

# Plug & Play Monitoring zur kosteneffizienten Erhöhung der Transparenz in Niederspannungsverteilnetzen

**Daniel Hauer<sup>1</sup>, Benedikt Pitschko<sup>1</sup>, Alfred Einfalt, Tobias Gawron-Deutsch**

Hauer Siemensstraße 90, 1210 Wien, +43 664 6154879, daniel.hauer@siemens.com  
Pitschko Siemensstraße 90, 1210 Wien, +43 51707-0, benedikt.pitschko@siemens.com  
Einfalt Siemensstraße 90, 1210 Wien, +43 664 8011716472, alfred.einfalt@siemens.com  
Gawron-Deutsch Siemensstraße 90, 1210 Wien, +43 664 8011717071, tobias.gawron-deutsch@siemens.com

Siemens AG Österreich

## **Kurzfassung:**

Die neuen dezentralen Erzeugungsanlagen und der Anstieg der Elektromobilität stellen die Infrastruktur vor neue Herausforderungen. Generell ist zu erwarten, dass Infrastrukturen näher an den Grenzen betrieben werden müssen, um das Maß an Neuinvestitionen in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen zu halten. Ein notwendiger erster Schritt ist die Ausstattung der Niederspannungsnetze mit Sensorik, wodurch ausreichend Messdaten für die Überwachung und, in einem weiteren Schritt, für die Implementierung von Regelungen im Netz zur Verfügung stehen. Da die Infrastruktur sehr langlebig ist und nicht alle Verteilnetzstationen mit Sensoren ausgestattet wurden, müssen einfache neu integrierbare Lösungen für das Monitoring erforscht werden. In dieser Arbeit wird daher ein Plug & Play Monitoringsystem vorgestellt, welches einfach und kosteneffizient in bestehende sensorlose Stationen eingebaut werden kann. Das System besteht aus einer Kontrollbox und drahtlosen, energieautarken Strommesssensoren. Die Sensoren werden an den einzelnen Phasen der sekundären Abgänge angebracht, messen den Leistungsstrom und übertragen die Daten drahtlos an die Kontrollbox. Diese misst lokal die sekundärseitige Spannung und berechnet aus den kombinierten Daten alle relevanten Leistungswerte der Trafostation und übermittelt diese an den Netzbetreiber. Um das Funktionsprinzip des Monitoringsystems zu zeigen, wird in dieser Arbeit der Prototyp eines Strommesssensors vorgestellt, welcher für einen Proof of Concept im Rahmen des Projekts FACDS erstellt wurde.

**Keywords:** Plug & Play Monitoring, Energy Harvesting, drahtlose Sensorik, Power Quality, Niederspannungsnetz

## **1 Einleitung**

Der klassische Netzbetrieb ist durch die zunehmende Durchdringung mit dezentralen, meist erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen (DEA) vor große Herausforderungen gestellt. Die Netzstabilität kann heute vorwiegend in zwei Bereichen gefährdet werden. Das vorherrschende Problem in ländlichen Netzen ist die Spannungshaltung, auch als „U-Problem“ bezeichnet. In urbanen Netzen, die aufgrund der Lastdichte eher geringe

---

<sup>1</sup> Jungautor

Leitungslängen aufweisen, ist weniger die Spannungshaltung als vielmehr das Problem der Auslastung von Betriebsmitteln vorherrschend. Dies wird auch als „I-Problem“ bezeichnet.

Werden diese Probleme nicht rechtzeitig adressiert, indem einerseits ein entsprechender Netzausbau vorangetrieben und andererseits neue Regelungskonzepte für das aktuelle Netz entworfen werden, so kann es zu Versorgungsausfällen und damit verbundenen Kosten kommen. Aufgrund der unterschiedlichen kurz- und langfristigen Auswirkungen einzelner Versorgungsausfälle, lassen sich die dadurch entstehenden Kosten nur schwer abschätzen. In [1] wird für Deutschland ein Durchschnittswert von 8.50 € pro ausgefallener kWh errechnet und in [2] wird für einen einstündigen Stromausfall<sup>2</sup> in der Stadt Wien ein Gesamtschaden von ca. 20 Mio. € angegeben.

Ein wesentlicher Punkt, um einerseits drohende Störungen im Netz überhaupt erkennen und lösen zu können und andererseits einen effizienten zukünftigen Netzausbau zu ermöglichen, ist der Einsatz von Sensoren in ausreichender Anzahl. Nur mit validen und flächendeckenden Daten aus den Netzen können zum einen die Planungsaktivitäten optimiert werden, um einen gezielten Netzausbau zu ermöglichen, und zum anderen kann nur mit ausreichenden Messwerten auch unterstützend bzw. regelnd in den Verteilnetzbetrieb eingegriffen werden.

Aktuell gibt es gesicherte Monitoringdaten nur bis zu den Mittelspannungsabgängen der Umspannwerke. Die zukünftigen Herausforderungen bedürfen jedoch auch Messungen in (Orts-)Netzstationen und ggf. sogar bis in Verteilerkästen im Niederspannungsnetz. Die dort verbaute Infrastruktur selbst ist sehr langlebig. Daher wird, wenn neue Stationen errichtet werden, auch eine angenommene Laststeigerung oder z.B. ein neuer Bedarf für Elektromobilität bei der Dimensionierung hinzugerechnet. Dies führt dazu, dass in neu errichteten Stationen in den ersten Betriebsdekaden kaum Probleme zu erwarten sind. Dies galt besonders in der Vergangenheit, wo mit relativ stetigen Laststeigerungen gerechnet wurde. Das entsprechende Einplanen von Reserven - dazu zählen z.B. auch Vorgaben wie die strukturelle n-1 Sicherheit für urbane Verteilnetze - war also der Grund warum bisher im Niederspannungsbereich kein Monitoring notwendig war. Die Herausforderung, eine ausreichende Sensordichte im Niederspannungsnetz zu schaffen, besteht daher nicht nur darin, dass bei der Planung zukünftiger Stationen ein entsprechendes Monitoringsystem vorgesehen werden muss, sondern vor allem auch darin, dass viele der aktuell aktiven Station kein solches System besitzen, aber noch eine erwartete Lebensdauer von mehreren Dekaden aufweisen.

Um eine flächendeckende Datenerfassung im Verteilnetz zu ermöglichen, ist also ein nachrüstbares Monitoringsystem für die langlebige Bestandsinfrastruktur notwendig. Hier stellt sich das Problem, dass die Installation dieses Systems kostengünstig, schnell und ohne Unterbrechung der Versorgung erfolgen muss. Im Falle von Arbeiten nach Fehlern ist auch das Thema von zusätzlichen Leitungen zu Messwandlern etc. ein Thema, da diese für die Netztechniker sehr hinderlich sind. Speziell für das I-Problem sind natürlich auch Strommesssensoren einzusetzen. Die gemeinsame, zeitsynchrone Messung von Strom und Spannung erlaubt die Berechnung von Wirk- und Blindleistungsflüssen z.B. um auch

---

<sup>2</sup> Annahme für die Simulation: Tag 22.01.2019, Uhrzeit: 09:00 -10:00

entsprechenden Netzmanagementsystemen eine Verlustleistungsoptimierung durch Blindleistungsmanagement zu ermöglichen.

