

Adaption und Validierung einer Low Cost μ PMU zur Netzüberwachung im Niederspannungsnetz

Melina Gurcke, Kevin Timpe, Michael Kelker, Jens Haubrock

Fachhochschule Bielefeld Institut für Technische Energie-System (ITES) Interaktion 1 33619
Bielefeld, +49.521.106-70981, melina.gurcke@fh-bielefeld.de,
fh-bielefeld.de/iium/ites

Kurzfassung: Eine flächendeckende Überwachung des Verteilnetzes findet zurzeit noch nicht statt, mit der zunehmenden Anzahl von Ladestationen und erneuerbaren Energien (EE) im Verteilnetz ist jedoch ein höheres Maß an Überwachung erforderlich, um die Netzsicherheit zu gewährleisten. Phasor-Measurement-Units (PMUs) haben sich als präzise und zuverlässige Messtechnik etabliert und kommen im Übertragungsnetz häufig zum Einsatz. Konventionelle PMUs bieten eine hohe Genauigkeit und sind daher kostenintensiv. Aufgrund der großen Anzahl von Knotenpunkten im Verteilnetz müssen jedoch kosteneffiziente Messgeräte eingesetzt werden. Daher wurde als eine kostengünstige Messeinheit für Niederspannungs-Verteilnetze eine Low-Cost Micro-PMU (LOCO μ PMU) weiterentwickelt und ergänzt. Um eine Anwendung im Niederspannungsnetz zu realisieren, wird ein Wandler zur Anpassung der Spannungspegel an den Eingangspiegel der μ PMU benötigt. Aus Gründen der Kosteneffizienz wurden keine kommerziell erhältlichen Module verwendet, sondern eigens konzipierte und entwickelte Wandler eingesetzt. Die Validierung des entwickelten μ PMU-Aufbaus zeigt sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit der Signalform. Die Abweichung der Genauigkeit der μ PMU für die Frequenz und den Effektivwert ist besser als 1 %. Für den Phasenwinkel ist sie im Durchschnitt besser als 2 %.

Keywords: μ PMU, Phasor Measurement Unit, Verteilnetz, Niederspannung

1 Einleitung

Im Übertragungsnetz haben sich Phasor-Measurement-Units (PMUs) zur Netzüberwachung als leistungsfähige Messtechnik etabliert. Eine Überwachung des Verteilnetzes findet derzeit noch nicht statt. Aufgrund der Ziele der Energiewende in der Europäischen Union (EU) wird es zukünftig jedoch notwendig sein, Verteilnetze messtechnisch zu überwachen. Der Anteil der erneuerbaren Energien (EE) an der Gesamtenergieerzeugung in der EU soll bis 2030 auf 40 % erhöht werden, und die durchschnittlichen jährlichen Emissionen von Neufahrzeugen sollen ab 2030 um 55 % und ab 2035 um 100 % im Vergleich zu 2021 gesenkt werden [1]. Diese politischen Ziele zeigen die Verlagerung der Stromerzeugung auf dezentrale erneuerbare Energien und gleichzeitig eine Zunahme neuer Lasten wie batteriebetriebener Elektrofahrzeuge. Beides wird hauptsächlich im Verteilernetz installiert, in dem heute fast keine Messeinrichtungen vorhanden sind. Die Netzbetreiber stehen vor der Herausforderung, die Netzsicherheit des Niederspannungsnetzes mit einer ständig wachsenden Anzahl von Großverbrauchern und EE aufrechtzuerhalten. Aus diesem Grund muss die Messtechnik im Verteilnetz im Rahmen der Entwicklung des Stromnetzes weiter ausgebaut werden. Eine Möglichkeit, das Verteilnetz zu überwachen, ist die Installation von gut etablierter Messtechnologie; PMUs. Im Vergleich zum Übertragungsnetz ist das Niederspannungsnetz viel größer und hat eine größere Anzahl von Knotenpunkten, so dass hier mehr Messgeräte

installiert werden müssen. Gleichzeitig ist der Energiedurchsatz pro Knoten vergleichsweise geringer. Dies führt zu einer viel engeren Kostenstruktur im Niederspannungsnetz für die Messung. Konventionelle PMUs sind aufgrund der hohen Anforderungen an Genauigkeit und Echtzeitbetrieb kostenintensiv. Die Überwachung eines Niederspannungsnetzes mit herkömmlichen PMUs wäre demnach kostenintensiv und unwirtschaftlich. Daher müssen kostengünstige Lösungen, sogenannte Low Cost (LOCO) μ PMUs, für den Einsatz im Niederspannungsnetz entwickelt werden.

