

EurA Innovation GmbH  
Am Köhlersgehäu 60  
98544 Zella-Mehlis

**Entwicklung einer Vorrichtung zur Bestimmung elektrischer Kenngrößen dezentraler Verbraucher innerhalb eines verzweigten Stromnetzes speziell für produzierende Unternehmen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt (Phase 2), gefördert unter dem AZ 29990/02 & /04 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Projektlaufzeit: 04.07.2014 – 19.07.2017

Verfasser

Dirk Schmidt

Juni 2017

Juni 2017

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



|    |                 |         |             |             |                  |
|----|-----------------|---------|-------------|-------------|------------------|
| Az | <b>29990/02</b> | Referat | <b>24/0</b> | Fördersumme | <b>235.000 €</b> |
| Az | <b>29990/04</b> |         |             |             | <b>107.000 €</b> |

**Antragstitel**                      **Entwicklung einer Vorrichtung zur Bestimmung elektrischer Kenngrößen dezentraler Verbraucher innerhalb eines verzweigten Stromnetzes speziell für produzierende Unternehmen**

**Stichworte**                      Energie, Elektrizität

|                          |                   |                   |                 |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Laufzeit                 | Projektbeginn     | Projektende       | Projektphase(n) |
| <b>3 Jahre, 5 Monate</b> | <b>14.01.2014</b> | <b>19.06.2017</b> | <b>2</b>        |

Zwischenberichte

**Bewilligungsempfänger**

EurA Innovation GmbH  
Am Köhlersgehäu 60  
98544 Zella-Mehlis

Tel 03682 400 62 15  
Fax 03682 400 62 11

Projektleitung  
Dirk Schmidt

Bearbeiter

**Kooperationspartner**

**Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Das zu entwickelnde Messsystem soll die detaillierte Erfassung der Energieverbrauchsdaten aller angeschlossenen Einzelverbraucher innerhalb einer größeren Produktionsumgebung ermöglichen. Damit werden vorzugsweise produzierende Firmen in die Lage versetzt, gezielte, energieverbrauchsabhängige Maßnahmen zur Einsparung von Elektroenergie durchzuführen. Die geringen Kosten, die hohe Anzahl der Messstellen, eine Datenreduktion sowie die einfache Installation sind die Hauptvorteile des neuartigen Meßsystems gegenüber anderen Anbietern von Energiemessgeräten.

Im Ergebnis der Gesamtentwicklung soll ein serienfähiges und kostengünstiges Produkt zur Bestimmung der elektrischen Energieverbrauchsdaten für eine große Zahl von dezentralen Einzelmessstellen am Markt etabliert werden. Eine Umweltentlastung wird durch das Energieeinsparpotenzial durch den Einsatz des Messgerätes realisiert. Für ein mittelständisches Unternehmen wird allein schon durch die Visualisierung der einzelnen Verbrauchszahlen ein Einsparpotential von bis zu max. 20 % gesehen. Weitere wesentliche Energiespareffekte ergeben sich durch den Einsatz des Gerätes im Verbund mit der Gebäude- und Industrieautomatisierung. Anlass für die Entwicklung war das Ergebnis einer Analyse, dass ein solches Gerät mit den avisierten Kosten von ca. 50 € je Messpunkt am Markt bisher nicht existiert.

**Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden alle Arbeitspakete abgearbeitet:

- Entwicklung eines Tools zur Inbetriebnahme großer Mengen an Sensoren
- Systemintegration und Erprobung
- Planung und Aufbau Feldtests in Industrieumgebung
- Erprobung in Industrieumgebung
- Erprobung im Zusammenspiel mit Gebäudeautomatisierung
- Ausentwicklung der Hard- und Softwarekomponenten
- Hardware (Stromsensoren, Strommessmodul, Spannungsmodul, Mini Server)
- Software (Datenbank, Schnittstellen (z.B. zu externen Energiemanagementsystemen), Miniserver, embedded Software)
- Technische Dokumentation

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Ergebnis steht ein leistungsfähiges Messsystem zur Messung des elektrischen Stroms, der Leistung, der Energie, der Spannung und der Phasenverschiebung bis 1200 A zur Verfügung. Über eine SQL-Datenbank können Energiemanagementsystemen die elektrischen Kenngrößen der Verbraucher in Unternehmen zur Verfügung gestellt werden. Die Daten können Web-basiert grafisch und mathematisch ausgewertet und angezeigt werden. Das System ist auf Grund seiner geringen Baugröße für die Installation im Bestand geeignet. Das Verfahren gestattet die Bestimmung der elektrischen Leistung und Energie durch die berührungslose Messung des Stroms und der einmaligen Messung der Spannung im Objekt. D. h. das System benötigt nur eine galvanische Ankopplung (An- und Abklemmen von Leitungen). Dadurch wird der Installations- und Hardwareaufwand drastisch reduziert. Ab ca. dreißig dreiphasigen Messpunkten in einem Unternehmen kann das System mit einem Hardwareaufwand von ca. 50 € bis 90 € (abhängig von der Größe der Stromsensoren) angeboten werden.

Die geringen Kosten sind möglich, weil die Bestimmung der elektrischen Kenngröße Leistung P an jedem Verbraucher nur über die direkte Strommessung erfolgt. Das Strommessmodul erhält aber über einen Zwei-Draht-Bus ein Synchronisationsimpuls von einem Spannungsmessmodul das im Objekt an einer günstigen Stelle installiert wird. Dieser Sync-Puls überträgt die Spannungsamplitude und die Nulldurchgänge der Phasen der Spannungsmessung. Dadurch ist der Phasenbezug des Stromes zur Spannung möglich. Mit den phasenrichtigen Größen  $u(t)$  und  $i(t)$  erfolgt die Berechnung der Leistung für jede Phase im Strommeßmodul. Je Modul bis zu 10 Phasen in einem nur 4 TE breiten Hutschienengerät.

Obwohl für die Berechnung nicht die momentanen Spannungswerte verwendet werden, sondern „nur“ die genaue Amplitude und der genaue Nulldurchgang, liegt der Fehler für die Messung der elektrischen Energie unter 3 %. Zielstellung für das Projekt war ein Fehler von <5 % für die elektrische Energie. Maßgebend für die Genauigkeit des Messsystems ist die genaue Strommessung (hier 12 bit mit 25 kHz, Fehler <1 %), die phasenrichtige Messung des Stroms durch die Sensoren (hier kleiner 1 %), die richtige Bestimmung der Phasenverschiebung  $\cos \phi$  und die genaue Messung der Amplitude der Spannung (hier <0,5 %). Das Strommessmodul überträgt nun über den Systembus die Werte für  $I_{rms}$  (Effektivwert Strom), P (elektrische Leistung) und  $Q_v$  (Grundschiebungsbindleistung) über eine Anzahl von Netzperioden an den Mini Server. Parallel aber zeitlich nicht abhängig überträgt das Spannungsmessmodul über den Bus die Werte für  $U_{rms}$  1 bis 3 und die momentane Netzfrequenz an den Miniserver. Das mathematische Modell ist so aufgestellt, dass auf dem Server alle weiteren relevanten Messgrößen, wie der Leistungsfaktor  $\cos(\Phi)$ , Scheinleistung und die Größen für die 3-phasigen Verbraucher, wie Wirkenergie und Blindenergie, berechnet werden können. Trotz der geringen Kosten für jeden Messpunkt stehen für ein und dreiphasige Verbraucher richtig gemessen alle relevanten elektrischen Kenngrößen zur Verfügung um ein effektives Energiemanagement zu betreiben. Die Messintervalle können von einer Netzperiode bis 15 min gewählt werden. Dadurch wird auch eine detaillierte Analyse möglich. Mit dem System kann auch regelungstechnisch eingegriffen werden, weil es auf einem Automatisierungssystem basiert. Da alle relevanten Kenngrößen auf dem Server in einer SQL basierten Datenbank gespeichert werden, steht dem Markt ein universelles Tool zur Verfügung, mit dem preiswert die elektrischen Kenngrößen bestimmt werden können.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das Messsystem ist im neuen Gebäude der EurA repräsentativ eingebaut. Alle relevanten Verbraucher im Gebäude (Wärmepumpe, Speicher, Pumpen, Licht, Klima, Küche etc) werden mit über 50 Messpunkten angezeigt und ausgewertet. In 2018 wird den Kunden das Produkt am Standort EurA Ellwangen demonstriert. Gleichzeitig werden bei 4 Unternehmen Tests durchgeführt, um Fehler aufzudecken und die Bedienbarkeit zu verbessern. Auf der Messe ISH in Frankfurt und der e World in Essen wird das Produkt 2019 in den Markt eingeführt.

## **Fazit**

Das Projektziel wurde erreicht. Im Ergebnis von diesem Projekt kann ein Industriebetrieb sehr kostengünstig ohne Unterbrechung der Produktion und ohne Veränderungen in der elektrischen Installation die elektrischen Kenngrößen bestimmen mit dem ein effektives Energiemanagement (richtig und an allen relevanten Verbrauchern messen, auswerten und eingreifen) einführen. Die Kosten sind so niedrig, dass ein Unternehmen mit Stromkosten von 73.000 € (ca. 2000 MWh) innerhalb von einem Jahr die Kosten für das Messsystem mit ca. 130 Messpunkten einsparen kann, wenn durch die Analyse ca. 12 % an Energie eingespart wird. 12 % sind sehr realistisch in Unternehmen, die noch keine Messungen als Grundlage für das Energiemanagement verwenden. Das System kann einen deutlichen Beitrag zur Senkung des Energieverbrauchs leisten.

## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Begriffe und Definitionen .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>1. Zusammenfassung.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2. Ziele und Ergebnisse des Entwicklungsprojektes .....</b>                                | <b>10</b> |
| <b>3. Darstellung und Ergebnisse der Entwicklung sowie deren Bewertung</b>                    | <b>12</b> |
| <b>3.1. Ausgangsbasis / Idee der Entwicklung.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>3.2. Feldtest .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>3.3. Messknoten .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>3.4. Spannungsmessmodul.....</b>   | <b>19</b> |
| <b>3.5. CE Konformität.....</b>   | <b>21</b> |
| <b>3.6. Kommunikation und Synchronimpuls .....</b>  | <b>21</b> |
| <b>3.7. Mini Server.....</b>  | <b>23</b> |
| <b>3.8. Stromsensoren.....</b>  | <b>23</b> |
| <b>3.8.1. Auswirkungen von Phasenfehlern auf die Berechnung der Wechselstromleistung.....</b> | <b>25</b> |
| <b>3.8.2. Elektronik zur Pegelanpassung.....</b>  | <b>28</b> |
| <b>3.8.3. Verfügbare Sensoren.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>3.9. Systemaufbau.....</b>   | <b>37</b> |
| <b>3.10. Software „Automation Suite“ .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>3.11. Spannungsmessung.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>3.12. Sync-Impuls .....</b>  | <b>44</b> |
| <b>3.13. Leistungsmessung .....</b>   | <b>45</b> |
| <b>3.14. Inbetriebnahmetool.....</b>  | <b>45</b> |
| <b>3.15. Bereitstellung und Visualisierung der Meßergebnisse .....</b>                        | <b>46</b> |
| <b>3.16. Ökonomische Bewertung der Projektergebnisse .....</b>                                | <b>48</b> |
| <b>4. Fazit .....</b>   | <b>51</b> |

|  |          |
|--|----------|
| <b>Anhang 1 Schaltplan Strommeßmodul 1 .....</b>         | <b>1</b> |
| <b>Anhang 2 Schaltplan Strommessmodul 2 .....</b>        | <b>2</b> |
| <b>Anhang 3 Schaltung Spannungsmessmodul 1 .....</b>     | <b>3</b> |
| <b>Anhang 4 Schaltung Spannungsmessmodul 2 .....</b>     | <b>4</b> |
| <b>Anhang 5 Installation Böhm Fertigungstechnik.....</b> | <b>5</b> |
| <b>Anhang 6 Installation EurA AG Ellwangen .....</b>     | <b>6</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1 Systemansicht - Schematisch .....   | 13 |
| Abbildung 2 Messknoten Vorderseite.....   | 17 |
| Abbildung 3 Messknoten.....   | 18 |
| Abbildung 4 Spannungsmessmodul Vorderseite.....   | 19 |
| Abbildung 5 Spannungsmessmodul.....   | 20 |
| Abbildung 6 nullaktiver Synchronimpulsaufbau.....   | 22 |
| Abbildung 7 Miniserver .....  | 23 |
| Abbildung 8 Sensorposition ALT                      Abbildung 9 Sensorposition NEU.....                               | 24 |
| Abbildung 10 - Darstellung des neues Sensordesigns .....  | 25 |
| Abbildung 11: Gesamtansicht Layout.....   | 30 |
| Abbildung 12: Top-Layer.....  | 30 |
| Abbildung 13: Bottom-Layer .....  | 30 |
| Abbildung 14: Elektronik Pegelanpassung Vorder- und Rückseite.....  | 31 |
| Abbildung 15: Elektronik im Kabelverbund.....   | 31 |
| Abbildung 16: Fertig aufgebauter Sensor mit Elektronik zur Signalanpassung.....                                       | 31 |
| Abbildung 17: Stromwandler am PowerSensor.....  | 32 |
| Abbildung 18: Spannungsverlauf Ausgangssignal Sensor .....  | 32 |
| Abbildung 19: Anschlussbelegung .....   | 33 |
| Abbildung 20 – Stromsensor – CT 6 bis CT 36 - .....   | 35 |
| Abbildung 21 - Verfügbar Stromsensoren .....  | 35 |
| Abbildung 22 - Rogoski Spulen mit angepasster Elektronik .....  | 36 |
| Abbildung 23 Testaufbau Labor.....  | 37 |
| Abbildung 24 - Systemaufbau für den Test der Systemgenauigkeit .....  | 38 |
| Abbildung 25 Aufbau Testaufbau aus Funktionsblöcken.....  | 39 |
| Abbildung 26 Funktionsblöcke .....  | 40 |
| Abbildung 27 Konfiguration IPs.....   | 41 |
| Abbildung 28 Konfiguration und Parametrisierung Funktionsblöcke (virtuelle Bausteine), unten Leistungsberechnung..... | 41 |
| Abbildung 29 Übertragung der Konfiguration .....  | 42 |
| Abbildung 30 Darstellung der Messwerte.....   | 42 |
| Abbildung 31 ist die Spannung in hexadezimaler Form.....  | 43 |
| Abbildung 32 Sceenshot Spannungsmessung.....  | 44 |
| Abbildung 33: Nullaktives Sync Signal .....   | 45 |
| Abbildung 34 - Auszug Daten und Log File SQL Datenbank.....   | 47 |
| Abbildung 35 Darstellung der Meßergebnisse .....  | 47 |

## **Tabellenverzeichnis**

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1 - Vergleich Sensor Melexis IC und Stromwandler..... | 27 |
| Tabelle 2 - Systemgenauigkeit mit Elektronik.....             | 28 |
| Tabelle 3: Beschreibung Eingänge .....                        | 33 |
| Tabelle 4: Beschreibung Ausgänge .....                        | 33 |
| Tabelle 3 Grundfunktionen der Hardwarekomponenten .....       | 38 |
| Tabelle 4 Messergebnisse Leistungsmessung.....                | 45 |
| Tabelle 5 Auszug aus den Ergebnissen der Kalkulation.....     | 48 |
| Tabelle 6 - Systempreise .....                                | 50 |

## Begriffe und Definitionen

|                  |  |
|------------------|--|
| ADC              | Analog-Digital-Converter   |
| CAN              | serielles Bussystem nach ISO/OSI Referenzmodell                            |
| DAC              | Digital-Analog-Converter   |
| DLAN (Powerline) | direkt LAN über Stromleitung   |
| GPIO             | Gruppe von zusammengefassten Ein-/Ausgangskontakten von logischen Signalen |
| IC               | Integrated Circuit   |
| LAN              | Local Area Network über Ethernet   |
| MATLAB           | Software zur numerischen Berechnung mit Hilfe von Matrizen                 |
| PWM              | Pulsweitenmodulation   |
| RMS              | Root Mean Square   |
| RTC              | Real Time Clock (Echtzeituhr)  |
| SQL-Server       | relationales Datenbanksystem   |
| SQLite           | abgerüstetes relationales Datenbanksystem                                  |
| SPI              | Synchron serieller Datenbus  |
| SIMULINK         | grafische Modellierung von Systemen auf Berechnungsbasis von MATLAB        |
| WLAN             | Wireless Local Area Network über Funknetz                                  |



## 1. Zusammenfassung

Innerhalb der Projektlaufzeit der Phase 1 des Projektes wurden die Grundlagen für die Phase 2 gelegt. Die Phase 1 endete mit nachfolgendem Ergebnis:

Das System zur Leistungsbestimmung wurde prototypisch umgesetzt. Zur Integration in das Serversystem wurden zwei Module bis zum A Serien Stand umgesetzt:

- Strommodul
- Spannungsmodul

Während der Entwicklung der embedded Software für diese Komponenten traten Probleme bei der Echtzeit Umsetzung der Spannungsmessung (Interruptpriorität der SPI) und der Synchronisierung der Spannungsnulldurchgänge mit den Strommodulen (Laufzeit über VBus und Programmengine) auf. Deshalb musste das Synchronisierungskonzept überarbeitet werden. Durch einen Controller werden die ermittelten Spannungsamplituden und die Nulldurchgänge der 3 Phasen als Synchronisationsimpuls an alle Strommodule zur Verfügung gestellt (siehe Übersicht). Dadurch ist die SPI-Schnittstelle nicht mehr notwendig. Weitere wichtige Erkenntnisse für die Systemumsetzung wurden in Konsultationen mit Industriepartnern und Hochschulangehörigen erarbeitet. Messungen in Energiesystemen bei großen Verbrauchern zeigen immer häufiger sehr asymmetrische Phasenbelastungen. Es ist davon auszugehen, dass ca.20% bis ca. 30% der Anwendungen eine dreiphasige Messung der Spannung benötigen werden.

Da das überarbeitete Synchronisierungskonzept sich auf das Spannungsmessmodul auswirkt, wurde die Messung der Spannung im Modul um zwei Phasen auf drei Phasen erweitert.

Dadurch war es auch weiter möglich, in allen DIN EN 50160 konformen Netzen (auch wenn sie unsymmetrisch belastet sind, was eigentlich vermieden werden soll), messen zu können. Im Ergebnis entstand ein Strommessmodul (Power Sensor) und ein Spannungsmessmodul (Voltage Sensor) mit dem Messungen durchgeführt werden konnten.

### 1. Strommodul

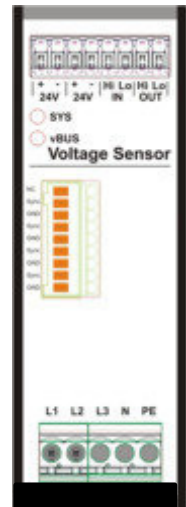
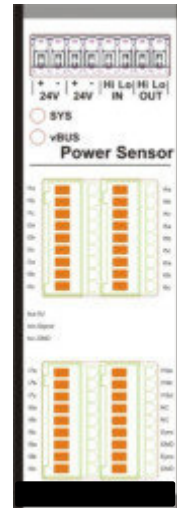
Aufbau Strommessmodule mit Anschlüssen für

- 10 Stromsensoren
- vBUS zur Kommunikation
- 24 VDC Spannungsversorgung

### 2. Spannungsmessmodul

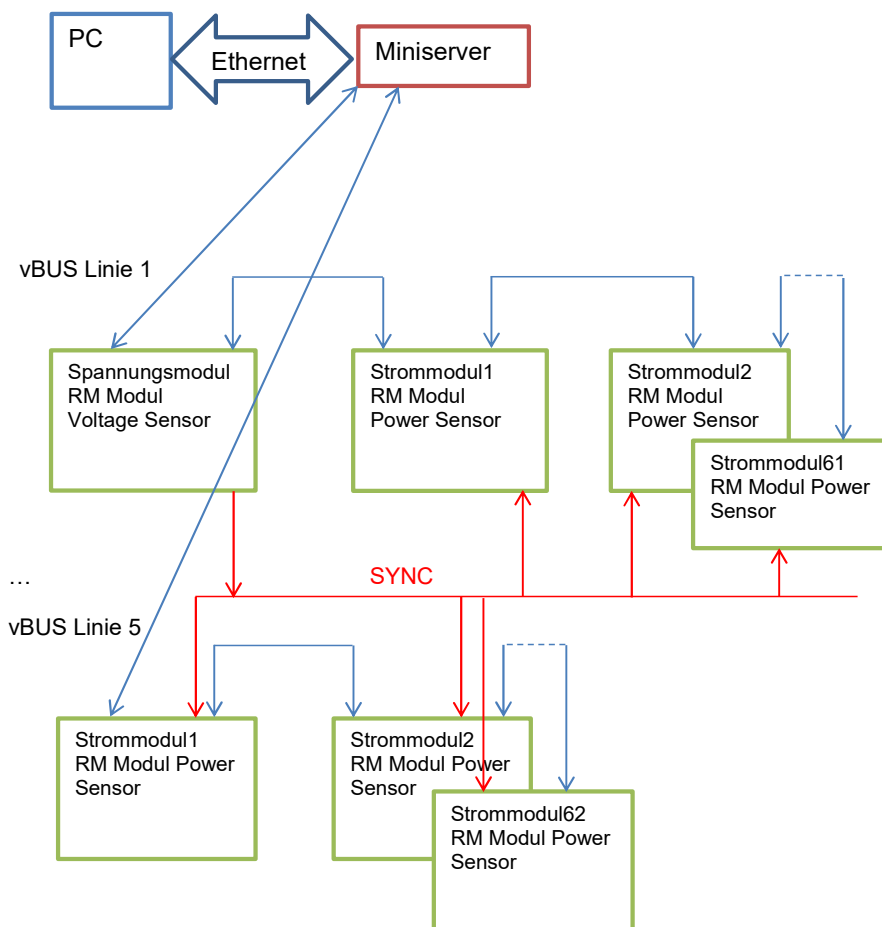
Zu realisierender 3-Phasen-Spannungsmesser

- 3-Phasenanschluß
- vBUS Schnittstelle
- SYNC-Impulsausgang



Die Systemansicht ist unten dargestellt.