Um diese Herausforderung zu adressieren, wird in dieser Arbeit ein Plug & Play Monitoringsystem vorgestellt, mit welchem bestehende (Orts-)Netzstationen kostengünstig nachgerüstet werden können. Das System besteht aus einer Kontrollbox und einer Vielzahl an Strommesssensoren. Die Sensoren werden an allen relevanten sekundären Abgängen angebracht, messen dort den Strom und übertragen die Daten per Funkverbindung an die Kontrollbox. Diese sammelt die Daten sämtlicher Sensoren und berechnet mithilfe einer lokalen Spannungsmessung sämtliche relevanten Leistungsparameter der Trafostation und überträgt diese an den Netzbetreiber. Die wichtigsten Eigenschaften dieses Monitoringsystems sind:

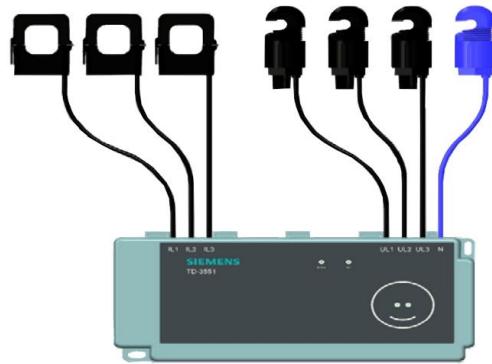
- Drahtloser Sensoraufbau
- Nicht-invasive Strommessung
- Batterieloser Sensoraufbau
- Zeitsynchronisierte Funkübertragung der Stromwerte an die Kontrollbox

Ein drahtloses Design sowie die nicht-invasive Strommessung ermöglichen eine einfache Installation der Sensoren ohne Unterbrechung des Stationsbetriebs. Der Verzicht auf Batterien reduziert den notwendigen Wartungsaufwand erheblich. Da auch keine drahtgebundene Versorgung vorgesehen ist, wird die nötige Energie der Sensoren mittels Energy Harvesting direkt aus der zu messenden Leitung gewonnen. Die synchronisierte Datenübertragung zwischen den einzelnen Sensoren und der Kontrollbox innerhalb der Station wird auf Basis des Bluetooth Low Energy (BLE) Standards implementiert und ermöglicht die Berechnung von Leistungswerten aus den getrennt gemessenen Spannungs- und Stromwerten.

In Kapitel 2 wird zunächst auf den aktuellen Stand der Technik eingegangen und ein Überblick über existierende Monitoringsysteme gegeben. Anschließend wird in Kapitel 3 das Gesamtkonzept des vorgeschlagenen Monitoringsystem vorgestellt, bevor in Kapitel 4 auf den Aufbau eines einzelnen Strommesssensors eingegangen wird. Kapitel 5 und 6 zeigen abschließend die an einem Sensorprototyp gemessenen Resultate und liefern einen Ausblick über mögliche und geplante Weiterentwicklungen und offene Forschungsfragen.

## 2 Stand der Technik

Herkömmliche Messsysteme beschränken sich auf die Messung von Strom und Spannung mittels kabelgebundener Lösungen. In Abbildung 1 ist ein Grid Monitoring Device (GMD) der Firma Siemens dargestellt, welches auf der „SMART GRIDS WEEK“ - Fachtagung, Graz 23.05.2014 vorgestellt wurde. Bei diesem Gerät ist ersichtlich, dass die einzelnen Messinstrumente über ein Kabel an das Messgerät angeschlossen werden.



**Abbildung 1: Klassische Messung von Strom und Spannung innerhalb einer Niederspannungsverteilnetzstation**

Um in Zukunft die Nachrüstbarkeit vereinfachen zu können, werden Funksensoren bevorzugt, welche selbstständig Energie für den Betrieb gewinnen können. Neben den reduzierten Wartungskosten durch den Verzicht auf eine Batterie hat ein solches System auch niedrigere Installationskosten, da die nachträgliche fachgerechte (und somit zeitaufwendige) Verkabelung entfällt. Das in dieser Arbeit vorgestellte Monitoringsystem sieht daher Funksensoren für den autonomen Messbetrieb und die Datenübermittlung vor.

Mittlerweile beschäftigen sich immer mehr Forschungsarbeiten mit dem Thema der Funkkommunikation in autonomen Messsensoren. In [3] wird ein System beschrieben, welches einen Stromwandler für das gemeinsame Messen und Energy Harvesting von Haushaltsleitungen verwendet und die gemessenen Stromwerte mittels IEEE 802.15.4 Standard überträgt. Bei einer angeschlossenen Last von 300 W kann der Sensor alle 60 Sekunden eine Messung und Übertragung durchführen. Der Sensor benötigt jedoch eine Backup-Batterie, um zuverlässig starten zu können. In [4] wird ein ähnlicher Sensor vorgestellt, welcher im Gegensatz zu der vorherigen Arbeit auch um eine Doppelleitung (N+L) angebracht werden kann und keine Batterie benötigt. Bei einem Leitungsstrom von 4 A können hier bis zu 1.89 mW Energie gewonnen werden. Der Sensor muss jedoch in einer bestimmten und starren Position an der Leitung angebracht werden. Auch das Konzept aus [5] verlangt nach einer korrekten und fixen Installation. Dieser Monitoring-Sensor ist in der Lage nicht-invasiv Spannung und Strom zu messen und die Daten drahtlos zu übertragen. Bei einem Leitungsstrom von 170 A können alle 2 Minuten Daten übertragen werden. Ebenfalls ohne Backup-Batterie kommt der in [6] vorgestellte Strommesssensor aus. Hier werden zwei getrennte Module für Energy Harvesting und Messung verwendet. Die Strommessung geschieht mittels Rogowski-Spule und für die Energiegewinnung wird ein Stromwandler verwendet. Dies ermöglicht zwar ein individuelles Anpassen der beiden Elemente und einen damit optimierten Betriebsbereich, erhöht aber den Hardware- und Kostenaufwand. Das System ist für Mittelspannungsleitungen ausgelegt und erreicht bei einem Betriebsbereich von 1 A bis 1000 A Leitungsstrom eine Leistungsaufnahme von 0.3 W für den Sensorbetrieb. Weiters wird in [7] ein Sensor vorgestellt, welcher aus dem Streufeld einer anliegenden Stromleitung mittels eines Flusskonzentrators ausreichend Energie für eine Strom- und Temperaturmessung gewinnt. Bei einem Leitungsstrom von 50 A bis 1000 A ist der Sensor aktiv, misst periodisch den Leitungsstrom und überträgt diesen drahtlos. Bei 100 A kann der Sensor einmal pro Minute eine Messung starten und das Ergebnis übertragen. Die Strommessung über das Streufeld erfordert jedoch ebenfalls ein präzises

Anbringen bzw. Kalibrieren des angebrachten Sensors und eignet sich somit nicht für eine einfache Installation.

Die vorgestellten Systeme benötigen im Allgemeinen entweder eine Backup-Batterie für den Schwarzstart, verwenden getrennte Technologien für Mess- und Harvesting-Module oder verlangen nach einer präzisen Platzierung und Installation. Das in dieser Arbeit vorgestellte System soll diese Nachteile überwinden und mit nur einer Technologie und ohne Backup-Batterie flexibel an den Leitungen jeder (Orts-)Netzstation angebracht werden können.

## 2.1 Energy Harvesting

Als Vorarbeit für dieses Projekt wurden die verschiedenen Harvesting-Methoden verglichen und auf ihre Eignung für dieses Projekt hin untersucht. [8], [9] und [10] geben einen Überblick über dieses Forschungsgebiet und führen verschiedene Verfahren zur Energiegewinnung für drahtlose Sensoren an. Zu den gängigsten Energiequellen zählen natürliche Quellen (Sonne, Wind, Wasser, etc.), mechanische Quellen (Vibration, Bewegung, etc.), thermische Quellen (Thermoelektrizität) oder elektromagnetische Quellen. Da in (Orts-)Netzstationen weder mit natürlichen noch thermischen oder mechanischen Quellen in ausreichend konstantem Maße gerechnet werden kann, liegt der Fokus daher auf dem Energiebezug aus dem elektromagnetischen Feld einer vorhandenen Stromleitung.

In [11] wird ein Sensor vorgestellt, der aus dem Streufeld einer Haushaltsleitung (einphasig, N+L gemeinsam) ausreichend Energie für eine Datenübertragung der gemessenen Temperatur alle 5 Minuten mittels eines Zigbee Moduls gewinnt. In [12] wird ein Sensor gezeigt, welcher aus dem elektrischen Streufeld einer 35 kV Leitung eine kontinuierliche Leistung von 17 mW beziehen kann. In beiden dieser Arbeiten ist kein Umschließen der Stromleitung nötig. Im Gegensatz dazu wird in [13] gezeigt, wie mittels einer Rogowski-Spule (Spule mit Luftkern), welche um eine Niederspannungsleitung geschlungen wird, Energie für einen Sensorbetrieb gewonnen werden kann. Aufgrund des fehlenden Kernmaterials ist diese zwar kostengünstig, erreicht aber einen maximalen Sensor-Leistung von 250  $\mu$ W bis 5 mW. Bei der Verwendung eines Stromwandlers (Spule mit Eisenkern) lassen sich deutlich höhere Energiemengen gewinnen und daher findet dieses Prinzip in vielen Arbeiten Anwendung. Beispielhaft seien hier [14], [15], [16] oder [17] genannt. In [17] kann so etwa an einer Niederspannungsleitung mit einem Leitungsstrom von 10.8 A bereits eine Sensorleistung von 10.8 mW erreicht werden.