2 μ -Phasor-Measurement-Unit (μ PMU)

Eine μ PMU ist eine Messeinheit, die heute in vielen Stromversorgungsgeräten, wie z. B. digitalen Schutzgeräten, eingebaut ist. Sie misst die Zeiger von Strömen und Spannungen. Gemäß IEEE Std C37.118.1TM-2011 muss eine PMU folgende Werte ermitteln und ausgeben: Name der PMU, Frequenz, ROCOF (Frequenzänderungsrate), Phasenwinkel und Effektivwert. [6] Die gemessenen Signale erhalten ein hochpräzises Zeitsignal und eine Zeitsynchronisation. Eine GPS-Antenne (Global Positioning System) liefert das Zeitsignal. Die Länge der Zeiger wird aus dem Effektivwert der Spannung oder des Stroms, der Phasenwinkel aus dem Sinus der Frequenz und einer dem Zeitsignal entsprechenden Kosinusfunktion bestimmt. Die Messdaten werden in Echtzeit an ein übergeordnetes System übertragen und dort verarbeitet. Herkömmliche PMUs, die im Übertragungsnetz eingesetzt werden, haben eine hohe Genauigkeit und sind dementsprechend sehr kostenintensiv in der Anschaffung. Da μ PMUs im Niederspannungsnetz zur stationären Überwachung eingesetzt werden, können die Anforderungen an die Aktualisierungsrate gelockert werden und es kann auf kostengünstigere Hardware zurückgegriffen werden. [3]

3 Stand von Wissenschaft und Technik

Die Entwicklung von LOCO μ PMUs für das Niederspannungsnetz ist in den letzten fünf Jahren in der Literatur recht selten vertreten. Einige Entwicklungen wurden getestet, wie z. B. in [2]. Carducci et al. reduzierten die Investitionskosten, indem sie nur die notwendigste Hardware verwendeten und die Komplexität auf die Softwareseite verlagerten. Eine Open Source-basierte Software ermöglicht schnelle Anpassungen. Das beschriebene System ist konform mit dem IEEE-Standard C37.118.1, genauso wie die in [3] und [4] entwickelten PMUs. Guamán et al. entwickelten eine kostengünstige PMU auf der Grundlage einer Entwicklungsplattform, die von einem digitalen Signalprozessor (DSP) gesteuert wird, die Schätzung der Synchronphasen erfolgt mithilfe der diskreten Fourier-Transformation (DFT). Angioni et al. untersuchten einen ähnlichen Ansatz. Die PMU basiert auf einem Analog-Digital-Wandler (engl. analogue-digital-converter; ADC) und einem Raspberry Pi (RPI). Die Kommunikation erfolgt über den IEC 61850-Standard. In [5] wird ein ähnliches System wie bei Angioni et al. um einen Wandler erweitert und ein Phasor-Data-Collector (PDC) implementiert. Das Wandlermodul passt die Größe des Eingangssignals an den Messbereich des ADCs an. Nur Seger et al. untersuchen die weiteren Komponenten, die für den Einsatz der μ PMU im Niederspannungsnetz benötigt werden.

Im Gegensatz zu den im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten verwandten Arbeiten befasst sich diese Ausarbeitung mit der Entwicklung der zusätzlichen Wandler, die für den Einsatz einer μ PMU in einem realen Niederspannungsnetz erforderlich sind. Die erweiterte

μ PMU besteht hauptsächlich aus einem ADC und einem RPI. Es wurden zwei Versionen von μ PMU-Systemen für zwei Anwendungen zur Überwachung zukünftiger intelligenter Stromnetze entwickelt. Das eine System ist auf die Messung von Ladestationen spezialisiert und soll in eine intelligente Ladestation integriert werden. Die zweite Version ist für die Überwachung größerer Knotenpunkte in Wohngebieten gedacht. Die Messung wird an lokalen Netzstationen platziert. Im Gegensatz zu Seger et al. wird durch das System nicht nur die Spannungsmessung, sondern auch die Strommessung ermöglicht.

