

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering (M. Eng.)

Johannes Müller

Name

MET2020, 5018187

Studiengang, Matrikelnummer

Thema:

**Energiemonitoring zur Prozessanalyse
in industriellen Anlagen am Beispiel
von Kernschießmaschinen**

Prof. Dr. Ingo Chmielewski

1. Prüfer(in)

Prof. Dr. Stefan Twieg

2. Prüfer(in)

07.12.2022

Abgabe am

Abstract

Die Lebensdauer einer industriellen Maschine hängt stark von der Qualität der Instandhaltung ab. Sogar schon bei der Qualitätskontrolle ab Werk ist es enorm wichtig, kleine Defekte zu erkennen und zu beseitigen. In Kooperation mit der *Laempe Mössner Sinto GmbH* (LMS) wird mit dieser Arbeit ein Energie-Monitoring-System entwickelt, welches Einblicke in die Effizienz und Zuverlässigkeit der im Unternehmen hergestellten Kernschießmaschinen gibt. Es hilft somit, die Qualität der ausgelieferten Anlagen und deren Instandhaltung zu verbessern und die Lebensdauer der Maschinen zu verlängern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Problemstellung	6
2.1	Bestandteile und Inhalt	6
2.2	Relation zu bestehenden Systemen	7
3	Grundlagen	8
3.1	Kernschießmaschinen	8
3.2	Topologie von industriellen Anlagen	9
3.3	Industrielle Steuerungen	10
3.4	Feldbusverteiler	10
3.5	Feldbussysteme	10
3.6	Strommessung	11
4	Lösungsansatz	12
4.1	Erfassung der Messwerte	12
4.2	Übertragung der Messwerte	13
4.3	Datenverarbeitung	14
4.4	Datenspeicherung	15
4.5	Visualisierung	15
5	Implementierung	16
5.1	Wahl des 480V-Sensorsystems	16
5.2	Wahl des 24V-Sensorsystems	18
5.3	Verarbeitungssoftware	20
6	Praktische Versuche	25
6.1	Siemens Anlage LFB65	25
6.2	Allen-Bradley Anlage LL20	28
6.3	Vergleich der Versuche	29
7	Ergebnisse	30
8	Fazit	33
	Anhang	35
I	IFM Sicherungen im Schaltschrank der LFB Anlage	35
II	Änderungen an der LFB65 Anlage	35
III	Datenerfassung an der LFB Anlage	41
IV	PLC Programm der ET200SP in den Versuchen 1 und 2	41
V	PLC Datenbaustein der LFB65 Kernschießmaschine	46
VI	Messergebnisse eines Anlagenzklus an der LFB65	48
VII	PLC Tags der LL20 Kernschießmaschine	49
VIII	DF2101 Datenblatt	50

Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht	6
2	Prozessroutine des Kernschießens	8
3	Bestandteile des Projekts	12
4	Programmablaufplan des PLC-Connectors	21
5	Siemens Versuch	26
6	AB Versuch	29
7	Leistungsaufnahme der LFB65	30
8	24V Gesamtstrom an der LFB65	31

Tabellenverzeichnis

1	Anbieter von Energieerfassungssystemen	17
2	Anbieter von 24V Strommesssystemen	19
3	Datenstruktur der AI-Energy-Meter-Karte	28
4	Struktur des Datenbausteins DB3 im LFB Versuch	47
5	Ausgelesene PLC-Tags im LL20 Versuch	50

Abkürzungsverzeichnis

SPS Steuerung einer industriellen Anlage

CPU alternativer Name der Steuerung einer industriellen Anlage

SCADA Kontrolle, Überwachung und Steuerung von industriellen Anlagen

Box-PC Computer, welcher in industriellen Anlagen verbaut wird

CT Stromwandler

TCP/IP Menge aller Protokolle bis zur Transportschicht des OSI-Referenzmodells

LMS Die Firma *Laempe Mössner Sinto GmbH*

LDC Das Produkt *Laempe Digital Cockpit*

DIY selbstgebaut; im Gegensatz zu: industriell hergestellt

BE big-endian; Binärzahl, bei der die höchstwertigen Bits zuerst kommen

ADC Analog-Digital-Umsetzer

HMI Human-Machine-Interface; Bedienoberfläche für eingewiesene Personen

I/O Input/Output

AC Alternating Current; Wechselstrom

DC Direct Current; Gleichstrom

1 Einleitung

Mit dieser Arbeit werden diverse Konzepte zur Überwachung maschineller Anlagen erforscht. Dabei soll ein autonomes Meldesystem aufgebaut werden, welches auf schleichende Probleme aufmerksam machen kann bzw. zur Verbesserung des Betriebsablaufes beiträgt. Es sollen im Speziellen die Versorgungsschnittstellen der Anlage instrumentiert werden, da dort am einfachsten ein Messwert mit einem Erwartungswert verglichen werden kann. Zudem ist die Versorgung der Anlage eine der größten Kostenfaktoren im Betrieb und somit auch der ideale Ansatzpunkt für Verbesserungen.

Die LMS hat es sich als führender Anbieter von Kernschießmaschinen zur Aufgabe gemacht, die Effizienz ihrer Maschinen kontinuierlich zu verbessern.[7] Mit steigenden Energiekosten wird es auch immer bedeutender, wie sich der Energieverbrauch ihrer Produkte über ihre gesamte Lebenszeit überwachen lässt. Die Verbrauchsüberwachung kann auch dazu beitragen, die Lebensdauer der Maschinen zu verlängern, da sie auf mögliche Probleme aufmerksam machen kann. Die Firma LMS hat sich daher entschlossen, den Funktionsumfang ihrer Produkte durch die Entwicklung eines Monitoring-Systems um diese Fähigkeiten zu erweitern.¹ Dieses soll die Energieeffizienz der Kernschießmaschinen beim Kunden messen und analysieren. Die Ergebnisse sollen dabei so aufbereitet werden, dass sie für den Endnutzer einfach zu verstehen sind. Zudem können sie zur Wahl besserer Komponenten für neue Anlagenrevisionen beitragen.

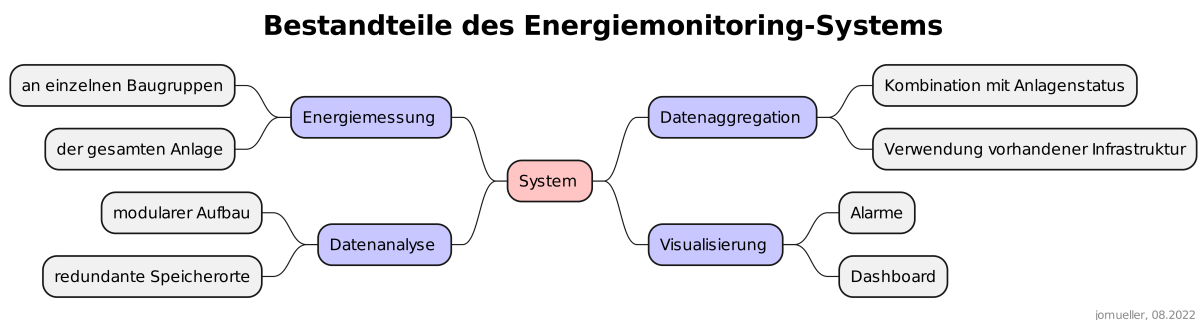
Ein zweiter Nutzen ist die genauere Erfassung von Fehlerzuständen. Die Kernschießmaschinen sind sehr komplex und bestehen aus vielen verschiedenen Baugruppen. Die LMS nutzt bereits Fehleranalysetools der Steuerungen, um Probleme mit den Anlagen zu identifizieren und zu beheben. Das Monitoring-System soll diesen Prozess so unterstützen, dass eine vorzeitige Erkennung und Meldungen von elektrischen Problemen bei der Qualitätskontrolle möglich ist und auch die Ursache für die Probleme besser ermittelt werden kann. Dieses Monitoring-System soll dabei helfen, die Anlagen in einem Zustand zu halten, in dem sie effizient arbeiten können und auch die Wartungskosten pro hergestelltem Kern möglichst gering bleiben.

¹Es ist bereits eine Speziallösung für Anlagen mit Siemenssteuerung von einem anderen Mitarbeiter entwickelt worden, deren Messwerte auf dem dazugehörigen Siemens HMI angezeigt werden konnten. Dieses bestehende System wurde nicht als Vorarbeit für diese Arbeit herangezogen, da dort keine Interoperabilität zwischen verschiedenen Steuerungstypen gegeben ist.

2 Problemstellung

2.1 Bestandteile und Inhalt

Um ein Überwachungssystem aufzubauen, müssen Messwerte erhoben, analysiert und schließlich gespeichert werden. Der Fokus der Überwachung liegt vorerst auf der elektrischen Versorgung, aber es soll eine Möglichkeit geben, den Aufbau in Zukunft mit der Instrumentierung anderer Ressourcen zu erweitern. Es sind daher zuerst geeignete Sensoren zu suchen, dann diese mittels praktischer Versuche an Kernschießmaschinen auszutesten und schließlich an ein modulares System zur Datenübermittlung, -verarbeitung und -speicherung anzuknüpfen. Die Wahl der Sensoren beginnt im Kapitel 4, die Erschaffung des modularen Verarbeitungssystems folgt in Kapitel 5 und die praktischen Versuche sind im Kapitel 6 dokumentiert. Die Ergebnisse werden zum Abschluss im Kapitel 7 zusammengefasst.



jomuellert, 08.2022

Abbildung 1: Übersicht

In Abbildung 1 sind die vier elementaren Bestandteile des Systems hervorgehoben. Zuerst ist die Energiemessung zu betrachten. Bei ihr entstehen Messwerte des aktuellen elektrischen Verbrauchs und somit viele separate Datenpunkte, die einzeln betrachtet keine große Aussagekraft besitzen. Der folgende Schritt der Datenverarbeitung kombiniert die eingehenden Datenströme und extrahiert für den Endnutzer relevante Informationen. Für die Übertragung der Messwerte von den Sensoren zur datenverarbeitenden Einheit werden Kommunikationsbusse eingesetzt, welche bereits in den Kernschießmaschinen verwendet werden. Es soll nach Möglichkeit kein weiterer Feldbus einer anderen Technologie hinzugefügt werden, um die Kosten für die Integration möglichst gering zu halten. Einige der einzubauenden Sensoren können beispielsweise mit einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung an einem IO-Link-Master angeschlossen werden, welcher wiederum über einen Feldbus zur zentralen Steuerung der Anlage kommuniziert. Diese Steuerungen wird dann wiederum über ein auf Ethernet basierendem Kommunikationsprotokoll mit der Datenverarbeitungseinheit kommunizieren.

Die Aggregation der Messwerte soll unabhängig von Modell und Auslegung der Anlage möglich sein. Es werden verschiedene Wege in Betracht gezogen und schließlich einer von diesen Wegen an einer echten Anlage getestet. Die dafür notwendigen Komponenten sollten leicht in den bestehenden Aufbau integrierbar sein. Bezüglich der Datenaggregation sollen zunächst die Einspeisung, die Ströme einzelner Baugruppen und der Status der zentralen Steuerung der Anlage erfasst werden. Der dabei verwendete Messintervall sollte klein genug sein, um zwischen den Prozessschritten der Anlage

unterscheiden zu können. Während der Entwicklung werden die Rohwerte der Messungen direkt gesichert, um den Analyseschritt in Zukunft mit Hilfe von echten Messwerten in einer simulierten Umgebung weiterentwickeln zu können. Je präziser die Datenverarbeitung dann im Produktivsystem angesetzt ist, desto weniger Daten müssen während der Laufzeit der Anlage beim Kunden gespeichert werden. Die zu speichernden Werte bestehen aus periodisch wiederkehrenden Datenpunkten der einzelnen Prozessschritte, welche in einer zeitbasierten Datenbank abgelegt werden müssen. Nur wenn ein Datenpunkt ein festgelegtes Limit überschreitet, ist eine direkte Meldung des Wertes notwendig. Um eine zuverlässige Speicherung zu garantieren, sollten die Daten möglichst auf mehreren unabhängigen Systemen gespeichert werden. Hierzu wird auch ein modularer Aufbau verwendet, der es ermöglicht, unterschiedlichste Speichermethoden gleichzeitig zu verwenden. Schließlich ist auch eine Lösungsstrategie notwendig, um zu garantieren, dass immer genug Speicherplatz für neue Daten vorhanden ist.

Die Visualisierung kann Dank der vorbereiteten Datensätze im einfachsten Fall aus dem Plotten der Messreihen aus einer der Datenbanken bestehen.

2.2 Relation zu bestehenden Systemen

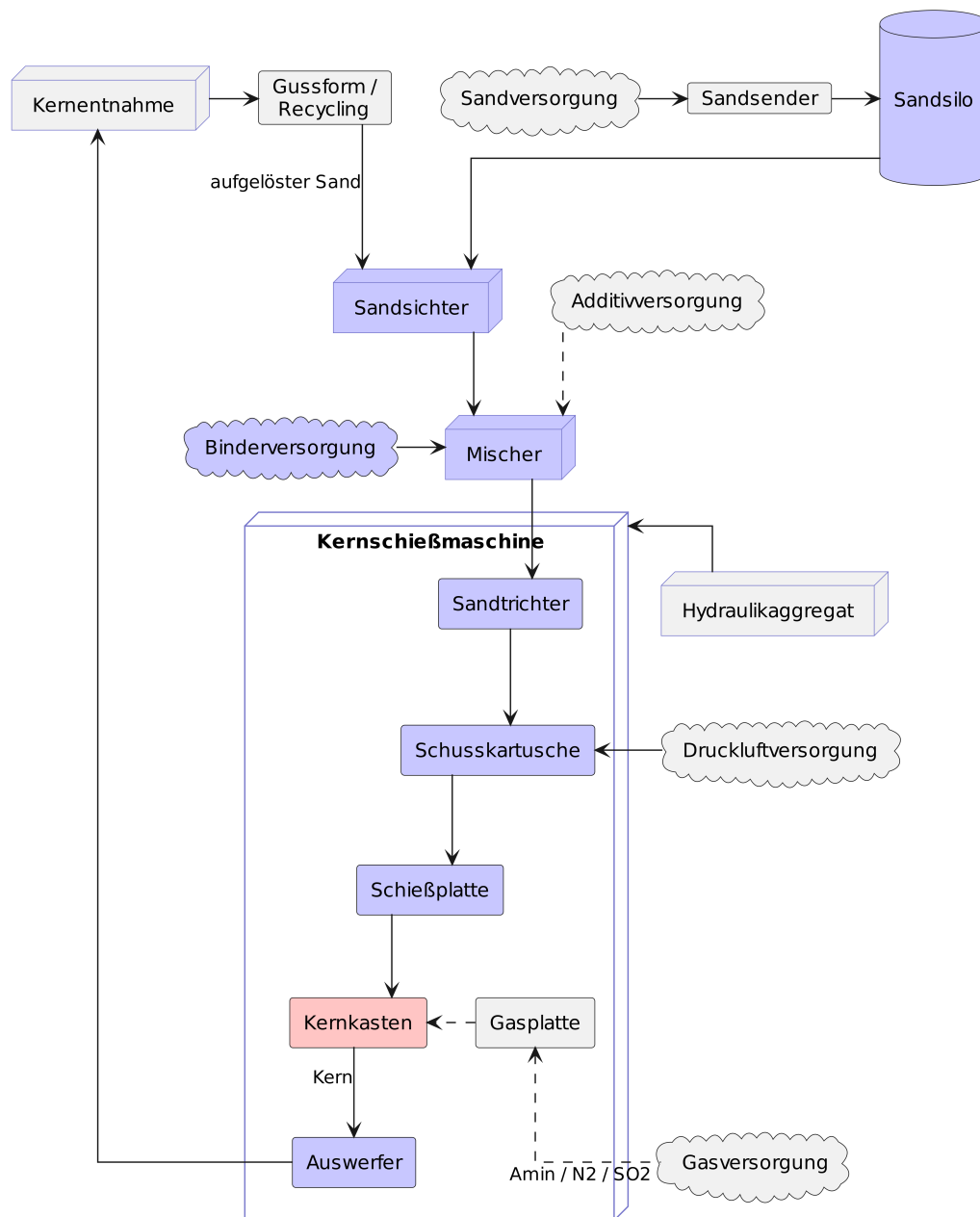
Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der Überwachung von Anlagen. Dabei wird auch ein System entwickelt, welches die Datenverarbeitung, Speicherung und Visualisierung von Messwerten übernimmt. Eigene Marktrecherchen haben ergeben, dass es auch andere All-in-one-Lösungen für die Überwachung von Anlagen gibt. Diese Systeme sind jedoch meistens kostenintensiv, intransparent oder erfüllen nicht alle Anforderungen. Zudem ist es oft schwierig diese an die bestehenden Datenbusse der Anlagen anzupassen, was auch zu einem erhöhten Installationsaufwand führen kann. Die LMS hat sich daher entschlossen, ein eigenes System zu entwickeln, welches die Anforderungen der Firma erfüllt. Dieses System soll auch in Zukunft weiterentwickelt werden, um auch neu entstehende Anforderungen an die Produkte der Firma zu erfüllen.

Die Visualisierung der Messwerte wird in dieser Arbeit bewusst weniger thematisiert, da dafür in Zukunft die bestehende Visualisierungslösung der Firma verwendet werden soll. Diese Visualisierungslösung namens *Laempe-Digital-Cockpit* (LDC) ist bereits in der Lage, andere Parameter der Kernschießmaschinen zu visualisieren.[7] Sie soll in Zukunft auch die Messwerte des Energie-Monitoring-Systems anzeigen können.

3 Grundlagen

3.1 Kernschießmaschinen

Kernschießmaschinen sind industrielle Anlagen, welche in der Gießereiindustrie eingesetzt werden. Sie stellen aus Sand und Bindemitteln Kerne her, welche beim Gießvorgang die Hohlräume der zu gießenden Form ausfüllen. Nach ihrer Verwendung werden die Kerne wieder aufgelöst und der Sand als Rohmaterial wieder dem Prozess zugeführt. Abbildung 2 zeigt den Materialfluss rund um eine Kernschießmaschine mit den dafür wichtigsten Komponenten.



jomueller, 11.2022

Abbildung 2: Prozessroutine des Kernschießens

Zuerst wird dem Mischer eine dosierte Menge Sand aus dem Sandsilo zugeführt. Danach wird dieser mit einem Bindemittel vermischt. Optional werden auch je nach Rezept Additive wie Holzfasern oder Asche beigegeben. Das Gemisch wird anschließend über einen Sandsender oder Sandtransportwagen in den Sandtrichter geladen. Aus dem Trichter wird dann erneut eine genau dosierte Menge Sand in die Schusskartusche abgegeben. Nun wird die Schusskartusche mit Druckluft befüllt und kurz danach mit bis zu 100bar über die Schießplatte in den Kernkasten entleert. Alternativ zu selbst härtenden Bindemitteln des Cold-Box-Verfahrens, kann der Kernkasten im Hot-Box-Verfahren begast und erwärmt werden, um den Aushärtungsprozess des Bindemittels chemisch anzustoßen. Nach dem Schuss wird der fertige Kern mit einem Auswerfer aus dem Kernkasten entfernt und dann der Maschine entnommen. Danach können weitere Schritte wie das Entgraten des Kerns erfolgen, bis der Kern letztendlich in einer Gussform als Platzhalter für einen negativen Raum seine Aufgabe erfüllt. Abschließend kann er wieder chemisch aufgelöst werden, sodass der Sand als Recyclingmaterial wieder dem ursprünglichen Prozess beigegeben werden kann.[4]

Die Kernschießmaschinen von LMS arbeiten komplett automatisch und können mehrere Kerne pro Minute herstellen. Sie bestehen, wie viele industrielle Anlagen, aus einer zentralen Steuereinheit und einer Vielzahl von Sensoren und Aktoren. Diese Steuerung ist auch für die anderen Produkte verantwortlich. Je nach Ausführung können in einer Anlage Mischer, Sandsichter, Binder- und Additivversorgung oder auch andere Systeme von einer zentralen Stelle gesteuert werden. Mit ihr wird eine festgelegte Sequenz von Schritten orchestriert, die unter anderem das Ein-/Ausfahren des Kernkastens, das Schließen der Seitenteile oder das Befüllen der Kernform beinhalten können.