## 2.2 Nicht-invasive Strommessung

Ein Vorteil der nicht-invasiven Strommessung besteht darin, dass die zu messende Leitung nicht aufgetrennt werden muss. Dies verringert den Installationsaufwand und ermöglicht ein Anbringen im laufenden Betrieb. Hierbei lassen sich grundsätzlich drei verschiedene in der Industrie eingesetzte Verfahren unterscheiden: Stromwandler, Rogowski-Spule oder Hall-Sensor. [18] und [19] geben einen Überblick über das Funktionsprinzip und Vor- und Nachteile des Stromwandlers und der Rogowski-Spule. Die Rogowski-Spule zeichnet sich durch geringe Kosten, hohe Flexibilität und einen großen sättigungsfreien Messbereich mit hoher Bandbreite aus. Nachteilig ist vor allem die geringe Spannungsinduktion und die dadurch nötige Verstärkerschaltung im Messsystem. Ähnlich verhält es sich mit der Strommessung mittels Hall-Sensor. Wie in [20] gezeigt, ist auch hier eine Verstärkung des

Messsignals nötig. Zusätzlich entstehen durch den benötigten Eisenkern hohe Kosten und die messbare Bandbreite ist geringer. Vorteilhaft ist hingegen die Möglichkeit zur Gleichstrommessung. Ein Sensorsystem basierend auf einem Hall-Sensor ist etwa in [21] beschrieben.

Der Einsatz eines Stromwandlers zählt zu einem gängigen Messverfahren und findet in der Literatur große Verbreitung (z.B. [22], [3], [19]). Auch hier sind der notwendige Eisenkern und die damit verbundenen Kosten und geringere Bandbreite ein limitierender Faktor. Im Gegensatz zur Rogowski-Spule und dem Hall-Sensor ermöglicht der Eisenkern jedoch eine hohe Leistungsübertragung. Somit ist keine Verstärkerschaltung nötig und der gleichzeitige Einsatz als Energielieferant für ein Sensorsystem möglich.

Abschließend sei auch die Arbeit in [23] angeführt. Hier wird der zu messende Strom aus dem Streufeld der Leitung mittels mehrerer angebrachter Sensoren ermittelt. Von Nachteil ist dabei allerdings vor allem die individuell nötige Kalibrierung der Sensoren. Stromwandler und Rogowski-Spule können im Gegensatz dazu ohne besondere Beachtung beliebig um die Leitung gelegt werden.

### 2.3 Funktechnologie

Für die Übermittlung von Daten gibt es eine Vielzahl an Technologien. Konventionell wird eine Kabelverbindung genutzt, da diese die höchste Sicherheit, Störfestigkeit gegenüber der Umwelt, hohe Datenraten und eine gute Zeitsynchronisierung ermöglicht. Jedoch gibt es eine große Anzahl an Funktechnologien, welche ebenfalls die nötigen Anforderungen erfüllen können. Funktechnologien zeichnen sich durch geringere Störfestigkeit und Datendurchsatz gegenüber einer Kabellösung aus. Diesen Nachteilen wird in dieser Arbeit der Vorteil der einfacheren Integration in ein bestehendes System ohne zusätzliche Umbauarbeiten gegenübergestellt. Durch die Vielzahl an möglichen Funktechnologien wie Zigbee, Bluetooth, WirelessHART usw. gibt es keine Lösung, die unter allen Umständen zu bevorzugen ist, sondern es muss für die individuellen Anforderungen eine geeignete Technologie gewählt werden. So können die genannten Nachteile jeweils minimiert werden.

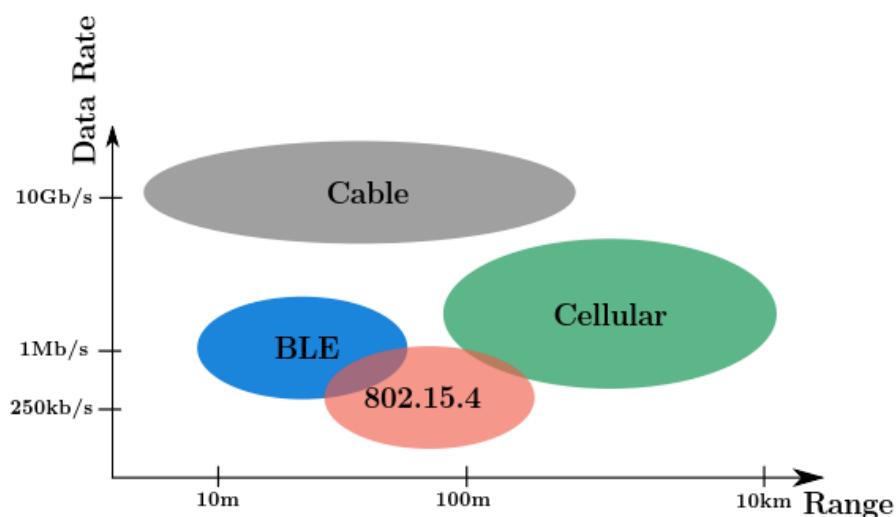


Abbildung 2: Unterschiedliche Kommunikationstechnologien. (Cable: leitungsgebundene Kommunikation; BLE: Bluetooth Low Energy; 802.15.4: Funkstandard auf den Zigbee und WirelessHART aufbaut; Cellular: Mobilfunk)

In Abbildung 2 sind verschiedene Kommunikationstechnologien hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Reichweite und Datenübertragungsrate hervorgehoben. [24]

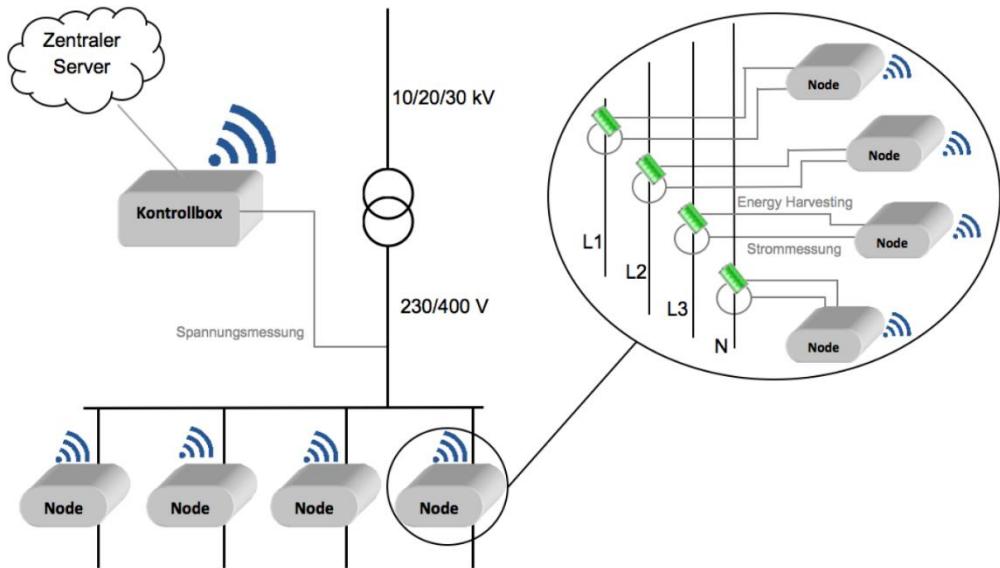
In [25] werden unterschiedliche Funktechnologien für IoT Anwendungen untersucht und verglichen. Dazu sind Short Range und Long Range Technologien und deren Eigenschaften evaluiert worden. Je nach Einsatzzweck hat jede Technologie ihre Vor- und Nachteile.