4 LOCO- μ PMU System

Um eine kostengünstige und funktionsfähige μ PMU für Anwendungen im Niederspannungsnetz zu ermöglichen, wurde der in [3] entwickelte μ PMU-Aufbau übernommen und um Wandlermodule erweitert. Aus Kostengründen wurden die Wandler mit kostengünstiger und industriell verfügbarer Hardware entwickelt, wobei die Genauigkeit und der Schutz der Komponenten der LOCO μ PMU weiterhin gewährleistet wird.

4.1 Hardwareaufbau

Der Hardwareaufbau der LOCO μ PMU basiert auf der Entwicklung der Arbeitsgruppe Simulationsinfrastruktur und HPCam am Institut für Automatisierung komplexer Energiesysteme der RWTH Aachen, und ist wie in [3] beschrieben. Eine Übersicht über den Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

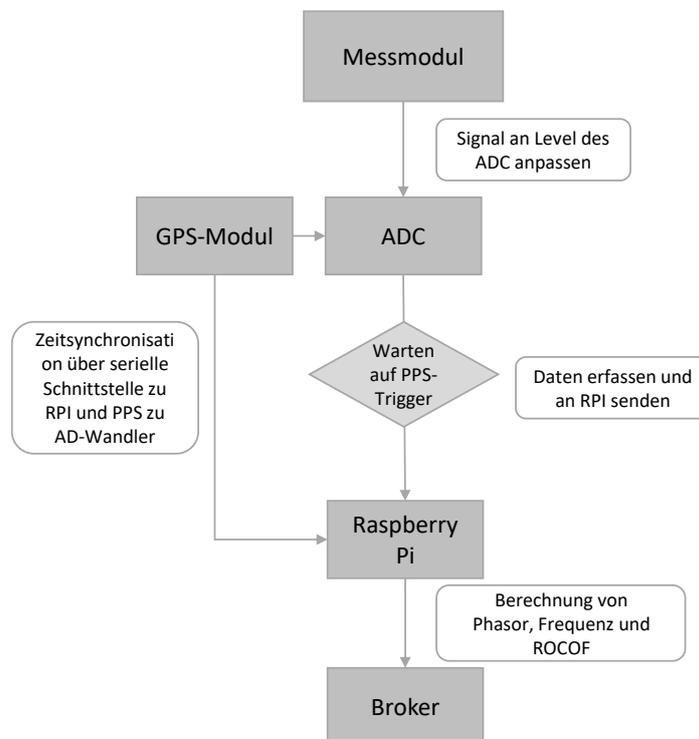


Abbildung 1: Überblick über Hardwarekomponenten μ PMU

Der Aufbau besteht im Wesentlichen aus einem ADC, einem RPI und einem GPS-Modul. Der ADC wandelt das analoge in ein digitales Messsignal um und überträgt es an den RPI, auf dem die weitere Verarbeitung der Signale erfolgt. Die Übertragung der Daten wird durch ein GPS-Signal ausgelöst. Dieser Aufbau ermöglicht Messungen zwischen +/-10 V auf dem Niveau des analogen Eingangs des ADC. Für den tatsächlichen Einsatz im Niederspannungsnetz muss der Aufbau mit Messwandlern ergänzt werden, die die Messgrößen für Strom und Spannung an diesen Pegel anpassen. Kommerziell erhältliche Hardware ist kostenintensiv, daher wurde eine kostengünstige Hardware zur Spannungs- und Strommessung entwickelt. Die Signaleigenschaften dürfen durch die Messwandler nicht verändert werden, da sonst die Genauigkeit der Messung abnimmt.

Die Anpassung der zu messenden Größe erfolgt pro Phase und wird beispielhaft für eine Phase dargestellt. Die Spannungswerte werden über Transformatoren (primär 230Vrms/sekundär 6Vrms) und einen Spannungsteiler eingestellt. Der zusätzliche Transformator wurde gewählt, um die Messtechnik auf der Sekundärseite vor der Netzspannung zu schützen. Die Spannungswerte werden mit dem Verhältnis 1V/28,3mV angepasst. Ein Schaltplan ist in Abbildung 2 dargestellt.

