

Konzept einer kostengünstigen GPS-synchronisierten Spannungsphasenwinkelmesseinheit für Smart-Grid-Applikationen

Abstract für die Konferenz Zukünftige Stromnetze 2023

Christian Hotz, Tim Schäfer, Ashraf Ishag, Sergej Baum, Ingo Stadler, Eberhard Waffenschmidt

TH-Köln, 11.08.2022

1. Übersicht

Eine zunehmende Durchdringung elektrischer Netze mit messtechnischen Einrichtungen ist notwendige Bedingung zur Implementierung von Smart-Grid-Applikationen, die für eine effizientere Nutzung und einen sicheren Betrieb der Netze der Zukunft sorgen sollen. Für verschiedene Anwendungen, z.B. die Berechnung von Leistungsflüssen, ist es nötig, die Spannungsphasenwinkel an den Knoten eines Netzes zu kennen. Da die Messung von Spannungsphasenwinkeln synchronisierte Messungen an räumlich verteilten Standorten erfordert, ist sie aufwendig und damit im Allgemeinen teuer. Dieses Paper beschreibt den Aufbau einer einfachen Messeinrichtung für Spannungsphasenwinkelmessungen in Hard- und Software mit Hilfe einfacher, kostengünstiger, handelsüblicher Komponenten und reproduzierbarer Schaltungen auf PCBs.

Das Messsystem besteht aus folgenden Komponenten:

- Hardware:
 - Raspberry Pi
 - GPS-Chip mit PPS-Funktion und Funkuhr
 - Komparatorbasierte Phasennulldurchgangsmessplatine
 - Zeit-Stopp-Platine basierend auf Counter-, Register- und Quarz-Chip
- Software:
 - Webserver zum Sammeln und Verteilen der Daten aller Messpunkte
 - Lokale Erfassung von Zeitstempel und $\Delta t_{1,2}$ sowie Übermittlung an den Webserver
 - Software zur lokalen Auswertung der kumulierten Messdaten aller Messpunkte inklusive Messwertbereinigung und -glättung

2. Beschreibung

Um den Spannungsphasenwinkel eines Messknotens relativ zu einem Referenzknoten zu bestimmen, muss der Phasenversatz zwischen deren Sinusverläufen bestimmt werden. Wegen der räumlichen Distanz kann in aller Regel keine lokale Messung beider Spannungsverläufe im selben Messsystem vereint werden. Stattdessen muss je ein eigenes Messsystem pro Messknoten mit einem an beiden Knoten synchronen Referenzsignal verglichen werden. Da eine präzise Messung eine zeitliche Auflösung im Mikrosekundenbereich erfordert (e.g. $0,1^\circ$ Phasenversatz entspricht $5,6 \mu\text{s}$ Zeitverzug), ist eine Synchronisation per TCP/IP ausgeschlossen, ebenso ist eine direkte elektrische Signalverbindung in den meisten Fällen unpraktikabel.

Verwendet wird also ein GPS-Chip mit PPS-Funktion. Ein Pulse-per-Second-Signal ist Teil des GPS-Standards und stellt ein räumlich verteilt synchrones sekundliches Pulssignal zur Verfügung, welches die hier benötigte Genauigkeit aufweist. Es wird an allen Messknoten mit dem Phasennulldurchgang des Spannungsverlaufes verglichen. Dazu wird das Sinussignal $u_{sin}(t)$ mittels Komparatorschaltung in ein Rechtecksignal $u_{comp}(t)$ umgewandelt (Abbildung 2.1):