3.2 Topologie von industriellen Anlagen

Die Kommunikationsstruktur von industriellen Anlagen wird in drei Ebenen unterteilt: die Feldebene, die Kontrollebene und die Überwachungsebene. In der Feldebene befinden sich alle Sensoren (Temperatursensoren, Lagesensoren, etc.) und Aktoren wie Motoren, Ventile und Leuchtsignale. Sie sind über Feldbusverteiler beziehungsweise Interfacemodulen mit dem entsprechenden Feldbus verbunden. Bei LMS werden neben traditionellen, analog an Interfacemodule verbundenen Komponenten auch solche eingesetzt, die das Punkt-zu-Punkt-Protokoll *IO-Link* unterstützen. Dieses eliminiert die Zuordnung der Komponenten zu individuellen I/O-Kanälen und ermöglicht eine einfache und flexible Konfiguration. Mit der Verwendung von *IO-Link* sind in allen Teilen der Anlagen IO-Link-Master verbaut, welche über Feldbusse wie *ProfiNet* oder *EtherNet/IP* mit der CPU kommunizieren. Auf diese Infrastruktur kann für die Umsetzung der Energiemessung zurückgegriffen werden. Die Kontrollebene besteht aus einer oder mehreren speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) und ihren untergeordneten Interfacemodulen. Das Zentralmodul einer SPS wird mit einer echtzeitfähigen Sprache programmiert und kommuniziert mit den Interfacemodulen, welche über Erweiterungskarten den verschiedenen Geräten im Feld verbunden sind. Je nach Hersteller kommen hier unterschiedliche Bussysteme zum Einsatz. Deren speziellen Eigenschaften sind im folgenden Kapitel näher erläutert. Wenn mehrere Steuerungen sich gegenseitig überwachen oder deren Einstellungen über ein Human-Maschine-Interface (HMI) angepasst werden können, dann geschieht dies in der Überwachungsebene. Sie ist die höchste Automatisierungsebene, die sich am Ort der Anlage befindet. In ihr befindet sich auch der Hauptteil des konzipierten Energieüberwachungssystems.

3.3 Industrielle Steuerungen

Industrielle Steuerungen sind das Herzstück industrieller Anlagen. Sie sind für die Steuerung der Anlage zuständig und kommunizieren mit den Sensoren und Aktoren über verschiedene Bussysteme. Früher wurden hauptsächlich sogenannte *PLCs* (programmable logic controller, deutsch: SPS) eingesetzt. Diese sind spezielle echtzeitfähige Steuerungen, die mit ihrer eigenen Programmiersprache programmiert werden. Durch die stetige Entwicklung der Technik und die damit verbundene Verfügbarkeit von leistungsfähigeren und kostengünstigeren Hardwarekomponenten spricht man heute eher von *CPUs* (central processing unit), da die Steuerung nicht nur für die Steuerung der Anlage zuständig ist, sondern auch ein Teil der höher gelegenen Kontrollsysteme (*SCADA*) ist. Somit muss eine moderne Steuerung auch Protokolle wie HTTP oder OPC UA unterstützen, die den Austausch mit anderen Systemen auf Basis der Internetprotokolle ermöglichen.

3.4 Feldbusverteiler

Mit dem Aufkommen der Industrie 4.0 und der damit verbundenen Vernetzung von Anlagen und Maschinen wurde die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten immer wichtiger. Um die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten zu vereinfachen und zu beschleunigen, wurden sogenannte *Feldbusverteiler* entwickelt. Diese sind dezentrale Geräte, die über verschiedene Schnittstellen mit den einzelnen Komponenten verbunden sind. Sie sind in der Lage, die Daten der einzelnen Komponenten zu sammeln und an die nächsthöhere Steuerung weiterzuleiten. Im Vergleich zu *Interfacemodulen*, welche meist direkt neben der CPU angebracht sind, wird mit ihnen der Verdrahtungsaufwand zwischen den einzelnen Komponenten und der Steuerung reduziert. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Feldbusverteilern und der Steuerung erfolgt über ein Bussystem wie zum Beispiel *EtherNet/IP* oder *ProfiNet*.

3.5 Feldbussysteme

In den Anlagen werden verschiedene Arten von Datenbussen verwendet. Die für dieses Projekt relevantesten sind *ProfiNet*, *EtherNet/IP* und *CC-Link IE*. *ProfiNet* ist ein Feldbus, der von der *Profibus Nutzerorganisation e.V.* (PNO) entwickelt wurde. Er ist ein offener Feldbus, der auf dem *Ethernet*-Standard basiert. Er kommt hauptsächlich in CPUs von Siemens zum Einsatz. *EtherNet/IP* ist ein Feldbus, der von der *Rockwell Automation* entwickelt wurde. Er ist für die Übertragung von Daten mit hoher Geschwindigkeit und hoher Zuverlässigkeit ausgelegt. Da er auf den *TCP/IP*-Standards TCP und UDP aufbaut, ist er im Gegensatz zu *ProfiNet* mit allen normalen Ethernet-Teilnehmern kompatibel. Jedoch kann er dadurch nicht das strikte Echtzeitkriterium einhalten, so wie es bei *ProfiNet* der Fall ist. Er kommt hauptsächlich in CPUs von Allen-Bradley zum Einsatz. *CC-Link IE* ist ein Feldbus, der von der *CC-Link Partner Association* entwickelt wurde. Er wird bevorzugt in industriellen Steuerungen und Roboterarmen von Mitsubishi eingesetzt. Er basiert auf Gigabit-Ethernet. Er ist jedoch nicht so weit verbreitet wie die anderen beiden Feldbusse.[3, 9, 11]

3.6 Strommessung

Die Stromstärke ist eine der wichtigsten Messgrößen in der Energieüberwachung. Sie ist die Grundlage für die Berechnung der Energiekosten und der Energieeffizienz. Die Strommessung wird in der Regel über Stromzähler durchgeführt. Die Stromstärke wird dabei über einen *Hall-Sensor* gemessen. Dieser ist in der Lage, die magnetische Flussdichte zu messen, welche parasitär durch die Energieübertragung in elektrischen Leitern erzeugt wird. Der Energiefluss wird dann über die Stromstärke und die Spannung berechnet. Die Spannung wird meist über einen *Spannungsteiler* gemessen. Dieser besteht aus zwei Widerständen, die in Reihe geschaltet sind. Der Spannungsteiler ist in der Lage, die Spannung zu reduzieren, sodass sie mit einem *Analog-Digital-Wandler* (ADC) erfasst werden kann.

Alternativ zum Hall-Sensor kann auch eine andere Art von Stromsensoren verwendet werden. Diese ist speziell in der Lage, die Stromstärke eines Wechselstromsystems (AC) zu messen. Sie besteht aus einem *Stromwandler* (CT) und einem Messwiderstand im Sekundärstromkreis des Wandlers. Die Spannung über diesen Widerstand ist proportional zur Stromstärke. Sie wird dann ebenfalls über einen ADC gemessen. Mit dieser Anordnung kann auch die Phasenlage des Stroms erfasst werden. Für die Messung eines DC Stroms im Kleinstspannungsbereich ist der Stromwandler nicht erforderlich und der Messwiderstand kann direkt im Strompfad angebracht werden.

4 Lösungsansatz

Die abstrakten Ideen aus der Problemstellung können nun in konkrete Lösungen umgesetzt werden. Zuerst werden die benötigten Aufgaben bestimmten Komponenten zugeordnet. Anschließend werden die einzelnen Komponenten genauer beschrieben. Die Aufgaben des Energieüberwachungssystems können in fünf Kategorien unterteilt werden: die Datenerfassung, -übertragung, -verarbeitung, Datenspeicherung und -visualisierung. Darstellung 3 zeigt die Zuordnung der Aufgaben zu den Komponenten, welche in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

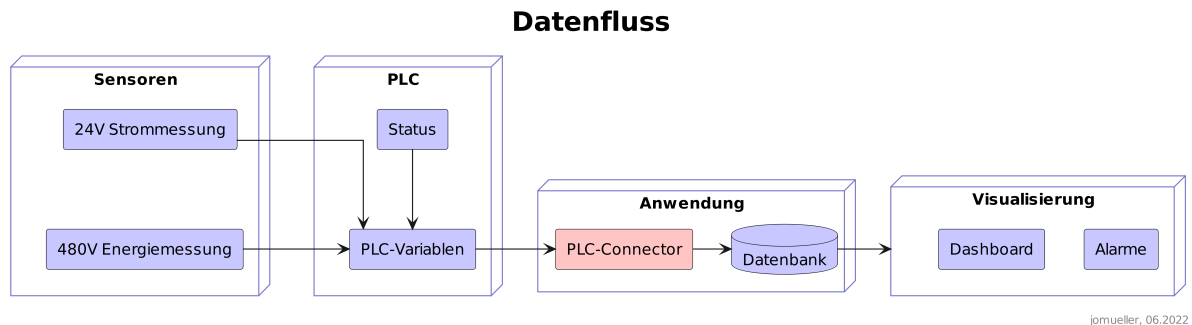


Abbildung 3: Bestandteile des Projekts

4.1 Erfassung der Messwerte

Die Aufgabe der Energiemessung wird durch zwei Gruppen von Sensoren übernommen. Die erste Gruppe besteht aus Sensoren, die an der elektrischen Einspeisung der Kernschießmaschine angebracht sind und den kompletten Momentanverbrauch der Anlage messen. Die zweite Gruppe besteht aus Sensoren, die an den einzelnen Komponenten der Anlage angebracht sind und den Verbrauch dieser Komponenten messen. Die Messwerte der beiden Gruppen werden über den internen Datenbus der Anlage an die zentrale Steuerung der Anlage übertragen.

In der ersten Gruppe werden für jede Phase jeweils Strom, Spannung und deren Beziehung zueinander erfasst. Dies ergibt ein komplettes Bild über den momentanen Leistungsbedarf und den Energieverbrauch der Anlage über einen längeren Zeitraum. Wie in der Darstellung 3 zu sehen ist, wird die zweite Sensorgruppe an der 24V Kleinstspannungsverteilung angebracht. Diese Entscheidung wurde getroffen, da die Steuerspannungsversorgung nach firmeninterner Beobachtung viel anfälliger für Überlastereignisse ist als die Versorgung der Niederspannungsverbraucher. Dazu kommt, dass fast jeder Teil der Anlage über diese Versorgung zumindest indirekt gesteuert wird und ein Fehlerfall der 24V-Versorgung definitiv Auswirkungen auf die Funktionalität der Anlage hat. Die Spannung wird direkt an der 24V-Versorgung gemessen.

Die Spannung an den einzelnen Komponenten wird nicht gemessen, da diese sich im Idealfall nicht stark von der Versorgungsspannung unterscheidet. Potenzielle Abweichungen skalieren bei konstantem Leitungswiderstand auch proportional zu den Strömen, was ein weiterer Grund ist sie nur an einer Stelle zu messen. Es ist auch nicht praktikabel den Strom jeder einzelnen Komponente zu messen, deshalb findet die Messung an einer zentralen Stelle statt, wo mehrere Komponentengruppen mit

wenigen dutzend Strommesskanälen abgedeckt werden können. Eine solche für die Messung der 24V-Versorgung geeignete Stelle ist in den Kernschießanlagen kurz vor den Potenzialklemmen, nämlich dort wo sich die elektronischen Untersicherungen befinden. Diese Sicherungen werden, neben den Netzteilen selbst, in der Implementierung für die Messung der Ströme instrumentiert.

Die meistverwendete Punkt-zu-Punkt-Verbindung in LMS-Anlagen ist *IO-Link*. Dieses Protokoll ist für die Kommunikation mit den Sensoren und Aktoren der Anlage vorgesehen. Die Sensoren werden zusätzlich über den IO-Link-Master mit Strom versorgt und können so ohne eigene Potenzialverteilung betrieben werden. Die hinzugefügten Energiesensoren werden vorzugsweise auch in dieses Sensornetzwerk integriert. Wenn dies so umgesetzt wird, dann werden die Signale, so wie bei allen anderen Sensoren auch, über Feldbusverteiler beziehungsweise Interfacemodule mit IO-Link-Master-Karten zu der zentralen Steuerung der Anlage geleitet. Alternativ zur *IO-Link*-Einbindung ist es aber auch möglich, die Energiesensoren direkt in die Feld- oder Steuerungsebene einzubinden, wenn jene über eine entsprechende Schnittstelle verfügen.

Unabhängig vom Feldbussystem muss eine Abfragerate der Energiesensoren festgelegt werden. Als Referenz wird hier die Taktzeit einer ausgelasteten zentralen Steuerung herangezogen, welche für die Zwecke der hinzukommenden Übermittlerrolle der Messwerte zum Verarbeitungssystem nicht unterschritten werden kann. Als oberes Limit ist bei den zu betrachtenden Kernschießanlagen die Dauer der kürzesten Aktorbetätigung der Kernschießmaschine anzusetzen. Nach Aussage der zuständigen Mitarbeiter ist dafür ein Intervall von 100ms ausreichend. Zudem werden von *IO-Link*-Teilnehmern die Prozessdaten bereits periodisch übertragen. Beim *IFM DF2101 24V IO-Link Sensorsystem* ist beispielsweise eine minimale Zykluszeit von 20ms angegeben (siehe Anhang VIII). In Kombination der beiden Grenzwerte wird daher je nach Möglichkeit ein Messintervall von 20ms angestrebt. Somit können auch sehr kurzzeitige Fehlerereignisse erkannt und analysiert werden.

4.2 Übertragung der Messwerte

Für dieses Projekt ist neben den bereits genannten Standardkomponenten der Energiesensoren, Feldbusverteilern und Interfacemodulen auch ein Computer (Box-PC) hinzuzufügen, welcher die Aufgabe der Verarbeitung der aufgenommenen Messwerte übernimmt. Ein solcher Computer ist in der Lage mit der zentralen Steuerung (SPS) der Anlage zu kommunizieren und von ihren Daten abzufragen. Die SPS ist daher so zu konfigurieren, dass sie zusätzlich zu ihrer Hauptaufgabe, die Anlage zu steuern, auch die Daten von den neu hinzugefügten Sensoren an den PC weiterreicht. Hierzu können zwei Methoden verwendet werden: Zum einen kann der Box-PC die von der SPS gesammelten Messwerte periodisch abfragen und zum anderen kann die SPS die Daten selbstständig zum PC übermitteln. In beiden Fällen muss jedoch ein Protokoll verwendet werden, welches von beiden Seiten unterstützt wird. Es ist beispielsweise nicht möglich ProfiNet Pakete über eine Ethernetverbindung mit einem generischen Linuxkernel zu empfangen, weil dieser nicht in der Lage ist, das Echtzeitkriterium des ProfiNet-Standards zu erfüllen. [11]

Zusätzlich zu den Energiewerten werden, wie in der Darstellung zu sehen ist, auch Statusinformationen der Kernschießmaschine gesammelt und ausgewertet. Diese helfen die Strommessungen in einem zeitlichen Kontext einzuordnen und somit die Qualität der Analyse zu verbessern. Als Datenpunkte

sind hier hauptsächlich die Befehle der Steuerung an die Aktoren von Interesse, denn diese Informationen lassen sich gut zu den Verbräuchen der aktivierten Komponenten zuordnen. Während der Datenverarbeitung kann somit beispielsweise gezielt nach Anlagenzuständen gefiltert werden oder es können langfristige Veränderungen der Energieverbräuche auf einen bestimmten Prozessschritt zurückgeführt werden.

4.3 Datenverarbeitung

Die Verarbeitung findet auf einer PC-Plattform statt, da PC-Systeme flexibel eingesetzt und die verwendete Software ohne großen Aufwand modifiziert werden kann. Die Verarbeitung der Daten kann dadurch beispielsweise vor Ort auf einem industriellen Box-PC, oder auch über eine Netzwerkverbindung aus einem entfernten Datenzentrum durchgeführt werden. Aus sicherheitstechnischen Gründen darf die verwendete Plattform nur lesend über die erhobenen Messwerte verfügen und nicht in den Prozessablauf der Anlage eingreifen. Das in Abbildung 3 dargestellte Programm *PLC-Connector* ist mit dieser Arbeit eigens für jenen Zweck entwickelt worden und wird in Kapitel 5.3 näher erläutert.

Die Datenverarbeitung findet in zwei Schritten statt. Zunächst wird periodisch mit den datenübermittelnden Komponenten des Aufbaus kommuniziert, um dann anschließend die erhaltenen Datensätze für die weitere Verarbeitung bereitzuhalten. Diese abzufragenden Komponenten können zum Beispiel die zentrale Steuerung der Kernschießmaschine, einzelne Interfacemodule oder netzwerkfähige Energiesensoren aus dem vorherigen Kapitel sein. Jeder Datensatz wird unabhängig von seiner Quelle abgefragt und mit einem genauen Zeitstempel der PC-Plattform bestückt, um bei der folgenden asynchronen Weiterverarbeitung die zeitlich korrekte Reihenfolge der Datensätze der verschiedenen Quellen sicherzustellen. Im zweiten Schritt werden die Datensätze in einem zentralen Prozess weiterverarbeitet. Es werden zuerst die Verbrauchswerte wie Ströme und Spannungen mit dem Status der Anlagensteuerung kombiniert, sodass pro Prozessschritt ein wiederholbares Datenbild entsteht. Ein Prozessschritt ist ein zeitlich begrenzter Zustand der Anlage, in der eine bestimmte Gruppe von Aktoren aktiviert wird. Dies kann beispielsweise das Einfahren des Auswerfers sein. Die elektrischen Verbräuche während dieses Schrittes können so als Funktion der Schrittnummer und Zeit nach Beginn des Vorgangs dargestellt werden. Das Datenbild besteht dann im einfachsten Fall aus Versorgungsleistungen und Strömen der 24V-Kanäle.

Nun werden die Differenzen des Datenbildes zwischen dem Ausgangszustand und der Aktivierung eines Prozessschrittes berechnet. Dadurch können die Verbräuche der jeweiligen Prozessschritte von den Standbyströmen der inaktiven Komponenten der Anlage isoliert werden. Der Ausgangszustand sollte zeitlich nah am Messvorgang liegen, damit äußere Einflüsse wie Versorgungsspannung und Umgebungstemperatur einen geringeren Effekt auf die berechneten Differenzen haben.

Anschließend werden je nach erwartetem zeitlichem Verlauf des Datenbildes einige Aggregationen wie Durchschnitt, Maximum oder Varianz einzelner Kanäle erhoben, um schließlich einfache Kennzahlen für diesen Schritt zu erhalten. Damit können nun Aussagen wie beispielsweise „Das für den Auswerfer zuständige Ventil hat beim zweitausendsten Aktivieren einen zusätzlichen Strom von 1,3A verbraucht.“ getroffen werden.