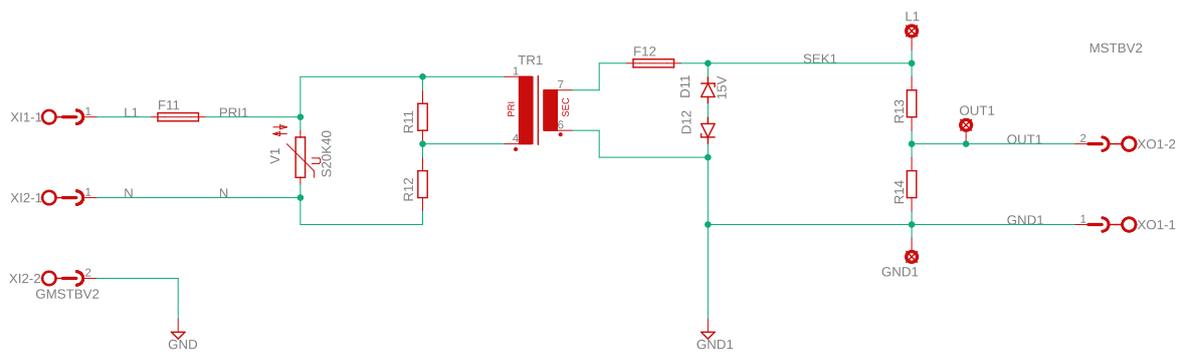


Abbildung 2: Schaltplan Spannungswandler

Bei der Strommessung muss neben der Amplitude des Signals auch die Signalform angepasst werden, da der ADC nur Spannungssignale verarbeiten kann. Das Stromsignal wird mit einem Verhältnis von 200A/1A über einen Kabelumbauwandler transformiert und anschließend über einen Messshunt in die entsprechende Spannung umgewandelt. Ein Operationsverstärker regelt das Signal auf eine maximale Amplitude von 6,5 V. Als gesamtes Übersetzungsverhältnis ergibt sich 1A/32,5mV. Die Abbildung 3 zeigt den Schaltplan.

Das Spannungsmodul ist für die Messung von drei Phasen, Phase gegen Erde, ausgelegt. Das Strommodul ist für die Messung von bis zu vier Phasen ausgelegt. Für die Anwendung an den Ladestationen werden nur die Spannungswerte als relevante Messgrößen angesehen, da der Strom bereits von vorhandener Hardware wie z. B. Energiezählern gemessen wird, die die Daten ebenfalls an PDC senden können. Die entwickelte intelligente Ladestation hat zwei Ladepunkte. Die Messwandler für die Messung der Spannungswerte werden deshalb für insgesamt sechs Phasen ausgelegt, drei pro Ladepunkt. Die μ PMU muss für die Anwendung der Messung an Ortsnetzstationen sowohl Spannungs- als auch Stromwerte messen. Daher werden beide Wandlermodule eingesetzt.

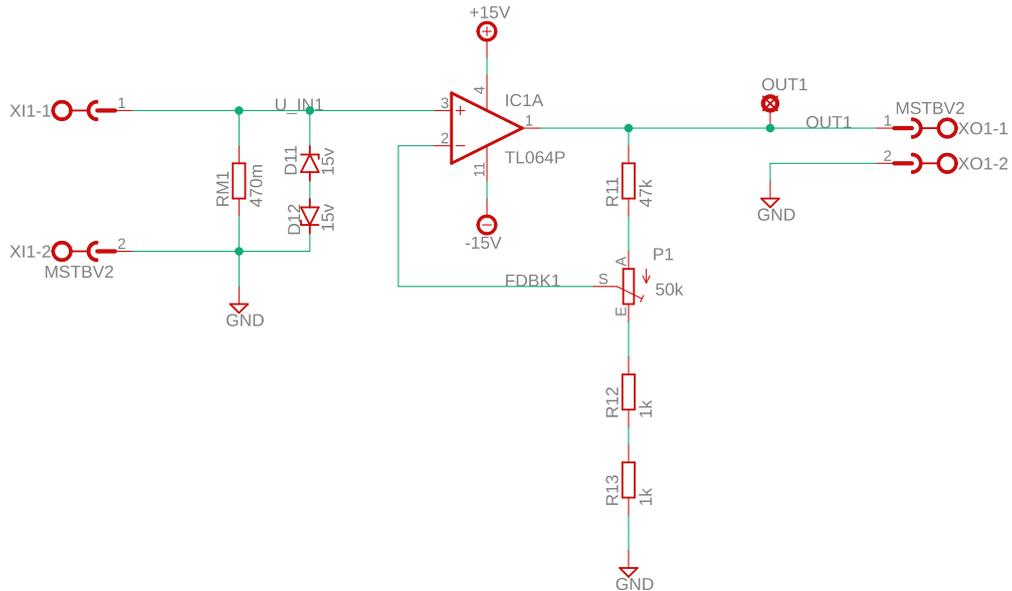


Abbildung 3: Schaltplan Stromwandler

Der aktuelle Aufbau ist in der Lage, drei Phasen der Spannungswerte und vier Phasen der Stromwerte zu messen. Die Kommunikation mit dem PDC erfolgt derzeit über Long Term Evolution (LTE). Die Abbildung 4 zeigt den Prototyp des für die Ladestation konzipierten μ PMU-Systems.



