stromkurve (Waveform) (CW):** Die Stromkurve liefert den vollständigen Satz an Informationen, um das Lastverhalten des Verbrauchers zu beschreiben. Die Datentiefe ist abhängig von der Abtastrate des Signals.
- **Stromoberwellen (HAR):** Mit einer Fast Fourier Transformation des Stromsignals können die einzelnen Stromoberwellen des Verbrauchers berechnet werden.
- **Instantaneous Admittance Waveform (IAW):** IAW ist definiert als der Quotient zwischen der momentanen Strom- und Spannungskurve: $IAW = \frac{i(t)}{v(t)}$.
- **Momentanleistung (IPW):** IPW ist definiert als das Produkt zwischen dem Momentanstrom und der Momentanspannung: $IPW = i(t) * v(t)$.
- **Eigenwert (EIG):** Dynamische Verbraucher sind schwieriger zuerkennen als Single-State oder Multi-State Verbraucher. Die Stromkurve eines dynamischen Verbrauchers, wie zum Beispiel einer Waschmaschine, kann von Messung zu Messung ändern. Um diese Dynamik zu erfassen, wird der momentane Strom (Waveform) in Form einer Matrix angeordnet, damit eine Analyse des Eigenwertes dieser Zeitreihe gemacht werden kann.
- **Switching Transient Waveform (STW):** Alle zuvor erwähnten Methoden basieren auf stabilen Zuständen der Endgeräte. Dieses Verfahren wertet die Transiente des Einschaltvorgangs aus. Dieses ist auch eine gute Signatur, um das Lastverhalten zu messen. Eine Möglichkeit könnte sein, die momentane Leistung jeder Halbwelle zu berechnen und die resultierende Leistungskurve (Waveform) als STW zu verwenden. Es ist auch möglich, direkt die einzelnen Samples der Waveform zu benutzen. STW benötigt eine hohe Samplerate. Dies wiederum erfordert eine hohe Speicher- sowie Rechenleistung. Als zusätzliche Erschwernis kommt die hohe Reaktionszeit des Messsystems dazu, denn es muss der Einschaltvorgang der Last aufgezeichnet werden.

Algorithmen

Mit den gesammelten Daten müssen nun die Verbraucher eindeutig identifiziert werden. Nachfolgend werden die heute bekannten Techniken vorgestellt, welche für die Lastaufschlüsselung mit NIALM Algorithmen verwendet werden:

- **Least Square (Methode der kleinsten Quadrate):** Least Square ist das mathematische Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung. Dabei wird zu einer Datenpunktwolke (Samples) eine Kurve gesucht, die möglichst nahe an den Datenpunkten verläuft. So kann beispielsweise die Stromkurve aus den einzelnen Samples berechnet werden. Least Square bedeutet, dass man nach einer Lösungskurve sucht, bei der die Summe der Abweichungen im Quadrat jedes einzelnen Samples am kleinsten ist. Dies ermöglicht es, eine Transienten-Signatur mit den Kurven in einer Datenbank zu vergleichen, um den richtigen Verbraucher zu eruieren. Das Verfahren dazu wird Maximum-Likelihood-Schätzung genannt (siehe Maximum-Likelihood-Schätzung).
- **Support Vector Machines (SVM):** Support Vector Machines können in neuronalen Netzwerken verwendet werden, um Signaturen zu erkennen. Im Allgemeinen ist SVM

ein Konzept in der Statistik sowie Numerik, welches für die Klassifizierung verwendet wird. Dabei handelt es sich um eine Reihe von verwandten und überwachten Lernmethoden, welche Daten analysieren und Muster erkennen.

- **Integer Programmierung:** Eine weitere Technik welche in NIALM Algorithmen verwendet wird, ist die Integer Programmierung. Integer Programmierung ist ein mathematisches Machbarkeit- oder Optimierungsprogramm in welchem einige oder alle Variablen auf ganze Zahlen beschränkt sind. Dies kann die Basis für eine Methode sein, welche den Zustand eines Verbrauchers schätzt.
- **Fuzzy-Logik:** Fuzzy-Logik ist eine weitere Methode, welche in NIALM Algorithmen zur Mustererkennung verwendet wird.
- **Künstliche Neuronale Netzwerke (ANN):** Eine weitere Möglichkeit der Signatuererkennung sind Algorithmen, welche auf künstlichen neuronalen Netzwerken basieren. Diese Algorithmen sind komplex, bieten aber ein grosses Potenzial mit vielen Möglichkeiten.
- **Genetische Algorithmen (GA):** Genetische Algorithmen sind eine Art der stochastischen Suchverfahren. Diese versuchen auf der Basis von einer oder mehreren Lösungen (Punkt im Lösungsraum) Schritt für Schritt die richtige Lösung zu finden. Genauere GA's gehören zu den heuristischen Optimierungsverfahren.

Entscheidungsmechanismen

Neben den verschiedenen Modellen und Techniken für die NIALM Algorithmen, werden auch unterschiedliche Entscheidungsmechanismen verwendet:

- **Most Common Occurance (MCO):** Dieser Entscheidungsmechanismus wählt den am meisten aufgetretenen Verbraucher in der Datenbank. Für den Berechnungsmechanismus ist dies die Ausgabe mit den geringsten Anforderungen, da nur die Gesamtzahl der Stimmen in der Datenbank gezählt werden muss. Zu beachten ist, dass aufgrund der Tatsache, dass der Entscheidungsindex eine Ganzzahl ist, die Chance eines Gleichstands relativ hoch ist. Beispielsweise können zwei Verbraucher die gleiche Menge an Stimmen haben.
- **Least Unified Residue (LUR):** Bei diesem Verfahren wählt der Mechanismus den Verbraucher mit dem kleinsten einheitlichen Rest. LUR ist ein Vergleich zwischen einer unbekanntem Signatur und einer Signatur aus der Datenbank.
- **Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE):** In der Statistik ist die Maximum-Likelihood-Schätzung ein Verfahren zum Schätzen der Parameter in einem statistischen Modell. In einem NIALM System wird die Berechnung benutzt, um die grösste Übereinstimmungswahrscheinlichkeit mit einem Gerät in der Datenbank zu bestimmen. Diese Technik kann sehr gut für die Mustererkennung verwendet werden.
- **Factorial Hidden Markov Model (FHMM):** Das Hidden Markov-Modell ist ein statistisches Modell bei dem angenommen wird, dass das System welches modelliert wird ein Markov Prozess mit unbeobachteten (hidden) States ist. Das Modell ist eine Methode, um eine Aufschlüsselung zu machen. In der Praxis wird jeder Verbraucher in einem Haus über ein Hidden Markov Model beschrieben und jeder Verbraucher hat zu jedem Zeitpunkt einen verborgenen Zustand.

Die nachfolgende Abbildung 3 fasst die beschriebenen Methoden zusammen.

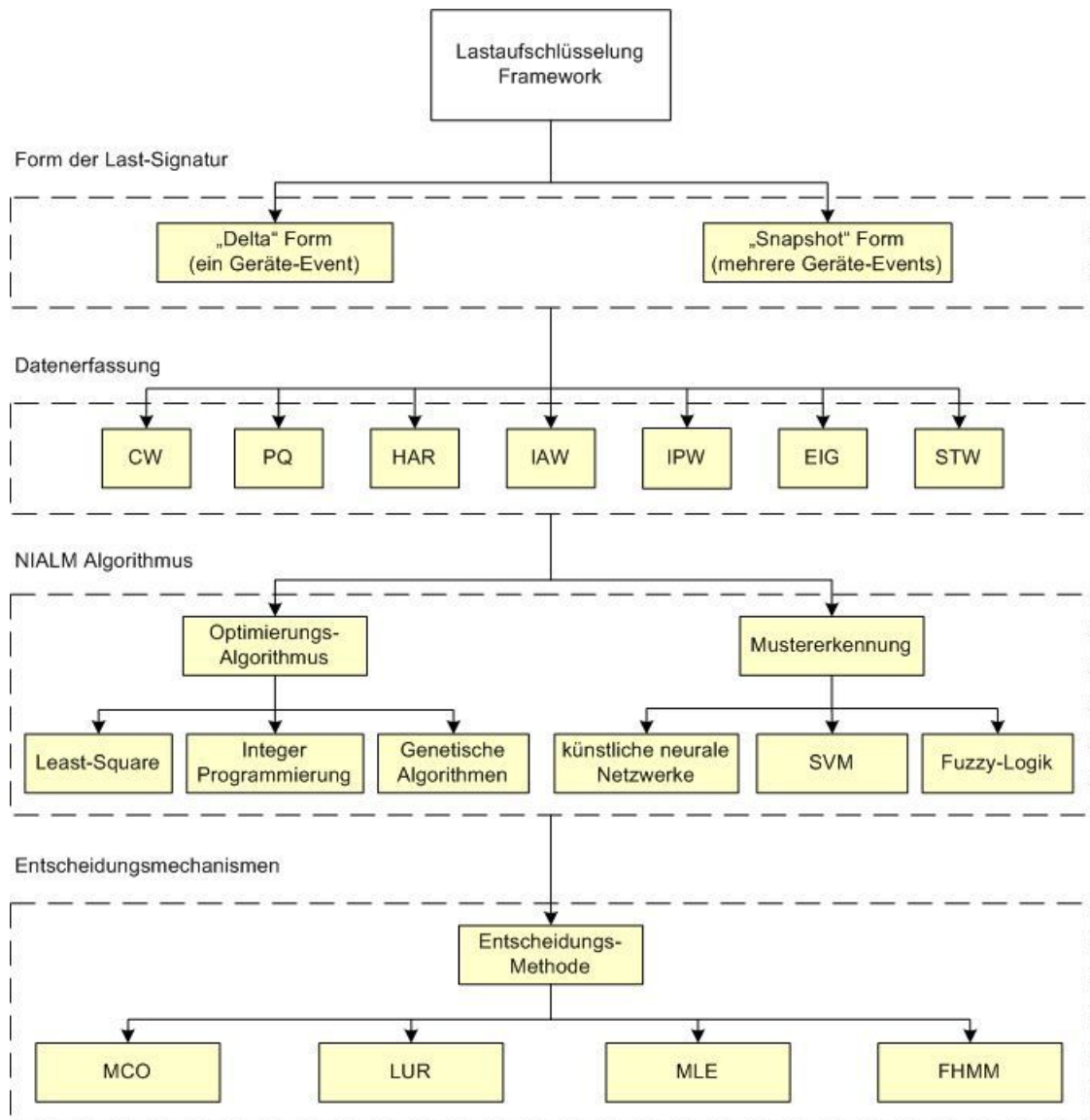


Abbildung 3: Lastaufschlüsselung Framework

Verbrauchertypen

Verbraucher können verschiedene Betriebszustände haben. Damit die Lasten dennoch eindeutig identifiziert werden können, müssen die verschiedenen Zustände bekannt sein. Nachfolgend werden die verschiedenen Verbrauchertypen eines Haushalts aufgelistet.

□ Permanent



□ ON/OFF



□ Multi-State



□ Variabel



Die Schwierigkeit der Lasterkennung steigt vom ON/OFF Betriebszustand zum variablen an. Die permanenten Betriebszustände sind mit NIALM Systemen nicht oder nur schwer zu erkennen.

Allgemeine Problemstellung der Lasterkennung

Bis jetzt wurden die theoretischen Aspekte der Lastererkennung aufgezeigt. Um Lasten präzise und effizient zu erkennen, können jedoch Probleme und Hürden auftreten:

- Wie wird mit Verbrauchern umgegangen, die falsch oder gar nicht erkannt werden?
- Verbraucher im Standby-Betrieb können nur schwierig oder gar nicht voneinander unterschieden werden.
- Störungen oder Rauschen auf dem Netz erschweren die Lasterkennung.
- Es gibt viele Lasten mit individuellen Schaltmustern (Signaturen). Wie viele kann man davon abdecken und erkennen im Haushalt?
- Verbraucher mit vielen Betriebszuständen (z.B. Waschmaschine) sind schwer zu erkennen.
- Lasten mit ähnlichen Zustandsänderungen brauchen feinere Algorithmen oder getrennte Messungen.
- Fluktuationen im Netz von bis zu 10% können die Messungen verfälschen.
- Neue Haushaltsgeräte werden evtl. nicht erkannt, da noch keine Lastprofile von ihnen vorliegen.

Geräte die sehr schwer durch NIALM identifiziert werden können, lassen sich wie folgt beschreiben:

- Geräte mit einem sehr kleinen Energieverbrauch
- Geräte die immer ON sind
- Fortlaufend veränderliche Geräte (variable Lasten)

Sehr kleine Verbraucher können schwer detektiert werden, da ihr Energieverbrauch im Rauschen untergeht. Geräte die immer ON sind lassen sich schwer identifizieren, da eine eindeutige Signatur fehlt (kein Einschaltvorgang vorhanden).

Forschung im Bereich NIALM an anderen Institutionen

Während der letzten 20 Jahre gab es grosse Fortschritte im Forschungsgebiet NIALM. Ein Wegbereiter für diesen Fortschritt ist die Verfügbarkeit von günstiger Rechenleistung. Der Preis für Computer sank und die Grösse der Chips wurde in diesem Zeitraum ebenfalls deutlich kleiner. Die Rechenleistung ist ausschlaggebend, um die elektrischen Charakteristiken der Geräte im Detail zu analysieren. Zusätzlich steigt in der Gesellschaft der

Wunsch nach smarten Lösungen um den Energiefluss generell zu verstehen und gleichzeitig zu optimieren. Nach den schweren Unfällen im Energiesektor, wie der Kernschmelzen in Tschernobyl und Fukushima, aber auch durch Blackouts, wie zum Beispiel das Blackout 2003 in Nordamerika, hat sich das Bewusstsein der Menschen zur Energie verändert. Regierungen investieren Millionen um die Netzstabilität und die Versorgung der Bevölkerung sicher zu stellen. Sobald die Energiepreise wegen der Energieknappheit steigen, werden sich die Leute fragen, wie sie den eigenen Energieverbrauch reduzieren können. Diese Faktoren begünstigen die Forschung im Bereich NIALM.