Auf Basis dieser Evaluierung und der oben angeführten Anforderungen wurde als mögliche Technologie für die Funkübertragung der BLE (Bluetooth Low Energy) Standard identifiziert. Dieser ermöglicht eine einfache Integration in bestehende Strukturen und eine leichte Erweiterbarkeit. Außerdem kann die notwendige Sicherheit, der Datendurchsatz und die Reichweite erfüllt werden. BLE hat den Vorteil, dass es weltweit in einem freien Frequenzband genutzt werden kann. Ein weiterer positiver Aspekt ist der geringe Energieverbrauch, insbesondere da die meiste Energie des Sensorbetriebs für den Senden- und Empfangsvorgang benötigt wird. Weiters kann durch eine intelligent gewählte Netztopologie die Reichweite erhöht und die Störanfälligkeit reduziert werden.

Durch das getrennte Messen von Spannungen und Strömen innerhalb der (Orts-)Netzstation kann es einerseits aufgrund von Verzögerungen in der gegenseitigen Kommunikation und andererseits aufgrund von unvermeidbaren Toleranzen und Drifts der einzelnen Hardwarekomponenten zu Zeitdifferenzen der gesammelten Messwerte kommen. Eine ausreichend zeitsynchronisierte Datenübertragung bzw. deterministische Übertragungsdauer und die damit verbundenen geringen Winkelfehler sind bei der Auswertung der Netzbelaistung essenziell und müssen daher ebenfalls von dem Funkprotokoll unterstützt werden. Dies steht bei keinem der Protokolle direkt zur Verfügung, jedoch kann das BLE Protokoll für eine ausreichend deterministische Übertragungsdauer modifiziert werden.

### 3 Gesamtsystem

Das grundsätzliche Konzept des Plug & Play Monitoringsystems ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Ströme der einzelnen niederspannungsseitigen Abgänge einer Netzstation werden mittels autonomer Sensoren gemessen. Die Sensoren, im Folgenden „Node“ genannt, bestehen dabei aus einem Strommess-Modul, einem Energy Harvesting-Modul, einem Prozessor zur Datenverarbeitung und einem Funkmodul zum drahtlosen Übertragen der Daten an ein übergeordnetes Modul, im Folgenden „Kontrollbox“ genannt. Sowohl für das Strommessen als auch Energy Harvesting wird ein gemeinsamer Stromwandler mit teilbarem Kern verwendet. Die Sensoren können somit einerseits autark und ohne Batterie arbeiten und lassen sich andererseits auch einfach und ohne notwendige Unterbrechung des Stationsbetriebes an den Abgängen anbringen, da die Stromwandler dank des teilbaren Kerns einfach an die vorhandenen Kabel angebracht werden können und hier weder eine präzise Montage noch eine Unterbrechung des Betriebs nötig ist. Dies verringert den Wartungsaufwand während des Betriebs und reduziert den Installationsaufwand und senkt somit die Kosten über den gesamten Produktzyklus gegenüber anderen in Kapitel 2 diskutierten Lösungen.



**Abbildung 3: Plug & Play Monitoringsystem**

Zusätzlich zu den lokalen Strommessungen misst die Kontrollbox örtlich und zeitlich unabhängig von den Nodes die Spannung mit direktem Abgriff auf der Sammelschiene, vorgelagerten Leistungsschalter oder ähnlichen vorhandenen Abgriffstellen. Die zeitliche Synchronisation der Strom- und Spannungswerte stellt eine Kernaufgabe der Kontrollbox dar. Da die Daten von den Sensoren drahtlos an die Kontrollbox übertragen werden, muss die Funkkommunikation eine ausreichende Synchronität gewährleisten. Dies ermöglicht die Berechnung von Leistungsparametern und Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Abgängen. Die Architektur ist dabei so gestaltet, dass die Möglichkeit besteht, verschiedene existierende aber auch zukünftig als Erweiterung entwickelte Verfahren zur Synchronisierung anzuwenden. Die Kontrollbox dient außerdem als Schnittstelle zur Außenwelt, über die Daten und Befehle mit einer zentralen Stelle (z.B. Netzbetreiber) ausgetauscht werden können.

#### 4 Aufbau einer Node

Abbildung 4 zeigt den Aufbau einer einzelnen Node. Hauptelement ist ein Stromwandler mit teilbarem Kern, welcher in beliebiger Position an der zu messenden Leitung am sekundären Abgang des Transfornators angebracht werden kann. Dieser wird sowohl für die Strommessung als auch das Energy Harvesting verwendet. Die notwendige Mess- und Harvestingschaltung sowie der Mikrocontroller und das Funkmodul werden gemeinsam am Stromwandler angebracht und ergeben einen drahtlosen und kompakten Sensor. Der Stromwandler wurde gewählt, da er sich, wie in Kapitel 2 gezeigt, gut für den kombinierten Einsatz des Messens und Harvestens eignet. Die Bandbreite ist ausreichend hoch für die Leistungsanalyse im Niederspannungsnetz und die hohe Energieübertragung ermöglicht eine lange Mess- und Sendephase.

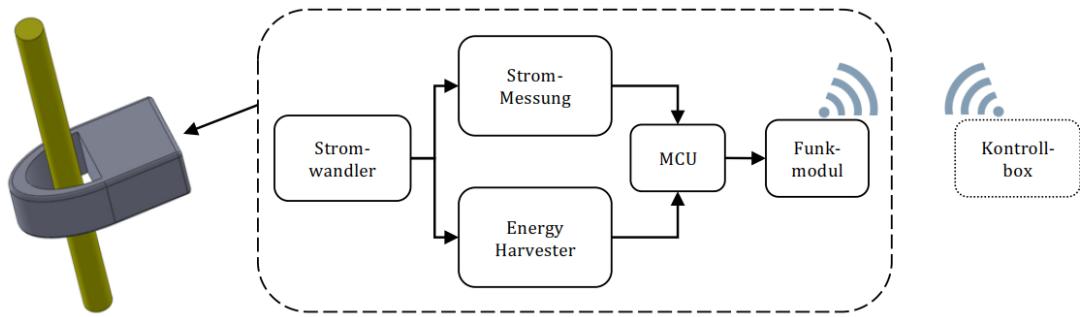


Abbildung 4: Aufbau einer Sensornode

Für den Entwurf der Harvesting- und Messschaltung wurde zu Beginn ein Simulationsmodell des Stromwandlers in LTSpice erstellt und verifiziert. Für den ersten Labor-Prototyp wurde ein 60/1 Stromwandler gewählt. Abbildung 5 zeigt das ermittelte Ersatzschaltbild in LTSpice und Abbildung 6 die Verifikation der Simulation durch Vergleich mit einer real aufgenommenen Hysteresekurve des Stromwandlers. Für genauere Details des Simulationsmodels sei auf [26] verwiesen.