Abbildung 4: Prototyp des für die Ladestation konzipierten μ PMU-Systems

4.2 Software

Die Berechnung des Effektivwertes, des Phasors, der Frequenz und des ROCOF erfolgt mit der Open-Source-Software LOCO-Villas der RWTH Aachen [3]. Dabei wird die Amplitude der Eingangssignale am ADC durch die Software mit den zuvor beschriebenen Verhältnissen auf die ursprüngliche Amplitude des gemessenen Signals zurückskaliert. Die Übertragung und Verarbeitung der Daten wird über das GPS-Signal ausgelöst und ermöglicht eine synchrone Messung verschiedener μ PMUs. Auf die übertragenen Signale wird eine DFT angewendet, um das zu untersuchende Signal zu extrahieren. Dies ist notwendig, da reine Sinussignale mit konstanter Nennfrequenz in der Praxis eher unwahrscheinlich sind und praktische Signale meistens mit anderen Signalen verunreinigt werden. Da der ADC nur ein diskret abgetastetes Signal liefert, wird ein Hanning-Fenster angewendet, um Abtastfehler zu reduzieren. Die erforderlichen Werte werden wie folgt berechnet:

$$\text{Frequenz: } f = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{1}{T_{c_i}} \quad (1)$$

Die Frequenz f wird als Mittelwert des Kehrwerts der Periodendauer T_{c_i} berechnet.

$$\text{ROCOF} = \frac{df(t)}{dt} \quad (2)$$

Der ROCOF ist die zeitliche Veränderung der Frequenz f .

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n u_i^2 \Delta t_i} \quad (3)$$

$$\text{Phasor: } X = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \text{DFT}[n] \cdot e^{-i 2\pi k n N} \quad (4)$$

Der berechnete Phasenwinkel bezieht sich auf die Mitte des Beobachtungsfensters und wird anhand der gemessenen Frequenz und der Zeitdauer des Beobachtungsfensters neu berechnet. Die gemessenen Größen werden an den PDC gesendet, um für weitere Berechnungen und Netzzustandsbewertungen verwendet zu werden.

5 Ergebnisse

Für die Validierung des μ PMU-Setups werden die Wandler getestet, um sicherzustellen, dass sie den Verlauf der ursprünglichen Signale nicht verändern. Außerdem wird die Genauigkeit der Spannung und der Frequenz des μ PMU-Aufbaus mit dem KEYSIGHT DSOX1204G-Oszilloskop validiert, der Phasenwinkel mit einer Simulation im OpalRT. Die Validierung wird mit einem Spannungsgenerator mit 10 V durchgeführt.