Seit den Anfängen von NIALM in den 1990er Jahren am MIT haben verschiedene Universitäten und Institute wie die Carnegie Mellon Universität aus Pittsburgh (USA), das Fraunhofer Institut für nachhaltige Energiesysteme (USA), die Hochschule Furtwangen (D) oder die Universität Brüssel am Thema gearbeitet. Die Aufzählung ist nicht vollständig, da noch weitere Institutionen in diesem Bereich forschen.

Wie in den vorherigen Unterkapiteln beschrieben wurde, gibt es verschiedene Verfahren und Methoden, Geräte zu identifizieren. Aus den Recherchen ging hervor, dass beispielsweise das Fraunhofer Institut und die Universität Brüssel beide den Ansatz der zentralen Energiemessung verfolgen. In LoReMA wird dezentral in jeder einzelnen Steckdose gemessen. In Brüssel versucht man anhand des Lastgangs der Wirkleistung und einer Eventdetektion eine Lasterkennung durchzuführen. Das Fraunhofer Institut in den USA verfolgt derzeit zwei verschiedene Ansätze. Einer beruht ebenfalls auf der Auswertung des Lastgangs der Wirkleistung und zielt auf eher grössere Verbraucher. In einer zweiten Stossrichtung werden die Messsignale mit einer Abtastrate von bis zu 100kHz abgetastet. Dadurch können die Stromkurven der Verbraucher sehr detailliert aufgezeichnet werden. Der Nachteil ist die grosse Datenmenge die erzeugt und analysiert wird. Aus diesem Grund handelt es sich hierbei ausschliesslich um einen Laboraufbau, mit welchem verschiedene Möglichkeiten der Lasterkennung geprüft werden (z.B. Transienten oder hochfrequente Stromoberwellen). Unsere Erkenntnis ist, dass sich die Anforderungen von unserem Projekt LoReMA mit den Ansätzen beider Institute nicht erfüllen werden. Mit einer zentralen Energiemessung ist die geforderte detaillierte Lastaufschlüsselung nicht möglich. LoReMA verwendet des Weiteren zusätzliche Parameter wie die Blindleistung und die Stromoberwellen zur Lasterkennung. Eine hohe Abtastrate wie beim Fraunhofer Institut ist aufgrund der Zielsetzungen Low-Power, Low-Cost und der Absicht, das System in eine Steckdose zu integrieren, nicht möglich.

Im Allgemeinen verfolgen die Universitäten die Zielsetzung der lückenlosen Identifikation der Endgeräte. Dem „geführten“ Lernen oder „selbständigem“ Erkennen der Endgeräte wird wenig Aufmerksamkeit geschenkt. In diesem Punkt sind die Erwartungen gross, dass Datenbanken mit genormten Energie-Fingerprints die Lücke schliessen können.

ZigBee Kommunikation

Für die drahtlose Kommunikation zwischen den Steckdosen und dem Koordinator wird der Kommunikationsstandard ZigBee verwendet.

ZigBee Profile und Kombination von Smart Energy (SE) + Home Automation (HA)

Im Workpackage der ZigBee Kommunikation wurden sowohl das Smart Energy Profile als auch das Home Automation Profile für die Verwendung in LoReMA geprüft. Der Wunsch war, das Beste aus beiden Profilen zu verwenden und die beiden Profile miteinander zu kombinieren. Es hat sich gezeigt, dass die Kombination nach ZigBee Standard nicht möglich ist. Die Kombination der beiden Profile würde den ZigBee Standard verletzen, Grund sind die unterschiedlichen Security-Levels der ZigBee Profile. Diese Erkenntnis hat zum Projektentscheid geführt, ausschliesslich das SE Profile zu verwenden.

Verwendung des ZigBee Smart Energy Profiles

Die nähere Betrachtung des ZigBee Smart Energy Profiles hat gezeigt, dass das Profile derzeit nicht für den Einsatz von NIALM Systemen ausgelegt ist. Es gestattet die Übertragung der Wirkleistung. Die Blindleistung und die Stromoberwellenwerte können nicht in einer definierten Struktur übertragen werden. Diese Tatsache war der Auslöser, dass das iHomeLab in Zusammenarbeit mit Landis+Gyr ein Amendment zur Erweiterung des SE Profiles mit den NIALM Electrical Fingerprints ausgearbeitet hat. Dieses wurde anschliessend an die ZigBee Organisation weitergeleitet und ist dort in Bearbeitung. Ersten Informationen zu Folge wurde bereits über die Aufnahme der NIALM Electrical Fingerprints in der ZigBee Organisation abgestimmt und dieser auch angenommen. Aktuell ist ein erster Draft des SE Profile Standards mit der Erweiterung der Electrical Fingerprints in Überarbeitung.

Security des SE Profiles

Die nutzerbezogene Betrachtung des Security Standards des SE Profile hat gezeigt, dass die Security zu komplex ist und einem einfachen Installationsprozess entgegensteht. Der Prozess der Verschlüsselung und das Austauschen der Schlüssel inklusive die Kommunikation mit dem Thrust Center sind viel zu umständlich.

Für den Erfolg eines Systems wie LoReMA ist es notwendig, dass Vereinfachungen vorgenommen werden.

Ergebnisse

Anforderungen an das System

Dieses Kapitel definiert die Anforderungen an das LoReMA System, wie sie aus der Zielsetzung des Projekts hervor gehen. Es wird zwischen funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen unterschieden.

Funktionale Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen legen fest, was das System können muss.

Tabelle 1: Funktionale Anforderungen

Nr.	Funktionale Anforderung
fA 1	Die LoReMA Messknoten erfüllen folgende Anforderungen: <ul style="list-style-type: none">• Schaltfunktionalität für die angeschlossenen Verbraucher (ON/OFF) Pmax 2000W• Energiemessung der Verbraucher mit folgenden Parametern:<ul style="list-style-type: none">○ Wirkleistung○ Blindleistung○ Grundwelle des Stroms I1 (50Hz)○ Stromoberwellen I3 – I11 (150Hz – 550Hz → nur die ungeraden)• Plug'n'Play Funktionalität für Installation und Netzwerkaufbau
fA 2	Der Koordinator besitzt folgende Anforderungen: <ul style="list-style-type: none">• Datenkollektor der Energiemesswerte (Weiterleitung an die Zentrale).• Schnittstelle zwischen Zentrale und Messknoten• ZigBee Netzwerkaufbau
fA 3	Die Zentrale besitzt folgende Anforderungen: <ul style="list-style-type: none">• Lasterkennung der angeschlossenen Verbraucher• Datenbankmanagement• Aufbereitung der Energiemesswerte für die Visualisierung
fA 4	Die Anzeigeeinheit besitzt folgende Anforderungen: <ul style="list-style-type: none">• Anzeige des aktuellen Energieverbrauchs• Anzeige der erkannten Lasten
fA 5	Das ZigBee Netzwerk besitzt folgende Anforderungen: <ul style="list-style-type: none">• Drahtlose ZigBee Kommunikation zwischen den einzelnen Devices (Messknoten, Koordinator)• Verwendung des SE Profile• Mesh-Netzwerk Topologie
fA 6	Dem Benutzer stehen folgende Bedienmöglichkeiten zur Verfügung: <ul style="list-style-type: none">• Anzeige der erkannten Lasten• Funktionalität um Lasten zu schalten• Manuelle Freigabe zum Netzwerkaufbau (Koordinator lässt Messknoten dem Netzwerk beitreten)

Nichtfunktionale Anforderungen

Die nichtfunktionalen Anforderungen legen fest, welche Eigenschaften das System haben soll.

Tabelle 2: Nichtfunktionale Anforderungen

Nr.	Nichtfunktionale Anforderung	Parameter / Richtgrösse / Eigenschaft
Gesamtsystem		
nfA 1.1	Reaktionszeit des Systems (messen, verarbeiten, übermitteln)	~1s
nfA 1.2	Anzahl Messknoten (Prototyp)	10
Messkonzept		
nfA 2.1	Messgenauigkeit/Messabweichung	+/- 1W
nfA 2.2	Messparameter	P, Q und Waveform-Samples (V und I)
Messknoten		
nfA 3.1	Max. Verlustleistung (Standby-Betrieb)	< 300mW
nfA 3.2	Max. Schaltlast (Strom)	10A (Laststrom)
nfA 3.3	Max. Verbraucherlast	2.3 kW (bei 10A, 230V)
Zentrale und Anzeigeeinheit (Laptop/PC)		
nfA 4.1	Anschauliche Visualisierung des aktuellen Energiehaushalts	

Systemkomponenten

Das LoReMA System besteht aus 4 Hauptkomponenten: den Messknoten, dem Koordinator, der Zentrale (Webserver) und der Anzeigeeinheit.

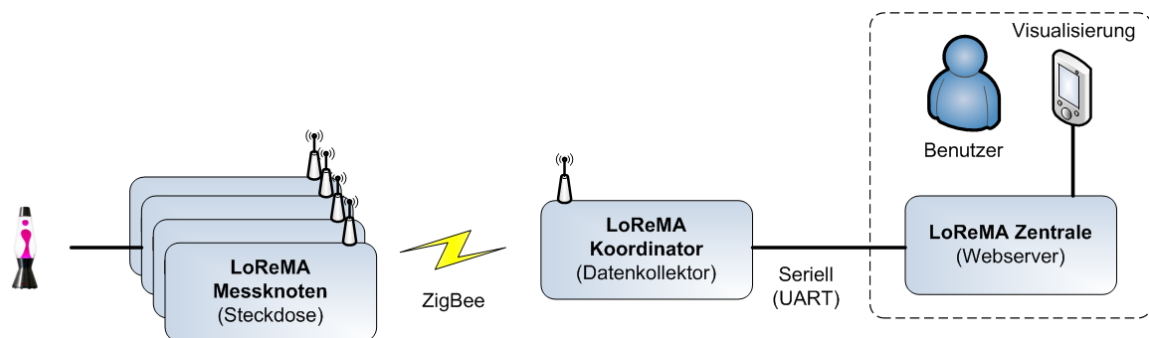


Abbildung 4: Übersicht der Systemkomponenten

LoReMA Messknoten

Der LoReMA Messknoten ist eine kleine Hardware mit integriertem Energiemesschip, welcher in eine Wandsteckdose oder einen Zwischenstecker eingebaut werden kann. Derartige LoReMA Steckdosen sollen die herkömmlichen Steckdosen in einem Gebäude ersetzen.

Kernaufgaben des LoReMA Messknoten

- Präzise und detaillierte Energiemessung (Parameter: P, Q sowie Stromgrund- und Oberwellen I1 – I11)
- Übermittlung der Energiemesswerte über das ZigBee Netzwerk
- Schaltfunktion via Fernsteuerung (ON/OFF)

LoReMA Zentrale und Anzeigeeinheit

Die gesammelten Energiemesswerte werden mittels NIALM-Algorithmen analysiert und so die Lasterkennung durchgeführt. Die ermittelten Resultate werden anschliessend auf der Zentrale aufbereitet und für die Visualisierung bereitgestellt. Da die Zentrale als Webserver eingerichtet ist, ermöglicht sie die Visualisierung auf jedem browserfähigen Gerät (z.B. PC oder Smartphone). Weiter bietet Sie dem Benutzer die Möglichkeit, die einzelnen Steckdosen individuell zu schalten.

Aufgaben der LoReMA Zentrale

- Lasterkennung mittels NIALM-Algorithmen
- Verwaltung der Verbraucherdatenbank
- Speicherung der Energiemesswerte
- Datenaufbereitung zur Visualisierung der Energiemesswerte
- Bietet eine Schaltfunktionalität für die einzelnen Steckdosen

Aufgaben der LoReMA Anzeigeeinheit

- Visualisieren des Energiehaushalts
- Bietet dem Benutzer eine Interaktionsmöglichkeit mit der Schaltfunktion

Funktionsablauf

Signalflussdiagramm

Wie der Signalfluss und das Laufzeitverhalten von der Energiemessung bis zur Lasterkennung aussieht, verdeutlicht nachfolgende Abbildung.

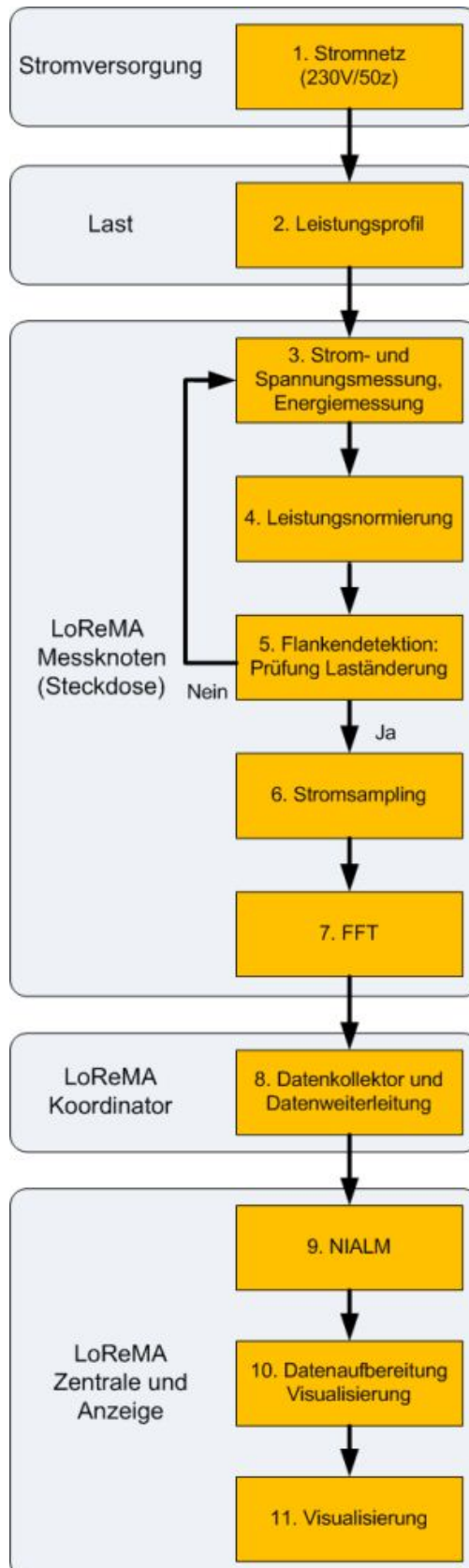


Abbildung 7: Signalflussdiagramm

Erläuterungen

1. Stromnetz 230V

Der Verbraucher wird am 230V Stromnetz angeschlossen.