4.4 Datenspeicherung

Die Ergebnisse der Datenverarbeitung werden in einer Datenbank gespeichert. Die Datenbank ist in der Lage, die errechneten Kennzahlen in einer Zeitserie zu speichern, sodass die Veränderung der Kennzahlen über einen längeren Zeitraum beobachtet werden kann. Sie ermöglicht es außerdem, die Daten in verschiedenen Formaten auszugeben, sodass die Ergebnisse in Tabellen, Diagrammen oder auch als Rohdaten exportiert werden können. Die Datenbank ist so aufgebaut, dass sie auch von anderen Programmen verwendet werden kann. So können beispielsweise die Daten in einem Programm zur statistischen Auswertung weiterverarbeitet werden, um die Ergebnisse zu visualisieren oder um statistische Kennzahlen zu berechnen.

4.5 Visualisierung

Je nach Bedarf kann die Visualisierung vor Ort am HMI der Anlagen erfolgen oder auch beispielsweise über einen Browser auf einem entfernten PC. Hier besteht kein großer Entwicklungsbedarf, da eine Einbindung an ein bestehendes System der LMS angedacht ist. Für eine offene Verwendung des *PLC-Connector* kann auch auf fertige universelle Visualisierungssoftware zurückgegriffen werden. Die einzige Einschränkung ist, dass diese mit der gewählten Datenbank kommunizieren können muss.

5 Implementierung

5.1 Wahl des 480V-Sensorsystems

Für die Suche nach einem geeigneten 480V-Sensorsystem wurden im Rahmen der Problemstellung diverse Kriterien definiert, die das Sensorsystem erfüllen muss. Diese Kriterien sind:

- Die Messwerte müssen unmittelbar abrufbar sein.

Es ist wichtig, dass die Messung in Echtzeit erfolgt, damit die Verarbeitung und Filterung der Daten vor der Speicherung erfolgen kann. Zudem bietet dies die Möglichkeit, zeitnah Alarmer aus möglichen Fehlzuständen zu generieren. Wenn die Messung nicht in Echtzeit erfolgt, dann müssten die Messwerte periodisch von der aufzeichnenden Hardware abgefragt werden. Das würde die Reaktionszeit des Systems verlangsamen und mögliche kurzzeitige Störungen könnten nicht erkannt werden.

- Das System muss für industrielle Umgebungen geeignet sein.

Da das System in einem industriellen Umfeld eingesetzt werden soll, muss es für diese Umgebung geeignet sein. Es muss eine lange wartungsarme Lebensdauer aufweisen, um mögliche Reparaturaufwände gering zu halten. Zudem muss es die entsprechenden Zertifizierungen besitzen, um die Sicherheit des Systems zu gewährleisten. Diese umfassen beispielsweise die Schutzart gegen Wasser und Fremdkörper oder die CE-Kennzeichnung.

- Das Sensorsystem muss über einen Feldbus, TCP/IP oder IO-Link angesprochen werden können.

Da das System in ein bestehendes Feldbusnetzwerk eingebunden werden soll, muss es über einen standardisierten Feldbus verfügen. Dieser muss von der bestehenden Hardware unterstützt werden. In diesem Fall müssen die Feldbusprotokolle ProfiNet und EtherNet/IP unterstützt werden. Alternativ kann das System über IO-Link angesprochen werden. Dieser Standard ist in der Industrie weit verbreitet und wird auch in allen Anlagen von LMS eingesetzt.

- Das System muss internationale Versorgungsspannungen unterstützen.

Da das System in Kernschießanlagen eingesetzt wird, die in verschiedene Länder exportiert werden, muss das System eine Vielzahl an Einspeisespannungen unterstützen. Da die Versorgungsspannung in den USA beispielsweise 480V beträgt, muss das System auch diese Spannung unterstützen. Eine Ausnahme bildet das kanadische Stromnetz, welches 600V verwendet. Für dieses Netz kann dem System später um eine entsprechende Spannungsumsetzung erweitert werden.

Unter diesen Kriterien sind nun diverse Energieerfassungssysteme recherchiert worden. Die Ergebnisse der Recherche sind in folgenden Tabelle zusammengefasst:

Hersteller	Artikelnummer	Beschreibung	Feldbus	Kennwerte
Schneider Electric	EM3550	Energiemonitor	Modbus RTU	600V AC
Mitsubishi	EMU4-HD1-MB	Energiemonitor	Modbus RTU / Modbus TCP / CC-Link / CC-Link IE	480V AC
Mitsubishi	EMU4-HM1-MB	modularer Energiemonitor	Modbus RTU, CC-Link	480V AC
Siemens	7KT PAC1200	mehrkanaliger Strommesssser	LAN/IP	40/63 A
Siemens	AI Energy Meter + ET 200SP IM 155-6 MF HF	Energiemeterkarte auf einem Interfacemodul	ProfiNet + EtherNet/IP	480V AC
Janitza	UMG801	Power Analyser, modular erweiterbar	Modbus RTU / TCP + OPC UA	480V AC
Hager	h3+	Leistungsschalter	Modbus RTU	480V AC
Eaton	NZM2 PXR25	Leistungsschalter	Modbus RTU	690V 100A AC

Tabelle 1: Anbieter von Energieerfassungssystemen

2

Zum Zeitpunkt der Recherche waren keine Energiesensoren mit IO-Link-Schnittstelle für den industriellen Gebrauch auffindbar. IO-Link ist jedoch ein Standard, der in der Industrie immer mehr an Bedeutung gewinnt und in Zukunft sicherlich auch in diesem Bereich eingesetzt werden wird. Sein Vorgänger, Modbus RTU, wird nicht in den zu betrachtenden Kernschießmaschinen eingesetzt.[5, 6] Daher können alle Ergebnisse aus der Tabelle mit diesem Feldbus ausgeschlossen werden. Ähnlich dazu ist auch CC-Link IE nicht wünschenswert, da es nur bei Anlagen mit Mitsubishi Steuerungen zum Einsatz kommt. Dieser Feldbustyp existiert zwar unter den von LMS hergestellten Produkten; wird aber bei Kernschießmaschinen nur sehr selten eingesetzt. Außerdem unterstützen alle Mitsubishi-Steuerungen das EtherNet/IP-Protokoll [9], auf das durch seine weit verbreitete Verwendung in Rockwell-Anlagen eher zurückgegriffen werden sollte. Somit können in allen Mitsubishi Anlagen die

²Stand: 10.2021

EtherNet/IP-Sensoren verwendet werden. Zudem sind die Steuerungen vom Typ MELSEC iQ-R um eine ProfiNet-Karte erweiterbar, was auch den Einsatz des ProfiNet Feldbusses möglich macht.

Als letzte Einschränkung ist noch zu erwähnen, dass die meisten der hier aufgeführten Sensoren nur für 480V AC ausgelegt sind. Dies ist für die meisten Kernschießmaschinen ausreichend, da diese in der Regel mit 480V AC (US) oder 400V AC (EU) betrieben werden. Für diejenigen Maschinen, die mit 690V AC betrieben werden, ist der Eaton NZM2 PXR25 die einzige Option.

Die nächstbeste Kommunikationsschnittstelle, die zur direkten Anbindung an den datenverarbeitenden Computer geeignet ist, ist unter den Ergebnissen das OPC-UA vom *UMG801* Power Analyser. Dieses Protokoll ist ein offenes Protokoll das auf TCP/IP basiert, wodurch die softwareseitige Anbindung an diese Einheit möglich wäre. Nach einigen Tests wurde festgestellt, dass die Kommunikation mit dem *UMG801* Power Analyser über OPC-UA nur mit Hilfe einer zusätzlichen Software möglich ist. Diese Software ist jedoch nicht kostenlos und muss separat erworben werden. Zudem liefert der *UMG801* Power Analyser die Echtzeit-Messdaten nur über seine Modbus RTU Schnittstelle und nicht über OPC-UA. Daher ist die Kommunikation mit dem *UMG801* Power Analyser über OPC-UA nicht wünschenswert.

Der letzte Strommesser mit TCP/IP-Anbindung ist der *7KT PAC1200* von Siemens. Dabei handelt es sich aber nur um eine Reihe von Stromsensoren. Die somit fehlende Erfassung der Spannung lässt keine Berechnung der Momentanleistung der Einspeisung zu. Hier wäre eine zusätzliche synchrone Erfassung der Drehspannungen nötig, welche wiederum Kosten und Komplexität mit sich bringt. Daher ist auch dieser Strommesser nicht wünschenswert.

Die letzte in Betracht kommende Option ist die Verwendung der Siemens AI-Energy-Meter-Karte auf einem Siemens Interfacemodul. Diese Karte erfüllt alle Kriterien und ist nebenbei eine sehr platzsparende Messeinrichtung. Sie unterstützt einen Messbereich von 480V und ist somit für den internationalen Einsatz geeignet. Als Interfacemodul, an dem die Energiemeterkarte aufgesteckt wird, wird das *ET 200SP IM 155-6 MF HF* eingesetzt. Dieses ist die *Multi-Fieldbus* Variante eines regulären Interfacemoduls und kann dadurch in ProfiNet- und EtherNet/IP-Netzwerken eingesetzt werden. Dadurch ist es möglich, die Messwerte an die entsprechende zentrale Steuerung von Siemens oder Allen-Bradley zu übermitteln.

5.2 Wahl des 24V-Sensorsystems

Für die Erfassung der Kleinstspannungskreise wird ein 24V-Strommesssystem eingesetzt. Dieses kann direkt im Netzteil, in den Untersicherungen oder als separate Einheit vor den Potenzialklemmen der Anlage platziert werden. Je nach Anordnung können so mehr oder weniger aufgeteilte Ströme erfasst werden. Die Messung der Spannung ist bei allen drei Varianten nur einmal notwendig, da es auf den kurzen Wegen im Schaltschrank zu keinen signifikanten Spannungsabfällen kommt. Mit Hilfe der Spannung und der Stromstärke kann die Leistungsaufnahme der einzelnen Komponentengruppen hinter den Stromsensoren berechnet werden. Wie bei der Messung der Einspeisung sind verschiedene Messsysteme in Betracht gezogen worden. Die Auswahlkriterien sind dabei die gleichen wie bei der Messung der Einspeisung. Die Messsysteme, die in Betracht gezogen wurden, sind in Tabelle 2

aufgeführt. Die Messsysteme sind in der Tabelle nach den Kriterien aufgelistet, die für die Integration in die bestehende Potenzialverteilung in LMS Kernschießanlagen wichtig waren.

Hersteller	Artikelnummer	Bustyp	Nennstrom Kanäle		Spannungsmessung
			in A	max.	
Block	EB-IO-LINK	IO-Link	40	40x1	azyklisch
Block	EB-IO-LINK1	IO-Link	40	16x1	azyklisch
Wago	787-1668/000-080	IO-Link	80	1x8	azyklisch $\pm 100\text{mV}$
Rockwell	1694-PFD1244	IO-Link	40	16x1 / 16x2	azyklisch $\pm 10\text{mV}$
ifm	DF2101	IO-Link	40	16x1 / 8x2	zyklisch $\pm 10\text{mV}$
E-T-A	EM12D-TIO-000-DC24V-40A	IO-Link	40	16x1 / 8x2	zyklisch
E-T-A	ControlPlex® System CPC12	PROFINET, EtherCAT, Ether- NET/IP, Modbus TCP	40		

Tabelle 2: Anbieter von 24V Strommesssystemen

3

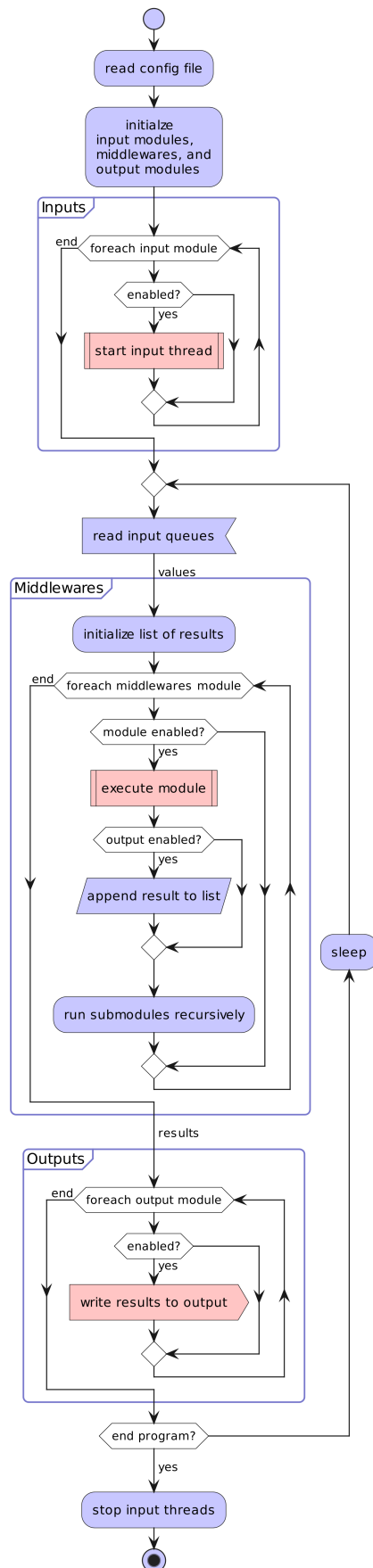
Im Unterschied zu den Einspeisungsmesssystemen sind die Messsysteme hier nicht auf unerwünschte Bussysteme beschränkt, sondern können meist auch direkt mit dem Punkt-zu-Punkt-Protokoll IO-Link angesprochen werden. Unter den Systemen, die IO-Link unterstützen, gibt es fünf, welche auch mindestens 16 Strommesskanäle besitzen. Die Anlagen von LMS sind meist in so viele logische Versorgungsgruppen unterteilt, sodass mit dieser Wahl eine Eins-zu-Eins Beziehung zwischen Versorgungsgruppen und Messkanälen möglich ist. Der gemeinsame Nennstrom von 40A ist für den Anwendungsfall ausreichend, da in der Regel auch nur Netzteile mit 40A Nennstrom eingesetzt werden. Von den fünf Kandidaten senden nur zwei den Messwert der Spannung im zyklischen Datensatz der IO-Link Verbindung. Die anderen drei senden nur den Messwert der Stromstärke. Da für die Berechnung der Leistungsaufnahme immer ein aktueller Spannungswert benötigt wird, können diese drei auch ausgeschlossen werden. Die beiden verbleibenden Systeme unterscheiden sich kaum und es kann sich möglicherweise um identische Hardware handeln, da diese beiden Produkte auch optisch sehr ähnlich aussehen. Letztendlich wurde sich bei der Durchführung der Testversuche für das IFM Kopfmodul *DF2101* mit acht der zweikanaligen Sicherungsmodule *DF2220* entschieden.

³Stand: 10.2021

5.3 Verarbeitungssoftware

Die Software für dieses Projekt übernimmt die Aufgaben der Datenverarbeitung und -speicherung. Zudem müssen die aufgenommenen Messwerte von der zentralen Steuerung der Kernschießmaschine eingelesen werden. Das dafür vom Autor selbst geschriebene Programm „PLC-Connector“ ist in diesem Abschnitt genauer beschrieben. Es ist der Arbeit beigelegt.[10] Dort befinden sich auch Anleitungen zur Installation und Nutzung der Software. Die Benutzerschnittstelle zur Visualisierung der Ergebnisse des Systems kann im Nachhinein durch ein generisches Interface zur Datenbank geschehen, da die dort enthaltenen Daten schon durch den *PLC-Connector* und dessen entsprechende Signalverarbeitungsmodule aufbereitet sind. Ein Beispiel für ein solches Setup ist auch im Softwareverzeichnis enthalten. Es besteht aus einer *docker-compose* Datei, welche die Container für die Datenbank und das Interface startet. Das Interface ist in diesem Fall ein *Grafana* Dashboard, welches die Daten aus der Datenbank abrufen und visualisiert. Die Datenbank ist eine *InfluxDB* Instanz. Ein *Dockerfile* zum Bauen des Containers für den *PLC-Connector* ist ebenfalls im Softwareordner enthalten.

Programmablauf PLC-Connector



jornueller, 08.2022

Abbildung 4: Programmablaufplan des PLC-Connectors

Der *PLC-Connector* ist modular aufgebaut, sodass verschiedene Module einfach ausgetauscht werden können. Abbildung 4 zeigt, wie die verschiedenen Module (rot markiert) im Programm verwendet werden. Dazu sind sie in die folgenden drei Kategorien unterteilt:

1. Inputs

Ein *Input*-Modul stellt die Verbindung zu einer bestimmten Komponente der Anlage her und bezieht über diese periodisch die Messwerte eines oder mehrerer Sensoren. Die Komponenten können beispielsweise Feldbusverteiler, netzwerkfähige Sensoren oder die zentrale Steuerung einer Anlage sein. Je nach Modul kommen unterschiedliche Protokolle zur Kommunikation zum Einsatz. Unter diesen sind zum Beispiel EtherNet/IP und das S7-Protokoll vertreten.

2. Middlewares

Eine *Middleware* ist ein Algorithmus, der strukturierte Datensätze der aktiven *Input*-Module entgegennimmt und die für die Auswertung interessanten Informationen extrahiert. Eine erste *Middleware* ingestiert beispielsweise die Werte mehrerer *Inputs* und führt eine zeitliche Korrelation durch. Die dadurch entstandenen Datenpakete können dann optional an weitere *Middlewares* weitergegeben werden, welche andere Analysen durchführen. Schließlich kann eine *Middleware* ihre Ergebnisse an die *Outputs* übergeben.

3. Outputs

Outputs sind Datensenken, welche Datensätze von *Middlewares* entgegennehmen und abspeichern. Ein *Output* archiviert beispielsweise die Datensätze in CSV Dateien und ein anderes sendet sie an eine Influxdb-Datenbank.

Die Module werden durch ein zentrales Python-Programm geladen, welches auch die initiale Konfiguration und die Datenübertragung zwischen den Modulen orchestriert. Ansonsten arbeiten die Module komplett autonom. Die Verbindungen und Parameter der Module sind in einer zentralen Konfigurationsdatei `config.yml` definiert. Diese Datei wird von dem *PLC-Connector* mittels `python3 main.py -c config.yml` geladen und gibt die Typen, die Parameter und die Untermodule der Module vor. Die Module werden dann entsprechend initialisiert und ausgeführt. Beispiele für mögliche Konfigurationsdateien sind in der beigefügten Software enthalten.