#### Systemübersicht:



Die Ergebnisse der Phase 1 wurden im Abschlussbericht ausführlich dargestellt.

Die antragsgemäßen Projektziele wurden in der Phase 2 der Entwicklung vollständig erreicht.

Im Ergebnis steht ein leistungsfähiges Messsystem zur Messung des elektrischen Stroms, der Leistung, der Energie, der Spannung und der Phasenverschiebung bis 400A im 230V (1-phasig) und 400V (3-phasig) zur Verfügung. Über eine SQL Datenbank können Energiemanagementsysteme die elektrischen Kenngrößen der Verbraucher in Unternehmen zur Verfügung gestellt werden. Die Daten können Web basiert grafisch und mathematisch ausgewertet und angezeigt werden.

Das System ist auf Grund seiner geringen Baugröße für die Installation im Bestand geeignet. Das Verfahren gestattet die Bestimmung der elektrischen Leistung und Energie durch die berührungslose Messung des Stroms und der einmaligen Messung der Spannung im Objekt. D.h. das System benötigt nur eine galvanische Ankopplung (An- und Abklemmen von Leitungen). Dadurch wird der Installations- und Hardwareaufwand drastisch reduziert.

**Ab ca. dreißig dreiphasigen Messpunkten in einem Unternehmen kann das System mit einem Hardwareaufwand von ca. 50€ bis 90€ angeboten werden (siehe Abschnitt 3.16).** Im Unterschied zum Stand der Technik messen wir mit unserem System **NUR** den Strom an allen Verbrauchern ohne die Verbraucher auch in einer bestehenden Anlage vom Netz zu nehmen. Nur einmal muss die Spannungsmessung galvanisch mit dem Netz verbunden werden. Über eine neu entwickelte schnelle Synchronisierung führen wir die Messwerte von Strom und Spannung zeitrichtig zusammen und können so die elektrische Leistung in kW, den Verbrauch in kWh, die Phasenverschiebung und die Blindleistung bestimmen. Durch die Halbierung des Aufwandes in der Messtechnik, die Verwendung eines neu entwickelten Berechnungsalgorithmus und durch die deutlich vereinfachte Installation konnte der HW Aufwand drastisch reduziert werden.

In einem Feldtest bei einem Hersteller von Sondermaschinen und in einem Bürogebäude wurde gezeigt, dass das System auch unter Umgebungsbedingungen von Industrie- und Bürogebäuden einwandfrei arbeitet.

Mit Projektende wurden vier Unternehmen angesprochen, bei denen das System bis Herbst 2017 installiert werden soll. Dazu wurde die Fertigung einer Vorserie vorbereitet.

## **2. Ziele und Ergebnisse des Entwicklungsprojektes**

In produzierenden Unternehmen ist die Verbrauchsmessung von Elektroenergie jedes einzelnen Verbrauchers bisher nicht Stand der Technik. Der Grund sind die relativ hohen Kosten der Messgeräte, ein hoher Nachrüstaufwand, Platzbedarf im Schaltschrank, die bisher nicht zufriedenstellend einfach zu lösende massenhafte Datenübertragung der Messdaten an eine zentrale Verarbeitungseinheit sowie eine fehlende durchgehende Lösung zur Anzeige und Weiterverwendung der gewonnenen Messdaten. Durch diesen Umstand können keine Verbraucher mit hohen Verbrauchswerten im Betrieb einzeln identifiziert und gemessen werden. Einsparpotenziale durch Lastmanagement im Zeitversatz, oder Identifikation und Optimierung besonders energieintensiver Prozesse können damit nicht erkannt und umgesetzt werden.

Ziel des Entwicklungsprojektes ist es, ein Energiemesssystem zu entwickeln, mit dem kostengünstig eine umfassende Verbrauchsmessung aller Energieverbraucher innerhalb eines Endkunden-Stromnetzes möglich wird. Dabei hat die einfache Nachrüstbarkeit in bestehende Elektronetze eine hohe Priorität da die Einzelverbraucher messung bisher nicht üblich war, und ein großer Markt in der Nachrüstung gesehen wird. Durch die damit gegebene Möglichkeit des Energiemonitorings können eine gezielte Verbrauchsminimierung, eine Vermeidung von Lastspitzen, und damit eine Verbesserung der Umweltbilanz in Fertigungsprozessen erfolgen.

Bei Einsatz des Systems in anderen Verbrauchsnetzen bspw. öffentlichen Einrichtungen oder Einfamilienhäusern kann die Kenntnis der Verbrauchszahlen der einzelnen Geräte zur besseren Steuerung durch die Gebäudeautomatisierung dienen, oder ein Umdenken im Benutzerverhalten bewirken. Durch das hiermit erschließbare Einsparpotential für Elektroenergie ist eine hohe Umweltrelevanz gegeben.

### **Ergebnis**

In der zweiten Phase dieses Projektes wurde ein produktionsreifes Leistungs- und Energiemesssystem entwickelt und getestet. Die folgenden Entwicklungsergebnisse wurden realisiert:

- (1)** Weiterentwicklung des Systemkonzeptes, Weiterentwicklung und Detaillierung des Lastenheftes, Verfeinerung der Berechnungs- und Korrekturalgorithmen
  
- (2)** Abschluss Hardwareentwicklung für 5 Stromsensoren (Current Transformer) mit 6 Messbereichen – alle Sensoren sind verfügbar und prototypisch aufgebaut; Typen sind:
  - CT-6 -10A
  - CT-10 -16A; -32A
  - CT-16 – 80A
  - CT-24 – 240A
  - CT-36 - 400A
  
- (2.1)** Abschluss Test Rogowski Spulen am Strommessmodul und Anpassung der Sensorelektronik – Rogowski Spulen sind mit der Elektronik prototypisch aufgebaut; Typen sind:
  - RC-060 - 100A
  - RC-090 – 250A
  - RC 120 – 500A
  - RC 160 – 1000A
  
- (3)** Abschluss Hardwareentwicklung Strommessmodul (Power Modul) (früher Messknoten) – prototypisch gefertigt, verfügbar und funktionsfähig
  
- (4)** Abschluss Hardwareentwicklung Spannungsmessmodul (Voltage Modul) - – prototypisch gefertigt, verfügbar und funktionsfähig
  
- (5)** Abschluss Entwicklung Software für die Buskommunikation und Zeitsynchronisation zwischen dem Clusterserver (früher Miniserver) und Implementierung der Software in Clusterserver; die Geräte Clusterserver mit Software zur Inbetriebnahme ist verfügbar – Software läuft auf Seriengeräten, verfügbar und funktionsfähig
  
- (6)** Abschluss der Entwicklung Datenbank und Schnittstelle zu einem Visualisierungsprogramm (MS Power BI) zur Darstellung und Auswertung der Daten – Datenbank läuft auf NUK IPC, Datensätze der SQL Datenbank können ausgelesen werden, Schnittstelle zu MS Power BI ist vorhanden

- (7) Abschluss Entwicklung Inbetriebnahme SW zur Inbetriebnahme des Gesamtsystems – SW Blöcke sind in Automation Suite integriert – SW läuft in Verbindung mit dem Clusterserver den Strommessmodulen und dem Spannungsmessmodul
- (8) Technische Dokumentation für alle HW und SW Komponenten (noch nicht abgeschlossen)

Die Feldtests wurden an zwei Standorten durchgeführt. Die Systeme wurden installiert:

1. Trafostation der Böhm AG, in 98544 Zella-Mehlis Am Köhlersgehäu 60
2. Einspeisung und Unterverteilung EurA AG, 73479 Ellwangen, Max-Eyth-Strasse 2

Bei der Böhm lag der Schwerpunkt auf dem Test der sicheren Übertragung über eine Buslänge von ca. 150m mit dem Einfluss von größeren Lasten aus der Produktion. (siehe Abschnitt 3.2).

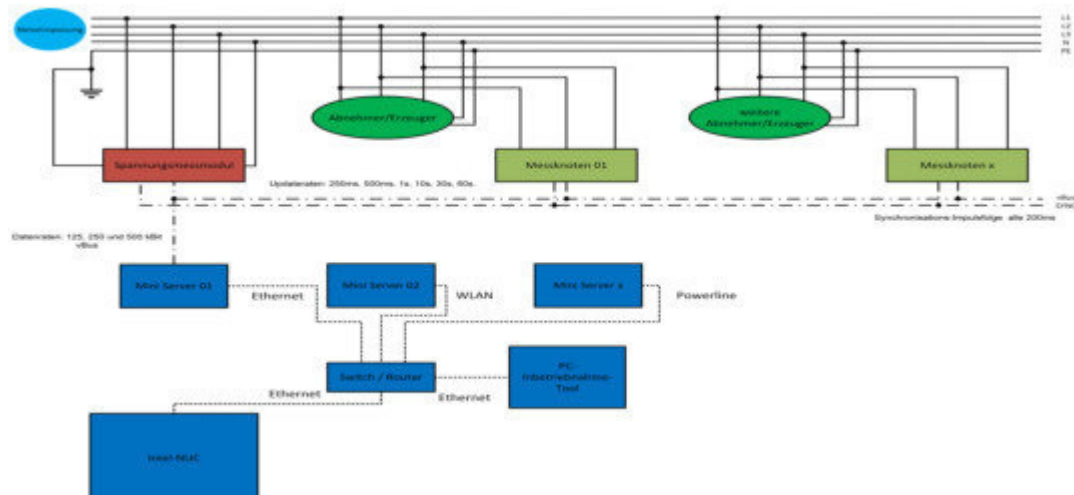
Bei der EurA lag der Schwerpunkt auf dem Einsatz vieler (bis 100Stück je System) Messpunkte. Es ist geplant den EurA Ausbau mit dem neuen Firmengebäude (Ende 2017) zu erweitern.

### **3. Darstellung und Ergebnisse der Entwicklung sowie deren Bewertung**

#### **3.1. Ausgangsbasis / Idee der Entwicklung**

Durch die Machbarkeitsbestätigung der Grundidee vom Projektstart in Phase 1 (vgl. Abschlussbericht zur 1. Phase, AZ: 29990/01) wurde eine 2. Phase gestartet mit der Zielstellung, eine fertigungsreife Lösung für ein Leistungs- und Energiemesssystem zu schaffen, das preisoptimal in Fertigung, Installation und Betrieb ist. Dazu war eine Anpassung in der Systemstruktur gegenüber Phase 1 notwendig: es wurde eine zusätzli-

che Synchronisierungsleitung (siehe Kapitel 3.6) eingefügt, durch die die Echtzeitfähigkeit der Signale umgesetzt werden konnte. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1 Systemansicht - Schematisch**

Wie schon in den Ergebnissen der Phase 1 dargestellt, wurde die Einbindung eines Projektpartners vollzogen. Die Fa. ACX GmbH entwickelt und vertreibt Hard- und Software im Umfeld der Gebäudeautomatisierung. Eine zentrale Komponente der Gebäudeautomatisierung wurde angepasst und verwendet und somit folgende Schritte realisiert:

- Implementierung Busprotokoll zur Verknüpfung der Messknoten und Spannungsmodule
- Entwicklung eines Mini Servers als zentrale Datensammelstelle
- Entwicklung einer LAN-Verknüpfung mehrerer Datensammelstellen
- Anbindung des Mini Server an ein Datenbanksystem und Bereitstellung der Daten für eine Datenauswertesoftware

Der erste Schwerpunkt der Entwicklung waren der Messknoten (HEUTE: Strommessmodul zur Stromerfassung – siehe Abschnitt 3.2.) , das Spannungsmessmodul (Spannungserfassung – siehe Abschnitt 3.3.) und die Kommunikation zwischen den Modulen, die für eine korrekte Leistungsberechnung zeitsynchron sein muss. Die Berechnungsalgorithmen zur Leistungsberechnung laufen auf beiden Modulen. Die Entwicklungen und Test sind hierzu planmäßig verlaufen. Die Geräte arbeiten sehr gut.

Der zweite Schwerpunkt die Entwicklung der Sensoren (Abschnitt 3.6.). Diese sind auch maßgeblich bestimmend für die Systemgenauigkeit und die Systemkosten. Hier

musste im letzten Teil der Entwicklung noch einmal gravierend am Konzept gearbeitet und neu entwickelt werden. Die Beauftragung der Fa. Nantis hat wie in den Zwischenberichten beschrieben, erhebliche Probleme bei der Genauigkeit der Sensoren und der Systemgenauigkeit aufgezeigt. Deshalb musste die Fa. Nantis GmbH nach ihrer ersten Analyse beauftragt werden, das Sensorkonzept noch einmal umzustellen. Wie unter dem Abschnitt 3.7.1. beschrieben, war dieser Maßnahme erfolgreich. Die gewonnen Teilergebnisse der Entwicklung mit dem Melexis IC sind eingeflossen. Wie unter 3.7.2. beschrieben, stehen nun mit Abschluss der Entwicklung Stromsensoren und Elektronik zur Verfügung.

Der dritte Schwerpunkt war die Anpassung einer vorhandenen Hardware bei der ACX GmbH. Das vorhandenes Modul Miniserver, das im System als Datenserver arbeitet und das Busmanagement übernimmt, kann die Hardwarekomponenten Strommessmodul, Spannungsmessmodul und die Stromsensoren miteinander verbinden die Messdaten einer Datenbank zur Verfügung stellen. Vorteilhaft für die weitere Verwendung ist eine Software, die die Auswertung und grafische Darstellung der Daten übernehmen kann. Die EurA profitiert hier von der Weiterentwicklung des Systems. Dadurch kann die Leistungs- und Energiemessung gut in Systeme der Industrie- und Gebäudeautomatisierung eingesetzt werden.

Der vierte Schwerpunkt ist die Übergabe der Messergebnisse an eine Datenbank und die Auswertung der Daten im Interesse es Energiemanagement und der Systemoptimierung. Unter dem Abschnitt 3.9.4 und 3.9.5 sind die entsprechenden Arbeiten beschrieben. Die Arbeiten wurden auch erfolgreich abgeschlossen. Die Visualisierung der Messergebnisse ist möglich und die Anlage kann mit den Softwarekomponenten in Betrieb genommen werden.

### **3.2. Feldtest**

Wesentlicher Bestandteil der Phase 2 war der Feldtest unter industrieller Umgebung. Im Labor wurde mit 3 Verbrauchern (Beleuchtung, Drehstrommotor, Heizgerät). Nicht berücksichtigt bei dem Laboraufbau sind Fragen wie:

- Leitungslängen bis 150m von Messpunkt zu Messpunkt
- EMV Störungen durch benachbarte Leitungen
- EMV Störungen durch benachbarte Maschinen
- Die Inbetriebnahme im Schaltschrank oder an der Maschine
- Die Verwendung von vielen Messpunkten (bis 100 Messpunkte)



Den Feldtest haben wir auf 2 Unternehmen verteilt.

1. Böhm Fertigungstechnik GmbH (Betrieb der Böhm AG im Gebäude der Böhm AG)

Die Böhm Fertigungstechnik ist ein mittelständiges Unternehmen mit ca. 200 mit einem Jahresenergiebedarf von ca. 2.228 MWh Strom (in 2017).

Installiert wurden 9 Messpunkte für die Bereiche.

- Gesamtmessung an der Hauptverteilung (3 x 250A)
- Werkstatt (3x 80A)
- Lehrwerkstatt (3x 32A)
- CNC3 F5 (3x 80A)
- Dreherei (3x 80A)
- Matec Fräsmaschine (3x 80A)
- Matec Portalbearbeitungszentrum (3x 80A)
- Unterverteilung Licht (3x 32A)
- Kompressor (3 x 32A)

Der Abstand der Messpunkte in der Halle beträgt durchschnittlich 50m. Vom ersten Messpunkt in der Hauptverteilung bis ins Labor der EurA (gleiches Gebäude im zweiten Obergeschoss) Messpunkt hat die Datenleitung mit Syncimpuls eine Länge von 150m.

Die Messungen erfolgten von März 2017 bis September 2017. Eine exemplarische Auswertung der Messungen für den Kompressor für eine Woche im Mai 2017 und die Ergebnisse für die Gesamtmessung.

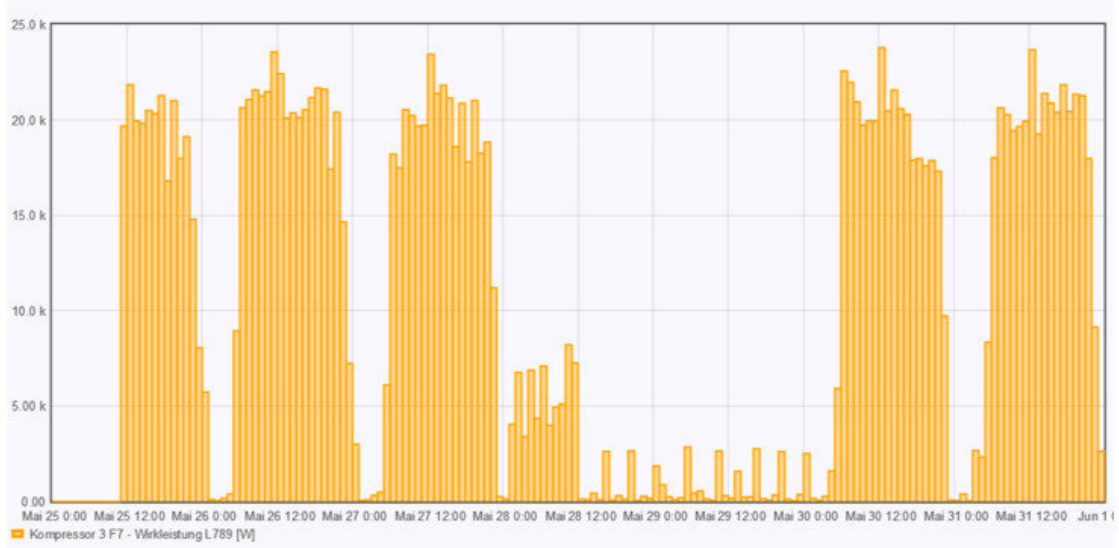


Abbildung 2: Messung über eine Woche im Mai 2017

|                                  |   |                                      |  |   |
|----------------------------------|---|--------------------------------------|--|---|
| Gesamt-Messung - Wirkleistung L1 | Werkstatt - Wirkleistung L456           | Dreherei - Wirkleistung L789         | Lehrwerkstatt - Wirkleistung L123              | Mater Frase - Wirkleistung L456                 |
| 51.82 k <sub>W</sub>             | 454.51 <sub>W</sub>                     | 11.48 k <sub>W</sub>                 | 2.04 k <sub>W</sub>                            | 10.24 k <sub>W</sub>                            |
| Mater Portal - Wirkleistung L789 | UV Licht Schaltraum - Wirkleistung L123 | CNC 3 F5 - Wirkleistung L456         | Kompressor 3 F7 - Wirkleistung L789            | Gesamt-Messung - Strom L1                       |
| 10.83 k <sub>W</sub>             | 46.04 k <sub>W</sub>                    | 6.47 k <sub>W</sub>                  | 21.36 k <sub>W</sub>                           | 86.25 <sub>A</sub>                              |
| Gesamt-Messung - Strom L2        | Gesamt-Messung - Strom L3               | Gesamt-Messung - Äquivalenter S L123 | Gesamt-Messung - Aktiv abgegebene Energie L123 | Gesamt-Messung - Aktiv angenommene Energie L123 |
| 104.96 <sub>A</sub>              | 110.26 <sub>A</sub>                     | 299.07 <sub>A</sub>                  | 1.75 M <sub>Wh</sub>                           | 9.98 M <sub>Wh</sub>                            |

### Abbildung 3 Überblick Messergebnisse

Nach Veränderungen im Schirmungskonzept konnten die Messungen an allen Messpunkten kontinuierlich durchgeführt werden. Übertragungswege über 150m auf Kabelbrücken sind unkritisch. Kritisch ist die Inbetriebnahme gewesen, die Auf Grund dessen noch überarbeitet wurde.

#### 2. EurA AG in Ellwangen

Die EurA AG ist ein mittelständiges Unternehmen mit 80 Mitarbeitern und ca. 45 Arbeitsplätzen am neu errichteten Standort in Ellwangen.

Kritisch bei unserem Messprinzip ist die Auswertung von vielen Messpunkten über einen kleinen Server mit beschränkter Rechenkapazität. Die Berechnungen ergaben eine 70% Belastung der Zentraleinheit von ca. 70% bis 80% bei 200 Messpunkten. Im Gebäude 1 der EurA AG wurden ca. 25 Sensoren installiert. Weiter 70 Sensoren sind im Gebäude 2 installiert. Bei dieser Installation sind nur wenige 3phasige Messungen (Solaranlage, Wärmepumpe, Pumpen für die die Erdkollektoren, Klima-Aggregat in Verwendung. Die überwiegende Anzahl ist einphasig installiert mit 10A und 16A Sensoren.

Wichtig waren hier die Erkenntnisse zur Inbetriebnahme aus dem Feldtest Böhm AG.

Mit dem Gebäude 1 wurde der Miniserver mit 15% ausgelastet, wenn alle 30 Sekunden ein Messwert abgerufen wird. Nach der Installation mit insgesamt 95 Sensoren lag die Auslastung bei ca. 40%. Wir gehen davon aus, dass bei 250 Messpunkten die Übertragung und Berechnung der Daten ohne Einschränkungen funktionieren wird.