2. Leistungsprofil

Der Verbraucher erzeugt das für ihn typische Lastprofil.

3. Spannungs- und Strommessung, Sampling

Durch die Laständerung im Netz wird die Messung von Stroms und Spannung getriggert. Der Energiemesschips berechnet die RMS Werte sowie die Wirk- und Blindleistung der Last.

4. Berechnung der Leistungsnormierung

Mit Hilfe der Leistungsnormierung werden Spannungsschwankungen im Netz ausgeglichen, damit keine falsche Messung erfolgt.

5. Flankendetektion

Die normierte Leistung ist der Eingang für den Flankendetektions-Algorithmus, welcher die Grösse und den Zeitpunkt der einzelnen Zustandsänderungen ermittelt und daraus eine Laständerung detektiert. Nun muss festgestellt werden ob das System bereits eingeschwingen ist oder eine weitere Messung nötig ist.

6. Stromsampling

Mittels Stromsampling werden die Strommesswerte (Waveform) für die anschliessende Fast Fourier Transformation (FFT) gesammelt.

7. FFT

Nachdem eine Flanke (Laständerung) detektiert wurde, werden die Stromsamples einer Periode aufgenommen und die FFT-Berechnung von diesen Werten durchgeführt. Ziel ist, die ersten 11 Stromoberwellen (nur die ungeraden) zu ermitteln.

8. Datenkollektor und Datenweiterleitung

Die von den Messknoten über das ZigBee Netzwerk verschickten Energiemesswerte werden vom Koordinator gesammelt und zur Zentrale weitergeleitet. Der Koordinator dient als Datenkollektor sowie Zwischenpuffer und ist zuständig für die Netzwerkverwaltung.

9. NIALM Algorithmus

Mit einem NIALM Algorithmus wird auf der Zentrale die Lasterkennung durchgeführt. Dies ermöglicht die Identifikation des spezifischen Verbrauchers und die Zuweisung des aktuellen Energieverbrauchs.

10. Datenaufbereitung Visualisierung

In der Zentrale werden die Energiemesswerte sowie die erkannten Lasten für die Visualisierung vorbereitet. Um die Daten auf einem browserfähigen System anzeigen zu können, ist in der Zentrale ein Webserver integriert.

11. Visualisierung

Um dem Benutzer den aktuellen Energieverbrauch ansprechend visualisieren zu können, werden die Energiemesswerte einfach und verständlich auf einer Anzeigeeinheit dargestellt.

Bereitstellung der Energiemesswerte

Das Laufzeitverhalten der LoReMA Messknoten lässt sich vereinfacht in 5 Hauptfunktionen unterteilen:

1. Trigger auf die Laständerung (P und Q)
2. Einschwingprozess bis das System im Steady-State ist
3. Sampling der Messsignale
4. FFT Berechnung der Stromsamples (Berechnung der Stromoberwellen)
5. Datentransfer zur Zentrale

Der Prozess zur Bereitstellung der Energiemessdaten wird in nachfolgender Abbildung verdeutlicht. Der unbekannte Verbraucher wird anhand seines „Fingerprints“ in der Zentrale erkannt..

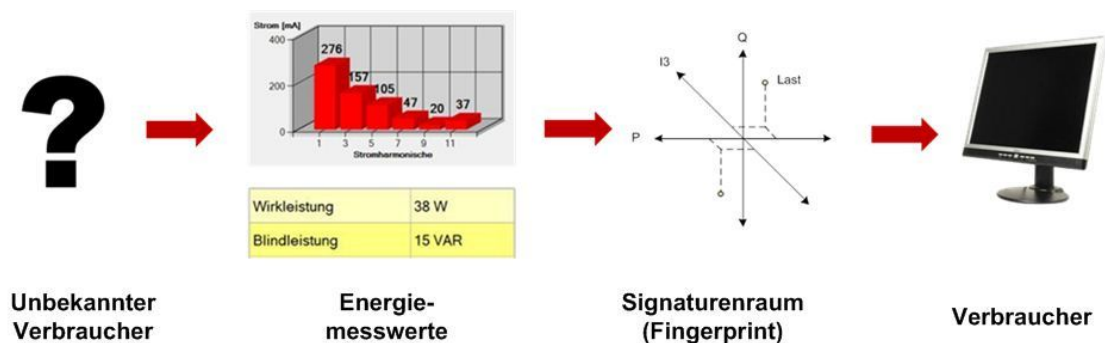


Abbildung 8: Bereitstellung der Energiemesswerte

Konzept der Energiemessung

Energiemesschip

Eine Nutzwertanalyse basierend auf den Systemanforderungen hat gezeigt, dass der Energiemesschip ADE5169 von Analog Devices der geeignetste Energiemesschip für die Entwicklung der LoReMA Steckdose ist.

Qualitätsziele

Das Messsystem hat zum Ziel, Lasten im Range von 2 – 2.3kW (10A, 230V) messen und erkennen zu können.

Messprinzip

Übersicht

Bei der Energiemessung werden das Strom- sowie das Spannungssignal über die ADC-Eingänge des Energiemesschips abgetastet (Waveform-Samples). Über interne Register kann auf die verschiedenen Energiemesswerte (P, Q, Waveform-Samples) zugegriffen werden, was anschliessend auch die Berechnung der Stromoberwellen über eine FFT ermöglicht.

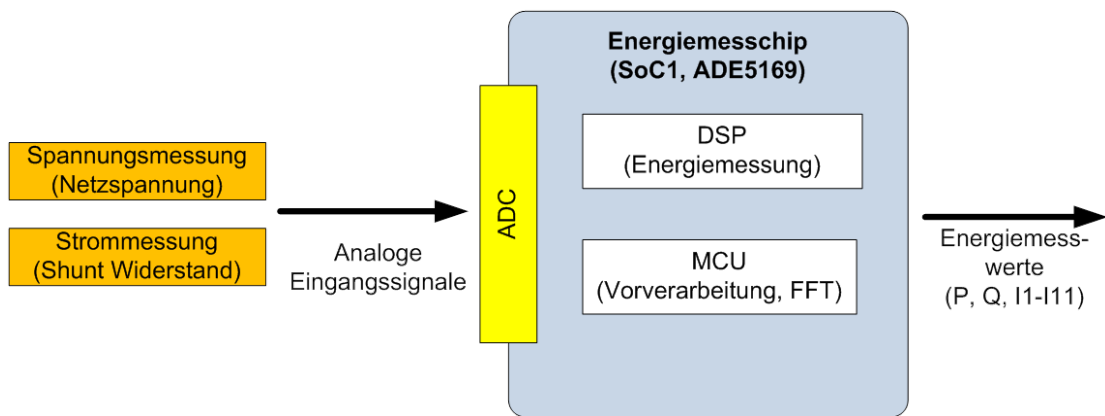


Abbildung 9: Messprinzip Energiemessung

Spannungsmessung

Die 230V Netzspannung wird direkt über einen Spannungsteiler an einen ADC-Eingang des Energieschips angeschlossen

Strommessung

Der Stromfluss wird mittels Shunt-Widerstand ermittelt und auch an einem ADC-Eingang gemessen. Mit dieser Spannung wird intern der effektive Stromfluss berechnet.

Signalabtastung

Die Signalabtastung erfolgt mit einer Sample-Rate von 3.2kHz. Bei einer Periodendauer von 20ms (50Hz) ergibt dies 64 Samples pro Periode

Einfluss von Störgrößen

Die Energiemessung ist von verschiedenen Störeinflüssen und Netzurückwirkungen abhängig. Verbraucher welche ans Versorgungsnetz angeschlossen werden, verursachen Rückwirkungen auf das Netz da diese die Netzimpedanz verändern. Zu den Störeinflüssen gehören unter anderem Frequenzschwankungen, Spannungsänderungen, Oberschwingungen sowie Überspannungen oder Spannungseinbrüche. Im Anhang A wird näher auf die einzelnen Störgrößen sowie Netzurückwirkungen eingegangen.

Schaltaktor

Bei der Analyse nach einer passenden Aktorik für den Messknoten wurden verschiedene Lösungsansätze untersucht. Derzeit kann einzig ein bistabiles-mechanisches Relais die Anforderung der tiefen Standby-Verlustleistung von <300 mW erfüllen. Nachteilig ist, dass für den Steuerimpuls eine Impulsleistung von 200-250mW aufgebracht werden muss. Diese Schaltleistung ist aber nur kurzzeitig nötig. Das bistabile Relais ist empfindlich gegen mechanische Schocks, diese können den Zustand des Relais beeinflussen. Eine softwaremässige Überwachung hilft das Problem zu lösen. Halbleiterlösungen haben das Problem, dass die Verlustleistung bei einem Laststrom von bis zu 10A in der Steckdose nicht abgeführt werden kann. Normale mechanische Relais dagegen haben eine zu grosse Leistungsaufnahme im Haltekreis.



Komponentenwahl

- Bistabiles-mechanisches Relais PE014F03
- Schaltstrom: 5A

Abbildung 10: Schaltaktor PE014F03

Drahtloskommunikation

ZigBee Smart Energy Profile (SE Profile)

Die Recherche zur ZigBee Kommunikation zeigte dass ausschliesslich das Smart Energy Profile verwendet wird. Das SE Profile gestattet aber lediglich die Übertragung der Wirkleistung. Blindleistung und komplexe Stromoberwellenwerte können nicht untergebracht werden. Um nun in LoReMA die Electrical Fingerprints übertragen zu können, wurde ein adaptiertes SE Profile implementiert.

Evaluation eines passenden RF-Chips

Die Evaluation verschiedener RF-Chips hat den CC2530 (bzw. CC2531) von TI als geeigneten Funk-Chip für die ZigBee-Kommunikation hervorgebracht. Gründe dafür sind ein niedriger Preis, der robuste ZigBee Stack, das Vorhandensein eines Evaluation-Boards und das bereits vorhanden Know How am iHomeLab.

ZigBee Devices

Die Funktionalität des Systems wird mit drei logischen Smart Energy Devices realisiert:

Energy Service Portal (ESP, auch ESI genannt)

Jedes Smart Energy HAN besitzt ein ESP. In einem ZigBee Netzwerk bildet das ESP die Schnittstelle nach aussen (in LoReMA wird diese nicht verwendet). In LoReMA nimmt das ESP die Funktionalität des Koordinators war.

Metering Device

Das Metering Device misst und zeichnet unter anderem den Energieverbrauch auf und schickt diesen zum ESP. Von dort gelangen sie zur Zentrale für die weitere Verarbeitung.

Load Control Device

Mit dem Load Control Device lässt sich eine Last schalten. Dies ermöglicht dem Messknoten den Aktor zu steuern.

Bemerkung: Das Metering Device sowie auch das Load Control Device befinden sind auf einem physikalischen Device im Messknoten.

Netzwerkteilnehmer

Das ZigBee Netzwerk besteht aus einem Koordinator, den Routern sowie den End-Devices. Die Messknoten können entweder als Router oder als End Devices konfiguriert werden. Ein Messknoten welcher als End Device konfiguriert ist, besitzt die gleichen LoReMA Funktionalitäten wie ein Messknoten welcher als Router konfiguriert ist. Der Unterschied liegt in der ZigBee Funktionalität und im Energieverbrauch. Da ein End Device in den Sleep-Mode wechseln kann, ein Router aber nicht, verbraucht dieses weniger Energie. Der Router erfüllt die wichtige Funktion das Netzwerk mittels Mesh-Funktionen zu erweitern.

Der Koordinator nimmt im Netzwerk die Funktionalität des ZigBee Koordinators war. Die Hauptaufgaben sind:

- Netzwerkkonfiguration
- Kanalwahl
- Zuweisung der Knoten ID's (Short-Adressen)

Netzwerktopologie

Die Netzwerktopologie des Systems entspricht einem ZigBee Mesh-Netzwerk.

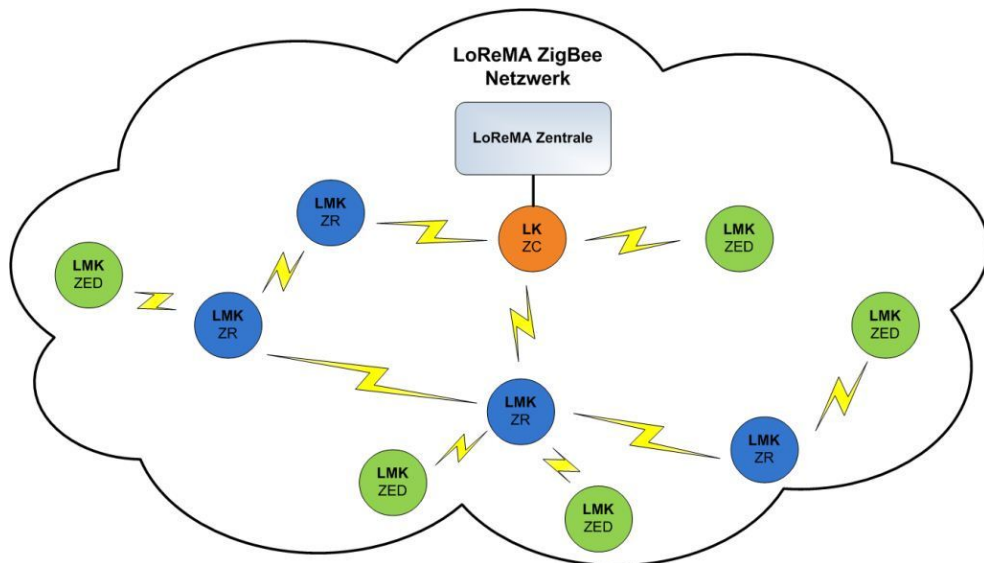


Abbildung 11: LoReMA ZigBee Mesh-Netzwerk

Legende: LMK = LoReMA Messknoten, LK = LoReMA Koordinator, ZR = ZigBee Router, ZED = ZigBee End Device, ZC = ZigBee Koordinator

SE Profile Cluster

Die einzelnen logischen Devices kommunizieren untereinander in sogenannten ZigBee Clustern. Dabei basiert die Kommunikation nach dem Server-Client Prinzip. Die Cluster der einzelnen logischen Devices sind über Endpoints (EP) miteinander verknüpft.