Input-Module

Das erste implementierte Input-Modul trägt den Namen `snap7_connect` und stellt aktiv eine Verbindung zu einer Siemens-Steuerung auf. Die IP-Adresse der Steuerung kann über den Parameter `address` gesteuert werden. Im Versuch ist dieser Wert auf die Adresse der zentralen Steuerung der *LFB665* gesetzt. Nachdem die Verbindung über das S7-Protokoll aufgebaut ist, beginnt das Modul alle 50ms einen Lesebefehl zu senden. Es werden dabei die ersten fünf Bytes des Datenbausteins DB3 abgefragt, welche die in Anhang V aufgelisteten Statusbits enthalten. Somit kann der Status einer LFB65 Kernschießmaschine an die Middleware-Module übertragen werden. Das Input-Modul namens `snap7_server` emuliert eine Siemens-Steuerung und lässt dadurch Verbindungsanfragen von echten CPUs auf das *PLC-Connector*-Programm zu. Es wurde in den in Kapitel 6 durchgeführten Versuchen verwendet, um von der *ET200SP CPU* passiv Messwerte zu empfangen. Das Timing der S7-Pakete kann dabei über einen Interrupt in der SPS gesteuert werden und ist somit viel präziser als eine PC-seitige Anfrage. Für seine Verwendung ist die Erstellung eines S7-Send-Blocks in der Steuerung notwendig, aber bietet den Vorteil des genaueren Zeitintervalls. Zur Erhaltung eines PLC-seitigen Zeitstempels kann der Betriebszeitzähler `cpu_uptime` optional mit im Datenblock abgelegt werden und dann mit einer Tiefpass-gefilterten Differenz zum lokalen Zeitstempel `local_time` zu einem echten UTC Zeitstempel umgewandelt werden.

$$\begin{aligned}\Delta T &= local_time - cpu_uptime \\ dt_0 &= \alpha \cdot dt_{-1} + (1 - \alpha) \cdot \Delta T \\ t &= cpu_uptime + dt_0\end{aligned}\tag{1}$$

Eine Referenzimplementierung dieses Verfahrens befindet sich im Modul `snap7_server` in der Methode `get_timestamp` mit dem Wert $\alpha = 0,999$. Bei einer Abfragefrequenz von $f = 50\text{Hz}$ entspricht dies einer Zeitkonstante des Filters von $T \approx 20\text{s}$:

$$\begin{aligned}1 - \frac{1}{e} &= 1 - \alpha^{f \cdot T} \\ \frac{1}{e} - 0,999^{50} &= 0,999^T \\ e &\approx e^{0,05T} \\ T &\approx 20\text{s}\end{aligned}\tag{2}$$

Middleware-Module

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, werden die Daten der *Inputmodule* zyklisch an die *Middleware*-Module übergeben. Das erste Modul dieser Kategorie übernimmt die Korrelation der Zeitstempel und die Synchronisation der relevanten Informationen. Es liegt in der Datei `time_correlation.py`. Zur Korrelation werden alle Datensätze der verschiedenen Inputs in eine Liste kombiniert und anschließend nach ihrem Zeitstempel sortiert. Damit wird sichergestellt, dass die Datenpakete der verschiedenen Inputs während eines Durchlaufs immer synchron sind. Für die Messwerte, die sich zwischen zwei

Zyklen der Hauptschleife der *PLC-Connector*-Software befinden, wird ein zusätzlicher Schritt der Synchronisation angewendet: Anstelle die sortierten Datenpunkte direkt zusammenzuführen, werden sie für einen Zyklus zwischengespeichert und dann noch einmal den neuen Werten angefügt und sortiert. Danach wird nur die Anzahl der vorherigen Datenpunkte freigegeben und die neuen wieder zwischengespeichert. Somit werden Verzögerungen der Datenquellen um bis zu einer Intervallperiode ausgeglichen. Zur Korrelation werden nun die sortierten Datensätze iteriert und pro Inputtyp in ein Statusverzeichnis kopiert. Für jeden Zeitpunkt wird so ein Abbild aller Inputs zu einem neuen Datentypen zusammengefasst und an die folgenden Middleware-Submodule weitergegeben.

Die nächste implementierte Middleware ist das *Aggregate*-Modul. Es nimmt eine Datenserie entgegen und wendet darauf eine oder mehrere Aggregationsfunktionen an. Die Aggregationsfunktionen werden in der Konfigurationsdatei definiert und können beliebig kombiniert werden. Gegenwärtig werden die folgenden Aggregationsfunktionen unterstützt: *avg*, *first*, *last*, *min*, *max* und *sum*. Sie werden über den eingestellten Zeitintervall auf eine gegebene Liste von Feldern der Datenquellen angewendet. Sobald ein Datensatz außerhalb des angegebenen Zeitintervalls liegt, wird die Aggregationsfunktion auf die vorherigen Daten angewendet und das Ergebnis an die nächsten Module weitergegeben. Dabei wird der letzte Datensatz kopiert und die Aggregationswerte in die Felder eingetragen. Um die Anzahl der resultierenden Datensätze zu untersuchen, kann das *Debug*-Modul *PrintStats* als Untermodul hinzugefügt werden. Es gibt die Rate der Datensätze in der Konsole aus.

Wenn nur bestimmte Datensätze weitergegeben werden sollen, dann können Module aus der Datei *filters.py* verwendet werden. Diese Module nehmen eine Datenserie entgegen und geben nur die Datensätze weiter, die den Filterkriterien entsprechen. Zur Zeit werden die folgenden Filter implementiert: *MatchAny*, *MatchAll* und *ComplexFilter*. Der *MatchAny*-Filter gibt alle Datensätze weiter, die mindestens einem der angegebenen Filterkriterien entsprechen. Der *MatchAll*-Filter gibt nur Datensätze weiter, die allen angegebenen Filterkriterien entsprechen. Der *ComplexFilter* ist ein allgemeiner Filter, der beliebige Filterkriterien anwenden kann. Die Filterkriterien werden in der Konfigurationsdatei definiert und können beliebig kombiniert werden. Momentan unterstützen *MatchAny* und *MatchAll* nur das Gleichheitskriterium. Der *ComplexFilter* unterstützt hingegen arbiträre Python-Ausdrücke, die auf die Felder der Datensätze angewendet werden. So kann dieser beispielsweise Kriterien wie `"measurement_480v and measurement_24v and sum(measurement_24v.current) > 20"` ausführen, um nur Datensätze weiterzugeben, die die Daten aus dem AI-Energy-Meter und IFM-Sicherungen enthalten und deren gesamter 24V Stromverbrauch größer als 20A ist.

Die letzte implementierte Middleware ist das *Selector*-Modul. Es nimmt eine Datenserie entgegen und gibt nur die Felder weiter, die in der Konfigurationsdatei angegeben sind. Dieses Modul ist nützlich, wenn nur bestimmte Felder weitergegeben werden sollen. Es kann auch verwendet werden, um die Datensätze zu kürzen, die an die *Output*-Module weitergegeben werden. Wie beim *ComplexFilter*-Modul kann auch ein individueller Python-Ausdruck angegeben werden, der auf die Felder angewendet wird. Dieser kann beispielsweise die Felder `"measurement_24v.current"` und `"measurement_24v.voltage"` zu einem Feld zusammenfassen, welches die Leistungsaufnahme pro Kanal beinhaltet:

```
"tuple([ c * measurement_24v.voltage for c in measurement_24v.current])".
```

Output-Module

Die *Output*-Module sind die letzten Module in der Kette. Sie nehmen Datenserien von Middlewares entgegen und geben sie an einen *Output*-Adapter weiter. Zur Zeit werden die folgenden *Output*-Module implementiert: CSVStorage, InfluxDB und JSONOutput. Das CSVStorage-Modul speichert die Datensätze in CSV-Dateien ab. Dabei werden jeweils 50.000 Zeilen in eine CSV-Datei geschrieben und diese dann in eine gleichnamige ZIP-Datei verschoben. Alle nachfolgenden CSV-Dateien werden im Anschluss dem ersten Archiv hinzugefügt. Das InfluxDB-Modul schreibt die Datensätze in eine InfluxDB-Datenbank. Hierbei wird das Feld `series` verwendet, um die verschiedenen Datenserien zu unterscheiden. Falls ein Feld vom Typ `tuple` ist, dann wird dessen Index als Tag `channel` umfunktioniert, um das Influxdb-Schema bestmöglich auszunutzen. Das JSONOutput-Modul gibt die Datensätze als JSON-Objekte in der Konsole aus. Dieses Modul ist nützlich, um die Daten zu debuggen.

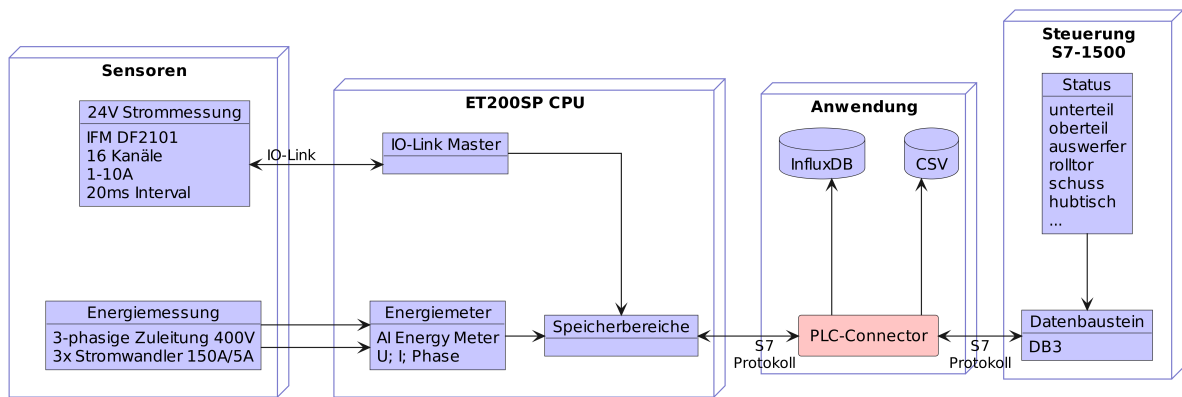
6 Praktische Versuche

Der gewählte Messaufbau wurde bisher an zwei Kernschießanlagen getestet. Dazu wurden alle benötigten Sensoren im Steuerungsschrank temporär verbaut und die aufgenommenen Daten extern mit einer weiteren ET200 Siemens Steuerung verarbeitet. Bei den Kernschießmaschinen handelt es sich um eine Anlage mit einer Steuerung von Siemens und eine mit einer Allen-Bradley Steuerung. In beiden Versuchen wurden die elektrischen Werte der Einspeisung, die Ströme der Kleinstspannungsverbraucher und der Anlagenstatus anhand des Programms auf der Steuerung aufgezeichnet. Zum Zeitpunkt der beiden Versuche fand noch keine tiefgehende Analyse statt. Diese erfassten Rohdaten wurden anschließend zur Analyse und für die Erarbeitung der Middleware-Module des PLC-Connector Programms (siehe vorheriges Kapitel) per Replay-Inputmodul wiederholt eingespielt.

6.1 Siemens Anlage LFB65

Der erste praktische Test wurde an einer Kernschießmaschine vom Typ LFB65 in der 19. Kalenderwoche 2022 durchgeführt. Als Sensoren sind hier zum einen eine Strommessung an der 24V Versorgung mit Hilfe der elektrischen Sicherungen von IFM und zum anderen eine Instrumentierung der elektrischen Einspeisung mit dem AI-Energy-Meter von Siemens vorgesehen. Die Messwerte der beiden Sensorgruppen werden über IO-Link und respektive Rückwandbus zu einer *ET200SP CPU* zusammengeführt. Diese CPU ist nicht die zentrale Steuerung der Anlage und befindet sich im Versuch auf einem separaten Teststand, der an die Kernschießmaschine angeschlossen wurde (siehe Anlage III).

Messaufbau LFB65



jomuellner, 06.2022

Abbildung 5: Siemens Versuch

Die Strommessung der 24V-Ebene wird durch einen digitalen Leitungsschutzschalter von IFM übernommen. Dieser besteht aus einem Kopfmodul (Typ DF2101) und bis zu 16 daran angereihten Sicherungskanälen. Am Kopfmodul kann eine 24V-Versorgung mit bis zu 40A Nennstrom angeschlossen werden. Es besitzt auch die IO-Link Schnittstelle, mit der die Werte der Versorgungsspannung und der Ströme der einzelnen Sicherungskanäle abgefragt werden können. Das Kopfmodul DF2101 ist in diesem Versuch direkt an das zentrale 24V, 40A Netzteil der Anlage (links am Rand des Fotos im Anhang I) angeschlossen. Die acht Sicherungsmodule vom Typ DF2220 mit je zwei Kanälen sind von der CPU individuell zwischen 1 und 10A einstellbar. Sie übernehmen die Funktion der ursprünglich eingesetzten Sitop Sicherungen von Siemens (grau im Foto I, zwischen dem Netzteil und den IFM Modulen). Vier von fünf Sitop-Sicherungen mit je vier Kanälen sind komplett deaktiviert, wobei die letzte noch drei der ursprünglich 19 Ausgangskanäle und den Rest des Versuchsstandes (Foto III) versorgt. Die Verteilung der Kanäle ist im Anhang II als EPLAN-Auszug dokumentiert.

Die zweite Sensorbaugruppe besteht zuerst aus drei Stromwandlern, die an der Einspeisung der Anlage verbaut sind. Sie messen somit den gesamten elektrischen Stromverbrauch der im Werk aufgebauten Anlage, inklusive der Standby-Verbräuche. Zu den nicht aufgenommenen Energieverbräuchen zählt wiederum die Stromaufnahme der Versorgungsmaschinen, welche die Anlage mit anderen Ressourcen wie Druckluft versorgt. Die Anlage war beispielsweise zum Zeitpunkt der Messung am pneumatischen Netz des Prüfstandes angeschlossen. Des Weiteren werden bei den Prüfläufen der Anlagen nicht alle Anlagenteile aktiviert, da zum Beispiel während der Zyklen keine echten Sandkerne geschossen wurden.

Der Wandlungsfaktor, der bei der LFB65 Anlage eingesetzten Stromwandler beträgt $150A : 5A$, was der maximalen Stromaufnahme dieser Anlage entspricht. Zur Digitalisierung der elektrischen Werte wird die Energiemeterkarte „AI Energy Meter“ von Siemens eingesetzt. Diese ist über einen sechspoligen Trenner mit den eben genannten Stromwandlern verbunden, welcher in Orange im Anhang III zu sehen ist. Am AI Energy Meter sind für die Messung der Versorgungsspannung auch die drei Phasen der Einspeisung angeschlossen. Diese werden vor dem Hauptschalter der Anlage abgegriffen (siehe EPLAN Anhang II) und mit einem dreipoligen Leitungsschutzschalter (LS) mit 6A Nennstrom abgesichert. Der LS ist rechts vom Trenner montiert.

Die AI-Energy-Meter-Karte ist auf einen sekundärseitigen Strom von 5A und auf die Messung von Spannungen à 400V eingestellt. Zur Fixierung des Sternpunktes der Spannungen ist zusätzlich zu den drei Leitern auch der Neutraleiter der Einspeisung verbunden.⁴

Links neben der Energiemeterkarte ist ein IO-Link-Master verbaut. Dieser ist über ein dreipoliges IO-Link Kabel mit dem Kopfmodul der IFM Sicherungen verbunden. Beide Karten stecken auf einer programmierbaren ET-200SP CPU. Diese befindet sich im Anhang III direkt angrenzend zu den beiden Karten und ist mit der darüberliegenden Netzwerk-Switch per Ethernetkabel verbunden. Beide werden über die vorhin genannte Sitop-Sicherung mit 24V Betriebsspannung versorgt.⁵

Die ET-200SP CPU erfasst periodisch die Messwerte der beiden per Rückwandbus verbundenen Siemens-Karten und sendet sie via S7-Protokoll an die selbstgeschriebene Anwendung „PLC-Connector“. Über IO-Link werden dabei alle 20ms folgende Zustände der IFM-Sicherungen ermittelt: Der gemessene Strom je Kanal im Bereich von [0.1, 0.2, ..., 10.0]A, Schalt-, Überlast-, Kurzschluss-, Grenzwert- und Tasterzustände, sowie die Spannung am Kopfmodul. Vom AI Energy Meter werden zudem alle 60ms die L-N-Spannungen, Leiterströme und Phasenwinkel der Drehstromversorgung aufgenommen.

Das verwendete Ethernetnetzwerk ist eine Erweiterung des Überwachungsnetzes der Kernschießmaschine. Darin befinden sich üblicherweise die zentrale Steuerung, mobile Zugänge zur Programmierung der Anlage und das Bedienpult (HMI). In manchen Kernschießmaschinen von LMS ist dort auch ein Box-PC mit der hauseigenen *Laempe-Digital-Cockpit*-Software (LDC) vorzufinden. Bei der im Versuch verwendeten LFB65-Anlage sind alle bereits vorhandenen Teilnehmer in der unteren Hälfte des Subnetzes 192.168.0.0/24 anzufinden. Zum Beispiel besitzt die zentrale Steuerung die Adresse 192.168.0.5. Demzufolge werden für die Erweiterung des Netzwerks statische Adressen im Subnetz 192.168.0.192/26 eingesetzt. Die hinzugefügten Teilnehmer umfassen die ET-200SP CPU mit der IP-Adresse 192.168.0.206 und ein Laptop mit der Adresse 192.168.0.201, der als Anwendungsserver fungiert.

Die PLC-Connector Anwendung ist für den Versuch so konfiguriert, dass sie Daten von der zentralen Steuerung abfragt, Verbindungen von der ET-200SP CPU zulässt und alle Messwerte in zwei redundanten Datenbanken abspeichert. Die Abfrage der zentralen S7-1500 CPU erfolgt über das S7-Protokoll auf der Ethernetverbindung zum Überwachungsnetzwerk der Anlage. Dazu wurde die Steuerung von einem LMS-Mitarbeiter so programmiert, dass sie die Ausgangszustandsbits in einen eigens zum Auslesen angelegten Speicherbereich (vgl. Datenbaustein DB3 in Abbildung 5) kopiert. Beim Auslesen wird der Inhalt von DB3 als Bytearray zum PLC-Connector übertragen. Die dabei verwendete Struktur der Statusflags im Datenbaustein ist im Anhang V definiert.

Für die Übertragung der Daten von der *ET-200SP CPU* werden neben DB3 zwei weitere Datenstrukturen eingesetzt. Die Erste umfasst die Messwerte der AI-Energy-Meter-Karte und besteht aus folgenden neun IEEE 754 LSB Fließkommawerten:

⁴Es ist hierbei anzumerken, dass bei der Einspeisung in industriellen Anlagen, wie dieser Kernschießmaschine, häufig ein kombiniertes PE-N System (TN) verwendet wird. Die Trennung in Neutral- und Schutzleiter findet somit erst im Schaltschrank der Anlage statt. Alternativ ist auch ein IT oder TT System möglich.

⁵Auf dem Teststand befinden sich auch ein weiteres Netzteil, ein Leitungsschutzschalter und ein ET-200SP Interfacemodul, welche alle während des Versuchs nicht verwendet wurden.

byte[]	Fließkommawert	Einheit
Byte 0-3	Spannung U_1	V
Byte 4-7	Spannung U_2	V
Byte 8-11	Spannung U_3	V
Byte 12-15	Primärstrom I_1	A
Byte 16-19	Primärstrom I_2	A
Byte 20-23	Primärstrom I_3	A
Byte 24-27	Phasenwinkel φ_1	°
Byte 28-31	Phasenwinkel φ_2	°
Byte 32-35	Phasenwinkel φ_3	°

Tabelle 3: Datenstruktur der AI-Energy-Meter-Karte

Die zweite Datenstruktur beinhaltet die Statusinformationen der elektronischen Sicherung *DF2101*. Sie ist identisch zu der vom Hersteller IFM definierten Struktur der IO-Link Prozessdaten des Moduls (siehe DF2101 Schnittstellenbeschreibung im Anhang)

Beiden Strukturen ist außerdem ein Zeitstempel der CPU vorangestellt, welcher bei der genauen Bestimmung des Messzeitpunktes herangezogen wird. Der Zeitstempel besteht aus einer ganzzahligen Anzahl an Millisekunden, die seit dem Start der CPU vergangen sind. Er ist als vorzeichenlose, vier Byte LSB Zahl kodiert. Somit wird er circa aller 50 Tagen überlaufen, was auch bei der Implementierung der Zeitbestimmung im vorherigen Kapitel beachtet wurde.