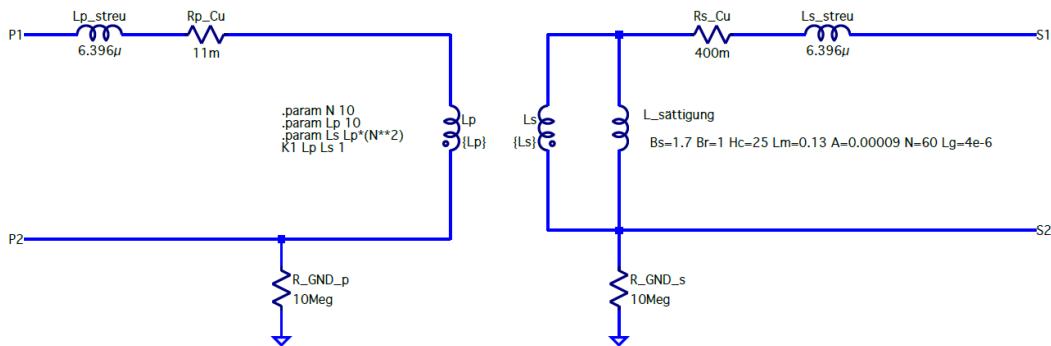


Abbildung 5: Simulationsmodell des Stromwandlers in LTSpice

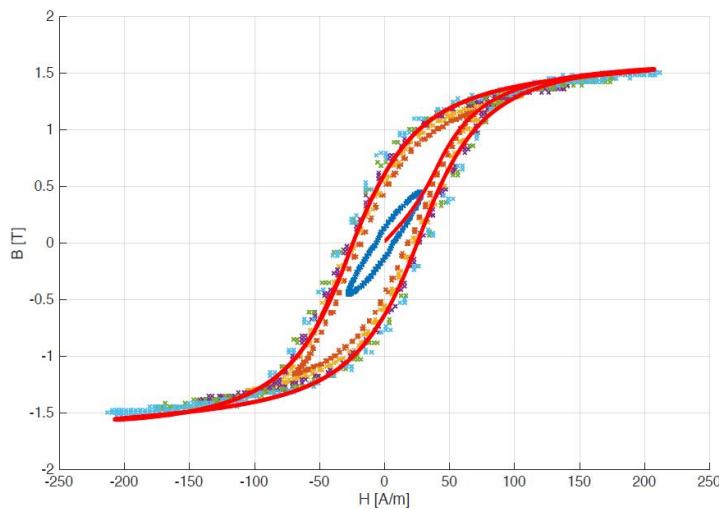


Abbildung 6: Vergleich der aufgenommenen Hysteresekurven (Punktdaten) des 60/1 Stromwandlers und den Ergebnissen der Simulation (durchgezogene Linie)

Basierend auf diesem Simulationsmodell wurden in LTSpice verschiedene Harvesting- und Messschaltungen analysiert. Als Energiespeicher wurde ein Superkondensator (Super-Cap) gewählt. Um die Messung nicht durch die Harvesting-Schaltung zu beeinflussen, wechselt

der Sensor immer zwischen Harvesting- und Messphase. In der Harvesting-Phase ist der Mikrocontroller stromlos und deaktiviert. Der Stromwandler lädt den Superkondensator bis zu einer Zielspannung ( $V_{T,HIGH}$ ) und wechselt anschließend automatisch in den Messmodus. In dieser Phase wird der Kondensator nicht mehr geladen und die Harvesting-Schaltung vom Wandler getrennt, um ein möglichst unverfälschtes Messignal zu erzeugen. Solange die Energie im Kondensator ausreicht misst der Sensor den Leistungsstrom, kann eine Vorverarbeitung der Messdaten vornehmen und überträgt diese an die Kontrollbox. Fällt die Spannung am Superkondensator unter einen Zielwert ( $V_{T,LOW}$ ), wechselt der Sensor selbstständig wieder in den Harvesting-Modus. Anders formuliert, der Schwarzstartfall (=Energie ist erschöpft) ist Teil des normalen Betriebes und es bedarf somit keiner zusätzlichen Backup-Batterien oder analogen Vorrichtungen.

Abbildung 7 zeigt den gesamten analogen Schaltungsentwurf des entworfenen Sensors inklusive der Primärleitung und dem Stromwandler-Modell (CT) in LTSpice. Diese Schaltung wechselt ohne Backup-Batterie eigenständig zwischen Harvesting- und Messphase und stellt in der Messphase einerseits eine stabile 3.3 V Versorgung ( $V_s$ ) und ein verstärktes Messignal ( $M_1$ ) für den Mikrocontroller und das Funkmodul zur Verfügung. Die obere und untere Zielspannung ( $V_{T,HIGH}$  und  $V_{T,LOW}$ ) werden durch das Widerstandsnetzwerk  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  und  $R_5$  eingestellt. Je nach Spannungsbereich und Kapazität des Superkondensators kann so einerseits die Ladedauer und die vorhandene Energie in der Messphase variiert werden und damit andererseits auch der minimal nötige Primärstrom (Leistungsstrom) für einen Sensorbetrieb angepasst werden. Bei einer oberen Zielspannung ( $V_{T,HIGH}$ ) von 2.5 V ist bei der vorliegenden Schaltung etwa ein minimaler Primärstrom von 22% Nennstrom des Stromwandlers nötig.

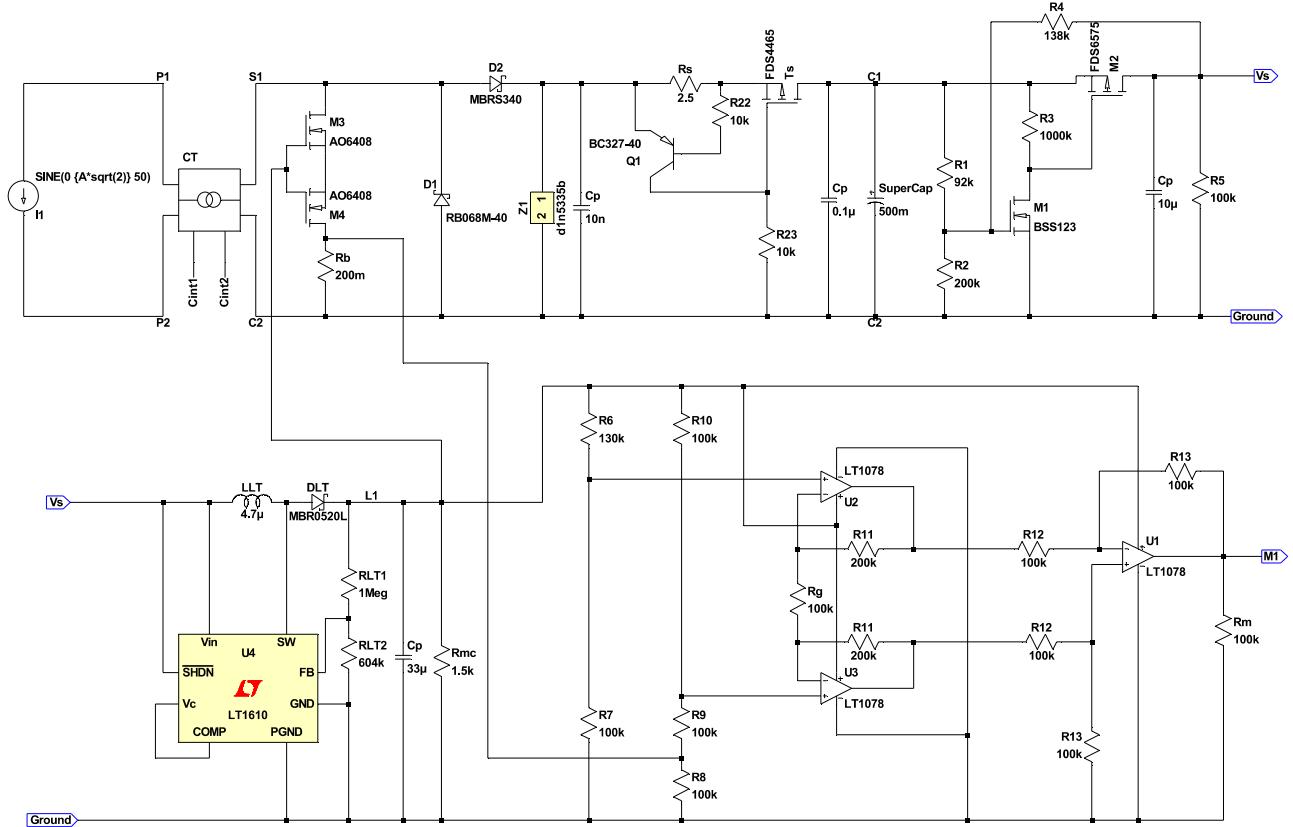


Abbildung 7: Schaltungsdesign mit Harvesting- und Messschaltung

Das Funktionsprinzip des analogen Schaltungsteils verdeutlicht Abbildung 8. Hier wurde als simulierte digitale Logik (Mikrocontroller und Funkmodul) eine konstante Last von 10 mA angeschlossen. Zu erkennen ist, dass der Kondensator ( $V_C$ ) auch nach einem Schwarzstart erfolgreich geladen wird. Beim Erreichen der Zielspannung  $V_{T,HIGH}$  (hier etwa 2.4 V) wechselt der Sensor in den aktiven Messbetrieb, M2 wird leitend und die Versorgungsspannung  $V_s$  und das Messsignal  $V_m$  sind aktiv. In dieser Phase sind M3 und M4 ebenfalls leitend. Dadurch entsteht einerseits das Messsignal in Form eines Spannungsabfalls an der Bürde  $R_b$  und andererseits wird der Superkondensator nicht mehr geladen, da der Spannungsabfall an  $R_b$  wesentlich geringer ist und die Diode D2 daher sperrt. In der Messphase entlädt sich der Kondensator bis zum Erreichen der unteren Grenzspannung  $V_{T,LOW}$ . Wird diese erreicht, dann sperrt M2 und die Versorgungsspannung wird deaktiviert. Dadurch sperren auch M3 und M4, die Bürde wird vom Wandler getrennt und dadurch beginnt eine neue Harvesting-Phase, in welcher der Superkondensator wieder bis  $V_{T,HIGH}$  geladen wird. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch ohne die Notwendigkeit einer externen Versorgung oder Batterie.