Im ZigBee Smart Energy Profile werden sowohl obligatorische wie auch optionale Cluster definiert. Mit welchen Clustern das LoReMA System kommuniziert, ist auf Abbildung 12 ersichtlich. Die wichtigsten sind dabei das „**Simple Metering**“ für die Übermittlung der Energiemesswerte und das „**Demand Response and Load Control**“ für das Schalten des Schaltaktors.

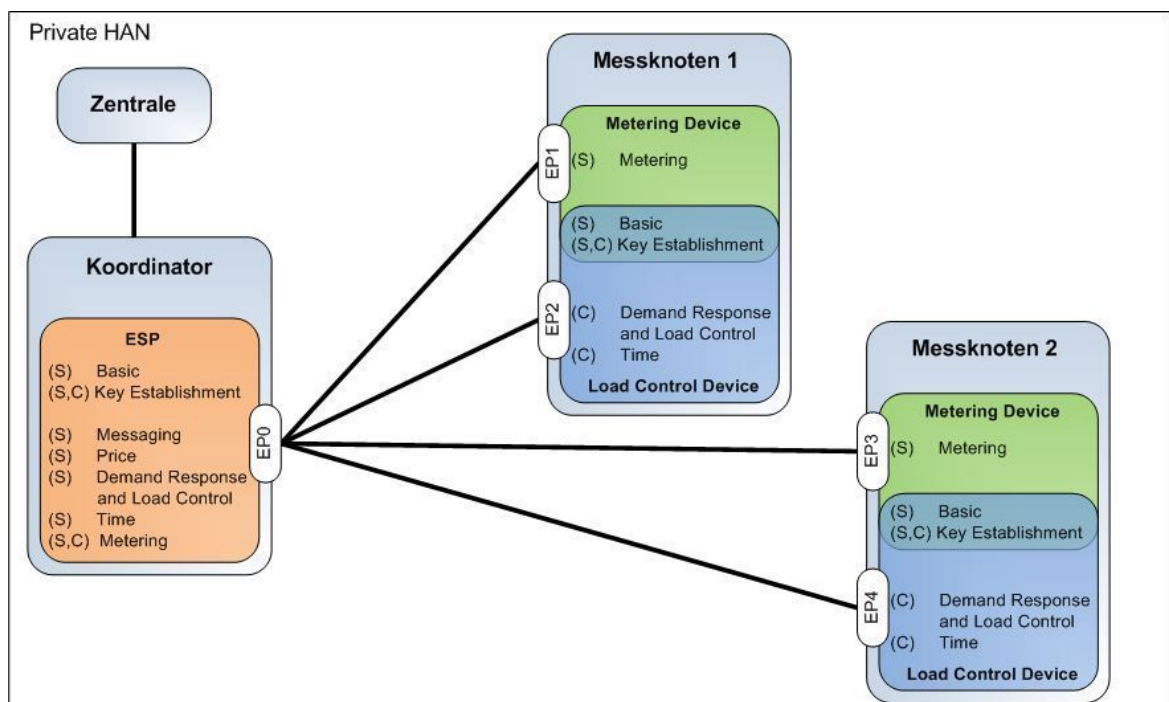


Abbildung 12: LoReMA Cluster (SE Profile)

Netzwerkaufbau

Der Koordinator wird vorweg zum ZigBee Koordinator bestimmt und ist für den Netzwerkaufbau zuständig. Sobald er das ZigBee Netzwerk konfiguriert hat (PAN ID, Kanal), kann das Netzwerk aufgebaut werden. Nach dem Betätigen eines Buttons beim Koordinator gibt dieser das Netzwerk für eine bestimmte Zeit frei, damit sich die Messknoten bei ihm anmelden können. Dies geschieht über ein BACON, welches der Koordinator versendet. Nach Ablauf dieses Zeitintervalls ist das Netzwerk wieder geschlossen und keine weiteren Messknoten können sich mehr anmelden. Weitere Messknoten können erst wieder nach erneutem Betätigen des Buttons dem Netzwerk beitreten. Durch diese Freischaltung des Netzwerks wird die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein falscher Messknoten im Netzwerk anmeldet, auf ein Minimum reduziert.

Die Routing-Tabellen des Koordinators sowie der Router bleiben auch nach einem allfälligen Stromausfall erhalten und erlauben einen einfachen und schnellen „Recovery-Prozess“.

Zentrale

Die Zentrale erfüllt folgende Aufgaben:

- Datenverarbeitung der empfangenen Messdaten
- Lastaufschlüsselung (NIALM)
- Verwaltung der Verbraucherdatenbank
- Aufbereitung der Daten für die Visualisierung
- Webserver-Funktionalität
- Bereitstellung der Schaltfunktionalität

Aufbau der Firmware

Das Firmware Design basiert auf einer Layer-Struktur. Der Datenaustausch zwischen den einzelnen Layer erfolgt über einen Event-Broker. Dies ermöglicht das einfache Austauschen einzelner Funktionsblöcke, ohne dass die ganze Software angepasst werden muss (Loose-Coupling).

Abbildung 13 zeigt die Design Struktur der Zentrale. Ersichtlich sind die verschiedenen Layer, welche in Ihrer Funktion unabhängig voneinander arbeiten.

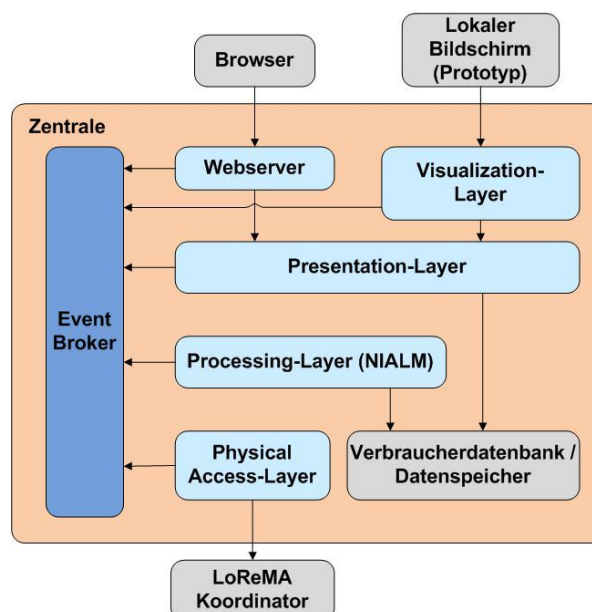


Abbildung 13: Design Struktur der Zentrale (Firmware)

Bemerkung: Die Pfeile in der Abbildung zeigen ausschliesslich die Abhängigkeit der einzelnen Blöcke untereinander und haben nichts mit der Kommunikation an sich zu tun.

Funktionsprinzip

Event Broker

Übermittlung der Daten zwischen den Layern: Für die Übermittlung der Daten zwischen den einzelnen Layern werden Events verwendet. Mittels dieser Events stellen die Layer Ihre Daten zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Wer diese Daten benötigt, kann sich auf den entsprechenden Events abonnieren.

Physical Access-Layer

Empfang der Daten: Über die UART Schnittstelle werden die Daten vom Koordinator empfangen und an den Physical Access-Layer weitergeleitet. Dort werden die Daten aufbereitet und über einen Event dem Processing-Layer zu Verfügung gestellt.

Processing Layer (NIALM)

Lastaufschlüsselung mit NIALM Algorithmus: In LoReMA ist der NIALM Algorithmus einfach gehalten und funktioniert nach dem „best-match“ Prinzip. Die erhaltenen Energiemesswerte werden mit der internen Verbraucherdatenbank verglichen. Der Verbraucher mit der grössten Übereinstimmung wird als erkannter Verbraucher ermittelt. Bedingung ist, dass er einen gewissen Threshold-Wert (aktuell 85%) der Übereinstimmung erreicht. Der erkannte Verbraucher wird anschliessend über einen Event dem Presentation-Layer zur Verfügung gestellt.

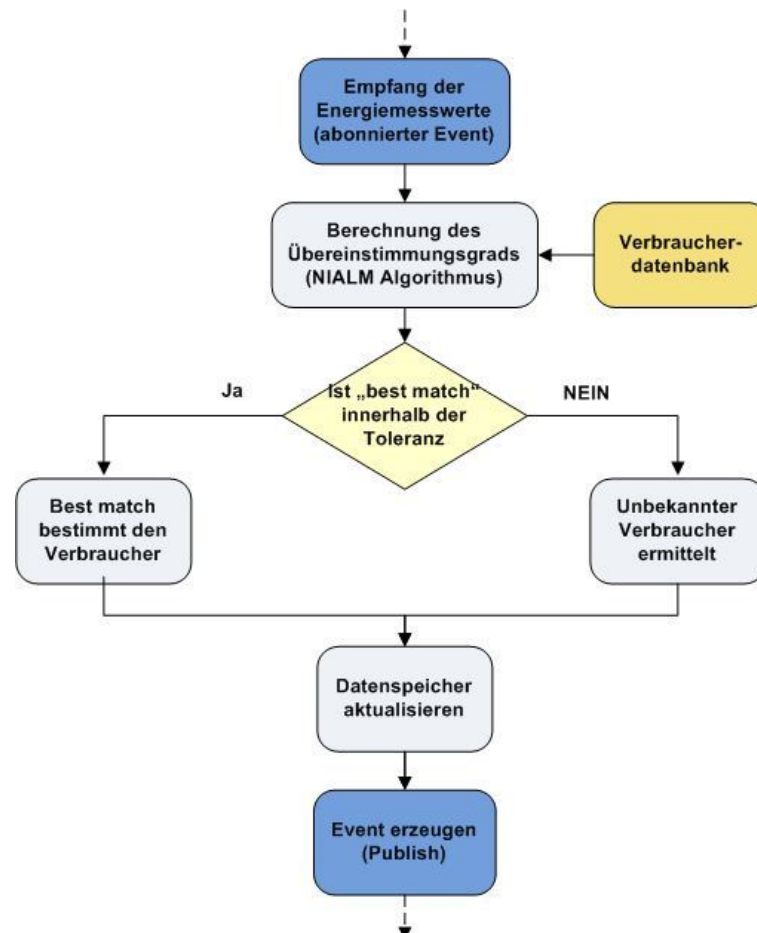


Abbildung 14: NIALM Algorithmus

Presentation-Layer

Aufbereitung der Daten für die Visualisierung: Der Layer ist für die Aufbereitung der Energiemesswerte, sowie der anderen Daten welche visualisiert werden, verantwortlich. Der Webserver, wie auch der Visualization-Layer, abonnieren sich auf den Event des Presentation-Layer, um unmittelbar über einen neu erkannten Verbraucher informiert zu werden.

Visualization-Layer

Bereitstellung der Daten für den lokalen Bildschirm: Der Visualization-Layer stellt dem Bildschirm des LoReMA Systems die Daten für die Visualisierung zur Verfügung.

Webserver

Bereitstellung der Energiemesswerte für den Browser: Für die Bereitstellung der Daten zur Visualisierung auf einem browserfähigen System ist auf der Zentrale ein Webserver integriert. Mit Hilfe dieses Webserver können die Energiemesswerte auf jedem browserfähigen System angezeigt werden. Auch der Schaltaktor kann über den Webserver angesteuert werden. So ist es beispielsweise möglich, mit einem Smartphone die einzelnen Steckdosen zu schalten.

Durch das Polling des browserfähigen Systems auf den Webserver wird die Visualisierung bei jeder Laständerung aktualisiert.

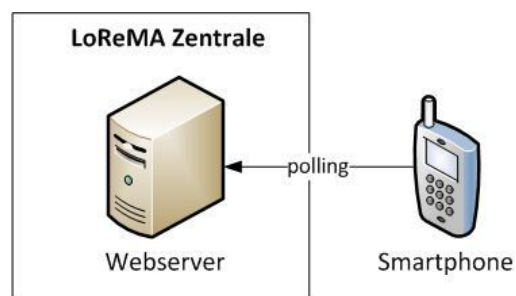


Abbildung 15: Zugriff auf den Webserver via Smartphone

Hardwareaufbau

Messknoten

Die miniaturisierte Hardware der LoReMA Messknoten hat kleine mechanische Abmessungen und kann zum Beispiel in eine Steckdose eingebaut werden. Für die Prototypen im iHomeLab wurde Sie in Zwischenstecker von Feller Schneider-Electric sowie in handelsübliche Steckerleisten eingebaut. Diese mobilen Prototypen können in jede beliebige Steckdose in einem Gebäude eingesteckt werden.