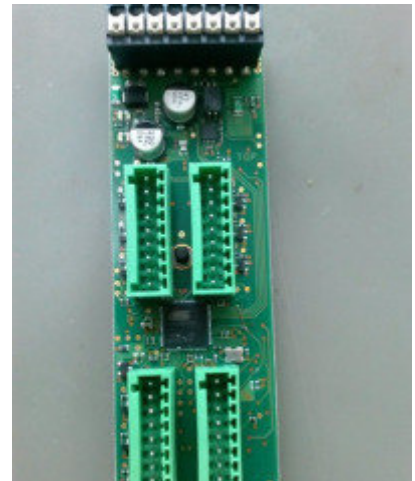
Wenn bei mehr Sensoren die Berechnung an die Grenze der Prozessor und Bus Leistung erreicht wird, kann durch eine Reduzierung der Messintervalle auf die üblichen 15 min die Anzahl der Messpunkte weiter erhöht werden.

### 3.3. Messknoten

Ziel war die fertigungstaugliche Entwicklung eines Moduls zur Messung der stromproportionalen Ausgangsspannung von unseren Stromsensoren (mind. 10 Stück). Außerdem sollte das Modul eine vBus-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Mini Server (ehemals Datensammelstelle) besitzen. Das Ziel wurde erreicht.

Als Anschlussystem für Spannungsversorgung und vBUS dient das Klemmensystem LSF-SMT 3.50/08/180 3.5SN BK der Firma Weidmüller.

Der Anschluss von 10 Stromsensoren ist über jeweils neunpolige Steckverbinder vorgesehen, d.h. je Steckverbinder 3 Sensoren (siehe Abbildung 4). Ein Bild der Platinerückseite befindet sich in der Abbildung 2. Jeder Stromsensor hat folgendes Interface: 5V, GND, Analog-Signal. Als Steckverbindersystem wird Phoenix Contact MCV 0,5/ 9-G-2,5 || MC 0,5/ 9-ST-2,5 eingesetzt.



**Abbildung 4 Messknoten Vorderseite**

An die 4 Pins rechts unten (siehe Abbildung 5) kann der SYNC-Impuls (vgl. Kapitel 3.6) angelegt werden. Es gibt eine Klemmstelle, um die SYNC weiterverteilen zu können.

Das Ausgangssignal der Stromsensoren ist so konditioniert, dass es direkt an den internen ADC des Prozessors angeschlossen werden kann ( $2,5V \pm 2,5V$ ). Hier erfolgt die Digitalisierung und in Verbindung mit der vom Spannungsmessmodul gemessenen Spannung die Berechnung der normierten Leistung. Die Abtastrate liegt bei mindestens 50kSample pro Kanal.

Als Hauptprozessor des Moduls dient die Atmel-CPU AT32UC3C2xxx im QFN64 Package. Die Stromaufnahme je Modul wurde mit 10 Sensoren auf max. 200 mA (24VDC) bestimmt. Die Stromsensoren sind mit jeweils 14mA (5V) angegeben plus die Versorgung der Klemme selbst.

Software auf dem Atmel wird wie folgt bezeichnet: Name der Klemme + Softwareversion. Der aktuelle Softwarestand heißt: Embedded.VBus.PowerMeter.4.0.0.33803

Auf dem Messknoten sind folgenden Informationen eindeutig hinterlegt: Hardwareversion, Gerätekenung (Modultyp), Seriennummer, Hersteller, Herstellungsdatum und Softwareversion. Diese Daten sind in jedem Modul gespeichert und können vom Mini Server ausgelesen und verarbeitet werden.

Der Messknoten (engl. Power Sensor) wurde wie beschrieben umgesetzt.

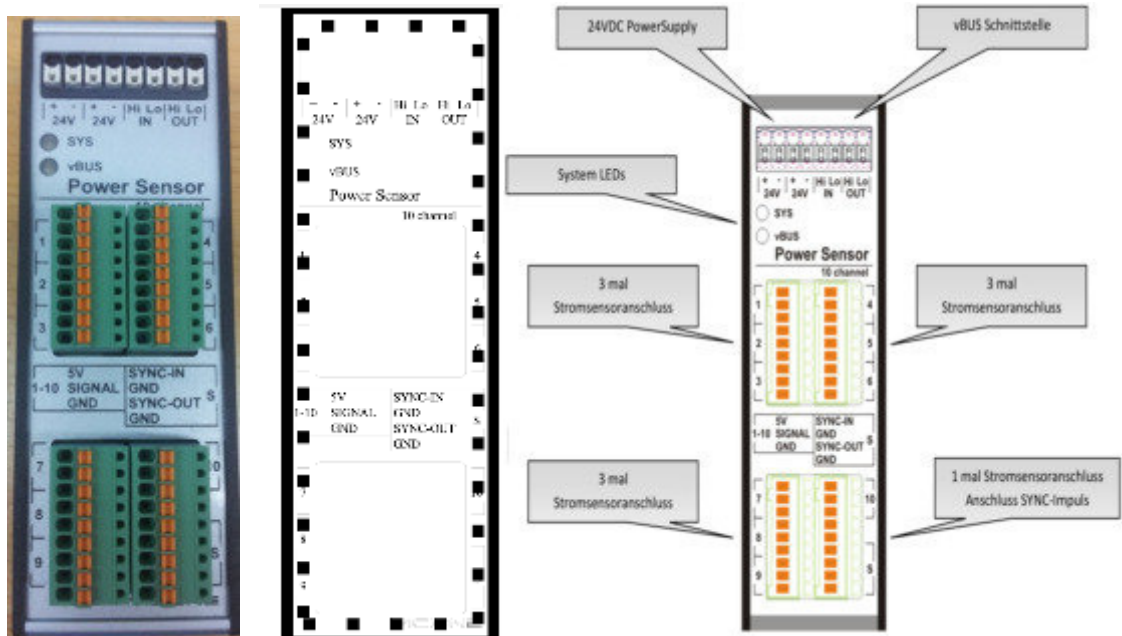


Abbildung 5 Messknoten

Als große Herausforderung bei der Umsetzung der Algorithmik aus der Phase 1 in den Messknoten erwiesen sich die zu erreichende Abtastrate und die notwendige mathematische Aufbereitung der Messwerte.

Messungen an Stromverbrauchern hatten gezeigt, dass für die Verbrauchssteuerung neben der Phasenanschnittsteuerung (periodische Anpassung) auch aperiodische Ansteuerungsverfahren (halbphasenweise Aussetzsteuerung) zum Einsatz kommen. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, jede Spannungsperiode in Echtzeit zu vermessen. Die geplante Abtastrate von 50kSample bei 10 Stromkanälen riefen vor allem Performanceprobleme am Controller bei der Weiterverarbeitung der Daten hervor (für RMS-Wert -> Potenzierung, ansonsten Multiplikation und Addition). Um die Performance zu verbessern, wurde untersucht, welche Teile im Berechnungsalgorithmus welche Rechenzeit erfordern. Die Operation mit dem größten Zeitverbrauch ist die Fließkommaarithmetik. Deshalb wurde ein Algorithmus für eine Umsetzung in Festkommaarithmetik entwickelt und programmiert.

Wir haben für beide Module (Strom + Spannung) das Montageprinzip Tragschiene (Hutschiene) nach DIN EN 60715 umgesetzt. Die Elektronik, Anschluss- und Verbindungselemente und die Signal LED wurden in einem DIN EN 60715 kompatiblen Gehäuse untergebracht. Für die Module wurde das selbe Aluminiumstrangprofil verwendet, das auch das Gehäuse für den Mini Server bildet. Dadurch entstand ein einheitliches Design für die drei Systembaugruppen.

### 3.4. Spannungsmessmodul

Die zentrale Spannungsmessung ist ein wesentlicher Bestandteil des dem Projekt zu Grunde liegenden Patentes. Die Umsetzung des Verfahrens in ein Spannungsmessmodul erwies sich dabei als sehr schwierig und bedurfte einiger neuer Entwicklungsansätze.

Das Spannungsmessmodul ersetzt zukünftig gemeinsam mit einem Standardnetzteil das intelligente Netzteil aus Phase 1.

Das Spannungsmessmodul dient der 1 oder 3-Phasen Spannungsmessung (Spannung, Frequenz und Nulldurchgangsimpuls für die einzelnen Phasen) und zeitnaher Weiterleitung der gemessenen Werte an die im Netz beteiligten Messknoten. Die Funktionsweise des Protokolls ist im Kapitel 2.4 "Kommunikation und Synchronisierung" detailliert beschrieben.

Als Anschlussystem für Spannungsversorgung und vBUS dient das Klemmsystem LSF-SMT 3.50/08/180 3.5SN BK der Firma Weidmüller.

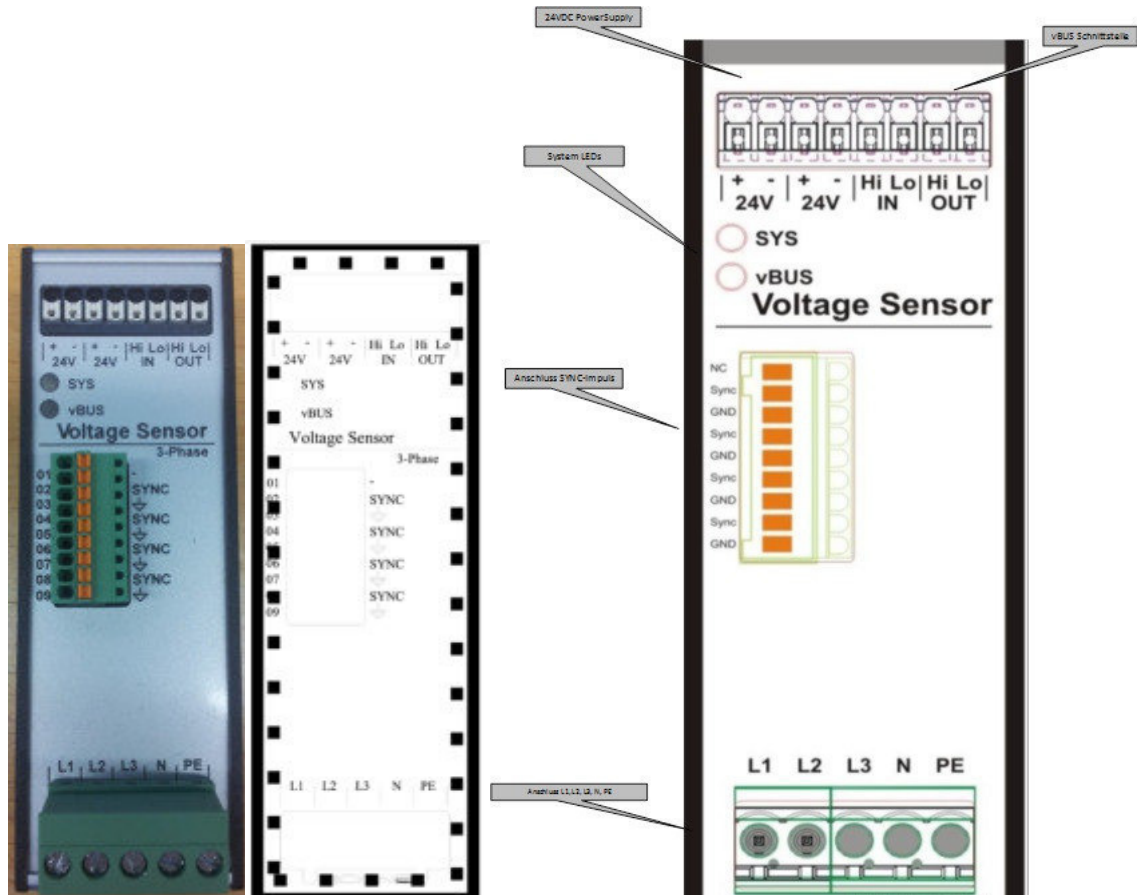
Es wird der Anschluss von einem 3-phasiges Wechselspannungssystem (400V) (L1, L2, L3, N, Schutzleiter) über eine fünfpolige Klemme vorgesehen (siehe Abbildung 6). Das verwendete Klemmsystem ist SL/SMT\_5.08HC\_180\_04 der Firma Weidmüller. Alternativ wird CIM040A5 + CVF040R5 der Firma Sauro verwendet. Weiterhin wird der Anschluss des SYNC-Impulses vorgesehen über einen neunpoligen Steckverbinder. Als Steckverbindersystem wird Phönix Contact MCV 0,5/ 9-G-2,5 || MC 0,5/ 9-ST-2,5 eingesetzt.



**Abbildung 6 Spannungsmessmodul Vorderseite**

Als Hauptprozessor des Moduls dient die Atmel-CPU AT32UC3C2xxx im QFN64 Package. Die aktuelle Softwareversion heißt: Embedded.VBus.VoltageMeter.1.0.0.33795

Die Netzspannungen werden über den IC M90E32AS von Atmel ein- oder 3-phasig gemessen. Der IC wird über SPI an die Haupt-CPU angeschlossen. Eine Abfrage der Parameter erfolgt jeweils einmal pro SYNC - Periode.



**Abbildung 7 Spannungsmessmodul**

Die Spannungsversorgung des Prozessors, die vBUS-Schnittstelle, wie auch der SYNC-Impuls wird galvanisch getrennt ausgeführt. Der SYNC-Impuls wird als ein open-collector realisiert. Der Maximalstrom, der auf die angeschlossenen Messknoten verteilt werden kann, wird auf 2A festgelegt.

Auf dem Spannungsmessmodul sind folgenden Informationen eindeutig hinterlegt: Hardwareversion, Gerätekenung (Modultyp), Seriennummer, Hersteller, Herstellungsdatum und Softwareversion. Diese Daten sind in jedem Modul gespeichert und können vom Mini Server ausgelesen und verarbeitet werden.



### 3.5. CE Konformität

Da für beide Module und das System noch keine Erklärung der CE Konformität vorhanden ist, würden die ersten Systeme mit der Aufschrift „Testsystem“ produziert.



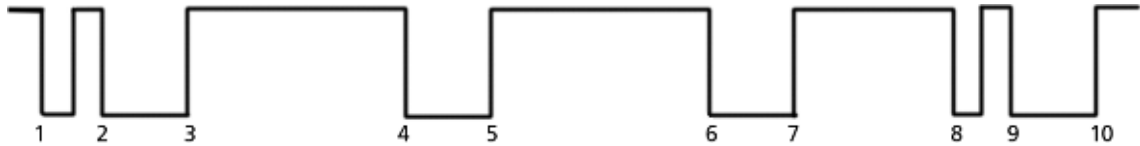
Anfragen zum Nachweis der der Einhaltung erforderlichen EU Richtlinien wie z.B. die EMV Richtlinien und Richtlinien zur elektrischen Sicherheit wurden eingeholt. Nach dem Anschluss der konstruktiven, elektronischen und softwaretechnischen Überarbeitung werden alle Prüfungen beauftragt, die noch notwendig sind um die Übereinstimmung mit allen zutreffenden EU Richtlinien zu bestätigen

### 3.6. Kommunikation und Synchronimpuls

Entgegen den bei Beginn der Phase 2 dargestellten Möglichkeiten der Synchronisation der Spannungs- und der Strommessung ist der vBus (modifizierter CAN-Bus) nicht in der Lage eine ausreichend häufige Synchronisation der Module zu gewährleisten. Messungen haben gezeigt, dass eine Synchronisation mehrfach pro Sekunde stattfinden sollte um die Netzfrequenzschwankungen ausreichend genau zu berücksichtigen.

Der Spannungsmess-IC im Spannungsmessmodul erzeugt ein digitales Signal für die Anzeige der Nulldurchgänge der einzelnen Phasen. Der Prozessor ermittelt die Spannungen und Nulldurchgänge und stellt daraus ein Nullaktives-Synchronisationssignal zur Verfügung, das die Informationen über die Nulldurchgänge der 3 Phasen, wie auch

die Höhe der Spannungsamplitude enthält (siehe Abbildung 6). Die Synchronisationsimpulsfolge wird alle 200ms übertragen. Ein geringeres Sync-Intervall ist aufgrund der aufwendigen Berechnungen auf den Messknoten nicht möglich - aber auch nicht notwendig.



**Abbildung 8 nullaktiver Synchronimpulsaufbau**

Jede Impulsfolge beginnt mit einem kurzen Initialimpuls (1), der anzeigt, dass es sich bei der nächsten fallenden Flanke um die Phase 1 handelt. Die fallenden Flanken der Impulsfolge stellen die Nulldurchgänge dar und die Breite der Impulse die Amplitude der Spannung. Als gültige Impulsweite wurden 1ms bis 5ms definiert. Die untere Grenze von 1ms ist wichtig, um den Initialimpuls (<1ms) von den übrigen Impulsen unterscheiden zu können. Die obere Grenze von 5ms ist wichtig, damit die Amplitudenübertragung sicher abgeschlossen ist, wenn der nächste Nulldurchgang stattfindet. Der Abstand der Nulldurchgänge beträgt bei 50Hz im Mittel 6,67ms, bei 60Hz Netzfrequenz 5,56ms. Die minimale Breite entspricht 300V, die maximale Breite 350V immer bezogen auf die Spannung zwischen Lx und N. Die Grenzen von 300-350V sind sinnvoll, weil die Netzspannung von 230V zu einer maximalen Amplitude von  $230V \cdot \sqrt{2} = 325V \pm \text{Netzschwankung}$  führt. Eine Unterstützung von anderen Spannungssystemen ist durch eine abgewandelte Bestückung der Eingangsspannungsteiler möglich. Um dies in der Software unterscheiden zu können, wird eine entsprechende Bestückungsbezeichnung auf den Klemmen vorgesehen.

In Abbildung 6 stellt (2) den Beginn der Phase 1 dar und die Zeit zwischen (2) und (3) die Amplitude der Spannung Phase 1. Die Punkte (4) und (6) stellen die Starts der Phase 2 und 3 dar und die Zeit zwischen (4) und (5) und die Zeit zwischen (6) und (7) jeweils die dazugehörigen Amplituden. (8) ist der neue Initialimpuls der nächsten Periode, die mit (9) beginnt.

Der Synchronimpuls wird über eine Ader der Busleistung übertragen. In unserem Fall hat die Verbindungsleitung 5 Adern. (2x Spannungsversorgung (24V) für die Module, 2x vBus, 1x Synchronimpuls). Es ist wichtig, dass der Synchronimpuls nicht mehr als die genannten 5 Adern hat, damit Kabel- und Installationskosten minimiert werden.



### 3.7. Mini Server

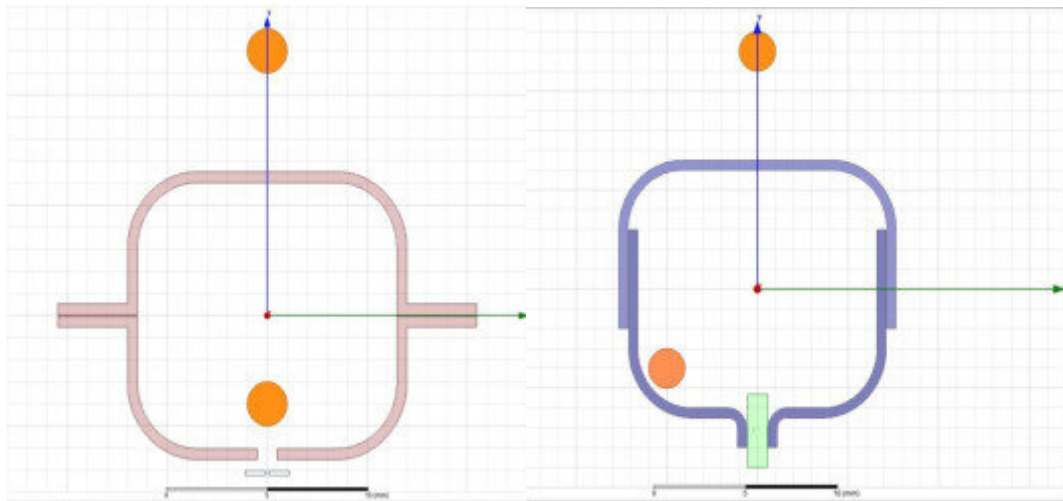
Der Mini Server verwendet dasselbe Klemmensystem wie der Messknoten und das Spannungsmessmodul. Er verfügt über 106 Ein- und Ausgänge, Bus Anschlüsse, sowie 9 Linienkoppler für bis zu 250 weitere Module und damit über 14.000 weitere Sensoren. Die geringe Leistungsaufnahme von weniger als 1,5 W bei Vollast und der interne Flash + SD Flash Speicher machen ihn zu einer idealen Ergänzung zu unserem Energiemesssystem. Der Mini Server kann die gemessenen Werte über Ethernet an einen externen Dienst-PC schicken, auf dem eine Datenbank in Form eines SQL-Servers läuft. Mit dieser Datenbank kann eine externe Auswertesoftware verbunden werden. Der Mini Server ist der Master für das Bussystem. Er regelt die Kommunikation zwischen den Messknoten und dem Spannungsmessmodul.



Abbildung 9 Miniserver

### 3.8. Stromsensoren

Für die Strommessung wurde, wie schon in Phase 1 ausführlich dargestellt, ein Hall-Sensor der Fa. Melexis verwendet.



**Abbildung 10 Sensorposition ALT**

**Abbildung 11 Sensorposition NEU**

Konstruktiv wurde die Position des Hallsensors geändert. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, war der Sensor (weiß, unterhalb des Eisenkreises) bisher außerhalb des rosa Eisenkreises. Bei der neuen Konstruktion (siehe Abbildung 11) wurde der Sensor (grün) direkt im Eisenkreis platziert. Dadurch sind die Messungen deutlich weniger anfällig gegenüber der Leiterposition des zu messenden Leiters (orangener Punkt innerhalb des Messkreises) und außerdem ist der Sensor deutlich weniger fehleranfällig gegenüber anderen Leitern in der Nähe des Sensors (orangene Punkte außerhalb des Eisenkreises). Der Fehler durch die genannten Einflüsse kann in Simulationen so von  $\pm 3,2\%$  (worst case) auf  $\pm 0,8\%$  (worst case) verringert werden.