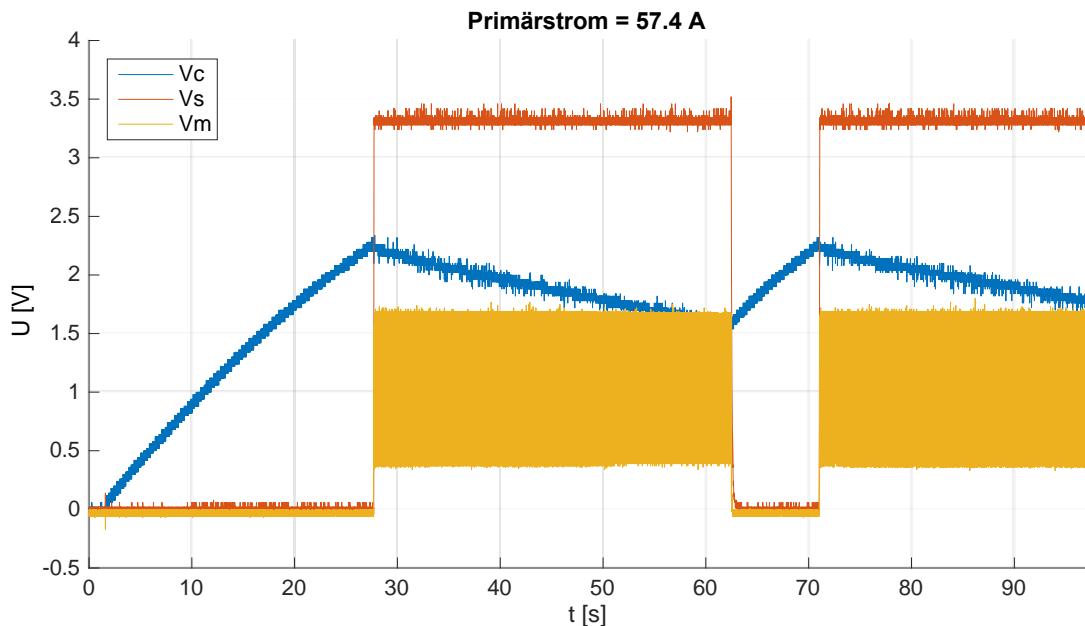
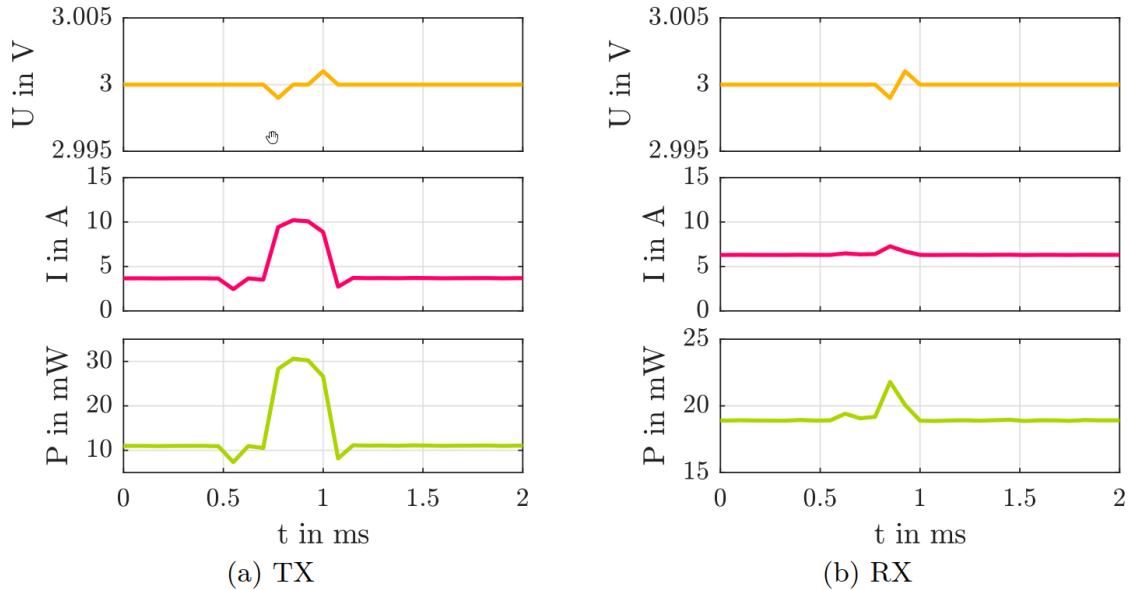


Abbildung 8: Spannungsverläufe am Prototyp mit einer 10 mA Last

Weiters wird für die Datenaufnahme, -bearbeitung und -übermittlung noch ein Mikrocontroller mit einem Funkmodul benötigt. Dazu kommt ein SoC (System on a Chip) von TI ([27]), bestehend aus einem Mikrocontroller und einem Funkmodul, zum Einsatz. Dieses System funkts im 2.4 GHz Bereich und unterstützt diverse Funkstandards, welche sowohl proprietäre Kommunikationen als auch die Verwendung des BLE Standards in der Version 4.2 ermöglichen. Für den Sensor ist der BLE Standard als Kommunikationslösung gewählt worden, da damit auch eine einfache Übertragung der Messwerte auf verschiedene Zielsysteme wie ein Smartphone, ein Tablet oder einen PC möglich ist. Außerdem unterstützt der BLE Standard diverse Netztopologien, um die Netzinfrastruktur bestmöglich aufzubauen zu können. Dies bedeutet, dass die Reichweite erhöht und die Störanfälligkeit erniedrigt werden kann. Darüber hinaus ist der Chip von TI ein Low Power Modul und benötigt daher wenig Energie. Das ist notwendig, um die zur Verfügung stehende Energie optimal ausnutzen zu können. Da die Funkmodule den meisten Strom während des

Sendevorgangs benötigen, ist es daher wichtig, den Stromverbrauch präzise zu kennen, um die Betriebsdauer zu optimieren. Abbildung 9 zeigt den Sende- und Empfangsvorgang eines 30 Byte langen Pakets. Es ist ersichtlich, dass im Sendefall die Leistung auf 30 mW ansteigt. Durch eine optimierte Ansteuerung der Funkschnittstelle kann der SoC die geforderte Strommessung und Datenübertragung durchführen. Weiterführende Informationen sind in [28] zu finden.