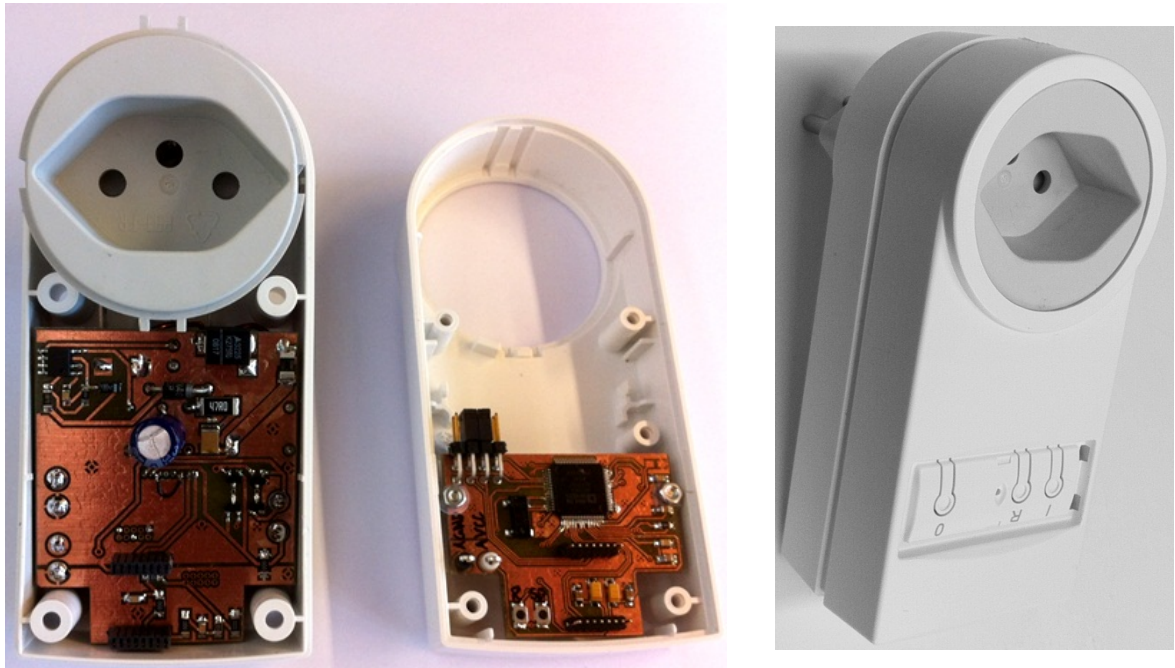


Abbildung 16: Messknoten als Zwischenstecker



Abbildung 17: Messknoten in einer Steckerleiste

Koordinator

Für den Koordinator wird ein USB-Dongle von TI verwendet (CC2531). Dieser wird in die Zentrale (PC) eingesteckt und kommuniziert über die USB-Schnittstelle.



Abbildung 18: Koordinator (USB-Dongle ohne Gehäuse)

Zentrale und Anzeigeeinheit

Für die Zentrale wie auch für die Anzeigeeinheit wird ein handelsüblicher Laptop verwendet.

Gesamtsystem

Übersicht

Das Gesamtsystem von LoReMA zeigt Abbildung 19. Über das WLAN und den WLAN-Router kann auf den Webeserver von LoReMA zugegriffen werden. Dies ermöglicht das Schalten der Steckdosen sowie das Anzeigen der aktuellen Energiemesswerte auf jedem browserfähigen System.

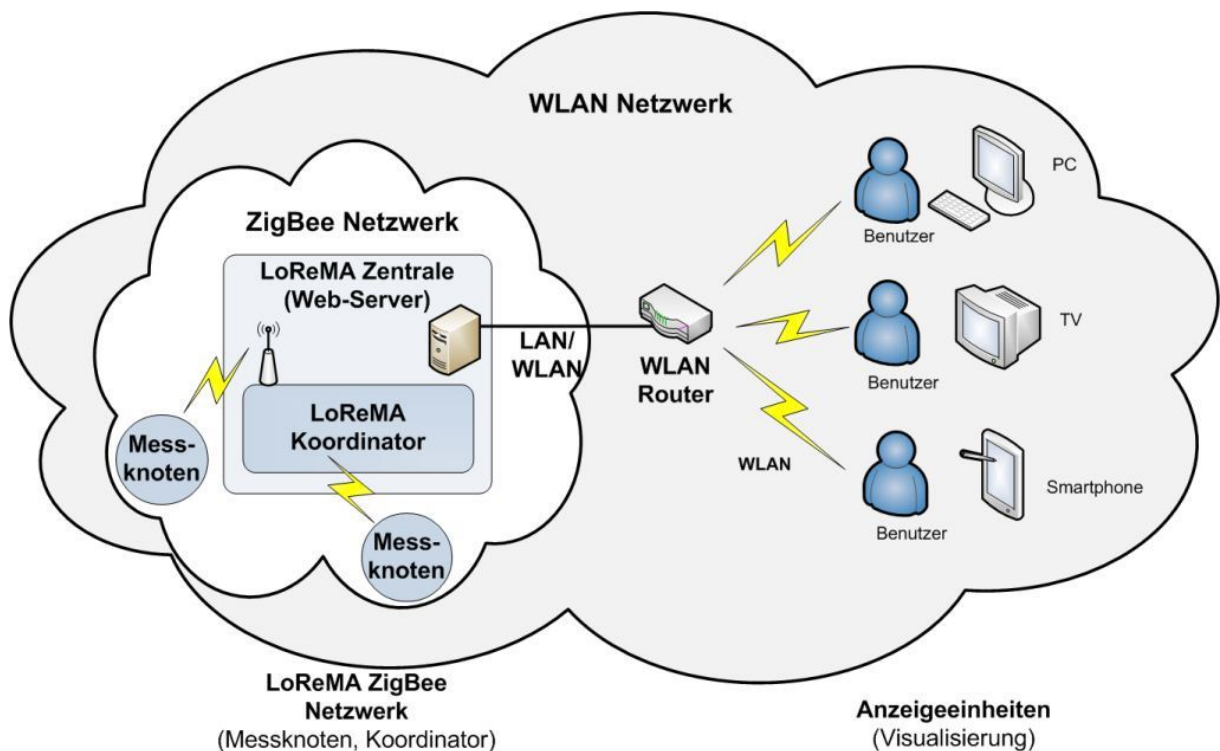


Abbildung 19: LoReMA Gesamtsystem

Reaktionszeit und Echtzeitverhalten des Systems

Aus dem LoReMA Projektantrag geht hervor, dass das System ein „quasi-Echtzeitverhalten“ aufweisen soll. Dabei sollen für die Energiemessung und die Lasterkennung die Nutzdaten innerhalb von einer Sekunde gemessen, übermittelt, verarbeitet und visualisiert werden.

Die gemessene Reaktionszeit des LoReMA Prototypen beträgt etwa 2 Sekunden. Davon wird 1s für die FFT auf dem Energiemesschip verwendet. Die Zeiten für die übrigen Tasks entsprechen groben Schätzungen und sind auf nachfolgender Abbildung ersichtlich. Die 2 Sekunden liegen immer noch in einem zulässigen Bereich und könnten durch Optimierungen an der Architektur sowie einem schnelleren Energiemesschip weiter optimiert werden.

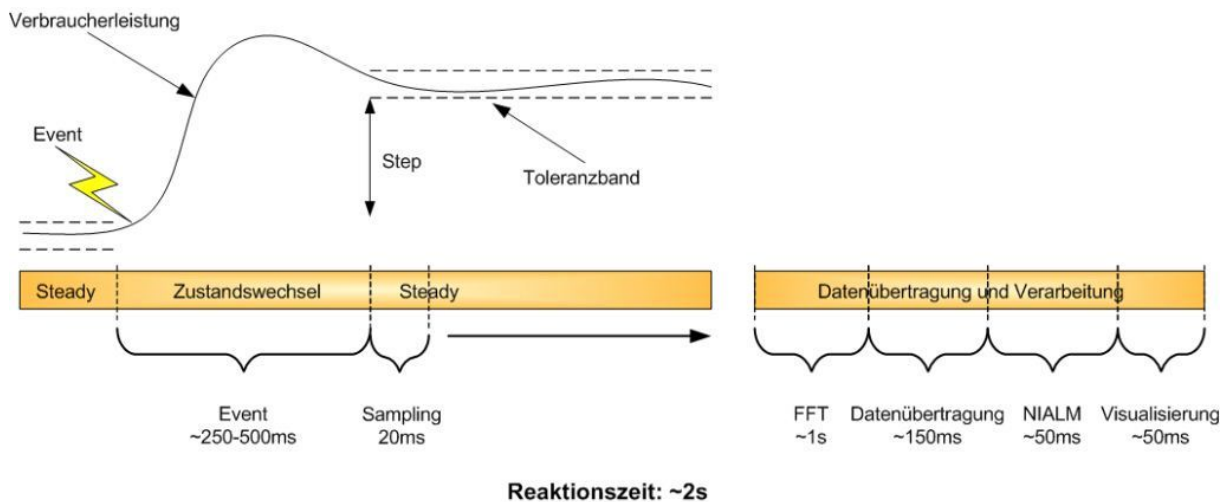


Abbildung 20: Reaktionszeit

Energieverbrauch

Gemäss Spezifikation sollte gezeigt werden, dass der Energieverbrauch der Steckdose im Standby Betrieb kleiner gleich 300mW ist. Messungen des LoReMA Prototypen haben ergeben, dass der derzeitige Energieverbrauch ~400mW beträgt. Ein Grund für den leicht höheren Wert ist ein „Snubber-Circuit“, welcher störende Hochfrequenzen und Spannungsspitzen neutralisiert. Potential zur tieferen Leistungsaufnahme, bietet das ZigBee Modul, dieses enthält USB Komponenten die nicht benötigt werden, im Rahmen des Prototypen jedoch nicht entfernt wurden.

Validierung Messresultate

Maximale Messunsicherheit der Wirkleistung (absoluter Fehler)

Die maximale Messunsicherheit der Wirkleistung wurde sowohl theoretisch erhoben und praktisch mittels Messungen ermittelt. Die theoretische Messunsicherheit des Systems auf den Nennwert von 1000W (25°C) beträgt 1.4%. Praktische Messungen haben ergeben, dass die maximale Messunsicherheit sogar um etwa den Faktor 3 (0.4%) unter dem theoretischen Wert liegt.

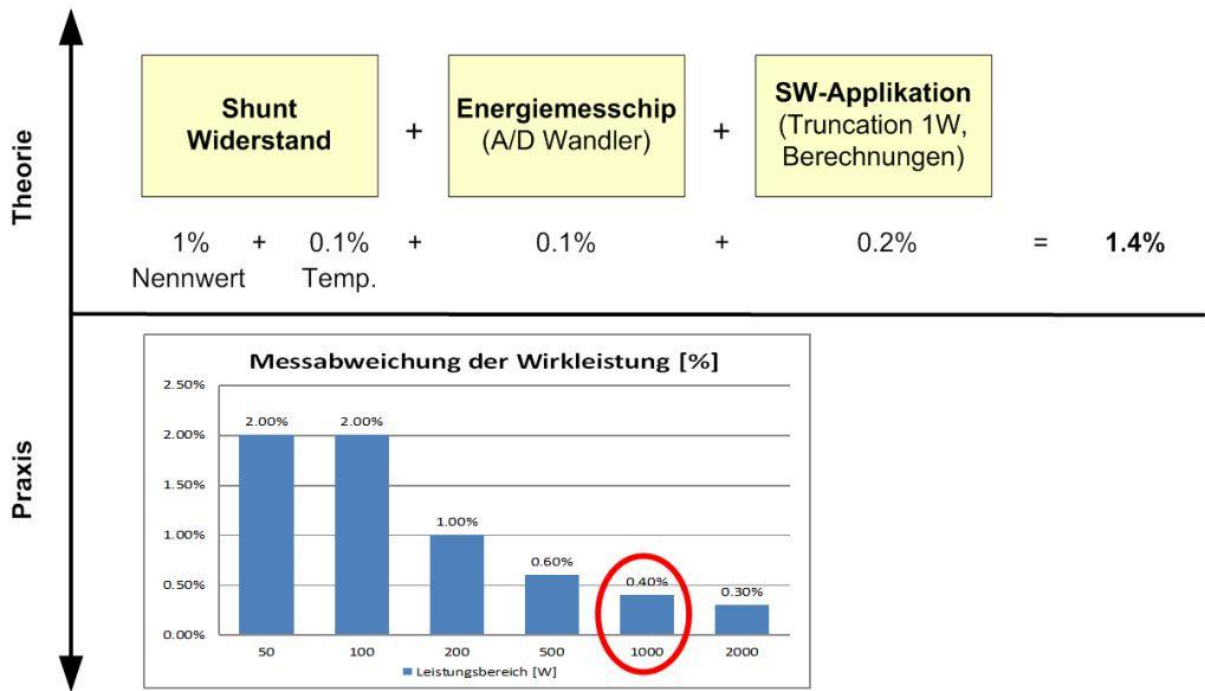


Abbildung 21: Maximale Messunsicherheit (bezogen auf die Wirkleistung)

Lasterkennung in Bezug auf den Messbereich

Der Bereich der Lasterkennung ist abhängig von der Grösse der Last. Je grösser ein Verbraucher ist, desto grösser muss der Delta-Wert der Laständerung sein. Dies hat zur Folge, dass kleine Verbraucher beim gleichzeitigen Betrieb eines grossen Verbrauches „untergehen“ können. Verbraucher mit einem kleinen Energieverbrauch werden schon bei kleineren Laständerungen erkannt. Durch Messungen mit dem LoReMA Prototypen konnte nachfolgender Bereich für die Lasterkennung ermittelt werden.