Grundsätzlich sind die Ergebnisse gut, erreichen aber noch nicht die Genauigkeit, die im Antrag Phase 2 geplant waren. Messungen haben einen Fehler von ca. 8% ergeben. Als Problem erweist sich der im Stromsensor verwendete Eisenrückschluss. Das verwendete Trafo-Blech weist eine zu hohe Hysterese auf. Dies führt zu einer Offsetverschiebung der Stromsensoren, die sich auch ändern kann, je nachdem an welchem Punkt der Stromkurve ausgeschaltet wurde. Daraus ergibt sich eine verfälschte Wirkleistung. Dies bewirkt, dass, z.B. auch ohne eingeschalteten Verbraucher, ein scheinbarer Strom fließt und eine Scheinleistung verbraucht wird.

Durch die Optimierung der Materialien und der Position des Sensors sollte der Fehler auf deutlich unter 5% reduziert werden. Die Arbeiten haben gezeigt, dass durch die Verwendung von speziellen Hysterese freien Spezialmetallen die Grenze in der Simulation unterschritten werden kann. Das Metall ist aber nur verfügbar, wenn es bei dem Unternehmen Vaccum Schmelze in einer großen Menge bestellt wird. Durch die Analyse der Firma Nantis (siehe Auftrag Fremdleistung) hat sich herausgestellt, dass die

Sensorkonstruktion mit der Zielstellung kleiner 5% überfordert ist. Nachfolgend die Betrachtung warum der Fehler oder genauer die Phasenverschiebung der Messung für die Bestimmung der Leistung und damit der Energie extrem wichtig ist.

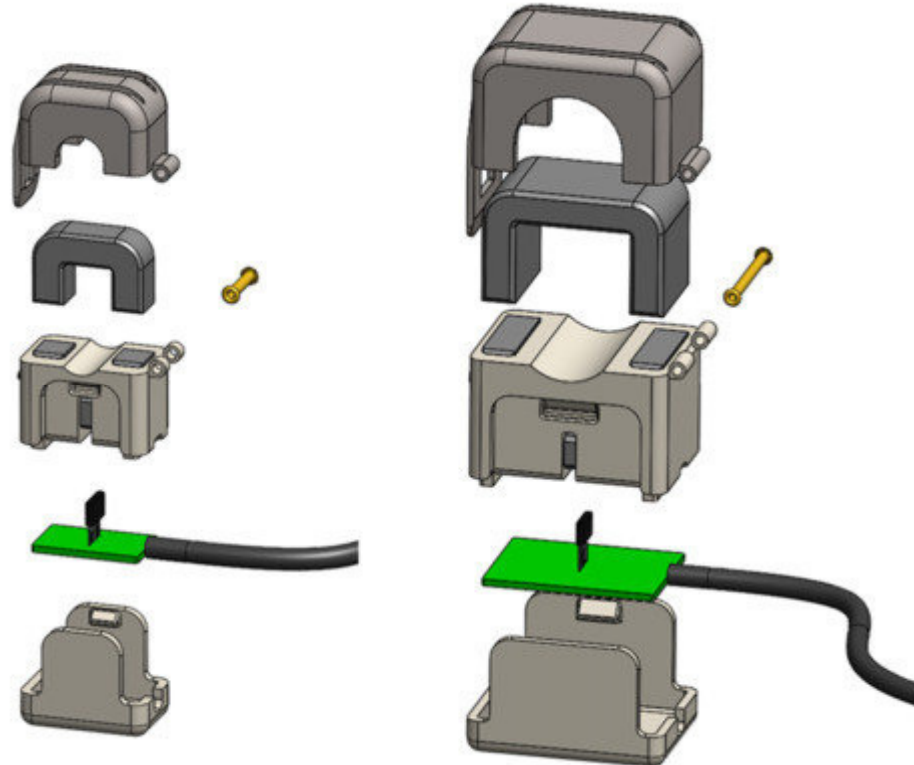


Abbildung 12 - Darstellung des neuen Sensordesigns

### 3.8.1. Auswirkungen von Phasenfehlern auf die Berechnung der Wechselstromleistung

In diesem Abschnitt soll kurz dargestellt werden, wie sich eine fehlerhafte Phaseninformation zwischen Strom und Spannung bei sinusförmigen Wechselgrößen auf die Berechnung der zugehörigen Leistung auswirkt. Für die Wirk- und Blindleistung bei sinusförmigen Wechselgrößen gilt:

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$$
$$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin \varphi$$

wobei

*P* – Wirkleistung  
*Q* – Blindleistung  
*I<sub>eff</sub>* – Effektivwert des Stromes  
*U<sub>eff</sub>* – Effektivwert der Spannung  
*φ* – realer Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung

Es wird nun angenommen, dass das Sensorsignal für den Strom außer der realen Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung einen weiteren Winkelfehler  $\theta$  enthält, der durch den Stromsensor verursacht wird und in den realen Signalen nicht vorhanden ist. Für die daraus berechnete fehlerbehaftete Wirk- und Blindleistung  $P'$  und  $Q'$  ergibt sich der Zusammenhang:

$$\begin{aligned} P' &= U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\varphi + \theta) \\ Q' &= U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\varphi + \theta) \end{aligned}$$

Der prozentuale Fehler in der Wirkleistung  $f_P$  bzw. der Blindleistung  $f_Q$ , der sich aus dem Phasenfehler im Sensorsignal ergibt, errechnet sich damit zu:

$$\begin{aligned} f_P &= \left( \frac{P'}{P} - 1 \right) \cdot 100 \% = \left( \frac{\cos(\varphi + \theta)}{\cos \varphi} - 1 \right) \cdot 100 \% \\ f_Q &= \left( \frac{Q'}{Q} - 1 \right) \cdot 100 \% = \left( \frac{\sin(\varphi + \theta)}{\sin \varphi} - 1 \right) \cdot 100 \% \end{aligned}$$

Zur Veranschaulichung sollen  $f_P$  und  $f_Q$  für einen statischen Phasenfehler  $\theta$  betrachtet werden und dazu über den  $\cos \varphi$  aufgetragen werden.

Es ist erkennbar, dass bei einem  $\cos \varphi$  nahe 1 der Fehler in der Wirkleistung bei einem konstanten und relativ kleinen Winkelfehler  $\theta=5^\circ$  sehr gering ist. In diesem Betriebspunkt eines Verbrauchers ist kein nennenswerter Blindleistungsanteil vorhanden. Deshalb sind die Auswirkungen des hohen Fehlers in der Blindleistung absolut gesehen gering. Sinkt der nun nennenswert, steigt der prozentuale Fehler in der erfassten Wirkleistung sehr schnell an. Für einen Winkelfehler von  $\theta=5^\circ$  erhält man bei einem  $\cos \varphi \approx 0,8$  bereits einen prozentualen Fehler in der erfassten Wirkleistung von größer 5%. Wird der Winkelfehler  $\theta$  sehr groß stellen sich erhebliche Messfehler bei  $\cos \varphi = 1$  ein, da sich der Punkt ohne Messfehler hin zu einem kleinere  $\cos \varphi$  verschiebt. Der Messfehler steigt bei einem Winkelfehler in dieser Größenordnung aber so schnell an, dass keine sinnvolle Nutzung der Messwerte mehr erfolgen kann. Daher sollte ein Phasenfehler kleiner  $3^\circ$  angestrebt werden, oder falls möglich eine Phasenkorrektur durchgeführt werden.

Zusammengefasst hat die Firma Nantis über die Berechnungen und Systembetrachtungen u.a. herausgearbeitet, dass das Sensorkonzept bis dahin zwar funktioniert, aber trotzdem ein erhebliches Risiko in der Genauigkeit birgt.

Zusammengefasst hat sich in der Schlussphase der Entwicklung ein sehr hohes Risiko gezeigt. Die bisherige Zielstellung zum Fehler des Sensors war falsch oder zumindest sehr grenzwertig.

Die Firma Nantis wurde beauftragt eine Alternative zu suchen, die es ermöglicht, den Phasenfehler des Sensors auf unter 3° zu bringen und den Verstärkungsfehler unter 3%.

Im Ergebnis wurde vorgeschlagen, das Messprinzip des Klappstromwandlers einzusetzen, bei dem die Induktion über einem Ferritkern mit einer Messspule ausgewertet wird. Dazu wurden 4 Typen ausgelegt und entsprechende Ferritkerne und Messspulen vermessen. Problematisch war die konstruktive Lösung, damit wir im Bestand der Anlagen weiter in dem 16 mm Raster die Sensoren zum Einsatz bringen können.

Nachfolgende Tabellen zeigen im Vergleich die Eigenschaften der beiden Sensortypen.

Die Tabelle und die Vermessung der Muster hat gezeigt, dass messtechnisch für die Wechselstrommessung der Stromwandler mit Messspule sicher geeignet ist. Nachteil: Das Prinzip ist für die Gleichstrommessung nicht geeignet. Auch sind die Produktionskosten theoretisch höher. Da wir beim Ferritkern und der Messspule auf bestehende hohe Stückzahlen zugreifen können und die Messelektronik sehr preiswert ist, konnte der Zielpreis in der Herstellung der Sensoren trotzdem erreicht werden. Die Materialkosten je Sensor liegen zwischen 6,30€ und 14,55€. Im Abschnitt 3.11. Tab 5 wird gezeigt, dass mit dem Konzept die Zielpreise für das System erreicht werden konnten.

**Tabelle 1 - Vergleich Sensor Melexis IC und Stromwandler**

| Kategorie   | Sensor, Melexis-IC   | Stromwandler mit Meßspule und Signalaufbereitung  |
|---|--|---|
| Phasenfehler Sensor                                 | <u>alte Version:</u> sehr groß >20°<br><u>neue Version:</u> <5° lt. Simulation mit Hysterese freiem Material möglich, die notwendigen max 3° können aber nicht garantiert werden | CT-10: $\phi < 3,0^\circ$ (Clip 4 und Clip 16)<br>CT-16: $\phi < 2,5^\circ$ (Clip 16)<br>CT-24: $\phi < 1,5^\circ$ (Clip 120)<br>CT-36: $\phi < 0,5^\circ$ (Clip 220) |
| Verstärkungsfehler im magnetischen Teil des Sensors | magnetischer Kreis kann Genauigkeit und Stabilität lt. Datenblatt aber <u>erheblich</u> beeinflussen.  | CT-10: $\epsilon < 1\%$ (Clip 4 und Clip 16)<br>CT-16: $\epsilon < 1\%$ (Clip 16)<br>CT-24: $\epsilon < 3\%$ (Clip 120)<br>CT-36: $\epsilon < 2\%$ (Clip 220)         |
| Verstärkungsfehler in der Elektronik des Sensors    | typisch $\pm 0,0\%$ , max. $\pm 1,5\%$ über gesamten Temperaturbereich (-40°C bis 125°C)   | typisch $\pm 0,03\%$ , max. $\pm 1,5\%$ über gesamten Temperaturbereich (-40°C bis 105°C)   |
| Fehler im Gleichspannungsoffset                     | max. 0,4% Voq  | typisch Anfangsgenauigkeit $\pm 0,1\%$ Voq, max. $\pm 0,7\%$ Voq, max. 70ppm/°C Temperaturdrift   |
| Linearität Elektronik                               | +0,4%  | +0,01%  |

**Tabelle 2 - Systemgenauigkeit mit Elektronik**

| Kategorie  | Stromwandler und Meßspule mit Signalaufbereitung   |
|--|--|
| Kombinierter Verstärkungsfehler  | CT-10-30A: $\epsilon < 2\%$ von 1% bis 90% Nennstrom (Bereich kann angepasst werden)<br>CT-16-70A: $\epsilon < 2\%$ von 1% bis 100% Nennstrom                                    |
| Sensor + Elektronik aus Testmessung der 4 Sensor-Typen (je eine Messung) | CT-24-240A: $\epsilon < 2\%$ von 0,5% bis 100% Nennstrom<br>CT-36-400A: $\epsilon < 1\%$ von 0,5% bis 100% Nennstrom<br>→ Genauigkeitsanforderung des LH könnten erreichbar sein |
| Fehler im Gleichspannungsoffset  | max. gemessener Offsetfehler 0,17% (6 Elektroniken wurden betrachtet)  |

Fazit für Stromwandler mit Messspule und Signalaufbereitung:

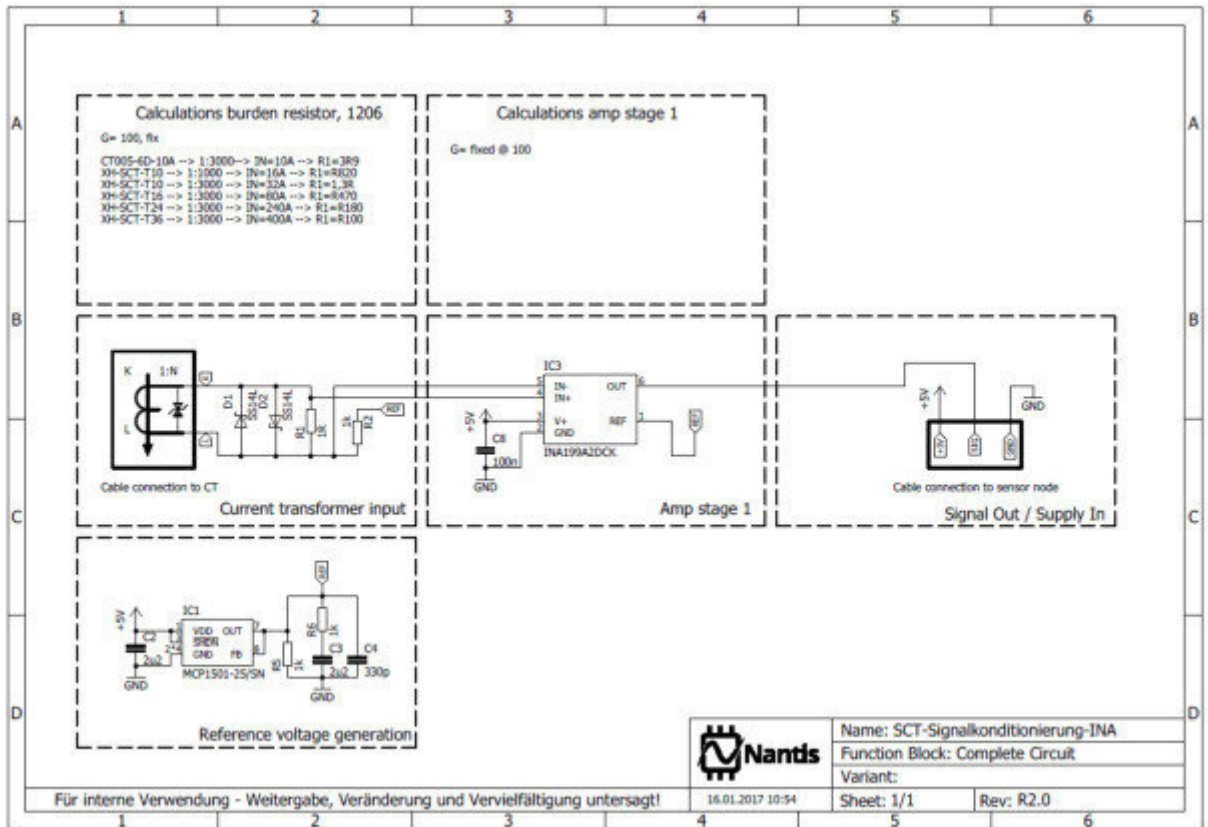
- Genauigkeit der Verstärkung auch ohne Kalibrierung ausreichend hoch
- Offsetfehler klein, kann bei Bedarf im Strommessmodul kalibriert werden
- Phasenfehler klein, kann nach aktuellem Stand nicht kalibriert werden, wenn dann aber im Strommessmodul

Vom Projekt Management wurde entschieden neue Sensoren auf Basis Stromwandler mit Messspule und Signalaufbereitung zu konstruieren und zu bauen. Die Ergebnisse der Sensoren mit Melexis IC sind aber trotzdem nutzbar, wenn Messungen an Gleichstromsystemen durchgeführt werden müssen. Da heute aber deutlich über 95% aller Messungen im Wechselstromnetz erfolgen, ist die Entscheidung zugunsten der Systemgenauigkeit folgerichtig

### 3.8.2. Elektronik zur Pegelanpassung

Die Elektronik zur Pegelanpassung wurde speziell für den Einsatz in Zusammenhang mit dem Stromsensor des Energiemesssystems entwickelt. Die Elektronik wandelt den Ausgangsstrom der Stromwandler in ein Spannungssignal um, das vom Mikroprozessor im Strommessmodul effizient eingelesen und weiterverarbeitet werden kann. Weiterhin können über verschiedene Varianten dieser Elektronik die unterschiedlichen Messbereiche der Sensoren realisiert werden, sodass diese alle ein einheitliches Ausgangssignal erzeugen und damit an die selben Eingänge des Power Sensors angeschlossen werden können.