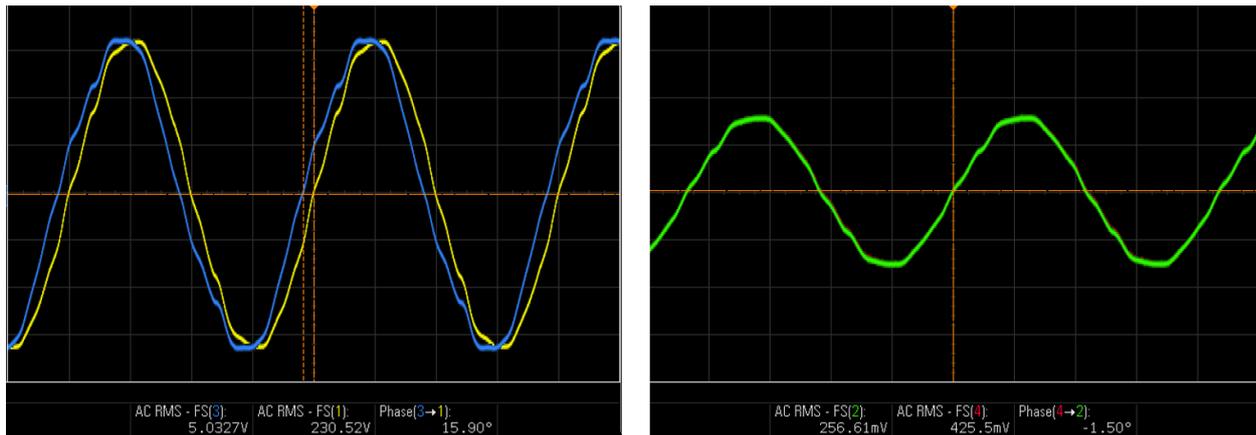


Abbildung 5: links: Netzspannung (gelb) und Spannungsplatine (blau)
rechts: Stromzangen Oszilloskop (rot) und Strommessplatine (grün)

Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, verändern die Wandler die Kurven der Signale nicht signifikant. Der Wandler für die Strommessung verschiebt nur den Phasenwinkel um $-1,50^\circ$, der Verlauf des Stromsignals bleibt unverändert. Das Spannungssignal wird durch den Wandler um $15,90^\circ$ phasenverschoben. Im Signalverlauf treten durch den Transformator geringfügige Abweichungen auf. Aufgrund des Aufbaus und der Funktionsweise der μ PMU ist die Phasenverschiebung für die Genauigkeit unerheblich.

Tabelle 1: Ergebnisse Genauigkeit μ PMU

Abweichung	Spannung	Frequenz	Phasenwinkel
Maximum	0,73 %	0,06 %	4,00 %
Durchschnitt	0,52 %	0,02 %	1,83 %

Die Abweichungen der μ PMU-Messungen sind in Tabelle 1 dargestellt und liegen im Vergleich zum Oszilloskop für den Effektivwert und für die Frequenz im Bereich von weniger als einem Prozent. Die Genauigkeitsanalyse der Phasenmessung ergab eine durchschnittliche Abweichung von 1,83 %. Die aufgezeichneten Größen weisen im Durchschnitt keine signifikanten Abweichungen auf.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird eine LOCO- μ PMU zur Netzüberwachung im Niederspannungsnetz erweitert und validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Wandler für die Strommessung die Signaleigenschaften nicht beeinflusst und beim Spannungswandler wird durch den Einsatz des Transformators der Signalverlauf geringfügig abgewandelt. Im Durchschnitt treten keine signifikanten Abweichungen bei den Messungen mit den μ PMUs im Vergleich zu einem Oszilloskop und dem OpalRT auf. Mit diesem Konzept und mehreren LOCO- μ PMUs können Netzzustände mit geringem Aufwand abgeschätzt werden. Sie können an Steuereinheiten gesendet werden, um die Sicherheit des Netzes dauerhaft zu gewährleisten.

In weiterführenden Arbeiten zu diesem Thema kann eine Optimierung des Spannungswandlers untersucht werden, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Außerdem

ist eine Validierung des μ PMU-Aufbaus in einem realen Netz notwendig. In diesem Zusammenhang sollte auch die Kommunikation zwischen den μ PMUs und dem PDC neu überdacht werden. Das derzeit verwendete Kommunikationsgateway LTE für die Übertragung der Messdaten wirft Sicherheitsbedenken auf. Ein weiteres Kommunikationsgateway, das in Betracht gezogen werden sollte, ist LoRaWan. Eine ergänzende Ausarbeitung könnte sich mit den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Kommunikationsstandards befassen.

7 Referenzen

- [1] Europäische Kommission, "Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen", Brüssel, Juli 2021
- [2] A. Angioni, G. Lipari, M. Pau, F. Ponci und A. Monti, „A Low Cost PMU to Monitor Distribution Grids,“ IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2017.
- [3] A. Angioni, G. Lipari, M. Pau, F. Ponci und A. Monti, „A Low Cost PMU to Monitor Distribution Grids,“ IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2017.
- [4] A. Guamán, M. Pozo, I. Pozo, M. Pacas, A. Cabrera und N. Pozo, „Design of a Low-Cost Phasor Measurement Unit (PMU) for Three-Phase Distribution Power Systems according IEEE C37.118.1,“ IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2019.
- [5] P. V. Seger, M. Moreto, F. L. Grandó, A. E. Lazzaretti, G. W. Denardin und C. R. Pastro, „Monitoring Low Voltage Electrical Networks Using Low Cost PMUs: a Case Study,“ IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2020.
- [6] IEEE Power & Energy Society „IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems“, December 2011