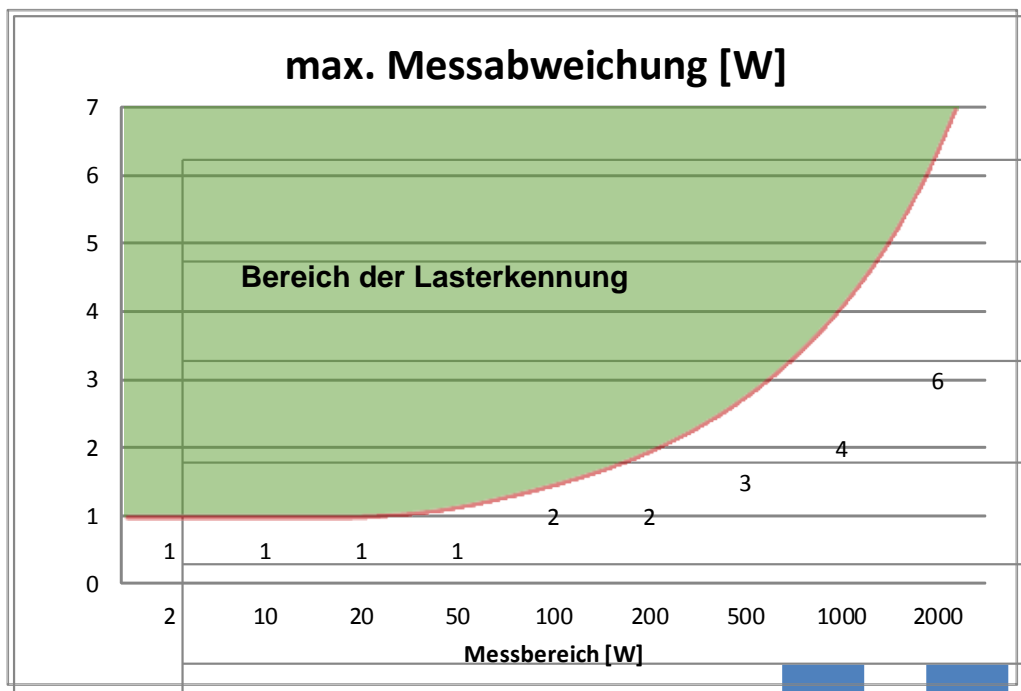


Abbildung 22: max. Messabweichung (bezogen auf den Messbereich)

Lasterkennung mit NIALM Algorithmus

Verbraucherdatenbank

Um die Lasterkennung und damit die Qualität des NIALM Algorithmus von LoReMA prüfen zu können, wurden Versuche mit Verbrauchern aus einer internen Verbraucherdatenbank gemacht. Bei der Auswahl der Verbraucher wurde darauf geachtet, dass diese aus verschiedenen Kategorien stammen, wie dies in nachfolgender Tabelle ersichtlich ist.

Tabelle 3: Verbraucherdatenbank LoReMA

Leistungsband	Verbraucher in Datenbank
> 1000 Watt	Wasserkocher
500 – 1000 Watt	Industrieföhn
200 – 500 Watt	
100 – 200 Watt	TV
50 – 100 Watt	Kühlschrank, Stabmixer, Glühlampe, Glühlampe mit Dimmer
10 – 50 Watt	Flat Screen, Laptop, Sparlampe (CFL), Ventilator,
0 - 10 Watt	Radio, LED Lampe

Es ist festzuhalten, dass die Verbraucherdatenbank mit 13 Verbrauchern eher bescheiden ist. Die Treffsicherheit für den NIALM Algorithmus wird umso schwieriger, je grösser die Datenbank ist. Dementsprechend muss auch der Algorithmus immer intelligenter und komplexer werden. Hier sehen wir Potential für zukünftige Forschungsprojekte.

NIALM Algorithmustests

Die 13 Verbrauchern wurden mit 100 Zustandswechsel an unterschiedlichen Steckdosen getestet, aufgezeichnet und anschliessend einer NIALM Lasterkennung unterzogen. Damit die Treffsicherheit der LoReMA Lasterkennung verglichen werden kann, wurde der Algorithmus mit anderen Parameter Sätzen verglichen.

Resultate

Fast alle Verbraucher der kleinen Verbraucherdatenbank wurden erkannt. Einzig beim Stabmixer waren die Ergebnisse fehlerhaft. Da es sich hierbei aber um einen variablen Verbraucher handelt, war dies abzusehen.

Abbildung 23 zeigt die Auswertung der Lasterkennung der 100 Zustandswechsel. Fast alle Zustandswechsel wurden korrekt erkannt. Da die Datenbank nur wenige Verbraucher beinhaltet, kann man aus den Resultaten keine allgemeine Aussage ableiten ob das gewählte Parameter-Set (P, Q, Harmonische) gegenüber anderen Parametern das bessere Resultat erzielt.

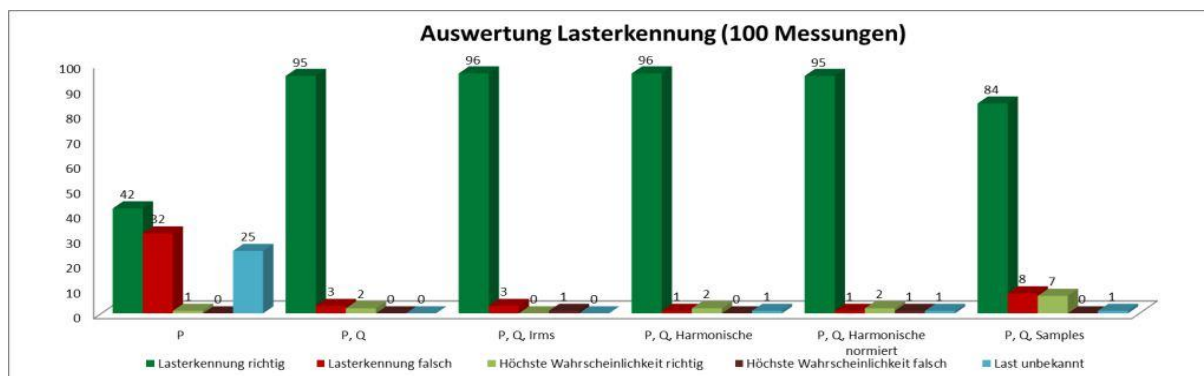


Abbildung 23: Auswertung der Lasterkennung (100 Messungen)

Bei der Lasterkennung wurden sowohl der Übereinstimmungsgrad [%] wie auch die Lastwahrscheinlichkeit [%] berechnet. Der **Übereinstimmungsgrad** sagt aus, zu wie viel Prozent die Parameter in der Datenbank mit der erkannten Last übereinstimmen. Die **Lastwahrscheinlichkeit** hingegen sagt aus, zu wie viel Prozent es der erkannte Verbraucher ist. Zum Beispiel können 2 Verbraucher den gleichen Übereinstimmungsgrad aufweisen (95%). Anhand dieser Zahl könnte man meinen, den unbekanntem Verbraucher ermittelt zu haben. Die Lastwahrscheinlichkeit der beiden Verbraucher würde aber nur bei 50% liegen, falls keine weiteren Verbraucher in Frage kommen. Das System kann somit nicht bestimmen, welcher Verbraucher nun der richtige ist. Der ausschlagende Wert für die Bestimmung der erkannten Last ist also die Lastwahrscheinlichkeit. Diese muss für eine erfolgreiche Lasterkennung grösser als 50% sein. Das beschriebene Konzept entspricht einem Entscheidungsmechanismus wie er in der Abbildung 3: Lastaufschlüsselung Framework.

Nachfolgende Abbildung zeigt den resultierenden Unterschied der Übereinstimmung und der Lastwahrscheinlichkeit der 100 Zustandswechsel unter Anwendung der verschiedenen Parameter-Sets. Die Lastwahrscheinlichkeit liegt bei den LoReMA Parametern (P, Q, Harmonische) leicht höher als bei den andern. Sehr anschaulich ist die Auswertung, wenn ausschliesslich die Wirkleistung verwendet wird. Die Übereinstimmung liegt bei über 98%, die Lastwahrscheinlichkeit aber nur bei knapp 55%. Dies zeigt deutlich, dass sich die Verbraucher für die Lasterkennung zu ähnlich sind, wenn nur auf die Wirkleistung geschaut wird.

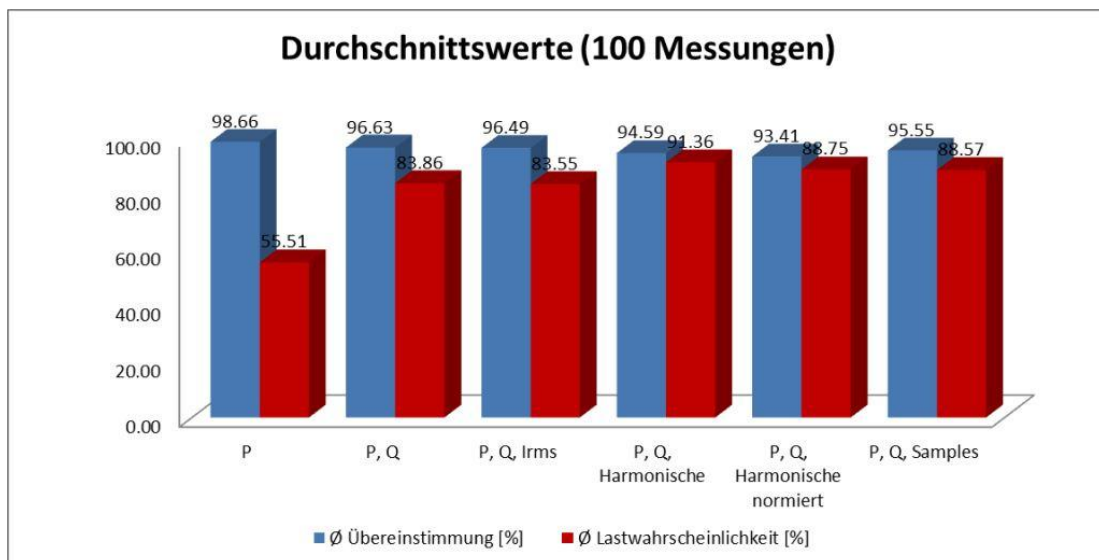


Abbildung 24: Durchschnittswerte der Übereinstimmung und Lastwahrscheinlichkeit

Im nächsten Schritt wurde geprüft, welche Verbraucher aus der Verbraucherdatenbank zuverlässig erkannt werden können. Bei den LoReMA Parametern konnte einzig der Stabmixer nicht detektiert werden, da es sich um einen variablen Verbraucher handelt.

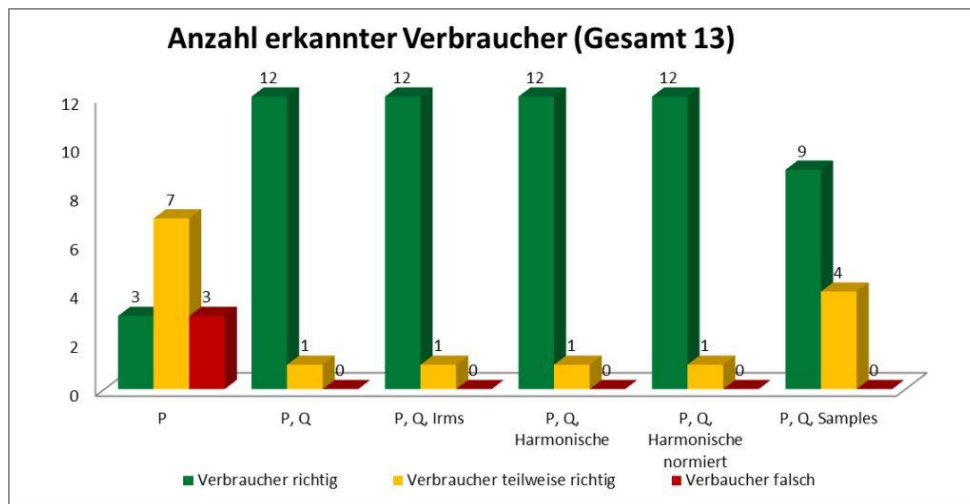


Abbildung 25: Anzahl erkannte Verbraucher aus der Datenbank

Versuche mit verschiedenen Laptops und Bildschirmen

Eine weitere Versuchsreihe basierte auf der Messung verschiedener Laptops und Bildschirme, welche alle über ein Schaltnetzteil verfügen. Ziel war es zu prüfen, wie sich die Trefferquote bei ähnlichen Verbrauchern verhält. Das Resultat ist, dass die Lasterkennung schwieriger wird und die Wahrscheinlichkeit einer Falscherkennung steigt. Bei der Falscherkennung handelt es sich jeweils um die gleiche Verbraucher-kategorie, sprich den funktional gleichen Verbraucher. Diese Versuchsreihe zeigt, dass die NIALM Algorithmen weiter verfeinert werden müssen um in einer Gerätekategorie ähnliche Gerätetypen voneinander zu unterscheiden.

Prototyp im iHomeLab

Im Sommer 2011 wurde der 1. Prototyp der LoReMA Steckdose im iHomeLab installiert. Die Resonanz, welche der Showcase in den Medien auslöste, war gross. Seither ist der Showcase fester Bestandteil jeder iHomeLab Führung. Auf den LoReMA Projektabschluss hin (Sommer 2012), wurde der Showcase mit den neuen Features erweitert (Miniaturisierung, ZigBee Kommunikation, Koordinator, Schaltaktor).

Showcase-Aufbau im iHomeLab

Der Aufbau des Showcases besteht aus 3 Verbrauchern (Ventilator, Glühlampe und Bildschirm), einer LoReMA Steckerleiste sowie einem Laptop als Zentrale und Anzeigeeinheit.



Abbildung 26: LoReMA Showcase im iHomeLab

Visualisierung

Bildschirm

Die Visualisierung auf dem Bildschirm wird einfach und anschaulich gehalten.