Die PLC-Connector Anwendung verwendet zur Kommunikation mit der ET-200SP CPU die *snap7* Pythonbibliothek. Diese Bibliothek stellt hier einen TCP-Server auf Port 102 bereit und emuliert damit das Verhalten einer S7-Steuerung. Die ET-200SP CPU baut anschließend eine Verbindung zu diesem Server auf. Aus der Sicht des SPS-Programms handelt es sich beim *snap7* Service um eine Partner-CPU, zu der nun aktiv eine Verbindung über das S7-Protokoll aufgebaut wird. Die ET-200SP CPU beginnt nun mit dem Senden der zwei Speicherbereiche. Der erste Bereich mit den Energiedaten wird in den emulierten Datenbaustein DB2 und der zweite wird in den Baustein DB1 der PLC-Connector Anwendung geschrieben.

6.2 Allen-Bradley Anlage LL20

Der zweite Versuchsaufbau dient zur Demonstration der Anpassungsfähigkeit der Hardware an eine andere Anlagenstruktur, im Speziellen an Kernschießanlagen mit einer zentralen Compact Logix Steuerung von Allen-Bradley und der Verwendung des EtherNet-IP Protokolls. Er fand an einer Anlage vom Typ LL20 in der 20./21. KW 2022 statt. Wie auch beim ersten Versuch werden die elektrischen Werte der Einspeisung, die Stromverbräuche der Kleinstspannungsverbraucher und der Anlagenzustand erfasst.

Messaufbau LL20

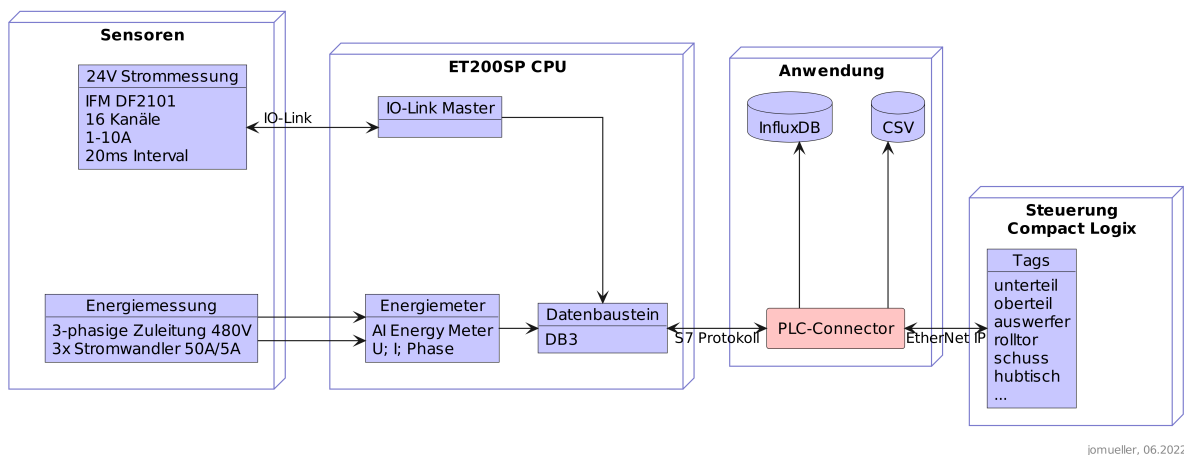


Abbildung 6: AB Versuch

Zur Energieerfassung kommen hier die gleichen Baugruppen wie im letzten Versuch zum Einsatz. Für die 24V Strommessung werden wieder die elektronischen Sicherungen von IFM verwendet und zur Instrumentierung der Einspeisung wird die Energiemeterkarte in Kombination mit 50A : 5A Stromwandlern eingesetzt. Beide werden wieder von einer ET-200ST CPU gesteuert. Beim Auslesen der zentralen Steuerung ist jedoch ein großer Unterschied vorzufinden: Ihre Programmierung unterscheidet sich stark von der Programmstruktur einer Siemens CPU. Anstelle von Datenbausteinen werden hier sogenannte Tags verwendet, um interne Zustandsvariablen anzulegen. Diese Tags können über EtherNet/IP mit Hilfe der *pylogix* Bibliothek von der PLC-Connector Anwendung ausgelesen werden. Zum Lesen des Anlagenstatus wurde in diesem Fall kein neuer Speicherbereich angelegt; der Zugriff auf die Tags kann nämlich direkt erfolgen. Eine Auflistung der ausgelesenen Tags befindet sich im Anhang VII. Diese Tags werden von der PLC-Connector Anwendung aller 20ms über das EtherNet/IP Protokoll von der Steuerung abgefragt. Dabei können mehrere Leseanfragen in einem Paket kombiniert werden, was die Anzahl an benötigten Ethernet Roundtrips gering hält. Für die Anbindung an das Überwachungsnetzwerk der Allen-Bradley-Steuerung wird auch ein anderes Subnetz verwendet. Das Subnetz ist hier 192.168.1.0/24 und die IP-Adresse der Steuerung lautet 192.168.1.15.

6.3 Vergleich der Versuche

Bei der LL20 handelt es sich im Vergleich zur LFB65 um eine kleinere und kompaktere Kernschießmaschine. In den Versuchen konnten fast identische externe Komponenten eingesetzt werden. Der einzige Unterschied in der Hardware war die Verwendung von Stromwandlern mit unterschiedlichen Umsetzungsfaktoren. Im ersten Test wurden Wandler mit einem Umsetzungsfaktor von 150A : 5A eingesetzt, während im zweiten Test ein Faktor von 50A : 5A ausreichend war. Die Kommunikation mit den Sensoren war in beiden Fällen identisch, da dies durch eine externe Steuerung übernommen wurde. In Zukunft wird für den Aufbau jedoch keine externe Steuerung mehr nötig sein, denn diese übermittelnde Funktion der ET200 CPU soll auch durch die Steuerung der jeweiligen Anlage übernommen werden.

Die Versuche unterschieden sich auch im Kommunikationsprotokoll zwischen dem Computer und der jeweiligen Steuerung der Anlage. Es wurden zwei unterschiedliche Versionen der Verarbeitungssoftware eingesetzt; bei der einen fand die Kommunikation mit der Steuerung über das S7-Protokoll statt und bei der anderen über EtherNet-IP. Beide Protokolle bauen auf TCP/IP auf und sind so beide in der Anwendungsschicht des Internetprotokolls anzufinden.

7 Ergebnisse

Beim Versuch an der LFB65 wurden insgesamt über 70.000.000 Datenpunkte über 7 Stunden kontinuierlichen Betriebs der Kernschießmaschine aufgezeichnet. Allein anhand der Strommesswerte ist ein klares Bild des automatischen Zyklusablaufs zu erkennen. Beim zweiten Versuch kam hingegen kein kontinuierlicher Betrieb zustande, da die Anlage ein anderes technisches Problem aufzeigte. Über die Dauer des zweiten Versuchs war die LL20 Anlage häufig wegen der Reparaturen außer Betrieb.

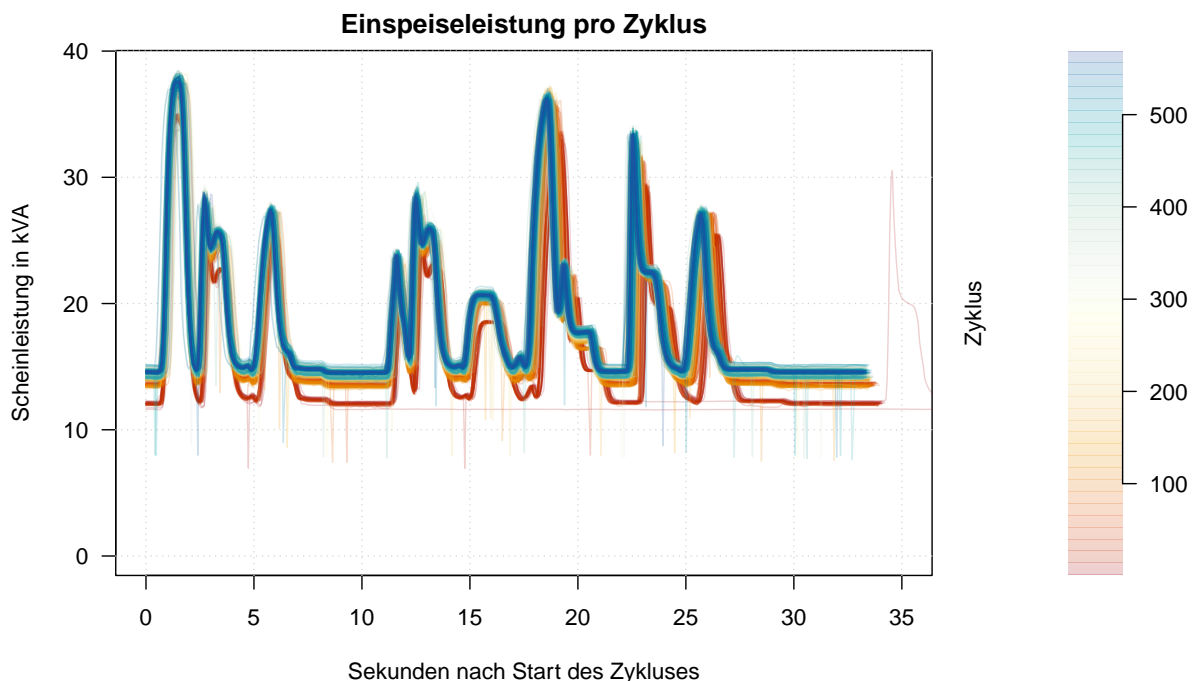


Abbildung 7: Leistungsaufnahme der LFB65

Abbildung 7 zeigt die Leistungsaufnahme der LFB65 über die ersten Stunden des Betriebszeitraums. Zur Überlappung der Zeitachse wurden die von der SPS aufgenommenen Statusbits herangezogen und der Verlauf jeweils bei Beginn eines neuen Zykluses zurückgesetzt. Dazu ergänzend zeigt Anhang VI die rohen Strommessungen der Einspeisung und der jeweiligen 24V Kanäle zusammen mit den entsprechenden SPS-Statussignalen über einen einzelnen Maschinenzyklus. Daneben sind auch von diesem einen Zyklus die einzelnen Phasen des Zyklusablaufs in der LFB65 aufgeführt. Die größte Leistungsaufnahme der Gesamtanlage tritt beim Öffnen der Seitenteile auf, gefolgt vom Heben und Senken des Hubtisches. Das ist dadurch zu erklären, dass das dafür verwendete hydraulische Aggregat mit der größte Verbraucher der Maschine ist. Der Grundverbrauch der Gesamtanlage im betriebs-

bereiten Zustand beträgt rund 20A, was zusammen mit der dreiphasigen 400V Netzspannung der folgenden Mindestleistungsaufnahme entspricht:

$$I_L \cdot \frac{U_{LL}}{\sqrt{3}} \cdot 3 = 20\text{A} \cdot 400\text{V} \cdot \sqrt{3} \approx 14\text{kVA}$$

Im Plot ist auch ein Drift in der Leistungsaufnahme zu erkennen. Dieser ist auf die Veränderung der Netzspannung zurückzuführen. Die Netzspannung schwankt im Bereich von 390V bis 405V, was zu einer Veränderung der Leistungsaufnahme führt. Die Leistungsaufnahme der LFB65 ist also nicht nur vom programmierten Zyklus, sondern auch von der Netzspannung abhängig. Eine Änderung der Spannung führt auch zu einer Änderung der Taktzeit. Die Taktzeit schwankt in einem Bereich von 33 bis 34s, wobei die schnellere Taktzeit mit der höheren Netzspannung einhergeht. Dies kann zum Beispiel durch das schnellere Erreichen von Endlagen der Aktoren erklärt werden. Alle fünf Minuten ist ein kurzer Ausfall der Stromstärke aufgezeichnet worden. Dieser ist auf eine Fehlfunktion der Datenübertragung zurückzuführen, da der Ausfall nur einzelne Werte der Stromstärke der Einspeisung betrifft. Der numerische Wert der Ausfälle ist immer exakt 0,00A, wodurch eine reale Ursache ausgeschlossen werden kann.

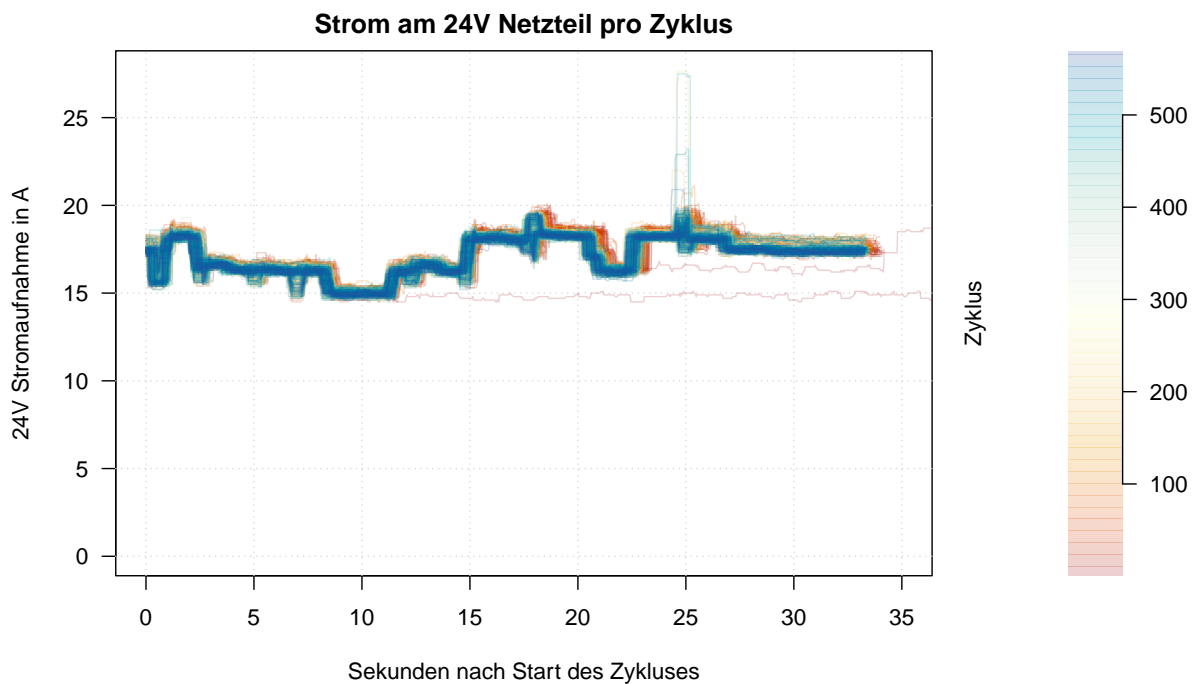


Abbildung 8: 24V Gesamtstrom an der LFB65

In der Kleinstspannungsebene sind die Relais und Schütze auf Kanal sechs der elektronischen Sicherungen mit die größten Verbraucher. Sie benötigen zeitweise über 5A, was der Hälfte des eingestellten Auslösestroms entspricht. Alle Kanäle zusammen benötigen durchschnittlich 18A, jedoch taucht sporadisch ein Überstromereignis auf Kanal 10 auf. An diesem Kanal sind die Proportionalventile der Anlage angeschlossen (siehe Anlage II). Durch diese Abnormalität betrug der maximale Stromverbrauch der 24V Komponenten während des kompletten Laufs 27,9A. Wenn dieses Fehlverhalten pro Vorkommen noch länger andauern würde, dann würde die Sicherung für den Kanal 10 auslösen

und die Anlage wegen der dadurch entstehenden Kommunikationsfehler anhalten. Der gemessene Maximalstrom liegt noch unterhalb des Nennstroms des Netzteils, welches bis zu 40A kontinuierlich liefern kann.

Bezüglich der Qualität der Daten gibt es auch einige Besonderheiten. Auf den Messwerten des *AI Energy Meters* wird eine aggressive Filterung direkt im Gerät durchgeführt. Dieses Verhalten ist nicht gut dokumentiert und führt dazu, dass kurze Ereignisse wie Anlaufströme oder hochfrequente Resonanzen nicht mehr in den Daten erkennbar sind.[8] Der Verlauf des Graphen in Abbildung 7 hat für den verwendeten Messintervall von 60ms zu wenig hochfrequente Anteile. Eine Verbesserung könnte mit dem Auslesen der vom Modul zur Verfügung gestellten Oberfrequenzanteile geschehen. Die Stromwerte der elektrischen Sicherungsmodule von *IFM* entsprechen auch nicht ganz den Erwartungen. Obwohl das aufgebaute Datenübertragungs- und Verarbeitungssystem in der Lage ist, Messpunkte aller 20ms entgegenzunehmen, werden die Prozessdaten des IO-Link-Geräts nicht so häufig aktualisiert. Die Folge ist, dass bis zu 30 identische Messwerte in die Datenbank geschrieben wird, bis der Wert von der Sensorbaugruppe geändert wird. Dies entspricht nicht dem erwarteten Verhalten des *DF2101*, da es laut Dokumentation bis zu 50-mal pro Sekunde Prozessdaten an den IO-Link-Master liefern sollte (vgl. Anhang VIII). Als Resultat weisen die Graphen der Stromverläufe nicht realitätsgetreue Schrittfunktionen mit einem individuellen Aktualisierungsintervall von ca. 700ms auf.

Eine mögliche Erweiterung des Informationsgehalts der Strommesswerte könnte das Auslesen und Zurücksetzen der azyklischen Maximalwerte des IFM Kopfmoduls sein. Es wäre möglich, dass diese öfter aktualisiert werden als die zyklischen Prozessdaten und somit mehr über den tatsächlichen Maximalstrom aussagen. Diese Werte bieten mit ihrer zusätzlichen Dezimalstelle den Vorteil einer höheren Präzision als die zyklischen Prozessdaten. Der Nachteil dieser Datenquelle ist jedoch der erhöhte Kommunikationsaufwand in der SPS und die damit verbundene negative Beeinträchtigung ihrer Zykluszeit.

8 Fazit

Das erstellte System zur Erfassung und Auswertung von Energieverbrauchswerten in einer Kernschießmaschine hat sich als sehr nützlich erwiesen. Die Messdaten können in Echtzeit aufbereitet und visualisiert werden. Die Einsicht in die Ströme der einzelnen 24V Kanäle ermöglicht eine schnelle Analyse von Problemen und die Erkennung von Abweichungen von den Normwerten. Auf Basis der Stromverläufe können die einzelnen Sicherungen identifiziert werden, die einen hohen Stromverbrauch aufweisen. Die anderen Sicherungen können in Zukunft nach einem validierten Referenzstromverbrauch auf einen passenden Auslösewert eingestellt werden. Die Stromverläufe können auch für das Netzteil der 24V Versorgung verwendet werden, um die maximale Leistungsabgabe im Betrieb zu bestimmen.

Bei der Wahl der Hardware sind mangels Kompatibilität einige Kompromisse eingegangen worden. Es wäre besser, wenn alle Energiesensoren über eine einheitliche Kommunikationsschnittstelle verfügen würden. Auch die Aktualisierungsrate des DF2101 ist nicht optimal. Nichtsdestotrotz ist ein System entstanden, welches die gewünschten Messwerte liefert und den Bedingungen des Umfelds gerecht wird.