**Abbildung 9: Energieverbrauch beim Senden und Empfangen von 30 Byte mittels BLE**

Der Bluetooth Standard hat sich das Ziel gesetzt eine einfache Verbindungsmöglichkeit zwischen Geräten zu schaffen, um die Daten mit geringer Energie, geringen Implementierungskosten, hoher Datenrate und Interoperabilität auszutauschen. Dazu sind Bluetooth Profile in der Bluetooth Spezifikation geschaffen worden, um die einzelnen Anforderungen zur Datenübertragung ermöglichen zu können. Ab der Version 4.0 wird eine Low Power Variante angeboten, um die notwendigen Stromsparmaßnahmen für eine längere Betriebsdauer der Sensoren gewährleisten zu können.

|                    |  |
|--------------------|--|
| Frequency Band     | 2.45 GHz (2.402 GHz to 2.480 GHz)  |
| Channels           | 40 channels with 2 MHz spacing<br>(3 advertising channels/37 data channels)                                  |
| Data Rate          | LE 2M PHY: 2 Mb/s<br>LE 1M PHY: 1 Mb/s<br>LE Coded PHY (S=2): 500 kb/s<br>LE Coded PHY (S=8): 125 kb/s       |
| Max TX Power       | Class 1: 100 mW (+20 dBm)<br>Class 1.5: 10 mW (+10 dBm)<br>Class 2: 2.5 mW (+4 dBm)<br>Class 3: 1 mW (0 dBm) |
| Network Topologies | Point-to-Point (including piconet)<br>Broadcast<br>Mesh  |

**Tabelle 1: Features von BLE [29]**

## 5 Ergebnisse

Abbildung 10 zeigt den entworfenen Sensor-Prototyp, welcher den Messwert aufnimmt und mittels BLE Kommunikation überträgt. In Orange eingerahmt ist dabei die analoge Mess- und Harvesting-Schaltung. Im gelb eingerahmten Bereich ist das verwendete SoC-Modul CC2650 von TI ersichtlich. Der Stromwandler wird mittels einer Steckverbindung an den Prototyp angeschlossen. Zu einem späteren Zeitpunkt soll die komplette Hardware miniaturisiert auf einer Platine mit direkt angeschlossenem Stromwandler realisiert werden.



Abbildung 10: Sensorprototyp

Der Prototyp ist bei ausreichend großem Primärstrom (Leitungsstrom) in der Lage, selbstständig zwischen Harvesting- und Messphase zu wechseln und in der Messphase die aufgenommenen Stromwerte vorzuverarbeiten und mittels BLE zu übertragen. Für die Überprüfung der korrekten Messfunktion wurde der Prototyp im Labor an eine Testleitung angeschlossen. Der Vergleich des Primärstroms (aufgenommen mit einer kalibrierten Strommesszange) mit dem vom Sensor aus  $V_M$  berechneten Messwert ist in Abbildung 11 ersichtlich. Die Genauigkeit des Messergebnisses liegt im Toleranzbereich des verwendeten Stromwandlers.

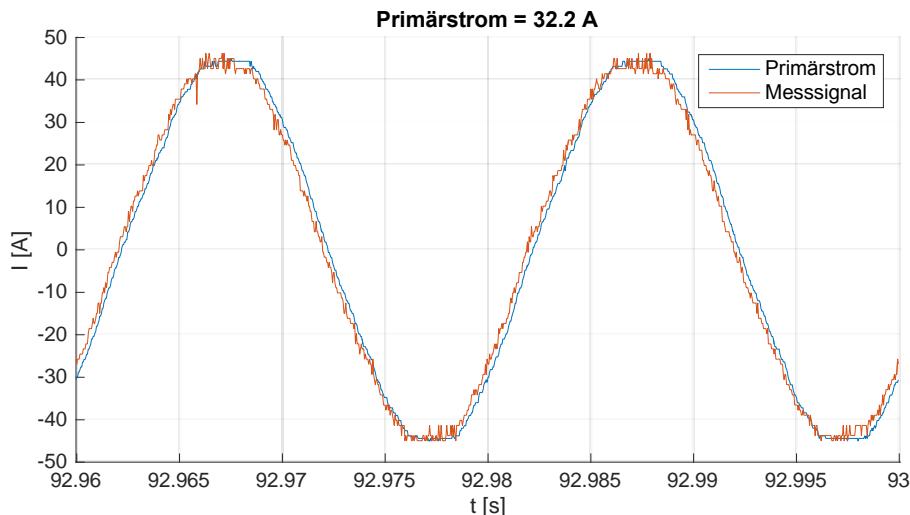


Abbildung 11: Vergleich des Primärstroms mit dem vom Sensor berechneten Messwert

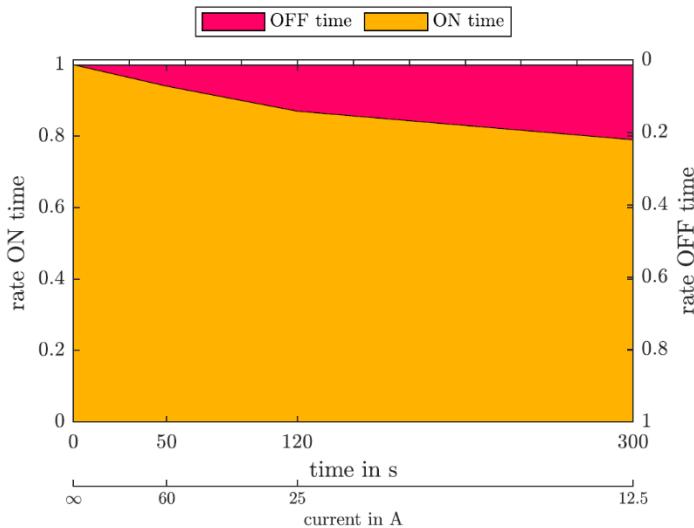


Abbildung 12: Die Betriebsphasen des Strommesssensors

Weiters sind Messungen und Simulationen zu der Betriebsdauer des Sensors durchgeführt worden. Das Ergebnis ist in Abbildung 12 ersichtlich. Dabei charakterisieren die zwei Zustände „OFF time“ und „ON time“ die beiden Betriebsmodi des Sensors. Innerhalb der OFF time gewinnt der Stromsensor über den Stromwandler die notwendige Energie, um dann in die ON time für den Messmodus wechseln zu können (= Harvesting-Phase). Bei einer genügend hohen Stromstärke könnte der Messsensor theoretisch fast 100% der Messwerte aufnehmen, da der Superkondensator sehr rasch geladen wird und der Anteil der Harvesting-Phase verschwindend klein ist. Limitiert wird dies durch den Nennbereich des gewählten Stromwandlers und zusätzlich durch die in der Schaltung eingebaute Strombegrenzung. Mit dem Widerstand  $R_s$  kann der maximale Ladestrom des Superkondensators an dessen Kenngrößen angepasst werden. Die tatsächliche Stromstärke hängt im realen Betrieb von der Belastung des Netzes ab. Die Dauer der möglichen Messzeit nimmt dabei mit sinkender Stromstärke ab, da die Harvestingzeit ansteigt. Im unteren Belastungsbereich ist auch die Einschränkung durch die Hardware selbst zu beachten, da diese beim vorliegenden Prototyp für den Betrieb einen minimal nötigen Leistungsstrom von ca. 22 % Nennstrom des Stromwandlers benötigt. Diese Grenze lässt sich durch die Wahl der Zielpotenzial  $V_{T,HIGH}$  beeinflussen und an die jeweiligen Anforderungen anpassen.

Der entwickelte Messsensor kann unter Berücksichtigung der Mess- und Harvestingzeiten und des minimal nötigen Leistungsstroms zum Monitoring der Leistungsdaten einer (Orts-) Netzstation herangezogen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Sensor aufgrund seiner Bauweise keine kontinuierlichen Messungen durchführen kann, aber für allgemeine Betrachtungen zur Auslastung des Netzes verwendet werden kann. Im nächsten Schritt der Arbeit soll der Sensor noch um eine Zeitsynchronisation erweitert werden. Dies ist für die Kombination der Stromwerte mit den an der Kontrollbox gemessenen Spannungswerten notwendig, um die gegenseitige Phasenlage und damit den Leistungsfaktor, die Blind- und Wirkleistung bestimmen zu können. Diese nicht triviale Zeitsynchronisation wird momentan in einem Nachfolgeprojekt entwickelt.

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiges drahtloses Plug & Play Monitoringsystem vorgestellt, welches einfach und schnell in bestehende Netzstrukturen eingebaut werden kann. Die Vorteile des gezeigten Systems sind die leichte Integrierbarkeit in bestehende (Orts-)Netzstationen ohne der Notwendigkeit von kostenintensiven Installationsarbeiten und der Verzicht auf den Einsatz von Batterien. Dadurch können einerseits die Personalkosten für die Integration und Wartung reduziert werden und andererseits die Datendichte im Niederspannungsnetz erhöht werden. In [30] werden Fallstudien, Kosten und Erlöse für die Integration, Nutzung und Nutzen neuer Messsysteme betrachtet. Dabei wurden herkömmliche GMDs mit Kabellösungen herangezogen. Im Vergleich zu dem hier vorgestellten drahtlosen Monitoringsystem ist der Einbau der kabelgebundenen GMDs wesentlich aufwändiger und mit höheren Kosten verbunden. Es zeigte sich, dass bei ausreichend dichtem Netzmonitoring ein Netzausfall vermieden werden könnte und dadurch der Erlös steigt. Außerdem können positive Systemeffekte durch die Überwachung des Netzes hervorgerufen werden.