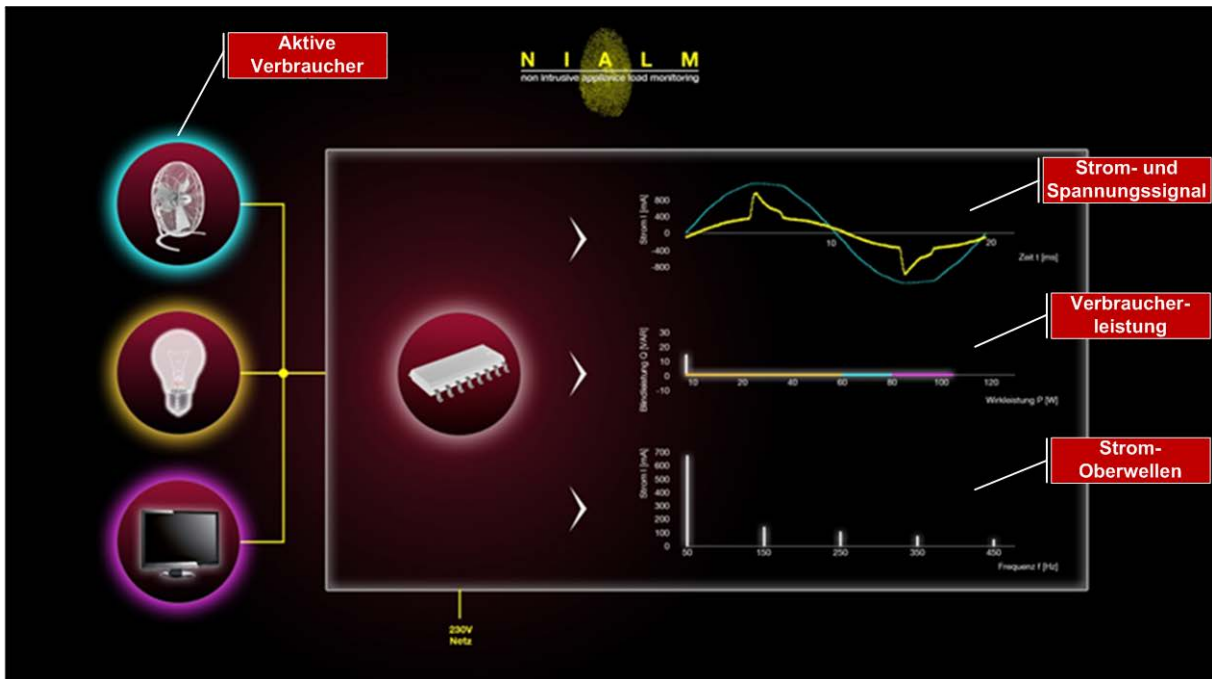


Abbildung 27: Visualisierung Showcase

Auf dem Bildschirm wird folgendes gezeigt:

- **Verbraucher:** Auf der linken Seite sieht man die aktuell aktiven und erkannten Verbraucher.
- **Strom- und Spannungssignal:** Diese Kurven zeigen das aktuelle Strom- wie auch Spannungssignal an der Steckdose.
- **Verbraucherleistung:** Der aktuelle Leistungsverbrauch aufgeteilt in Wirk- (x-Achse) und Blindleistung (y-Achse).
- **Stromoberwellen:** Die ermittelten Stromoberwellen aus der FFT.

Smartphone



Die Visualisierung auf dem Smartphone unterscheidet sich nicht wesentlich von der auf dem Bildschirm. Da der Platz begrenzt ist, konzentriert man sich bezüglich der Energiemesswerte ausschliesslich auf die Wirkleistung.

Abbildung 28: Visualisierung auf dem Smartphone

Schlussfolgerungen

Ziel des LoReMA Projekts war es, lückenlos von jeder einzelnen elektrischen Last in einem Gebäude den Energieverbrauch in Echtzeit zu erfassen, ohne Eingriff in den Verbraucher vorzunehmen. Mittels einer einfachen und anschaulichen, nach Verbrauchern aufgeschlüsselte, Visualisierung soll der Benutzer für seinen Energieverbrauch sensibilisiert werden. Anhand eines Prototyps, welcher als Showcase im iHomeLab präsentiert wird, wurde ein Proof-of-Concept durchgeführt. Die Erkenntnisse aus den verschiedenen Arbeitspaketen werden nachfolgend nochmals kurz zusammengefasst.

1. Aus den Recherchen geht hervor, dass verschiedene Universitäten und Institute am Thema NIALM forschen, darunter das Fraunhofer Institut aus den USA und die Universität Brüssel. Obwohl die ersten NIALM Systeme anfangs der 90er am Massachusetts Institute of Technology (MIT) unter Federführung von George W. Hart entwickelt wurden, gibt es derzeit noch keine massentauglichen Systeme. Die Hauptgründe dafür sind das Fehlen von Standards. Im Bereich der Algorithmik für die Lasterkennung ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten. Das iHomeLab ist Teil der NIALM Community und greift auf die aktuellen Forschungsergebnisse anderer Universitäten zu.
2. Für die drahtlose Kommunikation der Messknoten wird das Smart Energy Profile verwendet. Die Analyse des Profils hat gezeigt, dass das SE Profil derzeit nicht für den Einsatz von NIALM vorbereitet ist. Die Übermittlung der sogenannten Electrical Fingerprints ist im Standard nicht beschrieben. Das iHomeLab hat in Zusammenarbeit mit Landis+Gyr ein Amendment zur Erweiterung des SE Profiles mit den NIALM Electrical Fingerprints eingereicht.
3. Für die Energiemessung wird ein Energiemesschip eingesetzt. Gegenüber einem Energiemess-IC bietet ein SoC den Vorteil, dass die Fast Fourier Transformation für die Berechnung der Stromoberwellen bereits auf dem Chip vorgenommen werden kann. Dies spart sowohl Ressourcen bei der Datenübertragung als auch Zeit zur schnelleren Auswertung.
4. Die Evaluation eines passenden Schaltaktors hat ergeben, dass Halbleiterlösungen die Wärme aus der Verlustleistung des Lastkreises in der Steckdose nicht ableiten können. Mechanische Relais haben einen zu hohen Energieverbrauch im Steuerkreis. Als Aktor wurde ein bistabiles mechanisches Relais eingesetzt, da es als einziges Bauelement die Anforderung der tiefen Leistungsaufnahme von LoReMA erfüllt.
5. Die Miniaturisierung der Steckdose hat gezeigt, dass der Platz in einer Steckerleiste für die gesamte Hardware eines Messknotens ausreichend ist.
6. Der LoReMA Prototyp, welcher derzeit im iHomeLab als Showcase präsentiert wird, hat eine grosse Beliebtheit bei den Besuchern. Dies zeigt, dass eine anschauliche Lastaufschlüsselung sowie eine einfache Darstellung das Interesse der Besucher weckt.

Ausblick: weiterführende Aktivitäten

Zusammenfassend gesagt: das Projekt hat sehr viele Resultate im Bereich NIALM geliefert. Hier sehen wir das grösste Potential für Folgeprojekte. Die Lastaufschlüsselung mit NIALM ist sehr naheliegend als Analyseinstrument. Ein weiteres Anwendungsfeld ist, mit NIALM die Alterung elektrischer Systeme aufzuspüren. Die Algorithmen von NIALM müssen jedoch robuster und treffsicherer werden. Mit Hilfe von Umgebungsinformationen liessen sich die Algorithmen weiter verbessern und eventuell auf Stufe einer Sensorfusion optimieren.

Die fehlenden Standards sind nach wie vor eine Hürde für die Industrie, breit im Thema NIALM einzusteigen. Es wird sich zeigen ob in Zusammenarbeit mit der NIALM Community ein Vorstoss erfolgen kann.

Statements der Konsortiums-Partner

Im Zeitalter von Smartphones und Tablet-PCs bietet es sich an, dass die Kunden mehr Übersicht und Kontrolle über Ihr Haus von unterwegs erhalten wollen. Dazu gehören auch Feedbacks, Vergleiche und Schalmöglichkeiten im Bereich Energieeffizienz. Wir werden prüfen, wie diese Technologie von LoReMA zum Erheben der Energieeffizienz einzelner Geräte bei neuen Dienstleistungen im Smart Home-Bereich eingesetzt werden kann.

Markus Doetsch, Leiter Smart Living, Swisscom

Im Kontext von sogenannten „Pre-emptive Maintenance Strategien“ sollen mit Hilfe von abnormalen Verbrauchspattern von Lasten wie grosse Motoren, Lüftungsaggregaten usw. frühzeitige potentielle Defekte erkannt werden. Damit würde sich Energie einsparen lassen sowie auch „Asset protection“ betreiben.

Heinz Hohl, Innovation & Technology Manager, Landis+Gyr
Joe Imfeld, Business Development ICG, Landis+Gyr

Bis 2050 wird sich der weltweite Energiebedarf verdoppeln und der CO2 Ausstoss soll halbiert werden. Um das zu erreichen, muss die Energie intelligent eingesetzt werden. Schneider-Electric hat sich dem Energiemanagement verschrieben. Ein erster Schritt ist jeden Energieverbraucher genau zu kennen. Dazu hat uns das LoReMA Projekt wichtige Grundlagen geliefert.

Claude Jaquemet, Hardware Line Manager Connected Home, Schneider-Electric
Martin Dubs, Manager R&D, Feller AG

Der Stromverbrauch einzelner Geräte ist heute vielen Kunden nicht bekannt. Dank des innovativen Ansatzes, welcher im Rahmen des Projekts LoReMA entwickelt worden ist, kann nun das Gerät und dessen Verbrauch mit einer Messung erkannt werden. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber dem Smart Metering-Ansatz, wo nur der Gesamtverbrauch pro Haushalt ersichtlich ist. Aus Sicht der BKW ist der LoReMa-Ansatz die logische Weiterentwicklung von Smart Metering für den Inhouse-Bereich. Deshalb sind wir nach der Demonstrationsanlage im iHomeLab daran interessiert, in einem Feldversuch die Markttauglichkeit weiterzuentwickeln und eine Kommerzialisierung der „Fingerprint“-Datenbank für Elektrogeräte zu prüfen.

Adrian Peter, Leiter Marktleistungen und Energieservices, BKW FMB Energie AG

Das Benutzerverhalten ist ein wichtiger Schlüssel für eine bessere Energieeffizienz beim Elektrizitätsverbrauch. Der innovative Ansatz von LoReMa liefert dem Nutzer sehr wertvolle Informationen, mit hohem Detaillierungsgrad zu seinem Verbrauchsverhalten.

Die Stadt Zürich intensiviert ihr Engagement für die Umwelt. «Nachhaltige Stadt Zürich - auf dem Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft» - mit dem Legislatorschwerpunkt 2006 - 2010 hat sie sich hohe Ziele gesteckt. LoReMa ist ein vielversprechender Ansatz auf dem Weg zu diesem grossen Ziel.

Hans-Peter Broger, Technologiedelegierter "Energieeffizienz", ewz-Stromsparfonds

Danksagungen

Die Autoren danken dem Bundesamt für Energie (BFE) und dem gesamten LoReMA Konsortium für die Finanzierung sowie Roland Brüniger, Michael Moser, Hans-Peter Broger, Res Witschi, Martin Dubs, Adrian Peter, Heinz Hohl und besonders Adrian Ziswiler für die Idee zu LoReMA und die anregenden Diskussionen.

Symbolverzeichnis

AMI	Advanced Metering Infrastructure
EP	Endpoint
ESP	Energy Service Portal
EVU	Energie Versorgungsunternehmen
HAN	Home Area Network
IEA	Internationale Energie Behörde
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NIALM	Non-Intrusive Appliance Load Monitoring
SE	Smart Energy
SoC	System on Chip
S.A.F.E	Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz
THD	Total Harmonic Distortion

Referenzen

- [1] BFE - Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2009 nach Verwendungszwecken, Bundesamt für Energie BFE, Energiewirtschaft, Dezember 2010
- [2] BFE – Elektrizitätsstatistik 2010, Bundesamt für Energie BFE, Elektrizitätsstatistiken, Juli 2011
- [3] BFE; MEGA-Mehr Energieeffizienz durch gezielte Anwenderinformation; Michael Fercu, Rolf Kistler, *Hochschule Luzern T&A – iHomeLab*, Armin Egli, *Hochschule Luzern T&A - ISIS*, Justus Gallati, *Hochschule Luzern – Wirtschaft*, Publikationsnummer 290144, September 2010
- [4] iHomeLab - Denkfabrik und Forschungslabor für Intelligentes Wohnen – Hochschule Luzern; [Online] <http://www.iHomeLab>
- [5] S ES; Energieeffizienz in Gebäuden, Stand 2011 S ES, Schweizerische Energie-Stiftung, <http://www.energiestiftung.ch/energiethemen/energieeffizienz/gebaeude/>
- [6] S ES; Energieeffizienz von Geräten und Beleuchtung, Stand 2011 S ES, Schweizerische Energie-Stiftung, <http://www.energiestiftung.ch/energiethemen/energieeffizienz/geraetebeleuchtung/standby/>.
- [7] topten.ch - Der Klick zum besten Produkt <http://www.topten.ch/>
- [8] ZigBee.org – ZigBee Alliance Homepage <http://www.zigbee.org/>
- [9] ZigBee Smart Energy Profile (SE Profile) – ZigBee Smart Energy Profile Specification Revision 15 - 075356r15ZB_SE_PTG-SE_Profile_Specification.pdf
- [10] IEEE; Power signature analysis, Laughman C., Kwaduk L., Nordford L. IEEE Power and Energy Magazine, April 2003
- [11] VDE-Verlag, Einfluss von Netzimpedanz und Signalform, Stand 2011 <http://www.competence-site.de/energie/Einfluss-von-Netzimpedanz-und-Signalform>
- [12] BeuthVerlag Berlin; EN 50160:2000-03 / deutsche Fassung DIN EN 50160:1999: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen, Stand 2011
- [13] Fachhochschule Oldenburg; Power Quality Beeinflussung durch Spannungsschwankungen und Flicker Fachhochschule Oldenburg University of Applied Sciences, Prof. A. Burgholte
- [14] „Dirty Power“ – Oberschwingungen durch nichtlineare Verbraucher GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH, Dipl.-Ing. Günter Höck http://www.gmc-instruments.ch/src/download/dDirty_Power.pdf
- [15] VTT Energy; Non-intrusive appliance load monitoring system based on a modern kWh meter VTT Publication 356 (1998), Hannu Pihala
- [16] IEEE; Load Signature Study – Part 1: Basic Concept, Structure, and Methodology IEEE Transactions on power delivery, Vol. 25, No. 2, April 2010
- [17] IEEE; Load Signature Study – Part 2: Disaggregation Framework, Simulation, and Applications IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 2, April 2010
- [18] IEEE; Nonintrusive Appliance Load Monitoring: Review and Outlook IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 57, No. 1, February 2011

Anhang A

Störeinflüsse und Netzurückwirkungen

Ein störungsfreies und stabiles Stromversorgungsnetz ist für LoReMA von zentraler Bedeutung. Jede Störung auf dem Netz beeinträchtigt das System und kann zu Fehlinterpretationen führen. Welchen Einfluss die Störungen haben und wie man damit umgehen kann, wird in diesem Kapitel näher beschrieben.