## Schaltplan



## Layout

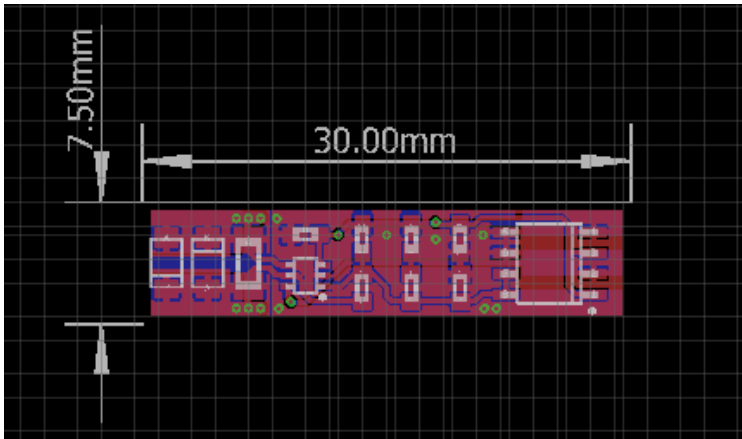


Abbildung 13: Gesamtansicht Layout

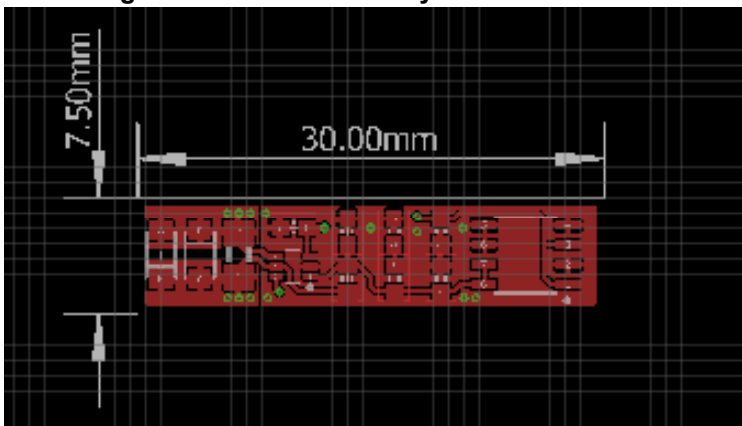


Abbildung 14: Top-Layer

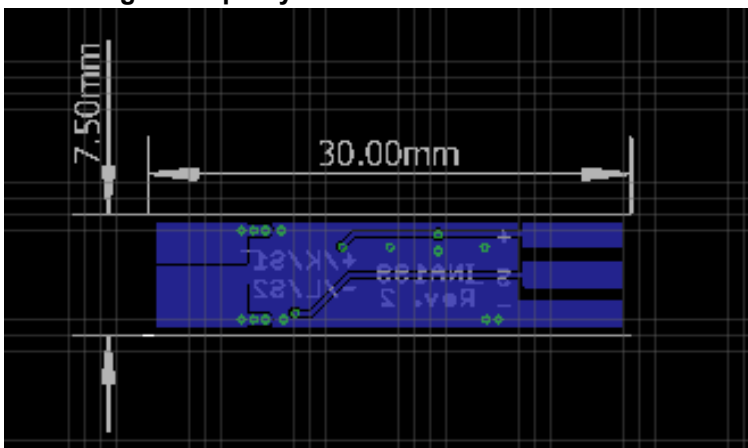


Abbildung 15: Bottom-Layer



### Ansichten Elektronik/Sensor

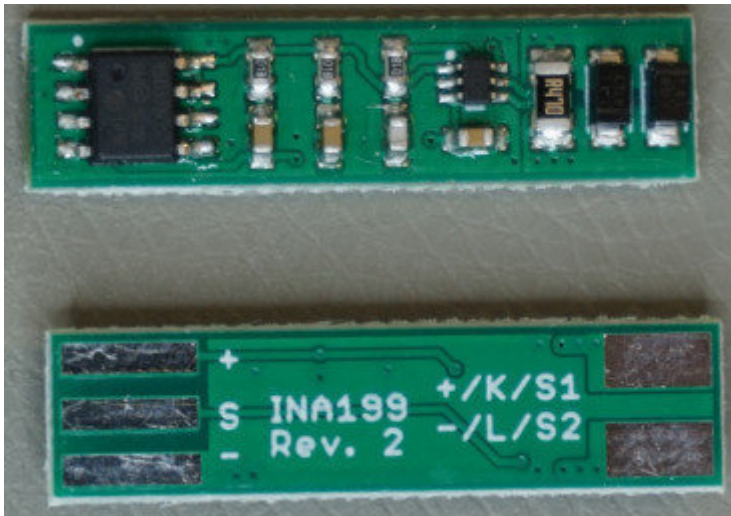


Abbildung 16: Elektronik Pegelanpassung Vorder- und Rückseite

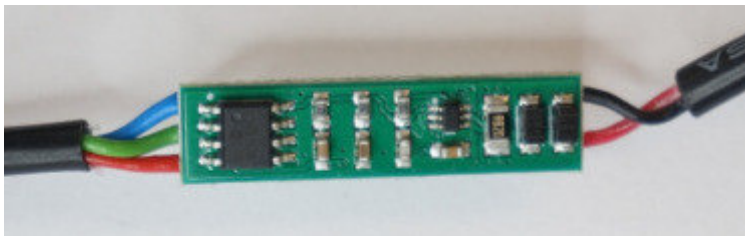


Abbildung 17: Elektronik im Kabelverbund



Abbildung 18: Fertig aufgebauter Sensor mit Elektronik zur Signalanpassung

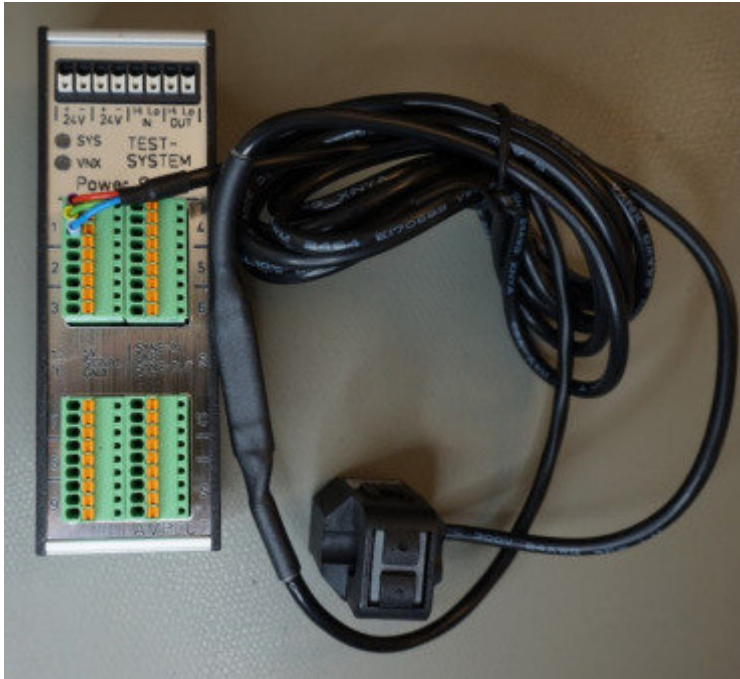


Abbildung 19: Stromwandler am PowerSensor

### Spannungsverlauf Ausgangssignal

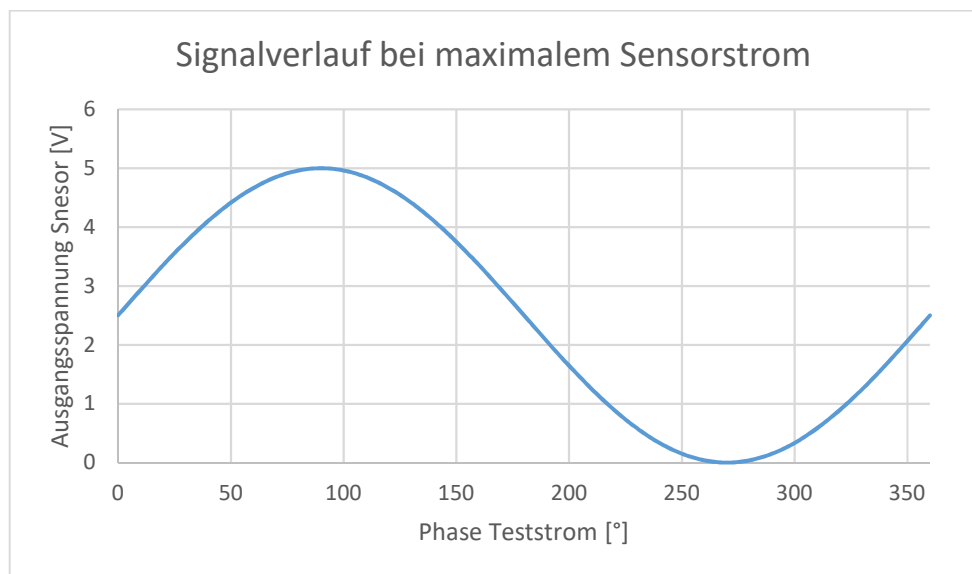


Abbildung 20: Spannungsverlauf Ausgangssignal Sensor

Das Sensorsignal besitzt einen DS-Offset von exakt 2,5V. Auf diese Weise befindet sich das gesamte Sensorsignal in einem Spannungsbereich, indem eine direkte Erfassung durch die Analog-Digitalwandler des zentralen Mikrocontrollers des Stromsensors möglich ist. Das Signal ist gegenüber der Masse des Stromsensors referenziert.

Die Ausgangsspannung ist proportional zum Strom im Leiter, an dem der Sensor angebracht worden ist. Bei der Dimensionierung der Verstärker ist darauf geachtet worden,

dass die Amplitude der Ausgangsspannung bei Nennstrom ca. 2V beträgt. Auf diese Weise können auch Überstromsituationen im Leiter bis ca. 120% Nennstrom noch erfasst werden. Die maximale Amplitude des Ausgangssignals beträgt 2,5V, sodass das resultierende Sensorsignal einen Wertebereich zwischen 0V und 5V aufweist.

Alle weiteren Berechnungen finden auf Basis dieses Sensorsignals statt, dass die Stromamplitude und die Phaseninformation des im Leiter gemessenen Stromes trägt.

## Anschlussbelegung



Abbildung 21: Anschlussbelegung

Tabelle 3: Beschreibung Eingänge

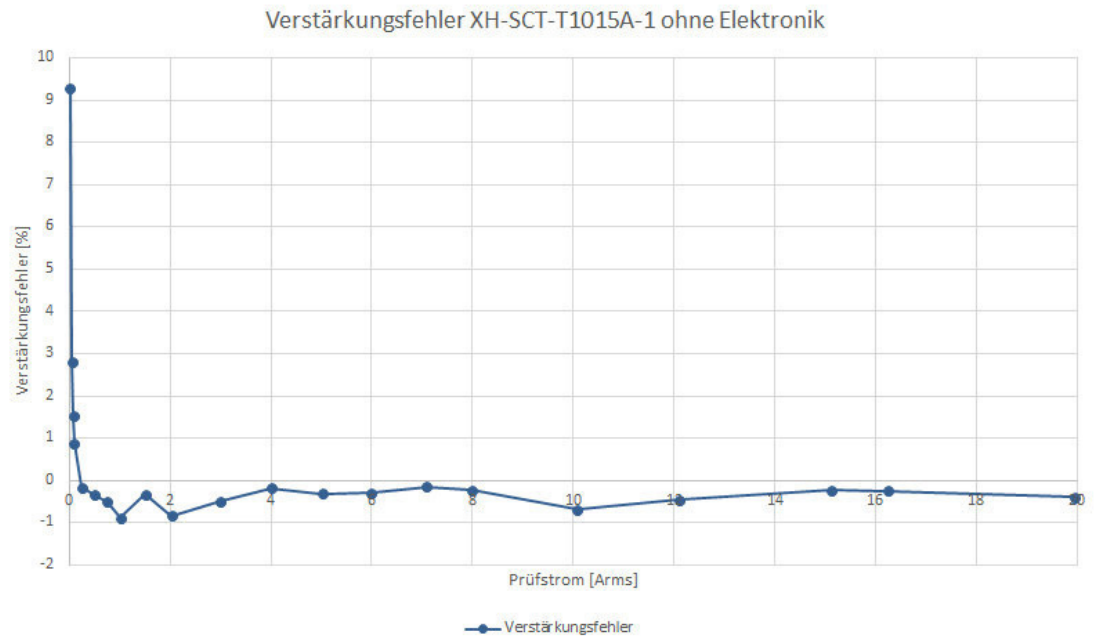
| <u>Bezeichnung:</u> | <u>Funktion:</u>               |
|---------------------|--------------------------------|
| +/K/S1              | Positiver Eingang Stromwandler |
| -/L/S2              | Negativer Eingang Stromwandler |

Tabelle 4: Beschreibung Ausgänge

| <u>Bezeichnung:</u> | <u>Funktion:</u>                      |
|---------------------|---------------------------------------|
| +                   | Spannungsversorgung, +5V, ca. 5mA     |
| S                   | Signalausgang, referenziert auf Masse |
| -                   | Masseanschluss                        |

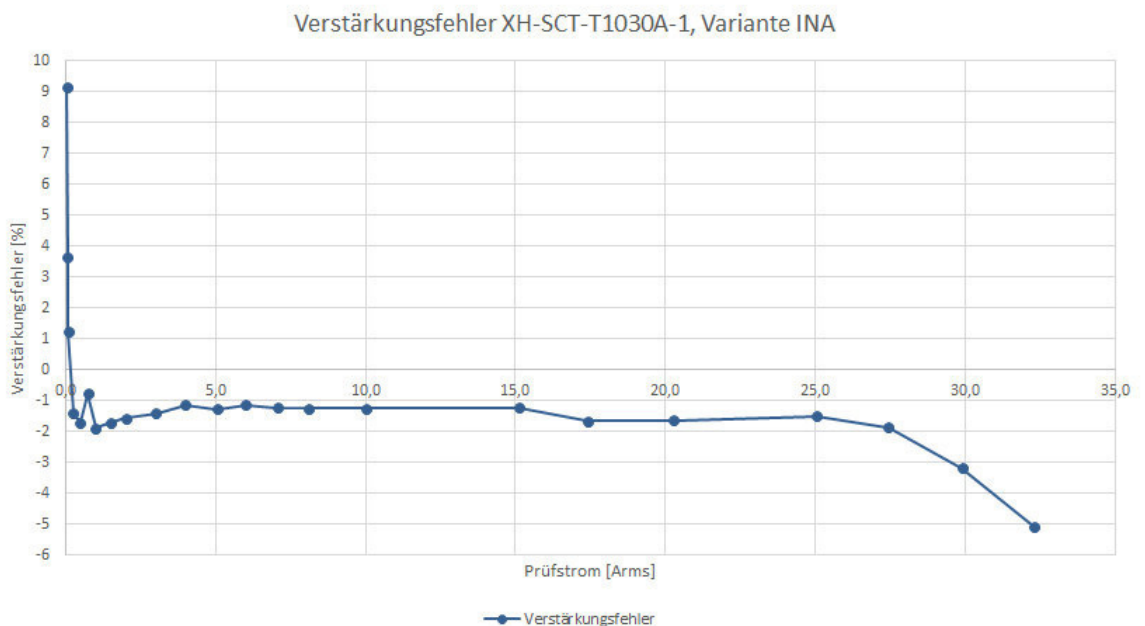
## Fehler ohne Elektronik

- Eigene Referenzmessung für XH-SCT-T10



## Fehler mit Elektronik

- Eigene Referenzmessung für XH-SCT-T10



Der Fehler des neuen Sensorkonzeptes im Messbereich mit Elektronik liegt bei <2%. Die Elektronik in Verbindung mit dem Gehäuse und Ferrit / Spulenmodul aus den vorhandenen Klappwandlern ist nutzbar. Die Messungen wurden für die notwendigen Baugrößen durchgeführt.

### 3.8.3. Verfügbare Sensoren

Nachfolgende Sensortypen sind entworfen und aufgebaut. Die Elektronik für die Pegelanpassung ist in einer kleinen Serie gefertigt. Von jedem Sensor stehen ca. 25 Muster zur Verfügung. Mit der Entscheidung und der Beauftragung der Firma Nantis wurde der Projekterfolg gesichert.



Abbildung 22 – Stromsensor – CT 6 bis CT 36 -

Die aktiven Stromsensoren erfassen Wechselströme bis 400A bei Leiterdurchmessern bis zu 36mm. Sie können ohne Abklemmen des primären Leiters installiert und ohne Trennklemme direkt mit dem Strommessmodul verbunden werden. 6 verschiedene Baugrößen erlauben hohe Flexibilität und Messgenauigkeit bei geringer Baugröße (siehe Tab. 11).

| Bezeichnung: | max. Leiterdurchmesser [mm]: | max. Querschnitt [mm <sup>2</sup> ): | Ziel-Nennstrom Prim. [Arms]: | max. Ziel-Strom Prim. [Arms]: | Maximalstrom [Arms] bei Vamp = 2,5V | Wandlungsverhältnis: | Elektronik Typ: |
|--------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------|
| CT-6-10A     | 6                            | 28                                   | 10                           | 12                            | 13,59820733                         | 3000                 | INA199A2        |
| CT-10-16A    | 10                           | 79                                   | 16                           | 19,2                          | 21,55813357                         | 1000                 | INA199A2        |
| CT-10-32A    | 10                           | 79                                   | 32                           | 38,4                          | 40,79462199                         | 3000                 | INA199A2        |
| CT-16-80A    | 16                           | 201                                  | 80                           | 96                            | 112,8361885                         | 3000                 | INA199A2        |
| CT-24-240A   | 24                           | 452                                  | 240                          | 288                           | 294,6278255                         | 3000                 | INA199A2        |
| CT-36-400A   | 36                           | 1018                                 | 400                          | 480                           | 530,3300859                         | 3000                 | INA199A2        |

Abbildung 23 - Verfügbar Stromsensoren

Durch die neu entwickelte Messelektronik für den Sensor war es auch möglich die Messsignale von Rogowski Spulen an den Signalpegel für unsere Strommessmodule anzupassen. Die Rogowski Spule hat den Vorteil, dass Kabelbündel gemessen werden

können. Dadurch ist es jetzt möglich, mit unserem System auch Messungen auszuführen, die typisch mit Rogowski Spulen ausgeführt werden (über 400 A oder Kabelbündel in Schaltanlagen).



**Abbildung 24 - Rogowski Spulen mit angepasster Elektronik**

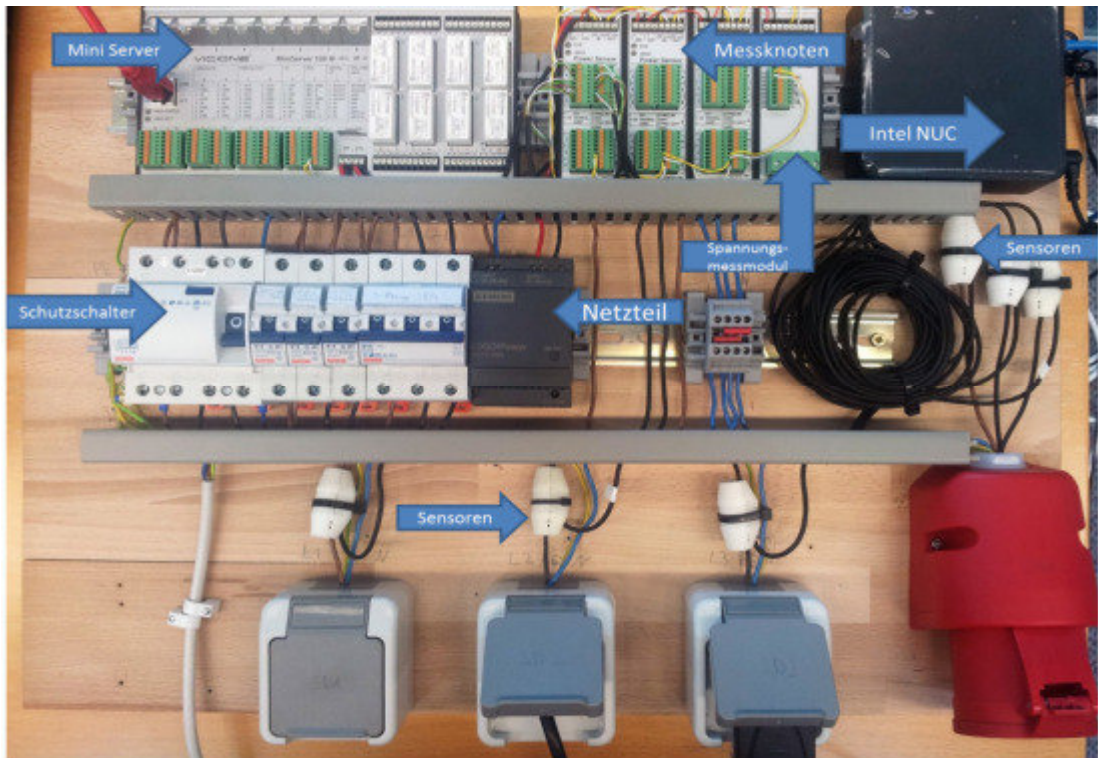
Mit der aktiven Rogowski Spule können Ströme bis 1500A bei Fensterdurchmessern von bis zu 160mm erfasst werden. Auch sie können ohne Abklemmen des primären Leiters installiert werden und sind besonders gut für Strommessungen an parallel geführten Leitern geeignet. Verschiedene verfügbare Fenstergrößen und Strombereiche ermöglichen eine optimale Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten.

Ergebnis:

- Funktionsfähige Sensoren mit Elektronik zur Pegelanpassung (siehe 3.7.1)



### 3.9. Systemaufbau



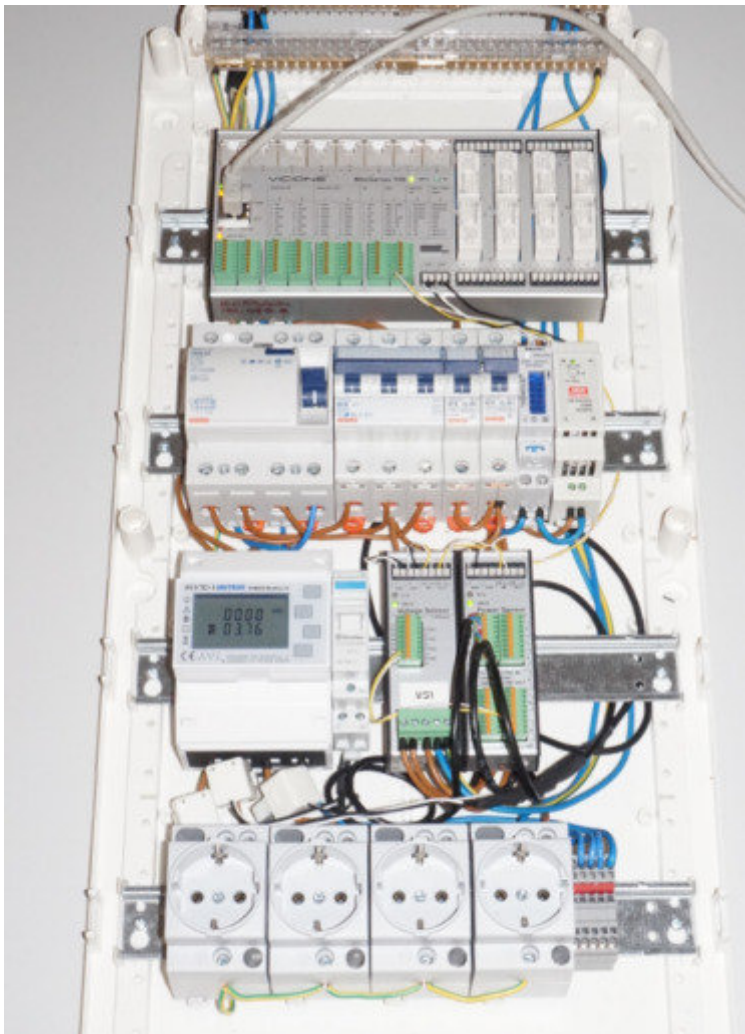
**Abbildung 25 Testaufbau Labor**

Der grundsätzliche Aufbau kann für einphasige und dreiphasige Messungen eingesetzt werden. Im Versuchsaufbau Abbildung 25 sieht man 2 handelsübliche Hutschienen, auf die die Hardwarekomponenten montiert wurden:

Auf der oberen Hutschiene sieht man: den Mini Server, rechts daneben drei Messknoten und ganz rechts das Spannungsmessmodul. Auf der Hutschiene in der Mitte sieht man einen FI-Schutzschalter über den die Stromversorgung gesichert wird. Daneben wurden 3 einphasige Schalter für die Steckdosen und ein dreiphasiger Schalter montiert. Die schwarze Box mit der Aufschrift „Logo|Power“ ist ein handelsübliches 24 V DC Netzteil für die Modulstromversorgung. Der graue Kasten rechts ist ein Mini PC (Intel NUC) auf dem die Datenbank arbeitet und die „Automation Suite“ laufen kann. Am unteren Rand sieht man 3 Steckdosen, an die jeweils einphasige Verbraucher angeschlossen werden können und in rot eine Dreiphasensteckdose. Die sechs weißen Sensoren sind an die Leiter zu den Einphasensteckdosen und je ein Sensor an eine Phase der Dreiphasensteckdose angeschlossen. Die Grundfunktionen der einzelnen Hardwarekomponenten sind in Tabelle 5 zu sehen.