Ein weiterer Vorteil der autonom arbeitenden Sensoren ist die Wiederverwendbarkeit des Monitoringsystems in verschiedenen Netzstationen. Dies bedeutet, dass das Sensorsystem nicht nur für dauerhafte Monitoringaufgaben sondern im Bedarfsfall auch nur kurzzeitig in einzelnen Stationen eingesetzt werden kann. Darüber hinaus kann das Wartungspersonal mit einem BLE-fähigen Gerät direkt vor Ort auf die Sensoren zugreifen und die Messwerte auslesen.

Drahtlose Harvesting Messsensoren können in Zukunft den Aus- und Aufbau eines Smart Grids beschleunigen und stellen daher ein vielversprechendes Forschungsgebiet dar. Durch die einfache Integrierbarkeit von Plug & Play Sensoren würde die Messdatendichte steigen und die Ausfallswahrscheinlichkeit im Netz sinken.

Als Ausblick für weitere Forschungen ist die Zeitsynchronisation der Funkkommunikation zu nennen. Diese ist für die Übertragung der Daten notwendig, da die einzelnen Sensoren an unterschiedlichen Orten befestigt werden können und mit der Kontrollbox zeitlich abgestimmt kommunizieren müssen. Um eine präzise Zeitsynchronisation zu schaffen, muss das Funkprotokoll adaptiert werden. Auch die Optimierung der analogen Schaltung zur Reduktion des nötigen minimalen Primärstroms und Verbesserung der Messgenauigkeit wird in Folgeprojekten weiterentwickelt.

## 7 Danksagung

Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2015 durchgeführt.



## Literatur

- [1] A. J. Praktiknjo, A. Hähnel, and G. Erdmann, "Assessing energy supply security: Outage costs in private households," *Energy Policy*, vol. 39, no. 12, pp. 7825–7833, 2011.
- [2] J. Reichl, M. Schmidthaler, and S. Schmidinger, "Blackout Simulator 2.0." [Online]. Available: <http://www.blackout-simulator.com/>. [Accessed: 29-Jan-2019].
- [3] D. Porcarelli, D. Brunelli, and L. Benini, "Clamp-and-measure forever: A MOSFET-based circuit for energy harvesting and measurement targeted for power meters," *Proc. 2013 5th IEEE Int. Work. Adv. Sensors Interfaces, IWASI 2013*, pp. 205–210, 2013.
- [4] T. C. Huang *et al.*, "Non-invasion power monitoring with 120% harvesting energy improvement by maximum power extracting control for high sustainability power meter system," *Proc. Cust. Integr. Circuits Conf.*, 2012.
- [5] F. Cai, D. J. Chung, E. Farantatos, a. P. S. Meliopoulos, and J. Papapolymerou, "Self-powered advanced meter design for smart grid," *2010 Asia-Pacific Microw. Conf.*, no. 2, pp. 1380–1383, 2010.
- [6] A. Nowakowski, P. Włazło, and R. Przybysz, "Intelligent Current Sensors as Part of Smart Grid Network," *Acta Energ.*, vol. 23, no. 23, pp. 48–53, 2015.
- [7] R. Moghe, Y. Yang, F. Lambert, and D. Divan, "Design of a low cost self powered 'Stick-on' current and temperature wireless sensor for utility assets," *2010 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2010 - Proc.*, pp. 4453–4460, 2010.
- [8] R. Moghe, Yi Yang, F. Lambert, and D. Divan, "A scoping study of electric and magnetic field energy harvesting for wireless sensor networks in power system applications," *2009 IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 3550–3557, 2009.
- [9] D. Niyato, M. M. Rashid, and V. K. Bhargava, "Wireless sensor networks with energy harvesting technologies: A game-theoretic approach to optimal energy management," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 4, pp. 90–96, 2007.
- [10] C. Ó. Mathúna, T. O'Donnell, R. V. Martinez-Catala, J. Rohan, and B. O'Flynn, "Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks," *Talanta*, vol. 75, no. 3, pp. 613–623, 2008.
- [11] H. Kim, D. Choi, S. Gong, and K. Park, "Stray electric field energy harvesting technology using MEMS switch from insulated AC power lines," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 17, pp. 1236–1237, 2014.
- [12] H. V. A. Smart, R. Moghe, A. R. Iyer, S. Member, F. C. Lambert, and S. Member, "A Low-Cost Electric Field Energy Harvester for," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2, pp. 1828–1836, 2015.
- [13] T. C. Huang, Y. Y. Yang, Y. H. Lee, M. J. Du, S. H. Cheng, and K. H. Chen, "A battery-free energy harvesting system with the switch capacitor sampler (SCS) technique for high power factor in smart meter applications," *2011 IEEE/IFIP 19th Int. Conf. VLSI Syst. VLSI-SoC 2011*, pp. 359–362, 2011.
- [14] F. U. Khan, "Energy Harvesting from the Stray Electromagnetic Field around the Electrical Power Cable for Smart Grid Applications," vol. 2016, 2016.
- [15] R. H. Bhuiyan, R. A. Dougal, and M. Ali, "A miniature energy harvesting device for wireless sensors in electric power system," *IEEE Sens. J.*, vol. 10, no. 7, pp. 1249–1258, 2010.
- [16] J. Cheang, W. Cheng, D. Gavrilov, B. Schiller, V. Smagin, and M. Gouzman, "High efficiency powering system for wireless sensor for AC monitoring in smart grid

- applications," *2014 11th Int. Conf. Expo Emerg. Technol. a Smarter World, CEWIT 2014*, pp. 1–5, 2014.
- [17] D. Porcarelli, D. Balsamo, D. Brunelli, and G. Paci, "Perpetual and Low-cost Power Meter for Monitoring Residential and Industrial Appliances," *Des. Autom. Test Eur. Conf. Exhib. (DATE)*, 2013, pp. 1155–1160, 2013.
- [18] L. Helong, S. Beczkowski, S. Munk-Nielsen, L. Kaiyuan, and W. Qian, "Current measurement method for characterization of fast switching power semiconductors with Silicon Steel Current Transformer," *Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), 2015 IEEE*, no. August 2016, pp. 2527–2531, 2015.
- [19] S. Burns and O. Khan, "LCN FUND TIER 1 CLOSE DOWN REPORT LV CURRENT SENSOR TECHNOLOGY EVALUATION," no. August, pp. 1–125, 2013.
- [20] Infineon, "Current Sensing Using Linear Hall Sensors - Application Note," no. February, pp. 1–18, 2009.
- [21] J. Specht, "Sensor system for metering and energy management applications."
- [22] Q. Wu, "Modeling and Analysis of Current Transformer for Fast Switching Power Module Current Measurement," 2016.
- [23] D. Lawrence, J. S. Donnal, and S. Leeb, "Current and voltage reconstruction from non-contact field measurements," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 15, pp. 6095–6103, 2016.
- [24] N. Hunn, *Essentials of Short-Range Wireless*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [25] M. Elkhodr, S. Shahrestani, and H. Cheung, "Emerging Wireless Technologies in the Internet of Things : A Comparative Study," *Int. J. Wirel. Mob. Networks*, vol. 8, no. 5, pp. 67–82, 2016.
- [26] D. Hauer, *Energy Harvesting und Lastflussmessung in Verteilnetzstationen mittels Stromwandler*. Wien: Wien, 2017.
- [27] Texas Instruments, "CC2650 - SimpleLink™ Multistandard Wireless MCU," pp. 1–59, 2015.
- [28] B. Pitschko, *Anforderungen an ein adaptives funkbasiertes Strommesssystem in Verteilnetzstationen*. Wien: Wien, 2018.
- [29] Bluetooth SIG, "Bluetooth 5.0," vol. 5.0, no. December, p. 2822, 2016.
- [30] O. Juli, "SC Demo Aspern," FFG: 846141, 2017.