Netzimpedanz

Die Netzimpedanz wird durch die Spannungsebene, die Netz- sowie Verbraucherstruktur und dem Lastgang im Netz bestimmt. Sie ist keine unmittelbare Ursache der Netzbeeinflussung. Ihre Wert und der Verlauf über der Frequenz und Zeit entscheiden jedoch, ob die Auswirkungen von Harmonischen und Leistungsschwankungen verstärkt oder gedämpft werden. In der Norm EN 61000-3-3 (VDE 0838) sind Bezugsimpedanzen angegeben, welche bei 50 Hz nicht überschritten werden sollten:

$$\text{Aussenleiter-Null-Leiter: } Z_{L,Null} = (0.4 + j0.25)\Omega = 0.4\Omega + \omega \cdot 0.8\text{mH}$$

$$\text{Aussenleiter: } Z_L = (0.24 + j0.15)\Omega = 0.24\Omega + \omega \cdot 0.478\text{mH}$$

$$\text{Null-Leiter: } Z_{Null} = (0.16 + j0.01)\Omega = 0.16\Omega + \omega \cdot 0.318\text{mH}$$

Nichtlineare Verbraucher bewirken Resonanzstellen in der Impedanz, wodurch für einzelne harmonische Frequenzen Maxime entstehen. Besitzt die Netzimpedanz bei harmonischen Frequenzen Maxima, verursachen schon relativ geringe Oberschwingungsströme hohe Oberschwingungsspannungen. Durch die Zuschaltung von Lasten ändert sich die Impedanz tagzeitabhängig. Die Netzimpedanz wird oft ermittelt, um Aussagen über den zu erwartenden Oberschwingungsgehalt der Spannung zu treffen. Die Impedanz ist jeweils dynamisch veränderlich und frequenzabhängig [11].

Netzurückwirkung

Verbraucher, welche ans Versorgernetz angeschlossen werden, verursachen Rückwirkungen auf das Netz. Da dessen Impedanz nicht unendlich klein sein kann, führen diese Rückwirkungen wiederum zu Spannungsveränderungen auf dem Netz.

Nachfolgend sind diese Rückwirkungen aufgelistet [14].

Tabelle 4: Ursachen und Beeinflussbarkeit der Netzstörphänomene

Phänomen	Hauptursache	Begrenzbar durch	
		Versorger	Verbraucher
Frequenzschwankung	Laständerung, Verlust von Erzeugung	Ja	Nein
Langsame Spannungsänderungen	Laständerung	Ja	Nein
Schnelle Spannungsänderungen /Flicker	Schalthandlungen, spezielle Lasten	Nein	Ja
Spannungsunsymmetrie	Unsymmetrische Belastung der Phasen	Teilweise	Ja
Oberschwingungen und Zwischenharmonische	Spezielle Geräte	Teilweise	Ja
Signalspannungen	Informationsübertragung	Ja	Ja
Gleichströme oder -spannungen	Spezielle Geräte (Einweggleichrichtung)	Nein	Ja

Spannungseinbrüche und- unterbrechungen	Fehler im Versorger- /Verbrauchernetz (Kurzschlüsse, Unterbrechungen)	Nein	Nein
Zeitweilige Überspannung	Fehler im Verbrauchernetz, Resonanz im Netz	Nein Teilweise	Teilweise Nein
Transiente Überspannung	Blitzeinschläge, Schaltvorgänge	Nein	Nein

Normen und Richtlinien

EN 50160 – Die europäische „Spannungsqualitätsnorm“

Um den Netzstörphänomenen entgegenwirken zu können, hat die europäische Norm EN 50160 [12] Eigenschaften der gelieferten Versorgungsspannung in einem recht niedrigen Qualitätsniveau definiert. Diese sollen 95% der Summenwahrscheinlichkeiten für Toleranz- und Grenzwerte abdecken.

Sofern keine speziellen vertraglichen Vereinbarungen zwischen dem EVU und dem Kunden bestehen, gelten die in nachfolgender Tabelle im Überblick zusammengefassten Anforderungen der Norm als Richtlinie für die am Anschlusspunkt an das öffentliche unter „normalen Betriebsbedingungen“ zu erwartende „Mindestqualität“ der Spannung [12].

Tabelle 5: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen nach DIN EN 50160 [12]

Merkmals	Anforderungen	Messintervall	Betrach- tungs- zeitraum
Netzfrequenz	Verbundnetz: 50 Hz +4%/-6% dauernd; 50 Hz $\pm 1\%$ während $\geq 99,5\%$ eines Jahres Inselbetrieb: 50 Hz $\pm 15\%$ dauernd; 50 Hz $\pm 2\%$ während $\geq 95\%$ einer Woche	10-sec-Mittelwert	1 Jahr 1 Woche
Langsame Span- nungsänderungen	$U_{\text{nenn}} +10\% / -15\%$ dauernd; $U_{\text{nenn}} \pm 10\%$ während $\geq 95\%$ einer Woche	10-min-Mittelwert	1 Woche
Flicker / Schnelle Spannungsänderungen	Langzeitflickerstärke $Plt < 1$ während $\geq 95\%$ einer Woche und $\Delta U_{10\text{ms}} < 2\% U_{\text{nenn}}$	2 h (Flickermeter gemäß EN 61000-4-15)	1 Woche
Spannungs- unsymmetrie	$U(\text{Gegensystem}) / U(\text{Mitsystem}) < 2\%$ während $\geq 95\%$ einer Woche	10-min-Mittelwert	1 Woche
Oberschwingungen $U_{h2} \dots U_{h25}$	$<$ Grenzwert lt. Tabelle 1-3 und THD $< 8\%$ während $> 95\%$ einer Woche	10-min-Mittelwert jeder Harmonischen	1 Woche
Zwischen- harmonische	In Beratung		1 Woche
Signalspannungen	$<$ Normkennlinie = $f(f)$ während $\geq 99\%$ eines Tages	3-sec-Mittelwert	1 Tag
Spannungs- einbrüche	Anzahl $< 10 \dots 1000$ / Jahr; davon $> 50\%$ mit $t < 1\text{s}$ und $\Delta U_{10\text{ms}} < 60\% U_{\text{nenn}}$	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} = 1 \dots 90\% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Kurze Spannungs- unterbrechungen	Anzahl $< 10 \dots 1000$ / Jahr; davon $> 70\%$ mit Dauer $< 1\text{s}$	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} \leq 1\% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Lange Spannungs- unterbrechungen	Anzahl $< 10 \dots 50$ / Jahr mit Dauer $> 3\text{min}$		1 Jahr
Zeitweilige Über- spannung (L-N)	Anzahl $< 10 \dots 1000$ / Jahr; davon $> 70\%$ mit Dauer $< 1\text{s}$	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} > 110\% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Transiente Über- spannung	$< 6\text{kV}; \mu\text{s} \dots \text{ms}$		k. A.

Für die Harmonischen gelten die in nachfolgender Tabelle aufgeführten Höchstwerte in Prozent zur 230V Netzspannung.

Tabelle 6: Grenzwerte der Oberschwingungsspannung in öffentlichen Elektrizitätsnetzen nach DIN EN 50160 [12]

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Nichtvielfache von 3		Vielfache von 3			
Ordnung n	U_{hn} in % U_{nenn}	Ordnung n	U_{hn} in % U_{nenn}	Ordnung n	U_{hn} in % U_{nenn}
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	$6 \leq n \leq 24$	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Der Gesamt-Oberschwingungsgehalt THD (Total Harmonic Distortion) der Spannung darf maximal 8% betragen.

EN 61000-3-3

Die EN 61000-3-3 ist eine weitere Norm in Bezug zur Spannungsqualität. In ihr werden Grenzwerte von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker (elektrische Störungen anderer Verbraucher) im öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetz definiert ($\leq 16A$ je Leiter).

Störeinflüsse auf das Versorgungsnetz

Die Stromqualität des Versorgungsnetzes wird auf dem Weg zum Kunden/Verbraucher von verschiedenen Einflüssen geprägt:

- Beeinträchtigungen können ausserhalb eines Gebäudes erzeugt werden.
Ursachen: Blitzeinschlag, Überspannung durch induktive Einkopplung, Schalten von Lastschaltern, Korrektur von Leistungsfaktoren, Schalten von induktiven Lasten, Fehlerbehebung im Kraftwerk
- Beeinträchtigungen können innerhalb eines Gebäudes erzeugt werden.
Ursachen: Sie werden durch die unterschiedlichsten elektrischen Systeme verursacht.
Bemerkung: Sie sind erheblich näher am elektrisch empfindlichen System, wodurch eine Dämpfung durch Zuleitungen geringer ist.

Auf das Versorgungsnetz können ganz unterschiedliche Störungen einwirken, welche auch das LoReMA System beeinträchtigen. Nachfolgende Abbildungen zeigen einen kleinen Überblick über mögliche Netzstörungen und deren Häufigkeit.

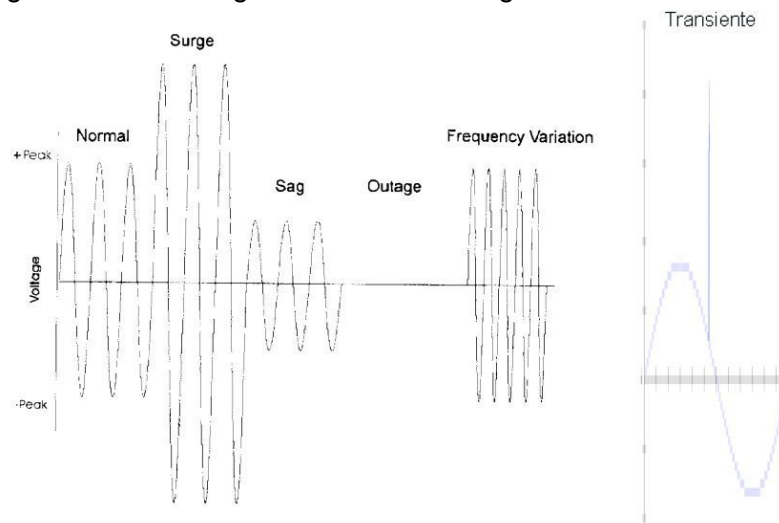


Abbildung 29: Typische Störungen in der Stromversorgung

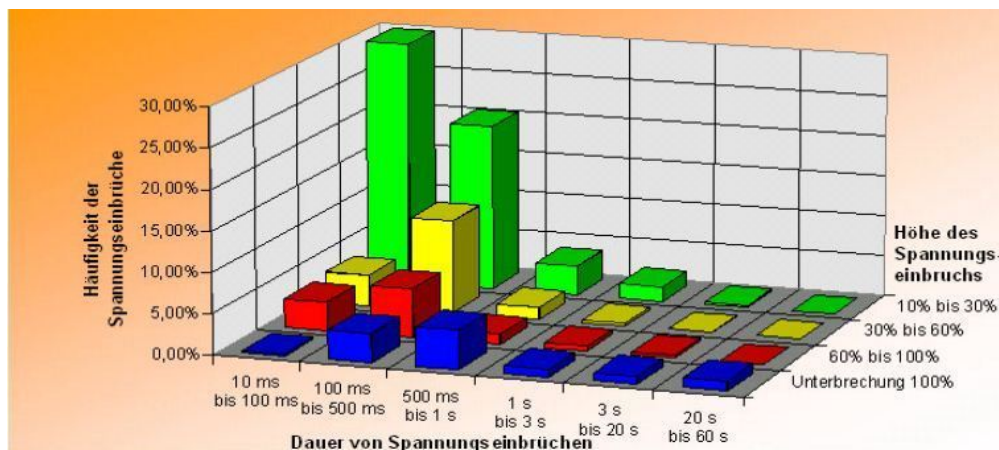


Abbildung 30: Häufigkeit und Höhe von Spannungseinbrüchen in Niederspannungsnetzen [13]

Nachfolgend die Definitionen zum Thema Spannungsschwankung und -unterbrechungen.

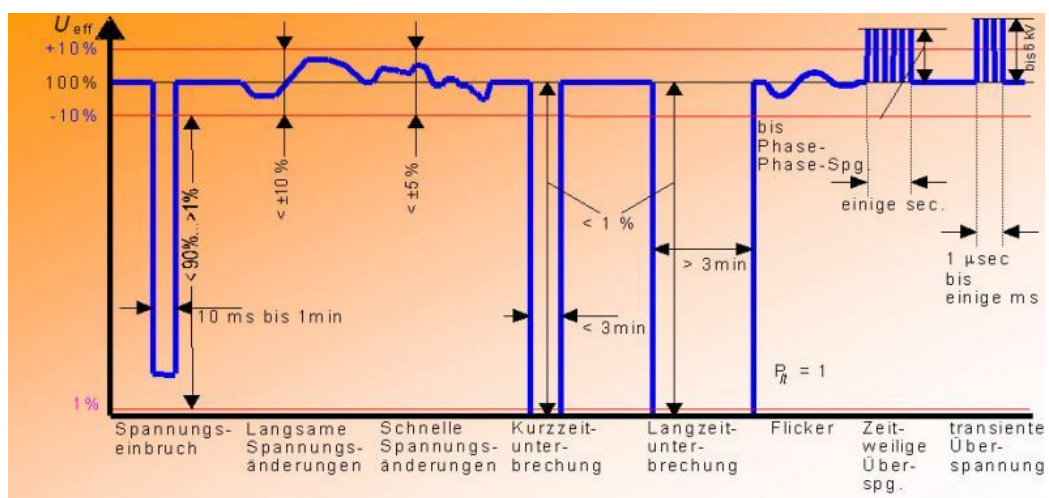


Abbildung 31: Definitionen zum Thema Spannungsschwankungen [13]