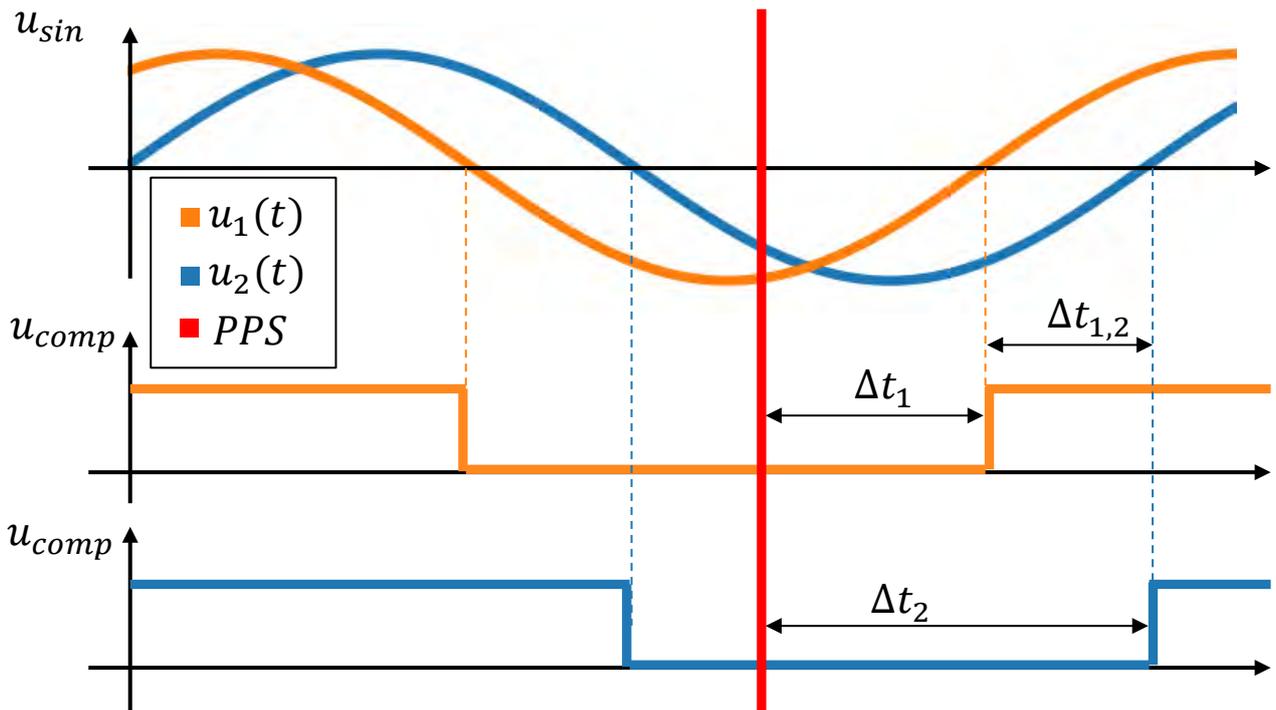


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Signale im Messsystem

Mit $\Delta t_{1,2} = \Delta t_2 - \Delta t_1$ und $\Delta \delta = \Delta t_{1,2} \cdot \omega_{Netz}$ lässt sich die Phasenwinkeldifferenz $\Delta \delta$ aus den lokal gemessenen Größen berechnen.

Die Komparatorplatine besteht aus einem Spannungsteiler, einem Komparator und einem Optokoppler zur galvanischen Entkopplung. Sie ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Für das Stoppen der Zeit wurde ebenfalls eine Platine entworfen, die aus je drei 8-Bit-Registern und 8-Bit-Countern sowie einem hochpräzisen Quarz besteht. Bei 2,54 MHz Taktfrequenz und 24 Bit Speicher kann eine ganze Periode (20 ms) mit einer Auflösung $< 1 \mu s$ erfasst werden. Die Platine kommuniziert per I2C und GPIO mit dem

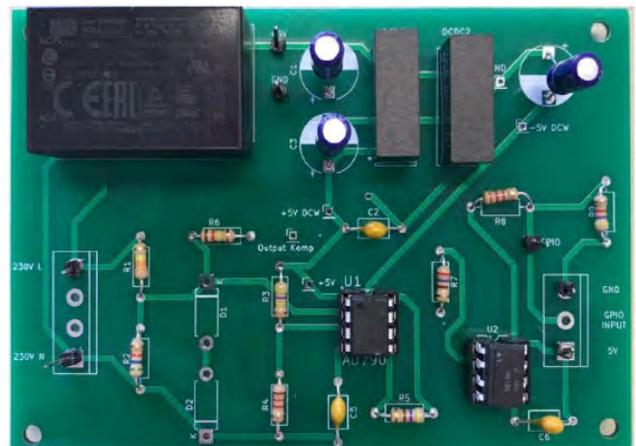


Abbildung 2.2: Die Komparatorschaltung

Raspberry Pi und ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Nach Bereinigung fehlerhaft übertragener Werte (bis zu 20% der 24-Bit-Sequenzen haben einen oder mehrere Bitfehler) ergeben sich für die zur Nulldurchgangsbestimmung ermittelten Regressionsgeraden in ersten Messungen Standardabweichungen unterhalb von 500 ns, was auf den Phasenwinkel bezogen einer Messtoleranz von weniger als $0,01^\circ$ entspricht.

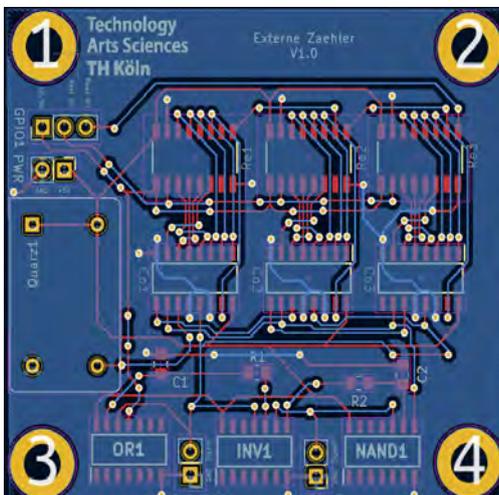


Abbildung 2.3: Die Zeit-Mess-Platine