**Tabelle 5 Grundfunktionen der Hardwarekomponenten**

| Hardware             | Funktion  |
|----------------------|---|
| Strom-messmodul      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stromwertmessung mit bis zu 50kSample pro Kanal</li> <li>- Effektivwertberechnung (I_RMS) für bis zu 10 Stromsensoren</li> <li>- Wirkleistung berechnen</li> <li>- Weiterleitung des Sync-Impulses, des vBus und der Betriebs-spannung</li> </ul>  |
| Span-nungs-messmodul | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Spannungswertmessung als Effektivwert (U_RMS) für 1-3 Pha-sen</li> <li>- Frequenzmessung</li> <li>- Nulldurchgangserkennung</li> <li>- Sync-Impuls Erzeugung und Übertragung auf 4 Leitern</li> <li>- Erkennung zu großer Netzverschiebungen</li> <li>- Weiterleitung des vBus und der Betriebsspannung</li> </ul> |
| Mini Server          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Buskommunikation</li> <li>- Parametrisierung der Busknoten (Automation Suite)</li> </ul>   |



**Abbildung 26 - Systemaufbau für den Test der Systemgenauigkeit**



Um die einzelnen Komponenten zu prüfen, wurde ein Testaufbau im EurA Labor (siehe 23) realisiert. Als Verbraucher wurden gängige Werkstattgeräte (Lampen, Heißluftpistole etc.) verwendet. Diese stellen überwiegend ohmsche Lasten dar. Tests mit induktiven oder kapazitiven Lasten stehen im Rahmen von Feldtests noch aus. Der Aufbau der Automation Suite entspricht dem in Abbildung 27: An Messknoten 1 sind alle Sensoren angeschlossen. Messknoten 2 und 3 sind derzeit ungenutzt. Auf dem Messknoten wird mit den angeschlossenen Stromsensoren und die mit Hilfe der im Sync-Impuls übertragenen Spannung (siehe Kapitel 3.6) die Wirkleistung berechnet. Der Strom und die Wirkleistung werden dann jeweils an die Leistungsbestimmungs-Funktionsblöcke übertragen, in denen mithilfe der gemittelten Phasenspannung des Spannungsmessmoduls die Schein- und Blindleistung sowie  $\cos\_phi$  berechnet werden. Die Leistungsbestimmungen 1-3 berechnen die Werte für die 3 einphasigen Steckdosen und die Leistungsbestimmung 4-6 berechnen die 3 Phasen der dreiphasigen Steckdose. Deshalb werden die Leistungsbestimmungen 1-3 mit der Phase 1 des Spannungsmessmoduls und die Leistungsbestimmungen 4-6 mit allen 3 Phasen des Spannungsmessmoduls verbunden.

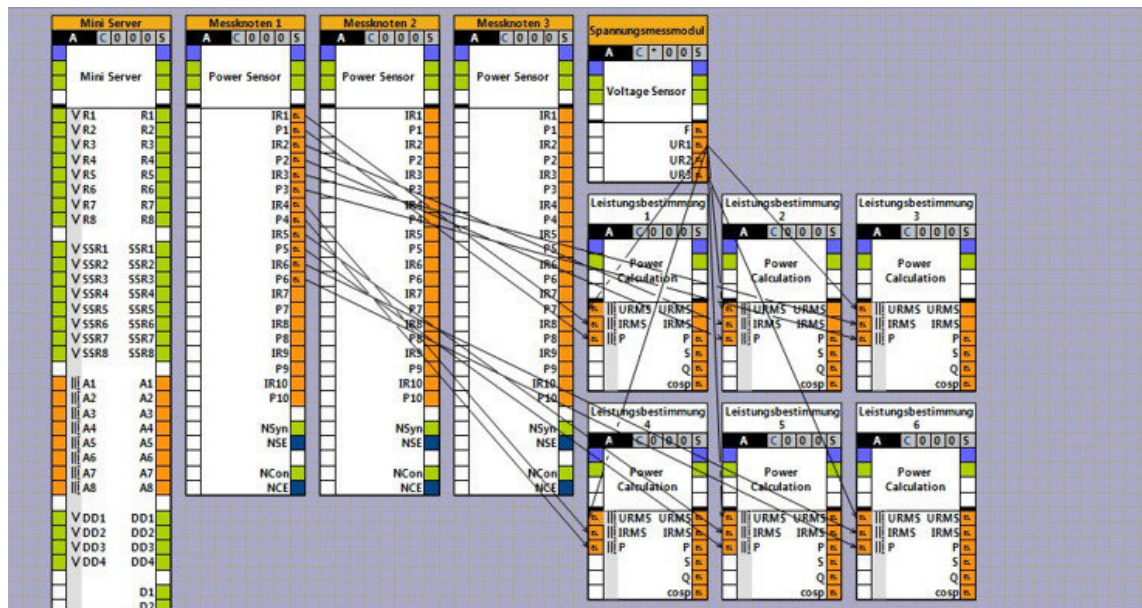


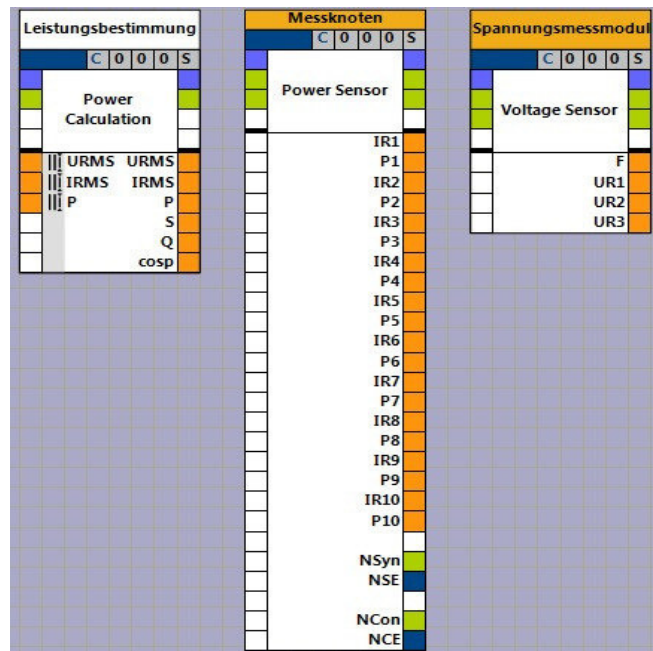
Abbildung 27 Aufbau Testaufbau aus Funktionsblöcken

### 3.10. Software „Automation Suite“

Im Folgenden wird die entwickelte Software anhand einer Basisinstallation vorgestellt.

Die Automation Suite ist eine Entwicklungsumgebung für Sensornetze in der Gebäudeautomation und dient bei unserem Energiemesssystem der Inbetriebnahme des Mini Servers und der angeschlossenen Module.

Die Grundversion wurde auf die Inbetriebnahme der von uns entwickelten Hardware angepasst. Dazu wurden spezielle Funktionsblöcke für die Messknoten, die Spannungsmessmodule und die endgültige Leistungsberechnung entwickelt (siehe Abbildung 28). Funktionsblöcke sind eine abstrakte Repräsentation der physisch mit dem System verbunden Hardware mit ihren individuellen Ein- und Ausgängen. Die Automation Suite“ ist ein Programm, das mehrere Tools in einer Oberfläche vereint. Diese Tools werden über eine Auswahl aufgerufen. Dabei gibt es optionale und essenzielle Funktionen, die über entsprechende Reiter und Schaltflächen ausgewählt werden können. Die Software setzt Windows 7, 8 oder 8.1 als Betriebssystem voraus. Mit dem Mini Server wird jeweils eine Lizenz zur Verfügung gestellt.



**Abbildung 28 Funktionsblöcke**

Benötigt werden ein PC, auf dem die Automation Suite installiert ist, ein Intel-NUC, ein Mini Server und ein Router als DNS-Server oder, wenn feste IP-Adressen im selben Bereich vergeben wurden, ein LAN-Switch. Standardmäßig hat der Mini Server eine IP von „172.16.17.xxx“. Diese wird benötigt um ihn über das „Embedded Tool“ (Teil der Automation Suite) konfigurieren zu können.

Die Konfiguration der Automation Suite erfolgt über die folgenden Schritte:

1. Konfiguration der IPs der angeschlossenen Mini Server

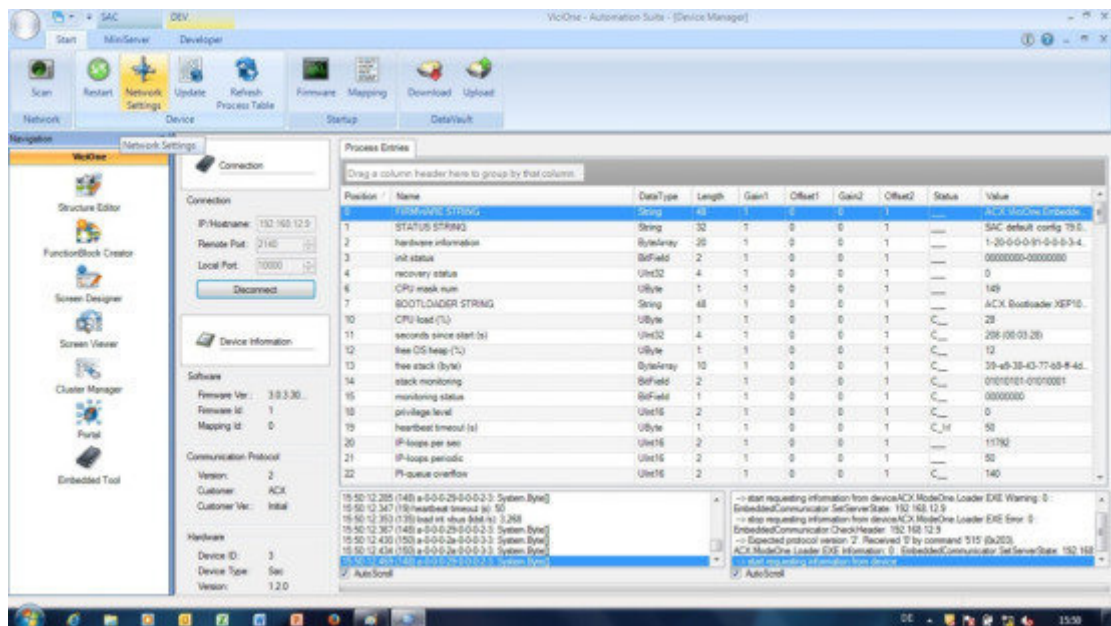


Abbildung 29 Konfiguration IPs

- Erstellen der Konfigurationsdatei über den „Structure Editor“: d.h. Konfiguration und Parametrisierung aller Hardwarekomponenten in Form von Funktionsblöcken (virtueller Bausteine).

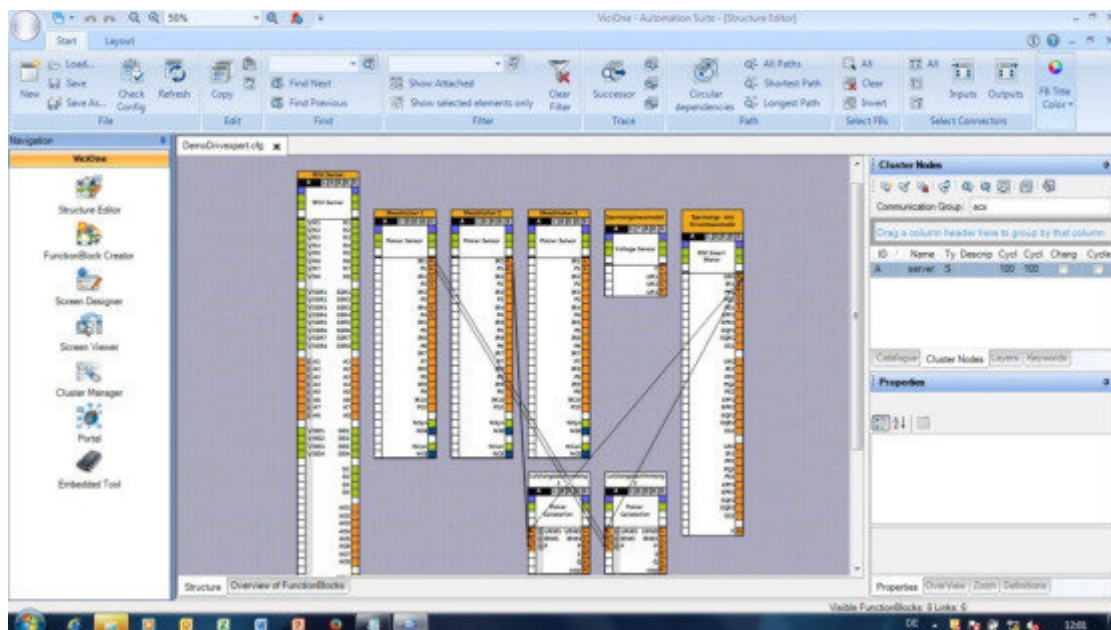


Abbildung 30 Konfiguration und Parametrisierung Funktionsblöcke (virtuelle Bausteine), unten Leistungsberechnung

- Übertragung der Konfiguration auf den Intel Nuc, damit die in der Konfiguration enthaltenen Arbeitsanweisungen ausgeführt werden können.



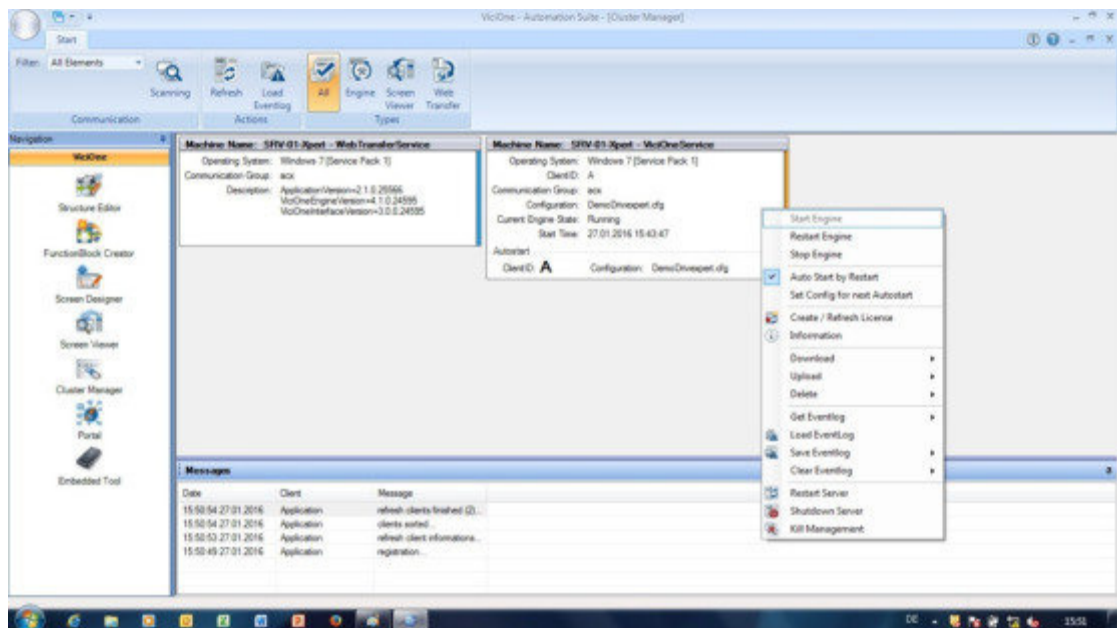


Abbildung 31 Übertragung der Konfiguration

#### 4. Anzeige der Messwerte.

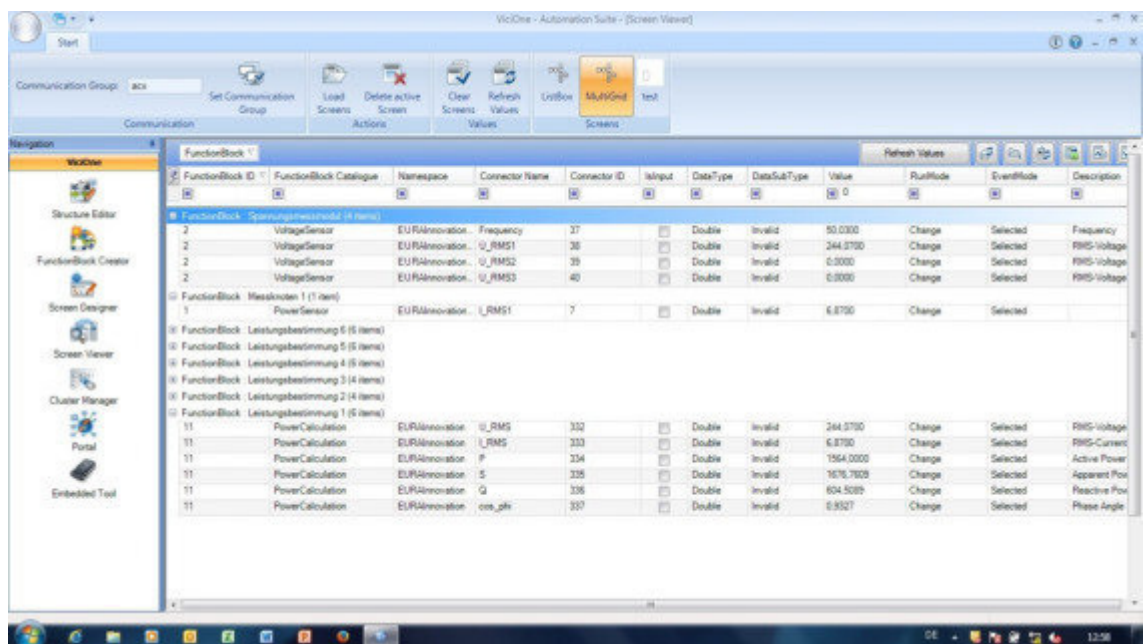


Abbildung 32 Darstellung der Messwerte

In Abbildung 32 sieht man eine einfache Anzeige der Messwerte. Im Abschnitt Spannungsmessmodul sieht man die Netzfrequenz von ca. 50Hz sowie die Netzspannung. Die angegebenen 244V resultieren aus der zu diesem Zeitpunkt noch nicht durchgeführten Kalibrierung (230V regulär). U\_RMS2 und U\_RMS3 sind 0, weil in dem Beispiel nur einphasig gemessen wurde. Im Abschnitt Messknoten sieht man den gemessenen Strom von 6,87A. Im letzten Abschnitt sieht man die Spannung und den Strom (Eingänge des Funktionsblocks) sowie die Wirkleistung (P), die Scheinleistung (S), die



In dezimale Form umgerechnet bekommt man den Wertes 232.15V. Daraus resultiert ein Fehler von 0,06%

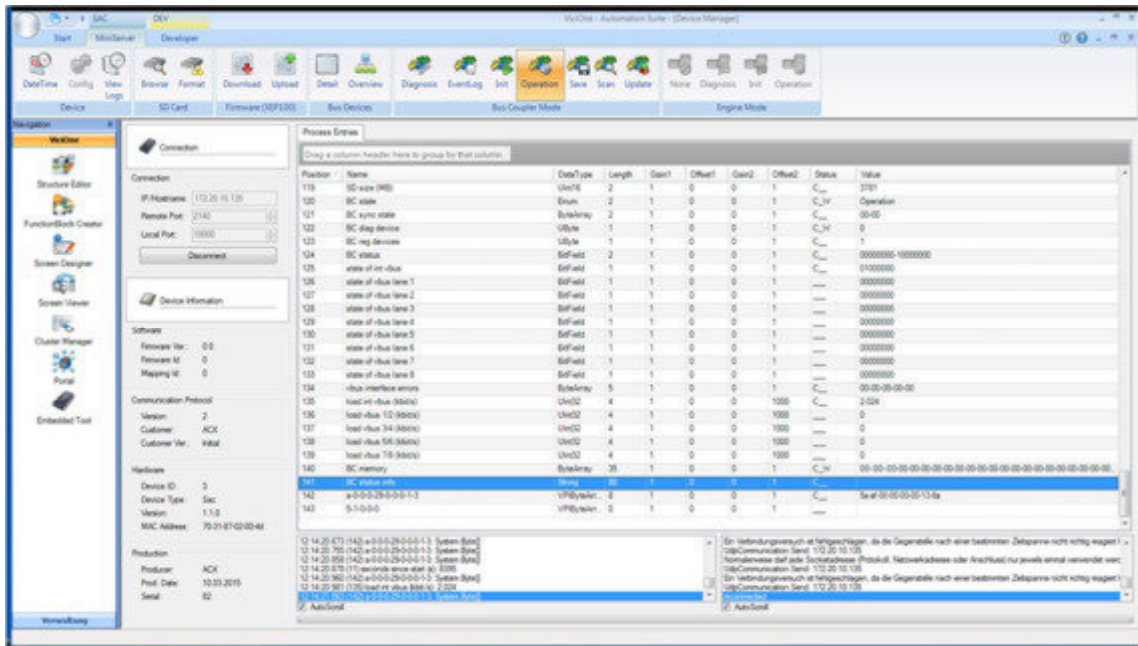
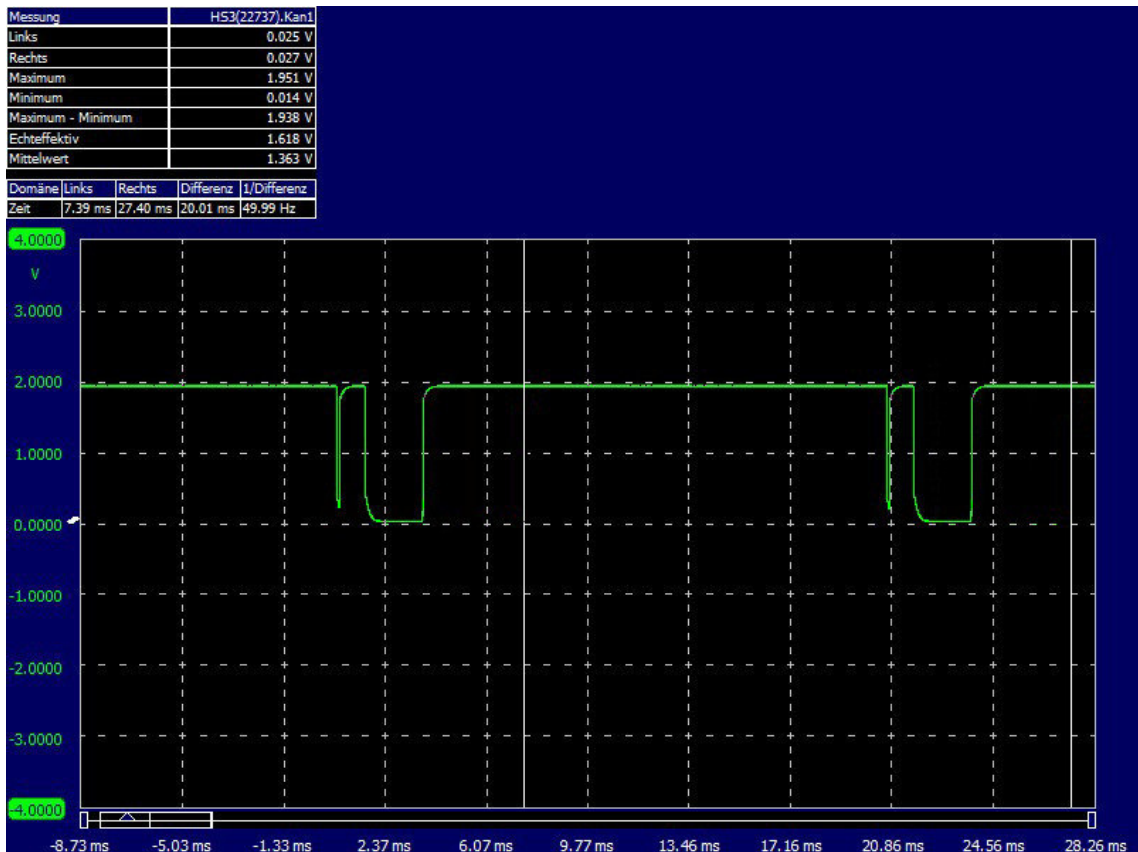


Abbildung 34 Screenshot Spannungsmessung

### 3.12.Sync-Impuls



### Abbildung 35: Nullaktives Sync Signal

Beim Blick auf die real an einen Oszi angeschlossene Syncimpulsleitung (siehe Abbildung 35) zeigt sich für eine Phase folgendes Bild: die sehr dünnen fallenden Abschnitte bei ca. 0ms und 20ms (=3 Phasen á 6,67ms) sind die Initialimpulse. Bei ca. 2ms und 22ms befindet sich der Nulldurchgang der Phase 1. Die Phase 1 ist dann ca. 2ms lang, was, wie in Kapitel Kommunikation und Synchronimpuls zu sehen ist, 230V entspricht. Da die zweite und dritte Phase nicht angeschlossen sind, gibt es auch keine weiteren Impulse. Das praktisch ermittelte Oszibild entspricht genau dem geplanten Synchronisierungsimpuls.