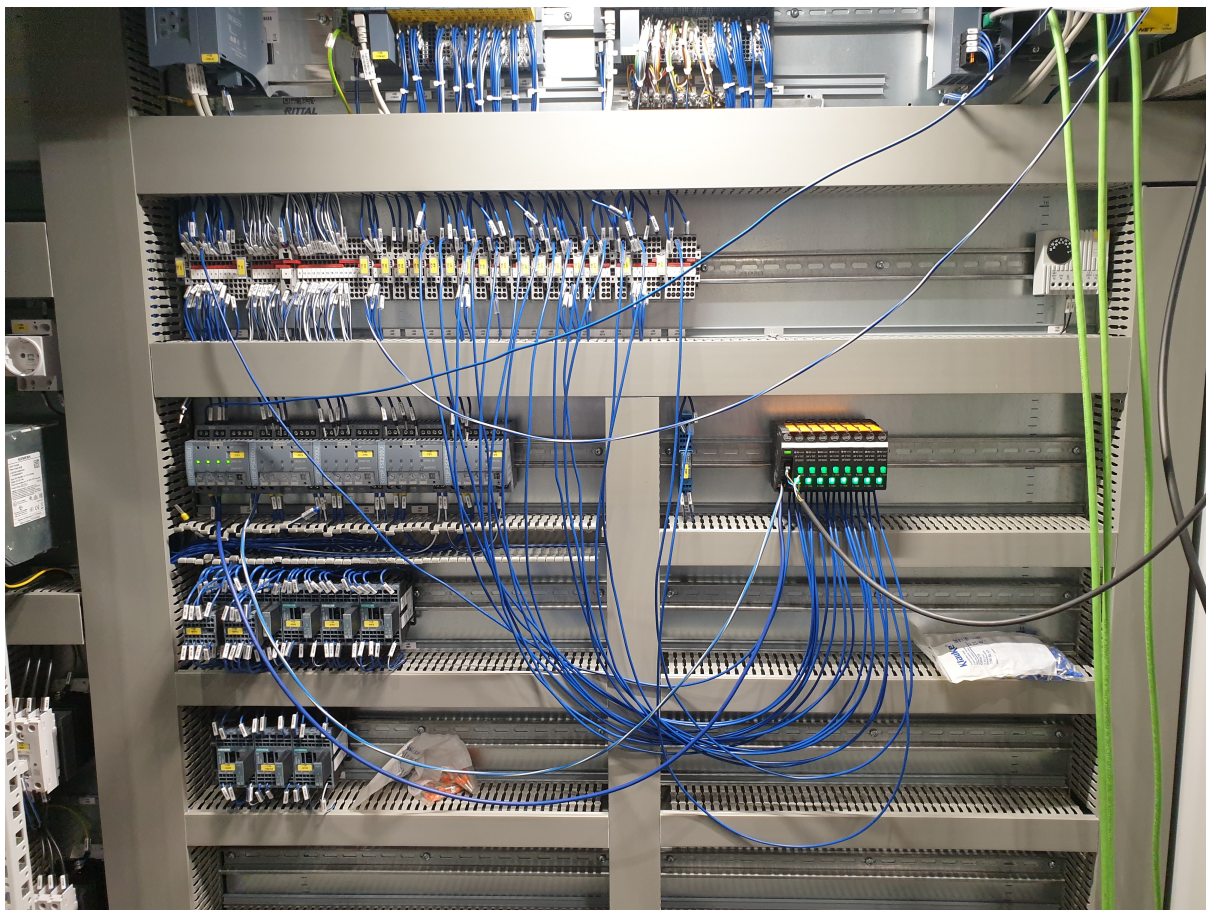
Die PC-basierte Datenbank bietet eine gute Möglichkeit, die Messwerte zu speichern und zu analysieren. Eine Anlage konnte im Versuch mit den gewonnenen Informationen verbessert werden; insbesondere wurde ein Problem aufgedeckt, welches zu irregulären Überstromereignissen in der 24V Unterverteilung führt. Die Messdaten können auch für die Dokumentation neuer Anlagen verwendet werden, indem das System zukünftig während der Qualitätskontrolle eingesetzt wird. In Zukunft wird die Software durch ihren modularen Aufbau noch mehr Anlagentypen unterstützen können und deren Konstrukteuren steht es offen weitere Middleware-Module zur Datenanalyse und -aufbereitung zu entwickeln.

Literatur

- [1] *Betriebsanleitung Kernschießmaschine LFB65*. 113638-02.03-001. Laempe Mössner Sinto GmbH. 2022.
- [2] *Betriebsanleitung Kernschießmaschine LL20*. 113620-02.03-001. Laempe Mössner Sinto GmbH. 2022.
- [3] Paul Brooks. „EtherNet/IP: Industrial Protocol White Paper“. In: 2001. URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/enet-wp001_en-p.pdf.
- [4] E Paul DeGarmo, J T Black und Ronald A Kohser. *Materials and processes in manufacturing*. 9. Aufl. Nashville, TN: John Wiley & Sons, Jan. 2004.
- [5] „EPLAN Kernschießmaschine LFB65“. 2022.
- [6] „EPLAN Kernschießmaschine LL20“. 2022.
- [7] Laempe Mössner Sinto GmbH. In: (Okt. 2022). URL: <https://www.laempe.com/>.
- [8] „Harmonic Resonance in Power Systems“. In: *Voltage Disturbance* (Mai 2019). URL: <https://voltage-disturbance.com/power-quality/harmonic-resonance-in-power-systems/>.
- [9] *MELSEC iQ-R Programmable Controller CPU Module User's Manual*. Version 1. Mitsubishi Electric Corporation. 2022. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/plc/sh082488eng/sh082488enga.pdf>.
- [10] J Mueller. *PLC-Connector Software*. VCS. Dez. 2022. URL: <https://github.com/jm-hsa/plc-connector>.
- [11] „PROFINET - Die Lösungsplattform für die Prozessautomatisierung“. In: (Juni 2018). URL: <https://de.profinet.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=133941&token=6fe9bec50142ed0883d65cd69c665a9740d1231c>.

Anhang

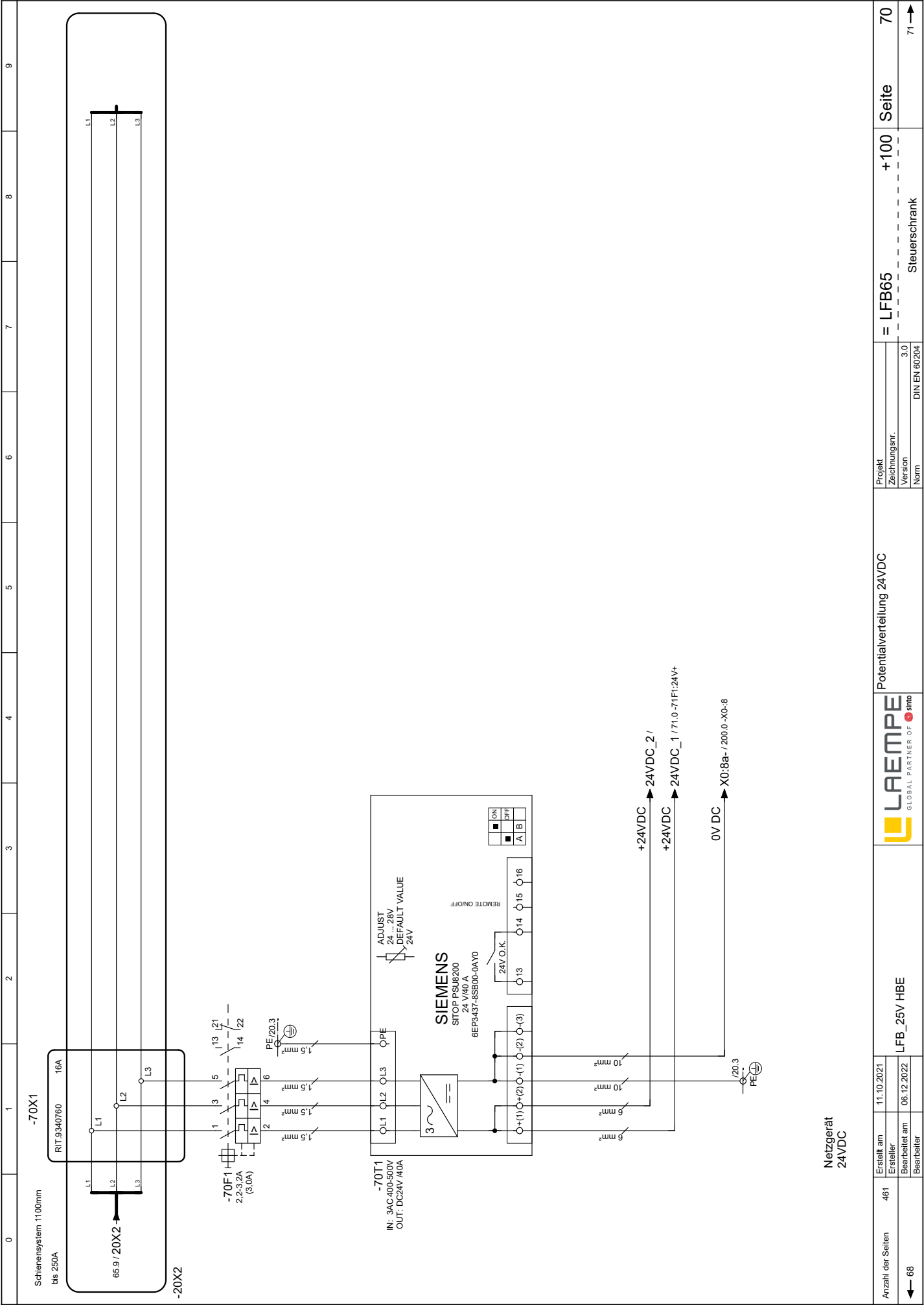
I IFM Sicherungen im Schaltschrank der LFB Anlage



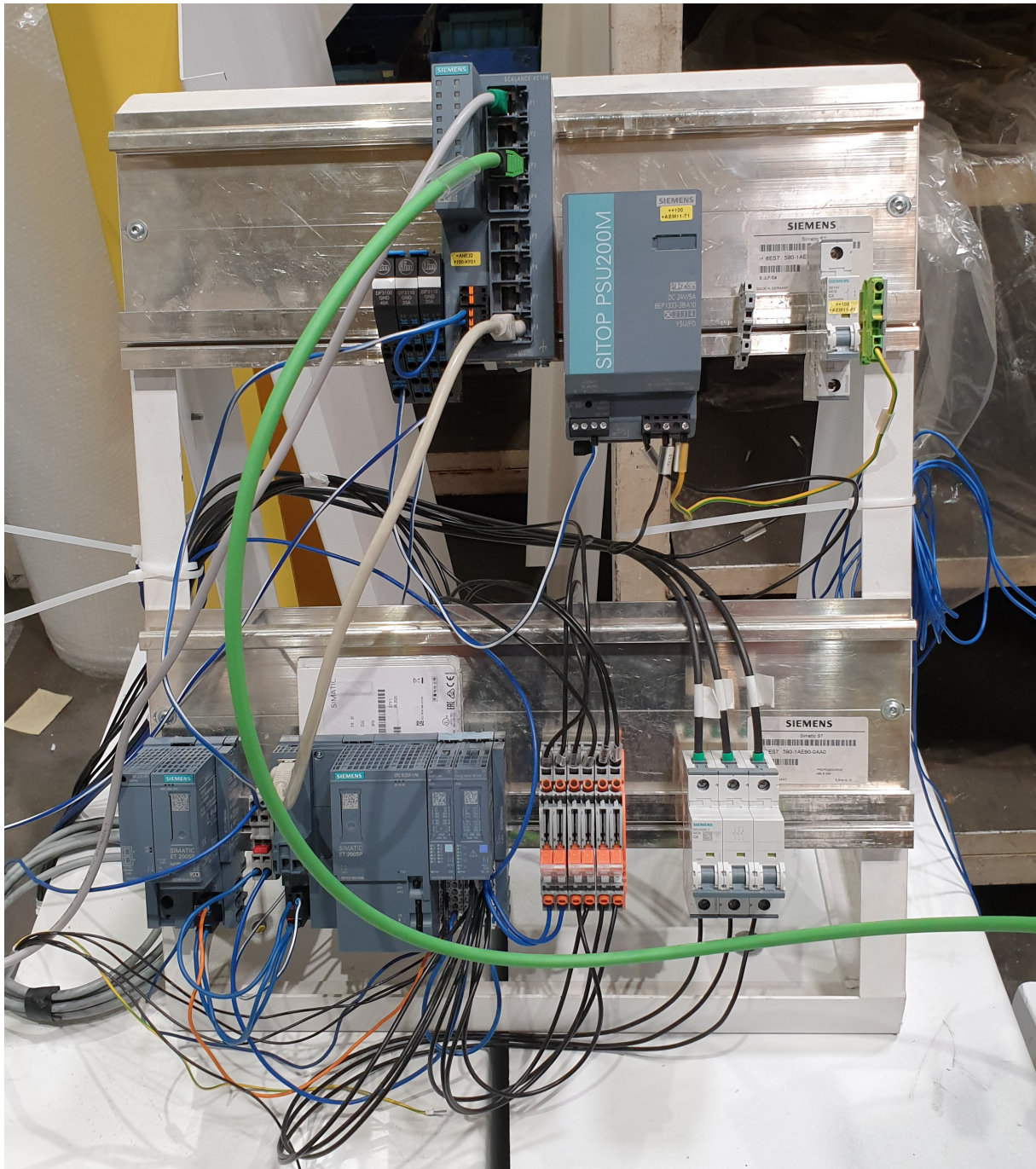
II Änderungen an der LFB65 Anlage

Modifizierter EPLAN der LFB65 Anlage mit den Änderungen, die für die Messung der Energieverbrauchsweite notwendig waren. Die originalen Zeichnungen wurden von einem anderen Mitarbeiter der LMS erstellt. vgl. [5]

(nächste Seite)



III Datenerfassung an der LFB Anlage



IV PLC Programm der ET200SP in den Versuchen 1 und 2

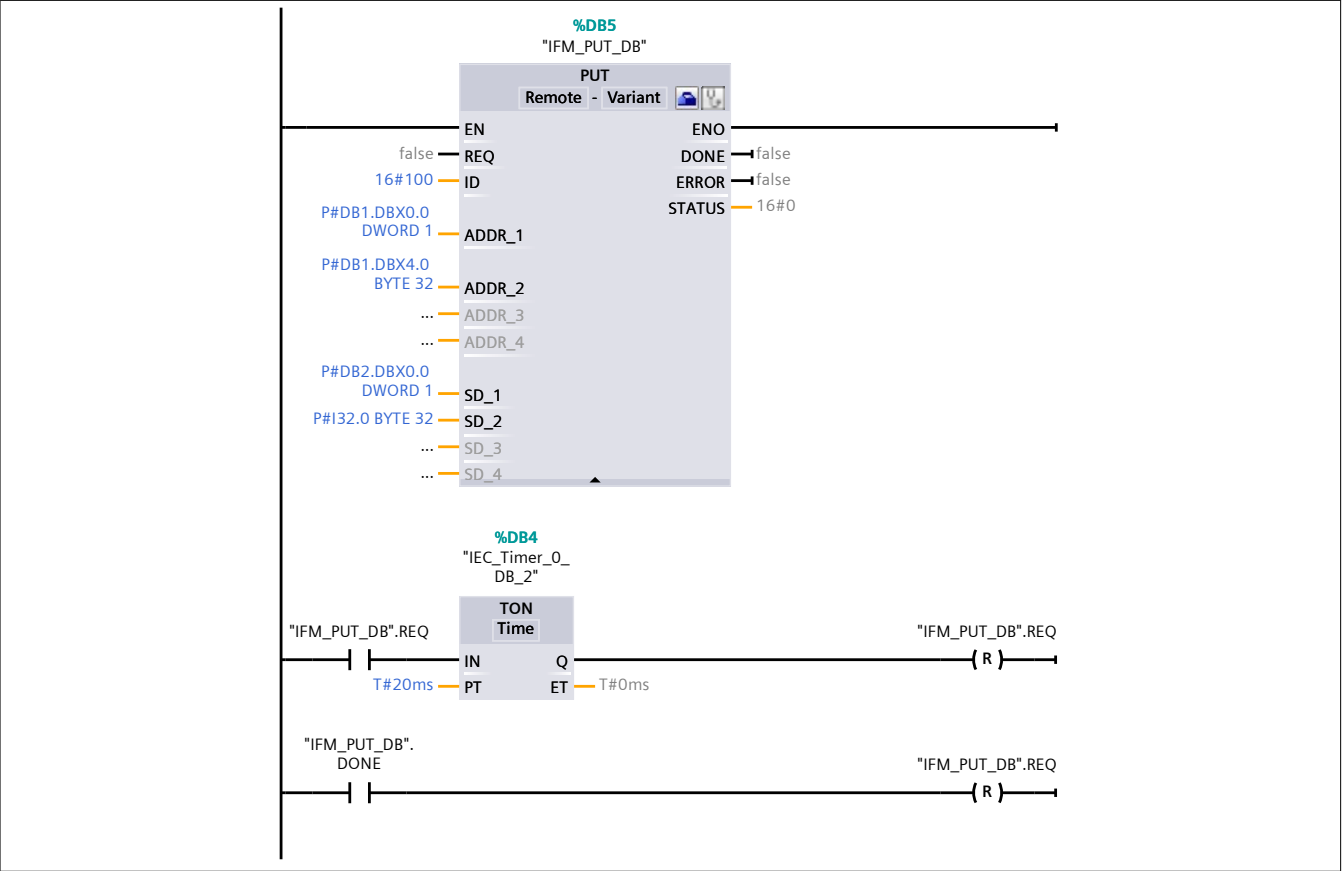
(nächste Seite)

Main [OB1]

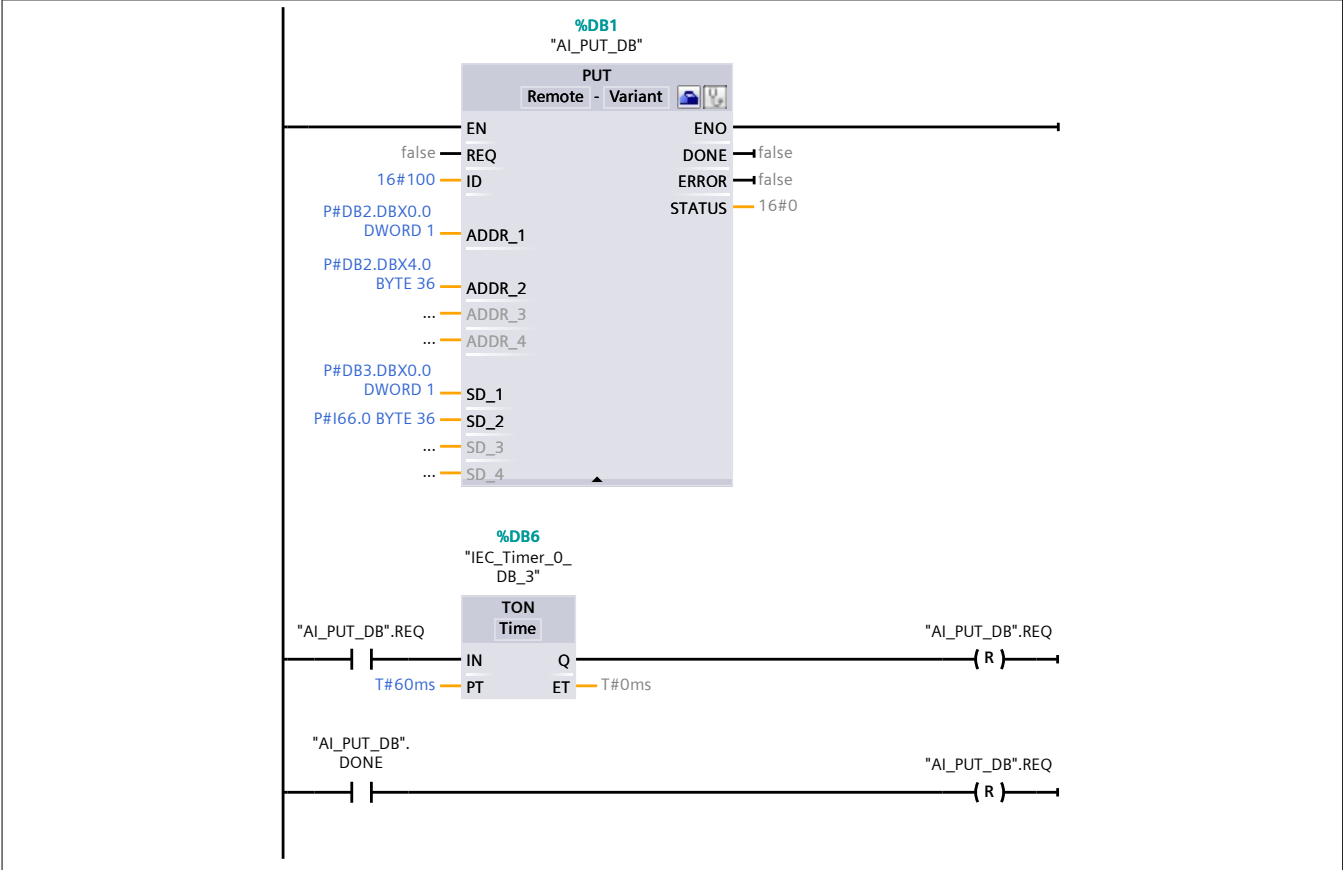
Main Eigenschaften					
Allgemein					
Name	Main	Nummer	1	Typ	OB
Sprache	KOP	Nummerierung	Automatisch		
Information					
Titel	"Main Program Sweep (Cycle)"	Autor		Kommentar	
Familie		Version	0.1	Anwenderdefinierte ID	

Name	Datentyp	Defaultwert
▼ Input		
Initial_Call	Bool	
Remanence	Bool	
▼ Temp		
time	DWord	
Constant		

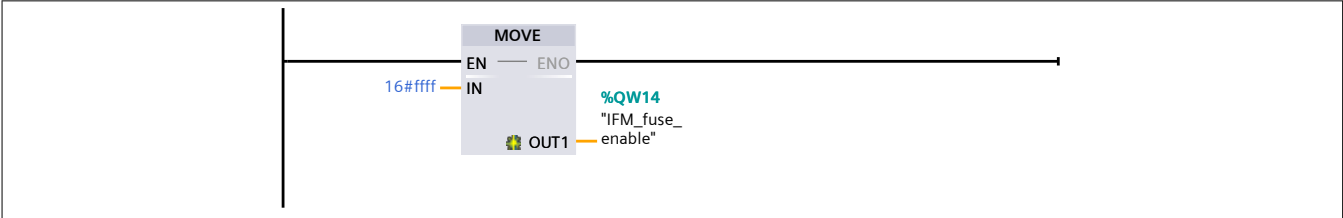
Netzwerk 1:



Netzwerk 2:



Netzwerk 3:

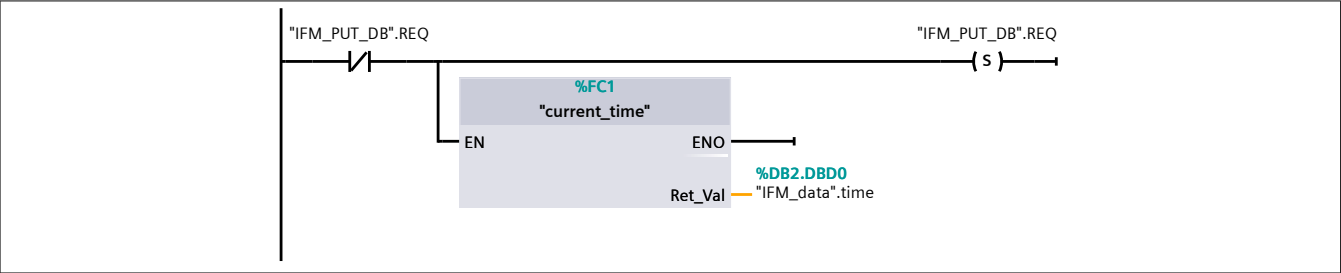


Cyclic interrupt 20ms [OB30]

Cyclic interrupt 20ms Eigenschaften					
Allgemein					
Name	Cyclic interrupt 20ms	Nummer	30	Typ	OB
Sprache	KOP	Nummerierung	Automatisch		
Information					
Titel		Autor		Kommentar	
Familie		Version	0.1	Anwenderdefinierte ID	

Name		Datentyp	Defaultwert
▼ Input			
Initial_Call		Bool	
Event_Count		Int	
Temp			
Constant			

Netzwerk 1:

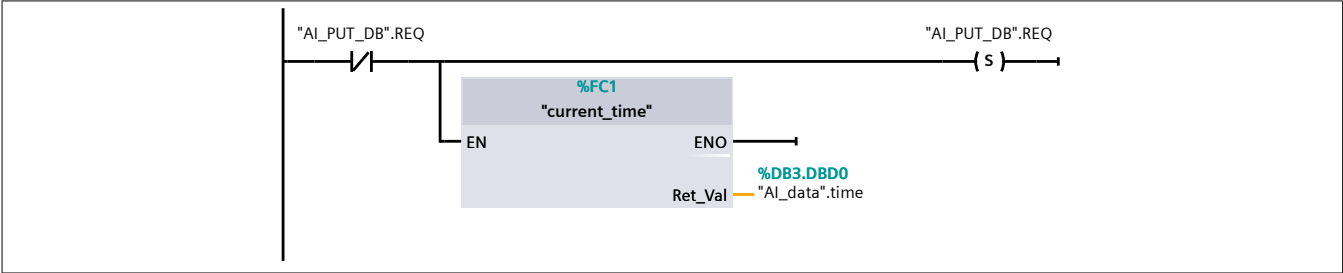


Cyclic interrupt 60ms [OB31]

Cyclic interrupt 60ms Eigenschaften					
Allgemein					
Name	Cyclic interrupt 60ms	Nummer	31	Typ	OB
Sprache	KOP	Nummerierung	Automatisch		
Information					
Titel		Autor		Kommentar	
Familie		Version	0.1	Anwenderdefinierte ID	

Name		Datentyp	Defaultwert
▼ Input			
Initial_Call		Bool	
Event_Count		Int	
Temp			
Constant			

Netzwerk 1:



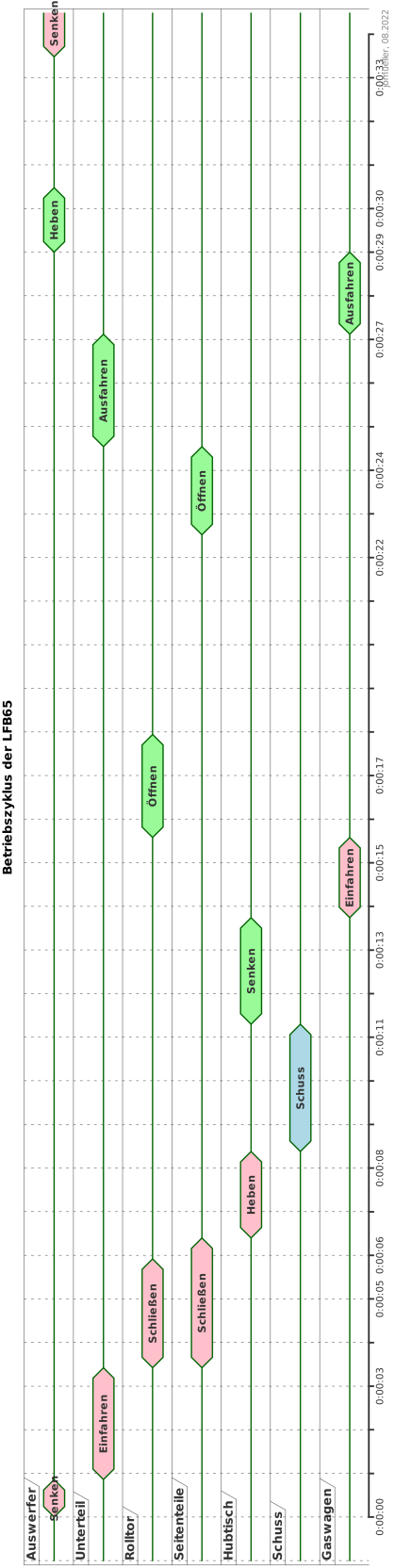
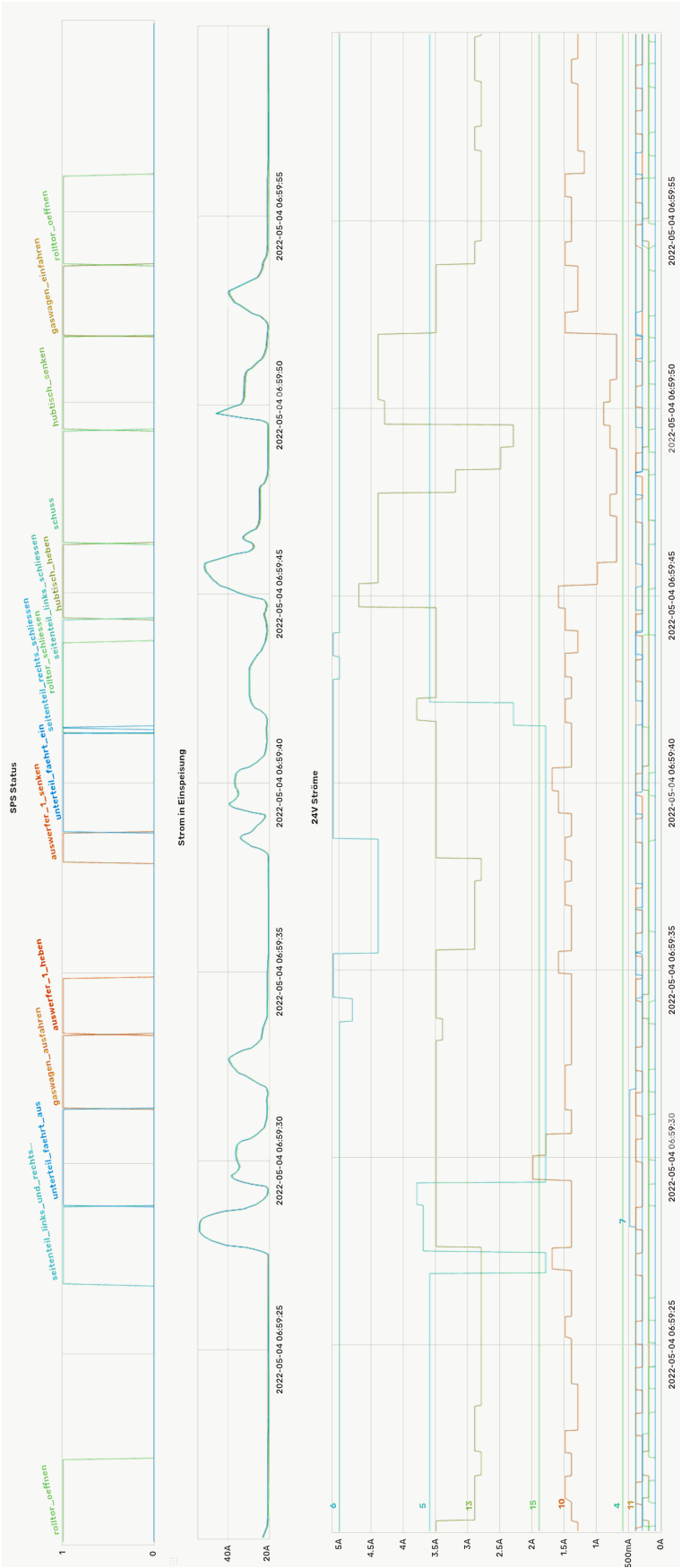
V PLC Datenbaustein der LFB65 Kernschießmaschine

Offset in DB3	BE Bit Index	Name
Byte 0	Bit 7	Unterteil einfahren
Byte 0	Bit 6	Unterteil ausfahren
Byte 0	Bit 5	Auswerfer 1 heben
Byte 0	Bit 4	Auswerfer 1 senken
Byte 0	Bit 3	Auswerfer 2 heben
Byte 0	Bit 2	Auswerfer 2 senken
Byte 0	Bit 1	Abdrücker Seitenteil links einfahren
Byte 0	Bit 0	Abdrücker Seitenteil links ausfahren
Byte 1	Bit 7	Abdrücker Seitenteil rechts einfahren
Byte 1	Bit 6	Abdrücker Seitenteil rechts ausfahren
Byte 1	Bit 5	Rolltor schließen
Byte 1	Bit 4	Rolltor öffnen
Byte 1	Bit 3	Gaswagen ausfahren
Byte 1	Bit 2	Gaswagen einfahren
Byte 1	Bit 1	Schwenkplatte abklappen
Byte 1	Bit 0	Schwenkplatte einklappen
Byte 2	Bit 7	Losteil 1 Unterteil einfahren
Byte 2	Bit 6	Losteil 1 Unterteil ausfahren
Byte 2	Bit 5	Losteil 2 einfahren
Byte 2	Bit 4	Losteil 2 ausfahren
Byte 2	Bit 3	Losteil 3 einfahren
Byte 2	Bit 2	Losteil 3 ausfahren
Byte 2	Bit 1	Losteil 4 einfahren
Byte 2	Bit 0	Losteil 4 ausfahren
Byte 3	Bit 7	Losteil 5 einfahren
Byte 3	Bit 6	Losteil 5 ausfahren
Byte 3	Bit 5	Seitenteil links schließen
Byte 3	Bit 4	Seitenteil rechts schließen
Byte 3	Bit 3	Seitenteil links und rechts öffnen
Byte 3	Bit 2	Sandschleuse schließen
Byte 3	Bit 1	Sandschleuse öffnen
Byte 3	Bit 0	Sandmessung 3 Wege Ventil schließen
Byte 4	Bit 7	Sandmessung 3 Wege Ventil öffnen
Byte 4	Bit 6	Schuss
Byte 4	Bit 5	Hubtisch senken
Byte 4	Bit 4	Hubtisch heben
Byte 4	Bit 3	Oberteil heben
Byte 4	Bit 2	Oberteil senken
Byte 4	Bit 1	

Offset in DB3	BE Bit Index	Name
Byte 4	Bit 0	

Tabelle 4: Struktur des Datenbausteins DB3 im LFB Versuch

VI Messergebnisse eines Anlagenzykles an der LFB65



VII PLC Tags der LL20 Kernschießmaschine

Tag[Byte Offset]	BE Bit Index	Name
B14[31]	1	ejector_move_down
B14[32]	1	ejector_move_up
B14[34]	1	carriage_move_out
B14[35]	1	carriage_move_in
B14[37]	1	side_clamps_open
B14[38]	1	side_clamps_close
B14[42]	1	table_move_down
B14[43]	1	table_move_up
B14[45]	1	gassing_platemove_out
B14[46]	1	gassing_plate_move_in
B14[48]	1	cope_eject_plate_move_out
B14[49]	1	cope_eject_plate_move_in
B14[51]	1	top_part_move_up
B14[52]	1	top_part_move_down
B14[54]	1	front_door_open
B14[55]	1	front_door_close
B14[57]	1	pneumatic_loose_part_1_move_out
B14[58]	1	pneumatic_loose_part_1_move_in
B14[60]	1	hydraulic_loose_part_2_move_out
B14[61]	1	hydraulic_loose_part_2_move_in
B14[63]	1	hydraulic_loose_part_3_move_out
B14[64]	1	hydraulic_loose_part_3_move_in
B14[69]	1	clamping_device_side_clamp_left_clamp
B14[70]	1	clamping_device_side_clamp_left_loose
B14[72]	1	clamping_device_side_clamp_right_clamp
B14[73]	1	clamping_device_side_clamp_right_loose
B14[81]	1	clamping_device_shoot_plate_clamp
B14[82]	1	clamping_device_shoot_plate_loose
B14[83]	1	sand_refill
B14[84]	1	sand_gate_close
B14[85]	1	sand_gate_open
B14[93]	1	shoot
B14[103]	1	clamping_device_gassing_plate_clamp
B16[12]	1	central_amine_supply_refill
B16[13]	1	gassing
B16[15]	1	gas_generator_process_coldbox_betaset
B18[31]	1	mixer_lid_move_up
B18[32]	1	mixer_lid_move_down
B18[35]	7	mixer_wing_motor_on
B18[37]	1	mixer_move_up

Tag[Byte Offset]	BE Bit Index	Name
B18[38]	1	mixer_move_down
B18[40]	1	sand_dosing_unit_inlet
B18[42]	1	sand_dosing_unit_outlet
B18[44]	1	binder_1_sucking
B18[45]	1	binder_1_blowing
B18[47]	1	binder_2_suction
B18[48]	1	binder_2_blowing
B18[50]	1	binder_3_sucking
B18[51]	1	binder_3_blowing
B18[53]	1	binder_4_sucking
B18[54]	1	binder_4_blowing
B18[59]	1	additive_1_dosing
B18[60]	1	additive_2_dosing
B18[62]	1	mixer_bowl_direction_eject_1_machine
B18[63]	1	mixer_bowl_direction_eject_2_scrap
B18[65]	1	cleaning_cylinder_move_up
B18[66]	1	cleaning_cylinder_move_down
B18[68]	1	mixer_sand_slide_move_to_machine
B18[69]	1	mixer_sand_slide_move_to_scrap
B18[71]	1	vertical_mixersand_slide_gateclose
B18[72]	1	vertical_mixer_sand_slide_gateopen
B18[73]	1	sand_sender

Tabelle 5: Ausgelesene PLC-Tags im LL20 Versuch

VIII DF2101 Datenblatt

Quelle: <https://www.ifm.com/de/de/product/DF2101>

Stand: 01.10.2021

(nächste Seite)

DF

Vendor ID 310 / 0x0136 Bytes: 01 54 / 0x01 0x36
Device ID 892 / 0x00037C Bytes: 00 03 124 / 0x00 0x03 0x7C
Vendor Name ifm electronic gmbh
Vendor Text www.ifm.com
Vendor URL <http://www.ifm.com/ifmgb/web/io-link-download.htm>



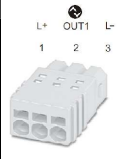

Communication

IO-Link Revision V1.1
Bitrate COM2
Minimum Cycle Time 20.00 ms
SIO Mode Supported NO