## 3.13. Leistungsmessung

Zum Testen der Leistungsmessung wurde das Leistungsmesssystem mit einem professionellen Leistungsmessgerät der Firma Zimmer<sup>1</sup> verglichen. Abnehmer war Heißluftpistole mit 2 einstellbaren Stufen, maximale Aufnahmeleistung von 2000 W.

**Tabelle 6 Messergebnisse Leistungsmessung**

|                 | LMG Zimmer Stufe 1 | LMG Zimmer Stufe 2 | Leistungsmesssystem Stufe 1 | Leistungsmesssystem Stufe 2 |
|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| I_RMS in A      | 4,2                | 8,5                | 4,3                         | 8,8                         |
| U_RMS in V      | 230,5              | 227,3              | 229,8                       | 226,5                       |
| P in W          | 968,1              | 1932,05            | 989,4                       | 1991,9                      |
| Abweichung in % |                    |                    | 2,2%                        | 3,1%                        |

In Tabelle 4 sieht man, dass die Sensoren im jetzt deutlich genauer arbeiten und mit 2,2% und 3,1% gegenüber dem Referenzgerät deutlich unterhalb des geplanten maximalen Fehlers von 5% liegen. Die gemessenen Werte machen deutlich, dass der Messfehler hauptsächlich von der Qualität der Stromsensoren abhängt.

## 3.14. Inbetriebnahmetool

Mit dem aktuell verwendeten Inbetriebnahmetool ist es möglich das Energiemesssystem anzulegen und zu parametrisieren. Während der Phase der Systeminbetriebnahme müssen alle notwendigen Geräteparameter in der Automation Suite hinterlegt werden, z.B.:

<sup>1</sup> <http://www.zes.com/de/Produkte/Praezisions-Leistungsmessgeraete/LMG500>



- Zuordnung der Messknoten und Spannungsmessmodule
- Zuordnung Stromsensor zu Spannungsphase und Parametrisierung (Sensortyp)
- positive Stromrichtung (anhand  $\cos_{\phi}$ )

Alle Funktionen sind grundsätzlich möglich, durch die Programmierung entsprechender Blöcke ist es nun möglich leicht über die AS viele Module in Betrieb zu nehmen ohne die Übersicht zu verlieren.

### 3.15. Bereitstellung und Visualisierung der Meßergebnisse

Die Bereitstellung der Ergebnisse der Messung erfolgt in einer SQL Datenbank. Ein exemplarisches Logfile sehen sie in der folgenden Abbildung.

Testlogging.nantiscom.VFSyncLogger3P.VFSyncLogger3P.F\_OUT: 552 Zeilen gesamt ▶ Näch

| EntryId | TimeStamp               | Cycle  | CycleLogging | ChangeLogging | Value |
|---------|-------------------------|--------|--------------|---------------|-------|
| 1       | 2017-09-15 15:55:50.023 | 600    | 0            | 1             | 49,9  |
| 2       | 2017-09-15 15:57:37.100 | 600    | 0            | 1             | 49,9  |
| 3       | 2017-09-15 15:58:37.100 | 1.200  | 0            | 1             | 50    |
| 4       | 2017-09-15 15:59:37.100 | 1.800  | 0            | 1             | 50    |
| 5       | 2017-09-15 16:00:37.103 | 2.400  | 0            | 1             | 50,01 |
| 6       | 2017-09-15 16:01:37.100 | 3.000  | 0            | 1             | 50,01 |
| 7       | 2017-09-15 16:02:37.100 | 3.600  | 0            | 1             | 50    |
| 8       | 2017-09-15 16:03:37.100 | 4.200  | 0            | 1             | 49,99 |
| 9       | 2017-09-15 16:04:37.100 | 4.800  | 0            | 1             | 49,99 |
| 10      | 2017-09-15 16:05:37.100 | 5.400  | 0            | 1             | 49,97 |
| 11      | 2017-09-15 16:06:37.100 | 6.000  | 0            | 1             | 49,96 |
| 12      | 2017-09-15 16:07:37.103 | 6.600  | 0            | 1             | 49,96 |
| 13      | 2017-09-15 16:08:37.100 | 7.200  | 0            | 1             | 49,98 |
| 14      | 2017-09-15 16:09:37.103 | 7.800  | 0            | 1             | 49,98 |
| 15      | 2017-09-15 16:10:37.100 | 8.400  | 0            | 1             | 49,98 |
| 16      | 2017-09-15 16:11:37.100 | 9.000  | 0            | 1             | 49,99 |
| 17      | 2017-09-15 16:12:37.100 | 9.600  | 0            | 1             | 49,99 |
| 18      | 2017-09-15 16:13:37.100 | 10.200 | 0            | 1             | 49,98 |
| 19      | 2017-09-15 16:14:37.103 | 10.800 | 0            | 1             | 49,99 |
| 20      | 2017-09-15 16:15:37.100 | 11.400 | 0            | 1             | 50    |
| 21      | 2017-09-15 16:16:37.103 | 12.000 | 0            | 1             | 49,99 |
| 22      | 2017-09-15 16:17:37.100 | 12.600 | 0            | 1             | 49,98 |
| 23      | 2017-09-15 16:18:37.100 | 13.200 | 0            | 1             | 49,98 |
| 24      | 2017-09-15 16:19:37.100 | 13.800 | 0            | 1             | 49,99 |
| 25      | 2017-09-15 16:20:37.100 | 14.400 | 0            | 1             | 49,99 |
| 26      | 2017-09-15 16:21:37.103 | 15.000 | 0            | 1             | 50    |
| 27      | 2017-09-15 16:22:37.100 | 15.600 | 0            | 1             | 50    |
| 28      | 2017-09-15 16:23:37.103 | 16.200 | 0            | 1             | 50    |
| 29      | 2017-09-15 16:24:37.100 | 16.800 | 0            | 1             | 50    |



```
dbo.nantiscom.VFSyncLogger3P.VFSyncLogger3P.F_OUT
dbo.nantiscom.VFSyncLogger3P.VFSyncLogger3P.U_RMS1_OUT
dbo.nantiscom.VFSyncLogger3P.VFSyncLogger3P.U_RMS2_OUT
dbo.nantiscom.VFSyncLogger3P.VFSyncLogger3P.U_RMS3P_OUT
dbo.nantiscom.VFSyncLogger3P.VFSyncLogger3P.U_RMS3_OUT
```

Abbildung 36 - Auszug Daten und Log File SQL Datenbank

Für die Kunden, die Energiemanagementsysteme anbieten, ist das die ideale Schnittstelle, weil hier alle Informationen für die Auswertung verfügbar sind.

Die EurA / Ampect möchte das System aber auch komplett nutzbar anbieten. Deshalb haben wir das Tool MS Power BI eingeführt, mit dem sehr gut die großen Datenmengen ausgewertet und dargestellt werden können. Folgende Ergebnisse wurden erreicht.

- Erstellung von Datenbankabfragen für die grafische Auswertung
- Darstellung von mehreren Leistungsmesspunkten im selben Diagramm trotz unterschiedlichem Zeitstempel der Messpunkte
- Erstellung der Kardinalitäten und Relationen für die Datenpunkte
- Darstellung von Energie und Leistung als unterschiedliche physikalische Größen in einem Diagramm
- Konvertierung von Datentypen, Bereinigen von Tabellen Zeitfiltern

Das Tool ist Web basiert und gestattet die Darstellung von festen und dynamischen Daten. Abbildung 20 zeigt einen Bildschirmausdruck für 4 ausgewählte Messpunkte.

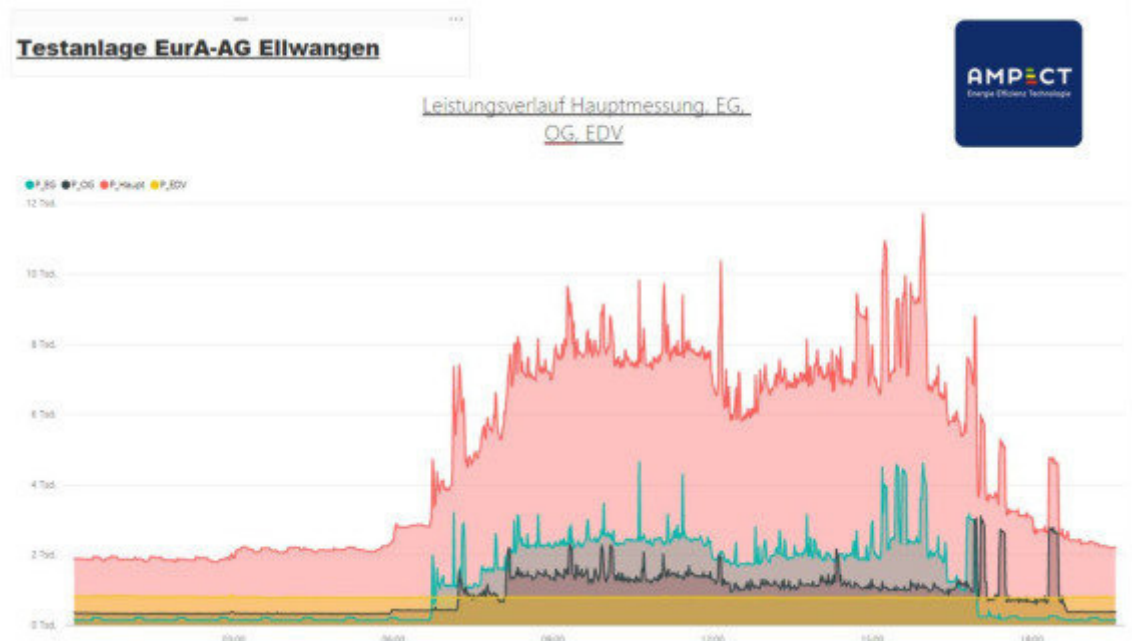


Abbildung 37 Darstellung der Messergebnisse

### 3.16.Ökonomische Bewertung der Projektergebnisse

Parallel zur Entwicklung wurde eine Kalkulation des Messsystems unter Berücksichtigung der verschiedenen Anwendungs-und Einsatzkonstellationen vorgenommen. Im Ergebnis konnte der angestrebte Verkaufspreis von ca. 56,-€ je dreiphasiger Messstelle ab einer Losgröße von je 1.000 Sensoren bestätigt werden. Tabelle 3 zeigt einen Auszug aus der Kalkulation mit Verkaufspreisen abhängig von der produzierten Stückzahl.

**Tabelle 7 Auszug aus den Ergebnissen der Kalkulation**

| <b>Sensorik Materialkosten</b> |         |         |         |         |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Losgröße                       | CT-10   | CT-16   | CT-24   | CT-36   |
| 1                              | 14,10 € | 14,10 € | 18,80 € | 24,80 € |
| 100                            | 8,15 €  | 9,25 €  | 13,10 € | 15,85 € |
| 1000                           | 6,30 €  | 7,65 €  | 11,85 € | 14,55 € |

| <b>Sensorik Gesamtkosten bei Fertigung mit Hilfswerkzeugen</b> |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Losgröße   | CT-10   | CT-16   | CT-24   | CT-36   |
| 1  | 19,10 € | 19,10 € | 23,80 € | 29,80 € |
| 100  | 14,25 € | 14,25 € | 18,10 € | 20,85 € |
| 1000   | 12,55 € | 12,65 € | 16,85 € | 19,55 € |

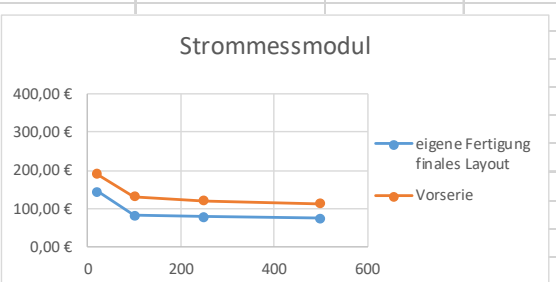
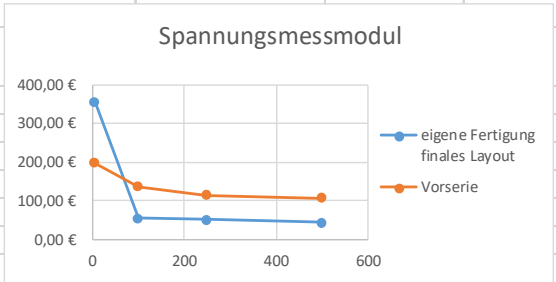
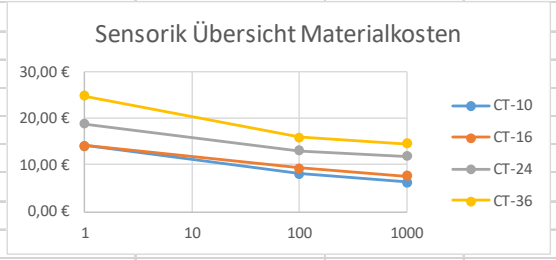
| <b>Spannungsmessmodul - PM 10</b> |                                    |          |
|-----------------------------------|------------------------------------|----------|
| Losgröße                          | eigene Fertigung<br>finales Layout | Vorserie |
| 5                                 | 355,17 €                           | 198,00 € |
| 100                               | 54,46 €                            | 136,00 € |
| 250                               | 50,16 €                            | 115,00 € |
| 500                               | 43,81 €                            | 107,00 € |

| <b>Strommessmodul - VM 01</b> |                                    |          |
|-------------------------------|------------------------------------|----------|
| Losgröße                      | eigene Fertigung<br>finales Layout | Vorserie |
| 20                            | 143,91 €                           | 190,00 € |
| 100                           | 82,67 €                            | 132,00 € |
| 250                           | 78,67 €                            | 120,00 € |
| 500                           | 74,65 €                            | 113,00 € |

| <b>Cluster Server 01 - CS 1</b> |                |
|---------------------------------|----------------|
| Losgröße                        | Bestellung ACX |
| 20                              | 680,00 €       |
| 100                             | 646,00 €       |
| 250                             | 613,70 €       |
| 500                             | 583,02 €       |



Die nachfolgende 4 Tabellen zeigt den Systempreis beim Einbau von 30 Messpunkten mit gemischten Sensoren bis 96A von ca. 82€. Bei Verwendung der kleinen Sensoren für 30 Messpunkte bis 12A kann ein Verkaufspreis von 65€ je Messpunkt realisiert werden. Steigen die Messpunkte im Unternehmen im Unternehmen z.B. auf 300 Stück an, reduzieren sich die Systemkosten pro Messpunkt bis ca. 52€ auch bei der Verwendung von Sensoren bis 96A. Die Kosten für die großen Sensoren und Rogowski Spulen bis

400A und 1000A ist möglich. Die Sensoren sind je Phase mit 23€ je Sensor etwas höher. Da so hohe Ströme auch in großen Unternehmen nicht so häufig gemessen werden, ist der Einfluss auf den Systempreis nicht so hoch.

In dem Verkaufspreis sind die Kosten für die Systemsoftware enthalten, mit der die Daten auf eine interne Datenbank geschrieben werden können. Möchte der Kunde von EurA / Ampect die Visualisierung nutzen, muss er eine Lizenzgebühr und die Anpassung der Darstellung auf seine Anlage bezahlen. Die monatlichen Lizenz Kosten belaufen sich um die 50€ je System.

**Tabelle 8 - Systempreise**

| Systemkosten Bsp. 30 Meßpunkte           |          |              |             |
|--|----------|--------------|-------------|
| gemischte Sensoren                       |          |              |             |
| Bezeichnung                              | VK       | Stück        | Gesamt      |
| CT 10                                    | 11,06 €  | 30           | 331,70 €    |
| CT 20                                    | 16,45 €  | 30           | 493,35 €    |
| CT 24                                    | 21,91 €  | 30           | 657,15 €    |
| PM 10                                    | 56,95 €  | 3            | 170,86 €    |
| VM 01                                    | 97,05 €  | 1            | 97,05 €     |
| CS 01                                    | 699,62 € | 1            | 699,62 €    |
|  |          | Gesamt:      | 2.449,72 €  |
|  |          | Preis je MP: | 81,66 €     |
| Systemkosten Bsp. 30 Meßpunkte gemischt  |          |              |             |
| nur kleine Sensoren                      |          |              |             |
| Bezeichnung                              | VK       | Stück        | Gesamt      |
| CT 10                                    | 11,06 €  | 90           | 995,09 €    |
| CT 20                                    | 16,45 €  | 0            | 0,00 €      |
| CT 24                                    | 21,91 €  | 0            | 0,00 €      |
| PM 10                                    | 56,95 €  | 3            | 170,86 €    |
| VM 01                                    | 97,05 €  | 1            | 97,05 €     |
| CS 01                                    | 699,62 € | 1            | 699,62 €    |
|  |          | Gesamt:      | 1.962,61 €  |
|  |          | Preis je MP: | 65,42 €     |
| Systemkosten Bsp. 300 Meßpunkte gemischt |          |              |             |
| nur kleine Sensoren                      |          |              |             |
| Bezeichnung                              | VK       | Stück        | Gesamt      |
| CT 10                                    | 11,06 €  | 300          | 3.316,95 €  |
| CT 20                                    | 16,45 €  | 300          | 4.933,50 €  |
| CT 24                                    | 21,91 €  | 300          | 6.571,50 €  |
| PM 10                                    | 56,95 €  | 3            | 170,86 €    |
| VM 01                                    | 97,05 €  | 1            | 97,05 €     |
| CS 01                                    | 699,62 € | 1            | 699,62 €    |
|  |          | Gesamt:      | 15.789,47 € |
|  |          | Preis je MP: | 52,63 €     |

## 4. Fazit

Zum Abschluss des Projektes sind alle Hardwarekomponenten prototypisch vorhanden und getestet. Eine Kleinserie zur Umsetzung von 5 Anlagen wird im Moment vorbereitet und beauftragt. Von 3 Unternehmen haben wir die Zustimmung für die Installation im Unternehmen.

Das Ziel der Entwicklung eines kostengünstigen Energie- und Leistungsmesssystems wurde erreicht. Abhängig von der Anzahl der Sensoren und dem Typ kann ein Preis von ca. 50€ bis 90€ je dreiphasiger Messstelle angeboten werden.

Die EurA AG hat eine GmbH gegründet mit dem Namen Ampect GmbH. Das Ziel der Ampect GmbH ist die Weiterentwicklung, die Produktion, die Beratung und der Verkauf des Energie- und Leistungsmesssystems und die Beratung zu Fragen des Energiemanagements.

Durch die Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt konnte die EurA Innovation GmbH eine Produktidee mit einer Patentanmeldung zu einem funktionierenden Produkt entwickeln.

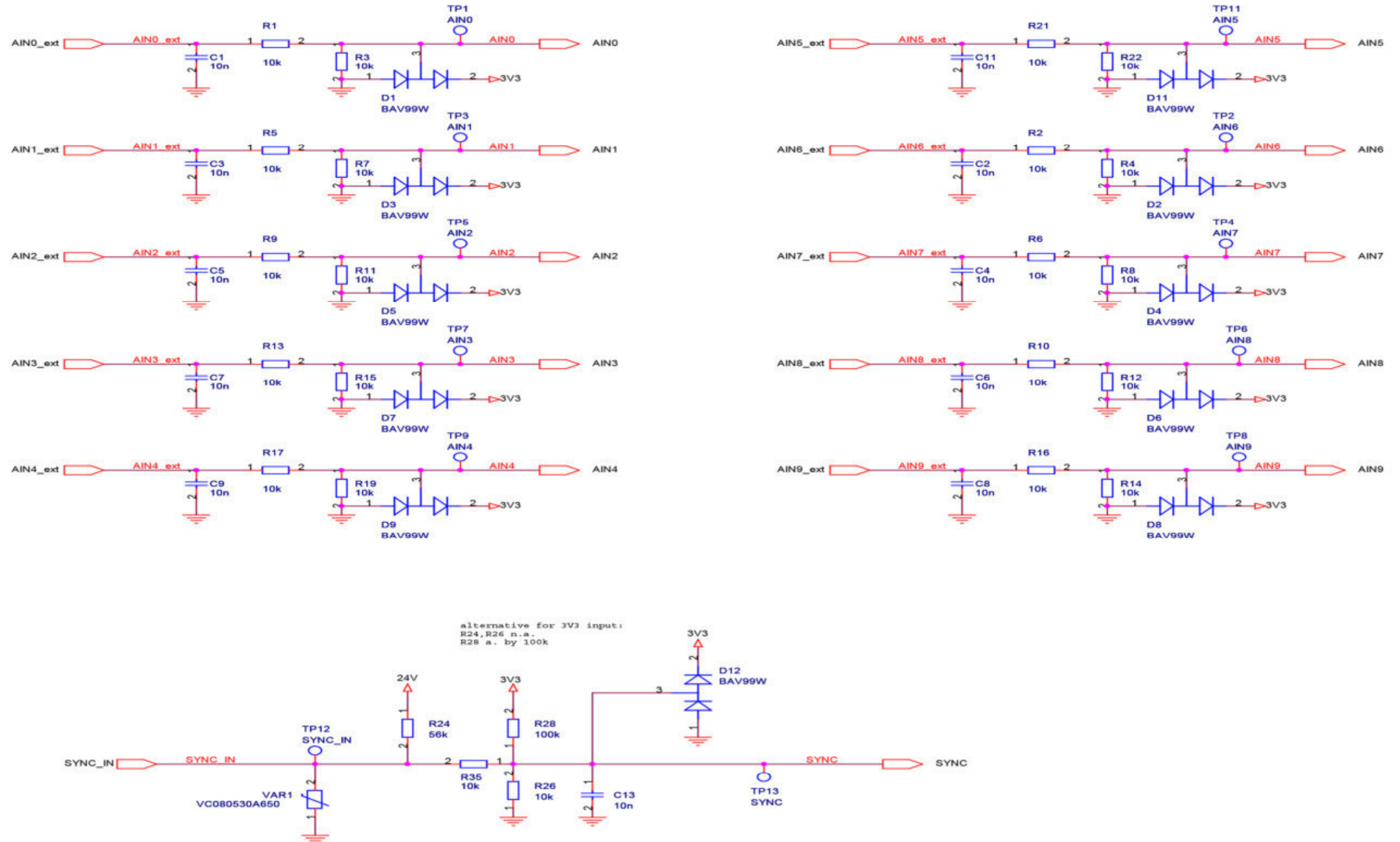
Mit dem System können Ströme bis 400A (Stromsensoren) und bis 1500 A (Rogowski spulen) gemessen werden. Wir gehen davon aus, dass dadurch 90% aller Verbraucher in Industrieunternehmen gemessen werden können.

Die beantragte Nachbewilligungszeit diente der Vorbereitung und Durchführung der Feldtests, den damit verbundenen Änderungen an Hard- und Software und der Zertifizierung des Systems.

Die Ziele des Feldtests wurden erreicht:

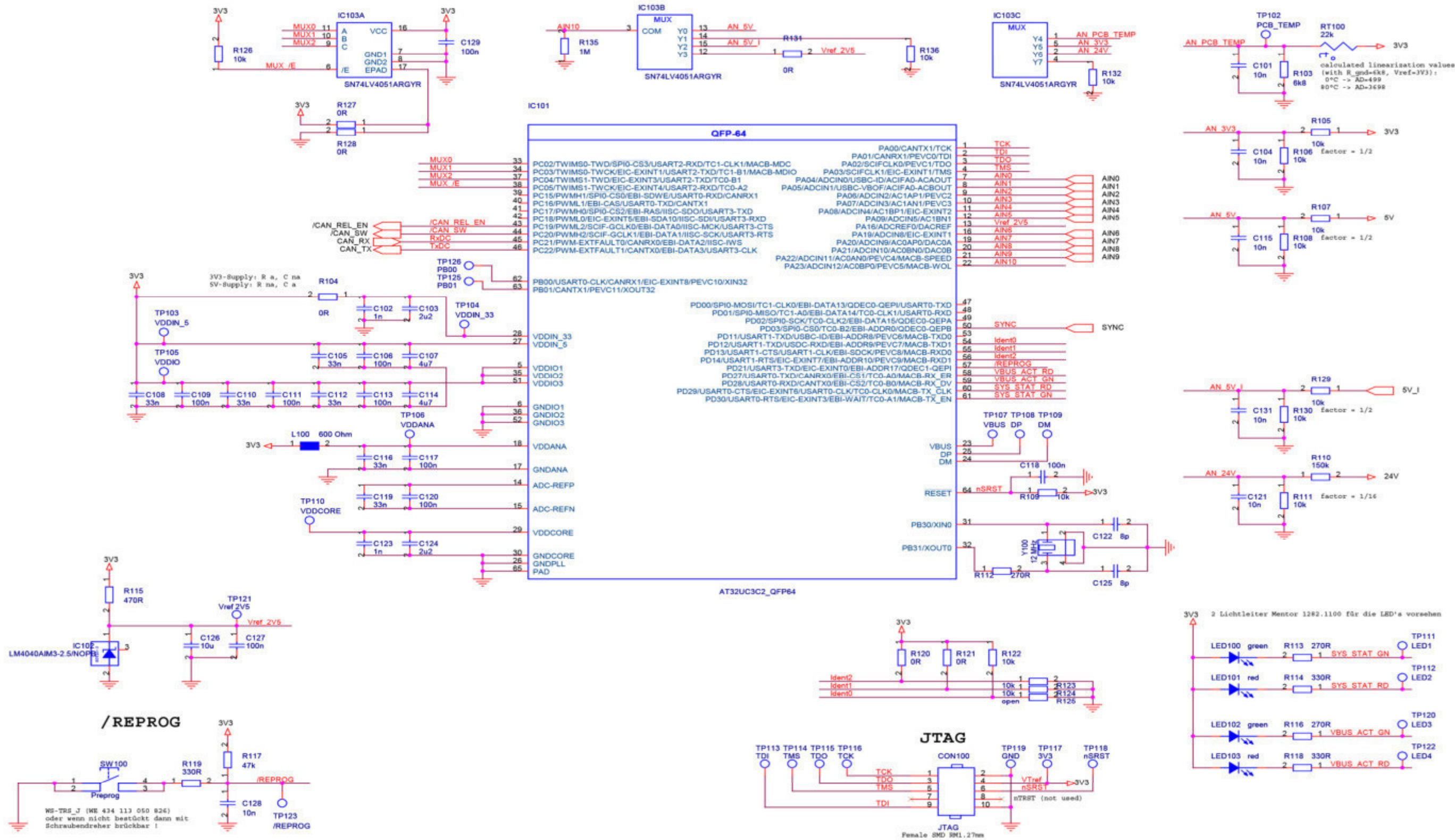
- Test und Optimierung des Inbetriebnahmetools
- Überprüfung der gewünschten Installationsflexibilität unter Realbedingungen
- Test Datenübertragung in stark elektromagnetisch belasteter Umgebung
- Test des Sensorhandlings und der Messqualität vor Ort
- Ableitbarkeit und Aussagekraft der erzielten Messergebnisse
- Test von min. 100 Messpunkten in einem System zum Performance Test – der Aufbau erfolgt 2 stufig im Bürogebäude der EurA AG, die erste Phase ist erfolgreich abgeschlossen, die zweite Phase mit Fertigstellung des Neubaus im Dezember 2017 umgesetzt .

# Anhang 1 Schaltplan Strommessmodul 1

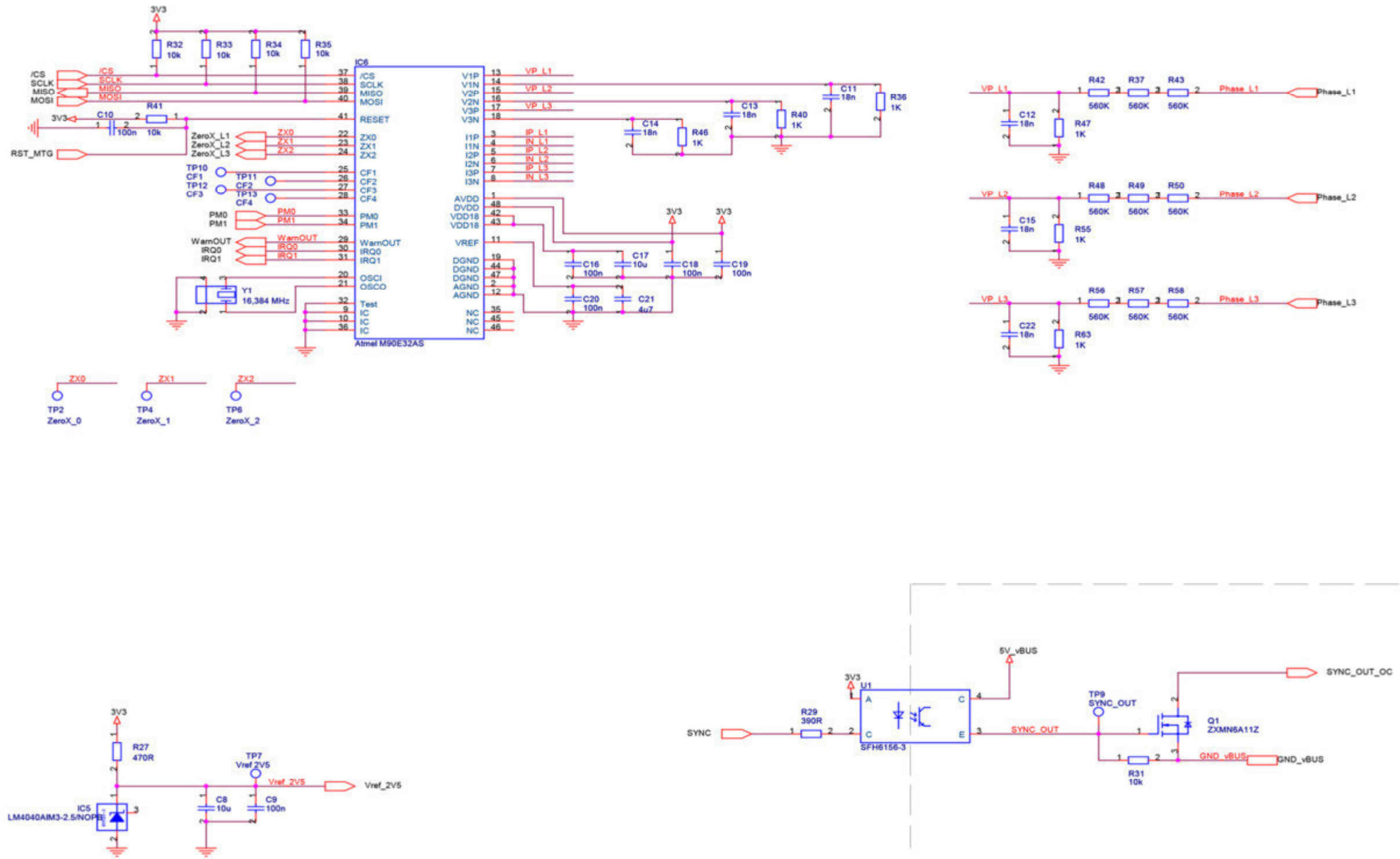




# Anhang 2 Schaltplan Strommessmodul 2

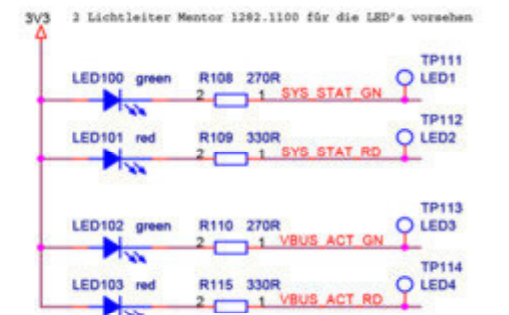
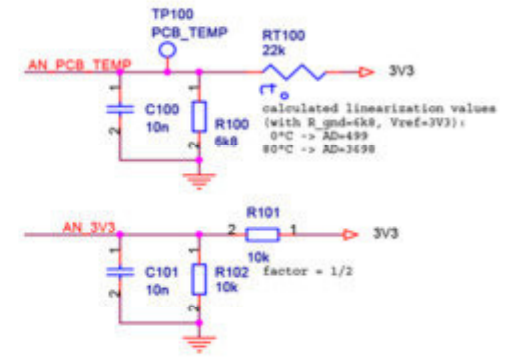
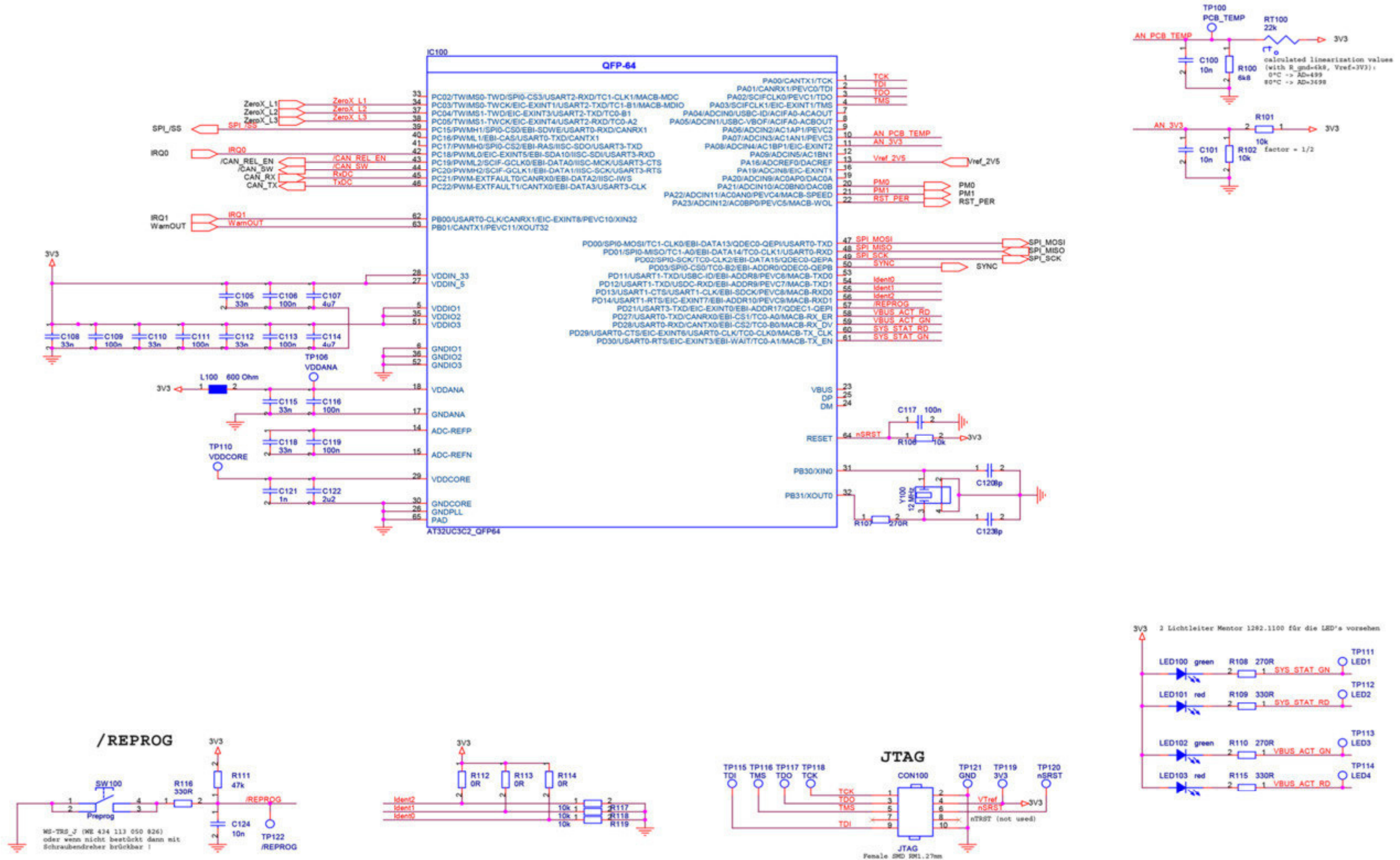


## Anhang 3 Schaltung Spannungsmessmodul 1

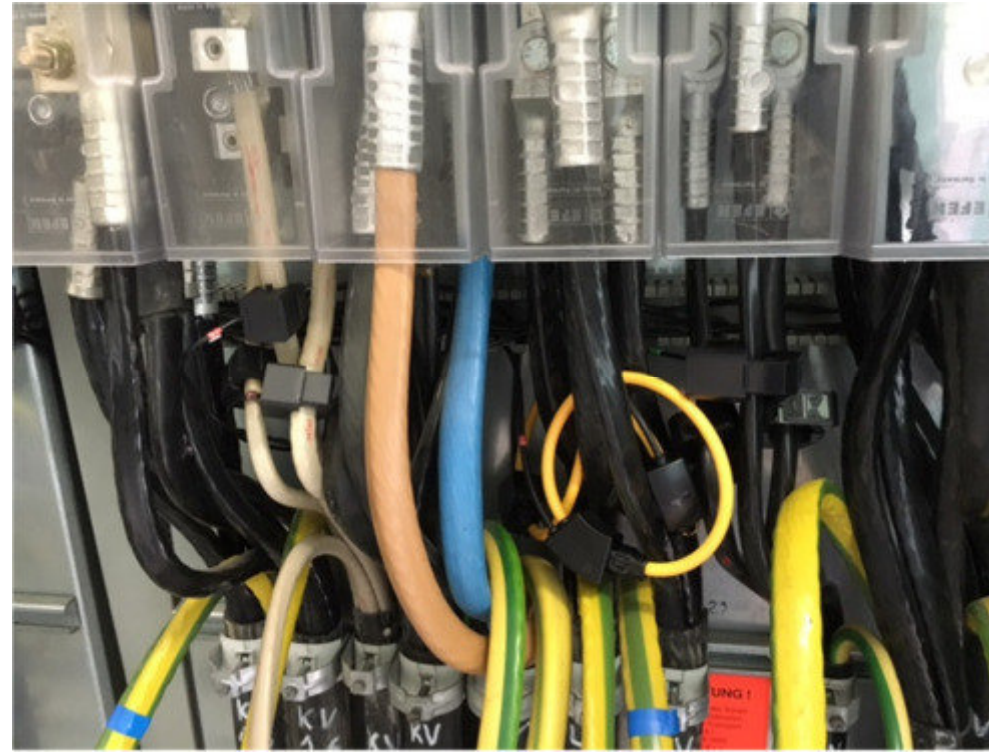
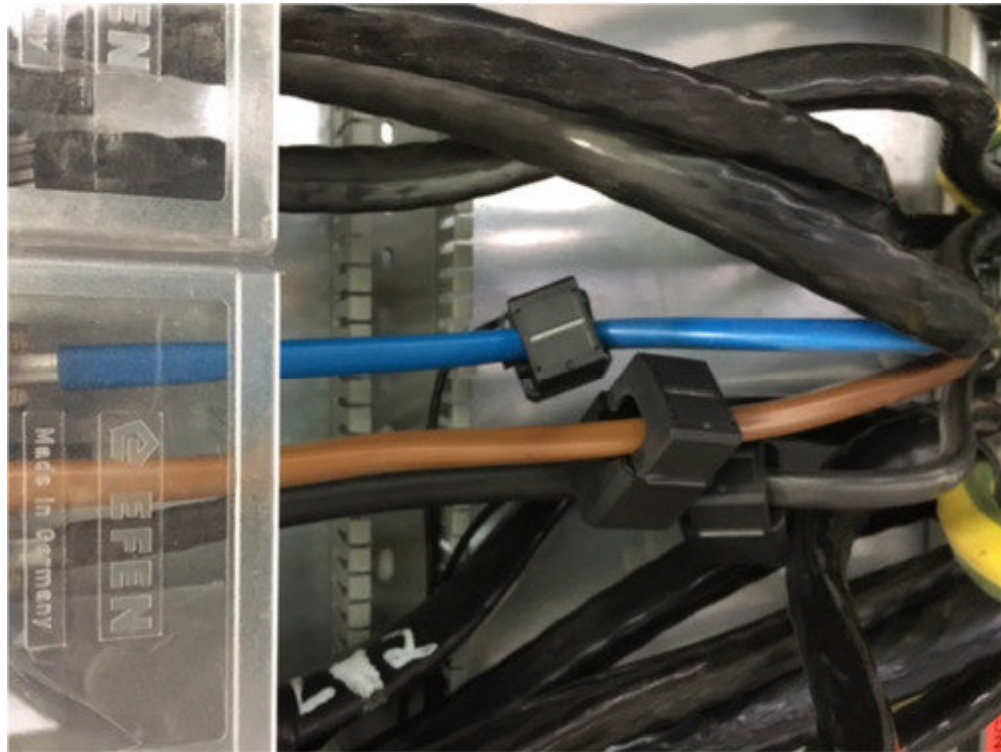




# Anhang 4 Schaltung Spannungsmessmodul 2



## Anhang 5 Installation Böhm Fertigungstechnik





## Anhang 6 Installation EurA AG Ellwangen