Features

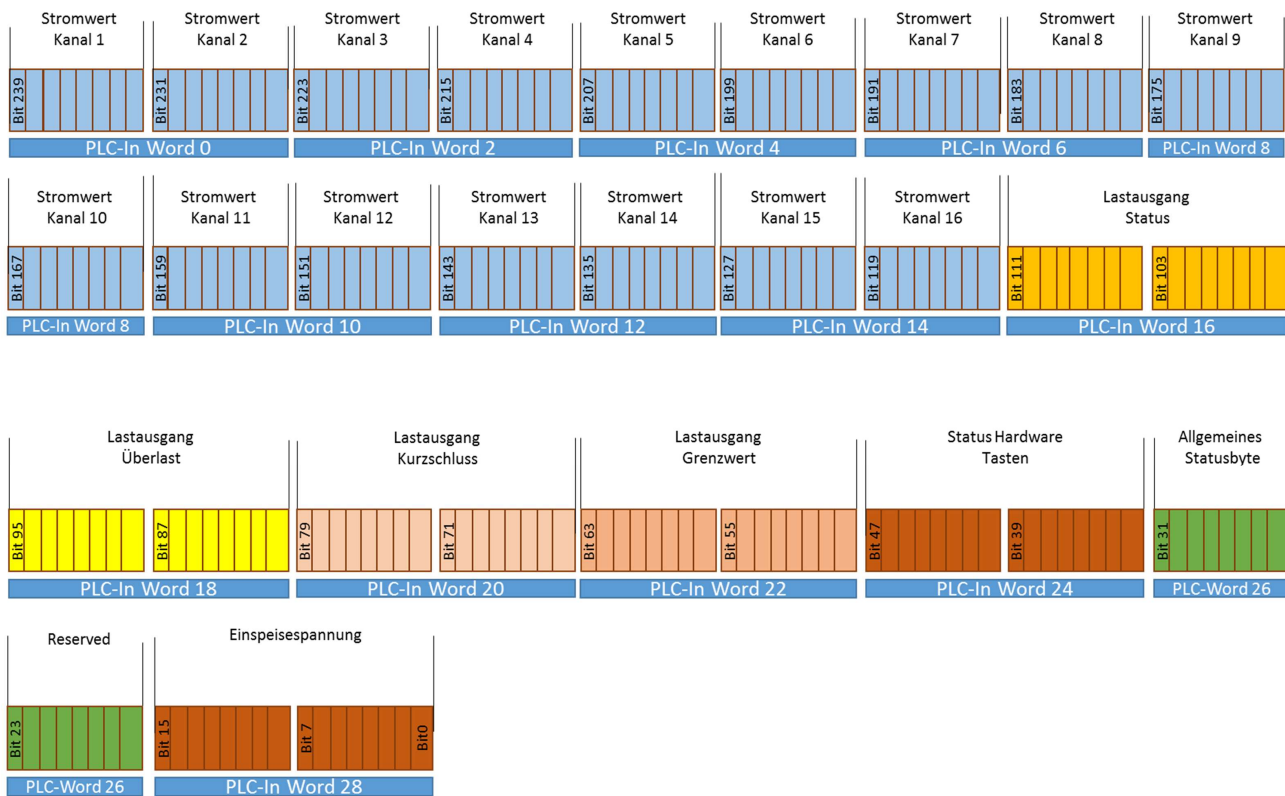
Block parametrization Yes
Data storage Yes

Device Variant

DF2101	Fuse/IO-Link / 24VDC/Module		
--------	-----------------------------	---	---

Process Data Total BitLength = 240
(Eingangs-Prozessdaten)

Name	Description	Datatype	Bitlength	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Laststrom F1	Aktueller Strom Kanal 1	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F2	Aktueller Strom Kanal 2	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F3	Aktueller Strom Kanal 3	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F4	Aktueller Strom Kanal 4	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F5	Aktueller Strom Kanal 5	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F6	Aktueller Strom Kanal 6	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F7	Aktueller Strom Kanal 7	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F8	Aktueller Strom Kanal 8	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F9	Aktueller Strom Kanal 9	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F10	Aktueller Strom Kanal 10	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F11	Aktueller Strom Kanal 11	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F12	Aktueller Strom Kanal 12	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F13	Aktueller Strom Kanal 13	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F14	Aktueller Strom Kanal 14	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F15	Aktueller Strom Kanal 15	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Laststrom F16	Aktueller Strom Kanal 16	Unsigned CharacterT	8	0 to 255	0.1	0	A
Lastausgang Status	Aktueller Status des Lastausgangs pro Sicherung (Kanal 1 bis 16 Bitweise)	Unsigned IntegerT	16	(false) inaktiv (true) aktiv			
Lastausgang Überlast	Anzeige einer Überlast pro Sicherung (Kanal 1 bis 16 Bitweise)	Unsigned IntegerT	16	(false) inaktiv (true) aktiv			
Lastausgang Kurzschluss	Anzeige eines Kurzschlusses pro Sicherung (Kanal 1 bis 16 Bitweise)	Unsigned IntegerT	16	(false) inaktiv (true) aktiv			
Lastausgang Grenzwert	Anzeige des erreichten Grenzwertes pro Sicherung (Kanal 1 bis 16 Bitweise)	Unsigned IntegerT	16	(false) inaktiv (true) aktiv			
Status Hardware Taster	Anzeige ob über den Hardware- Taster am Gerät abgeschaltet wurde (Kanal 1 bis 16 Bitweise)	Unsigned IntegerT	16	(false) inaktiv (true) aktiv			
Allgemeines Statusbyte	Anzeige der Unterspannung im Bit 0 (alle weiteren Bytes sind reserviert)	Unsigned IntegerT	8	(false) inaktiv (true) aktiv			
Reserved			8				
Versorgungsspannung	Aktuelle Speisespannung	Unsigned IntegerT	16	0 to 65535	0.01	0	V

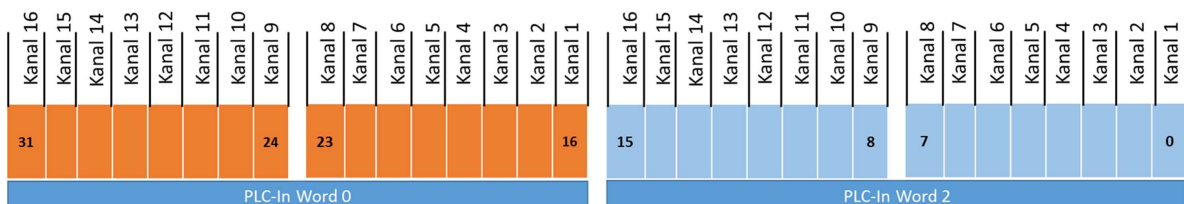


Process Data Total BitLength = 32
(Ausgangs-Prozessdaten)

Name	Description	Datatype	Bitoffset	Bitlength	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Lastausgang Rücksetzen	Der jeweilige Lastausgang kann zurückgesetzt werden (Kanal 1 bis 16 Bitweise)	Unsigned IntegerT	16	16	(false) inaktiv (true) aktiv			
Lastausgang ein/aus	Der jeweilige Lastausgang kann ein- und ausgeschaltet werden (Kanal 1 bis 16 Bitweise)	Unsigned IntegerT	0	16	false) inaktiv (true) aktiv			

false = Lastausgang ausschalten

true = Lastausgang einschalten bzw. zurücksetzen



Variables

Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Standardkommando		2	Sub 0	UIntegerT	8 Bit	wo		(5) Aktivierung Datastorage (130) Auslieferungszustand wiederherstellen (240) IO-Link 1.1 Systemtest Kommando 240, Event 8DFE kommt (241) IO-Link 1.1 Systemtest Kommando 241, Event 8DFE geht (242) IO-Link 1.1 Systemtest Kommando 242, Event 8DFF kommt (243) IO-Link 1.1 Systemtest Kommando 243, Event 8DFF geht (255) Kommando Ohne Auswirkung,nur für internen Gebrauch			

Variables

Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Device Access Lock		12	Sub 0	RecordT	16 Bit	rw					
Datenspeicherungssperre			bitOffs 1	BooleanT	1 Bit		(0)				
Lokale Benutzerinterface-Sperre			bitOffs 3	BooleanT	1 Bit		(0)				
Herstellername		16	Sub 0	StringT	19 octets	ro	ifm electronic gmbh				
Herstellertext		17	Sub 0	StringT	11 octets	ro	www.ifm.com				
Produktname		18	Sub 0	StringT	6 octets	ro	DF2101				
Produkt-ID		19	Sub 0	StringT	6 octets	ro	DF2101				
Produkttext		20	Sub 0	StringT	29 octets	ro	Fuse/IO-Link / 24VDC/Module				
Seriennummer		21	Sub 0	StringT	10 octets	ro					
Hardwareversion		22	Sub 0	StringT	1 octets	ro					
Firmwareversion		23	Sub 0	StringT	5 octets	ro					
Anwendungsspezifische Markierung		24	Sub 0	StringT	32 octets	rw	***				

Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Parameter Channel 1-16 Nennstrom	Parameter Kanal	101-116	Sub 0 bitOffset 8	RecordT UIntegerT	16 Bit 8 Bit	rw		(2) 2A (4) 4A (6) 6A (8) 8A (10) 10A (1) 1 to 10A 50 to 100	1	0	A
Grenzwert Laststrom			bitOffset 0	UIntegerT	8 Bit		80		1	0	%
Device always on	Verhindert ein überschreiben der SPS	199	bitOffset 0	UIntegerT	16 bit	rw	65535 (alle Kanäle)	0 to 65535			
ELBus controller configuration	Konfigurationsdaten des Intelligenten Einspeisemoduls DF2101	200	Sub 0	RecordT	8 Bit	rw	2	(0) Unfreeze - alle Lastausgänge der Sicherungsautomaten werden ausgeschaltet und das DF2101 wechselt in die Betriebsart „Unabhängiger Betrieb“. (2) Freeze - alle Lastausgänge der Sicherungsautomaten behalten ihren aktuellen Zustand und das DF2101 wechselt in die Betriebsart „Unabhängiger Betrieb“. (4) Energiesparmodus aktiviert und Unfreeze			

Page 7

								(8) Energiesparmodus aktiviert und Freeze			
Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
System Errors	Diagnoseinformationen des intelligenten Einspeisemoduls DF2101	300	Sub 0	UIntegerT	16 Bit	ro	0	(0) Kein Fehler vorhanden (1) Hardware Error im Konfigurations-Speicher (2) Checksum in Konfigurations-Speicher. Neue Parameter sind notwendig. (16) Kommandospeicher voll Der IO-Link Master sendet schneller Anfragen als diese bearbeitet werden können. (128) ELBus Hardware Error Mögliche Ursache ist ein Kurzschluss auf dem ELBus. (512) Watchdog verursachte Reset. Ein temporärer Fehler ist aufgetreten.			

Page 8

								Dieser Fehler kann durch starke EMV verursacht werden.			
Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
System Errors	Diagnoseinformationen des intelligenten Einspeisemoduls DF2101	300	Sub 0	UIntegerT	16 Bit	w		(1024) Hardware Fehler. Interne Testroutinen haben einen Hardwarefehler erkannt. Kontaktieren Sie bitte den Hersteller.			
Error Channel 1-16	Diagnosemeldungen Kanal	301 - 316	Sub 0	UIntegerT	8 Bit	r	0	(0) No Error (1) Nicht unterstütztes Gerät entdeckt. Es wurde ein nicht unterstützter Schutzschalter in das System integriert (2) Kein Gerät vorhanden (144) Die übertragenen Geräte Parameter wurden von dem Schutzschalter abgelehnt, weil sie außerhalb des gültigen Bereichs liegen			

Page 9

Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Error Channel 1-16	Diagnosemeldungen Kanal	301 - 316	Sub 0	UIntegerT	8 Bit	r		(146) Kanal gesperrt Der Kanal wurde durch Betätigung des integrierten Tasters gesperrt und kann nicht durch den IO-Link Master eingeschaltet werden (147) Unterspannung erkannt. Die Betriebsspannung liegt unterhalb des sicheren Bereichs. (148) Übertemperatur (abhängig vom Schutzschalter) (149) Gerät hat ausgelöst. Es muss ein Rücksetzbefehl geschickt werden (151) Der Schutzschalter ist nicht parametrisiert (152) Es wurde ein interner Gerätefehler erkannt			

Page 10

Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Error Channel 1-16	Diagnosemeldungen Kanal	301 - 316	Sub 0	UIntegerT	8 Bit	r		(153) Unbekanntes Kommando (154) ELBus Fehler, falsche Framelänge (155) Interner ELBus Fehler erkannt (temporäre Störung) Dieser Fehler kann durch starke EMV verursacht werden.			
Voltage Channel 1-16	Lastspannung Kanal	401- 416	Sub 0	UIntegerT	16 Bit	r		0 to 3000	0.01	0	V
Extended Information Channel 1-16 Fehlerspeicher	Erweiterte Diagnosemeldungen (Dynamic Info) Kanal	501- 516	Sub 0	UIntegerT	24 Bit	r	0				
			bitOffs 16	UIntegerT	8 Bit	ro	0	(0) No Error (1) Keine Parameter vorhanden (2) Fehler Parameterspeicher (4) Fehler Programmspeicher (8) Fehler Datenspeicher (16) Fehler Steuereinheit			

Page 11

Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Extended Information Channel 1-16 Fehlerspeicher	Erweiterte Diagnosemeldungen (Dynamic Info) Kanal	501- 516	Sub 0	UIntegerT	24 Bit	r	0				
			bitOffs 16	UIntegerT	8 Bit	ro	0	(32) Reset durch Watchdog Aufgetreten			
Auslösezähler			bitOffs 8	UIntegerT	8 Bit	ro	0	0 to 255	1	0	
Auslösegrund			bitOffs 0	UIntegerT	8 Bit	ro	0	(0) Kein Auslösegrund Vorhanden (1) Kurzschluss (2) Überlast (4) Interner Gerätefehler			
Action Channel 1-16 Fehlerspeicher rücksetzen Auslösezähler rücksetzen Minimalwertespeicher rücksetzen Maximalwertespeicher rücksetzen Mittelwertespeicher rücksetzen	Aktionsbefehle Kanal 1 -16	601- 616	Sub 0	UIntegerT	8 Bit	w					
			bitOffs 0	UIntegerT	8 Bit	w		(115)			
			bitOffs 0	UIntegerT	8 Bit	w		(116)			
			bitOffs 0	UIntegerT	8 Bit	w		(117)			
			bitOffs 0	UIntegerT	8 Bit	w		(118)			
			bitOffs 0	UIntegerT	8 Bit	w		(119)			

Page 12

Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Informations channel 1-16 Gerätetyp	Geräteinformationen Kanal 1-16	701- 716	Sub 0	RecordT	80 Bit	r					
			bitOffs 0	UIntegerT	16 Bit	ro		(0) No device detected. Either there are no devices, or they are not powered. (36873) Fuse/IOLink/1 Channel (36875) DF22xx Fuse/IOLink/2 Channels (36875) Fuse/IOLink/4 Channels"			
Hardwareversion			bitOffs 16	UIntegerT	16 Bit	ro					
Softwareversion			bitOffs 32	UIntegerT	16 Bit	ro					
Seriennummer des Sicherungsschalters			bitOffs 48	UIntegerT	32 Bit	ro					

Page 13

Name	Description	Index	Subindex bitOffset	DataType	Length	Access Rights	Default	Value Range	Gradient	Offset	Unit
Informations channel 1-16	Minimal und Maximalwert Speicher 1-16	801- 816	Sub 0	RecordT	96 Bit	r					
Min Load Current			bitOffs 0	UIntegerT	16 Bit	ro	0	0 to 65535	0.01	0	A
Max Load Current			bitOffs 16	UIntegerT	16 Bit	ro	0	0 to 65535	0.01	0	A
Avg Load Current			bitOffs 32	UIntegerT	16 Bit	ro	0	0 to 65535	0.01	0	A
Min Load Voltage			bitOffs 48	UIntegerT	16 Bit	ro	0	0 to 65535	0.01	0	V
Max Load Voltage			bitOffs 64	UIntegerT	16 Bit	ro	0	0 to 65535	0.01	0	V
Avg Load Voltage			bitOffs 80	UIntegerT	16 Bit	ro	0	0 to 65535	0.01	0	V

Page 14

Events

Code	Name	Type	Description
6145 d / 1801 h	F1: Device parameters have changed	Warning	F1 Trip Current changed
6146 d / 1802 h	F2: Device parameters have changed	Warning	F2 Trip Current changed
6147 d / 1803 h	F3: Device parameters have changed	Warning	F3 Trip Current changed
6148 d / 1804 h	F4: Device parameters have changed	Warning	F4 Trip Current changed
6149 d / 1805 h	F5: Device parameters have changed	Warning	F5 Trip Current changed
6150 d / 1806 h	F6: Device parameters have changed	Warning	F6 Trip Current changed
6151 d / 1807 h	F7: Device parameters have changed	Warning	F7 Trip Current changed
6152 d / 1808 h	F8: Device parameters have changed	Warning	F8 Trip Current changed
6153 d / 1809 h	F9: Device parameters have changed	Warning	F9 Trip Current changed
6154 d / 180A h	F10: Device parameters have changed	Warning	F10 Trip Current changed
6155 d / 180B h	F11: Device parameters have changed	Warning	F11 Trip Current changed
6156 d / 180C h	F12: Device parameters have changed	Warning	F12 Trip Current changed
6157 d / 180D h	F13: Device parameters have changed	Warning	F13 Trip Current changed
6158 d / 180E h	F14: Device parameters have changed	Warning	F14 Trip Current changed
6159 d / 180F h	F15: Device parameters have changed	Warning	F15 Trip Current changed
6160 d / 1810 h	F16: Device parameters have changed	Warning	F16 Trip Current changed
6176 d / 1820 h	System Error	Warning	System Error: Extended information available at index 300
6177 d / 1821 h	DeviceError	Warning	Device Error F1: Extended information available at 301
6178 d / 1822 h	DeviceError	Warning	Device Error F2: Extended information available at 302
6179 d / 1823 h	DeviceError	Warning	Device Error F3: Extended information available at 303
6180 d / 1824 h	DeviceError	Warning	Device Error F4: Extended information available at 304
6181 d / 1825 h	DeviceError	Warning	Device Error F5: Extended information available at 305
6182 d / 1826 h	DeviceError	Warning	Device Error F6: Extended information available at 306

Page 15

Code	Name	Type	Description
6183 d / 1827 h	DeviceError	Warning	Device Error F7: Extended information available at 307
6184 d / 1828 h	DeviceError	Warning	Device Error F8: Extended information available at 308
6185 d / 1829 h	DeviceError	Warning	Device Error F9: Extended information available at 309
6186 d / 182A h	DeviceError	Warning	Device Error F10: Extended information available at 310
6187 d / 182B h	DeviceError	Warning	Device Error F11: Extended information available at 311
6188 d / 182C h	DeviceError	Warning	Device Error F12: Extended information available at 312
6189 d / 182D h	DeviceError	Warning	Device Error F13: Extended information available at 313
6190 d / 182E h	DeviceError	Warning	Device Error F14: Extended information available at 314
6191 d / 182F h	DeviceError	Warning	Device Error F15: Extended information available at 315
6192 d / 1830 h	DeviceError	Warning	Device Error F16: Extended information available at 316
36350 d / 8D FE h	Test Event 1	Warning	Event kommt bei Setzen von Index 2 auf den Wert 240, Event geht bei Setzen von Index 2 auf den Wert 241
36351 d / 8D FF h	Test Event 2	Warning	Event kommt bei Setzen von Index 2 auf den Wert 242, Event geht bei Setzen von Index 2 auf den Wert 243

Error Types

ErrorCode	Name	Description
32768 d / 80 00 h	Anwendungsfehler im Gerät - keine Details	Zugriff wurde vom Gerät verweigert. Es steht keine Detailinformation zur Verfügung
32785 d / 80 11 h	Index nicht vorhanden	Zugriff auf einen nicht existierenden Index
32816 d / 80 30 h	Parameterwert außerhalb des gültigen Bereichs	Geschriebener Parameterwert liegt außerhalb des zulässigen Wertebereichs
32819 d / 80 33 h	Parameterlänge zu groß	Geschriebene Parameterlänge ist größer als erlaubt
32820 d / 80 34 h	Parameterlänge zu klein	Geschriebene Parameterlänge ist kleiner als erlaubt
32822 d / 80 36 h	Funktion zur Zeit nicht verfügbar	Geschriebenes Kommando wird vom Gerät im aktuellen Zustand nicht unterstützt

Page 16

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorstehende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und mich anderer als der im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen übernommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Alle Internetquellen sind der Arbeit beigefügt. Des Weiteren versichere ich, dass ich die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe und dass die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem elektronischen Speichermedium entspricht.

Ort, Datum

Unterschrift