

FB6 - EMW

**Fachbereich Elektrotechnik, Maschinenbau
und Wirtschaftsingenieurwesen**
Campus Köthen

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)

—.-.2022

Abgabe am

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
2 Problemstellung	4
2.1 Zweck der Arbeit	5
2.2 Relation zu bestehenden Systemen	5
3 Grundlagen	6
3.1 Kernschießmaschinen	6
3.2 Topologie von industriellen Anlagen	7
3.3 Industrielle Steuerungen	7
3.4 Feldbusverteiler	7
3.5 Feldbussysteme	7
3.6 Strommessung	8
4 Lösungsansatz	9
4.1 Erfassung der Messwerte	9
4.2 Übertragung der Messwerte	10
4.3 Datenverarbeitung	10
4.4 Datenspeicherung	11
4.5 Visualisierung	11
5 Implementierung	12
5.1 Wahl des 480V-Sensorsystems	12
5.2 Wahl des 24V-Sensorsystems	14
5.3 Verarbeitungssoftware	15
6 Praktische Versuche	17
6.1 Siemens Anlage LFB65	17
6.2 Allen-Bradley Anlage LL20	20
6.3 Vergleich der Versuche	21
6.4 Ergebnisse	21
7 Fazit	22
Literaturverzeichnis	23
Anhang	24
Anhang A IFM Sicherungen im Schaltschrank der LFB Anlage	24
Anhang B Datenerfassung an der LFB Anlage	25
Anhang C PLC Datenbaustein der LFB65 Kernschießmaschine	26
Anhang D PLC Tags der LL20 Kernschießmaschine	27

Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht	4
2	Herstellung von Kernen	6
3	Bestandteile des Projekts	9
4	Programmablaufplan des PLC-Connectors	16
5	Siemens Versuch	18
6	AB Versuch	20
7	Messergebnisse eines Anlagenzykluses an der LFB65	22

Tabellenverzeichnis

1	Anbieter von Energieerfassungssystemen	13
2	Anbieter von 24V Strommesssystemen	15
3	Datenstruktur der AI-Energy-Meter-Karte	20
4	Struktur des Datenbausteins DB3 im LFB Versuch	26
5	Ausgelesene PLC-Tags im LL20 Versuch	28

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

EIP EtherNet/IP (IP = Industrial Protocol)

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

LE little-endian; Binärzahl, bei der die niedrigstwertigen Bits zuerst kommen

ADC Analog-Digital-Umsetzer

HMI Human-Machine-Interface; Bedienoberfläche für eingewiesene Personen

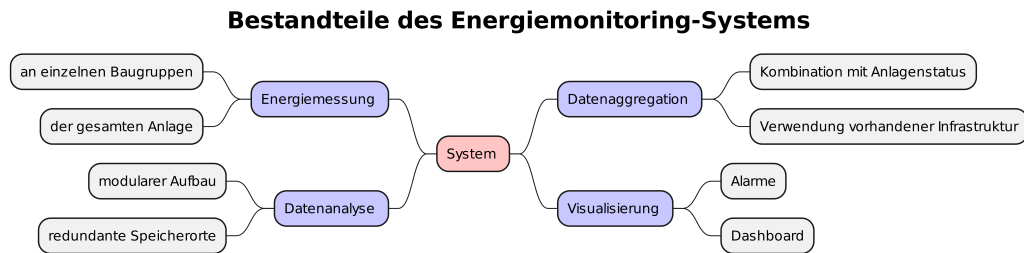
1 Einleitung

Es gibt viele gute Wege eine Messung durchzuführen, aber die darauffolgende Auswertung kann oft nur im Nachhinein manuell durchgeführt werden. Dazu kommt zusätzlich, dass im industriellen Umfeld viele proprietäre Lösungen existieren, die aber noch weniger Flexibilität als DIY-Systeme bieten. Sie decken dabei auch häufig nicht vollständig die Anforderungen der Kunden ab. Das hier vorgestellte System arbeitet hingegen direkt mit der bereits im Unternehmen etablierten Hardware zusammen und ermöglicht, dank Verwendung offener Standards, eine leicht erweiterbare Datenaggregation und die Möglichkeit der direkten programmatischen Analyse der Messwerte.

In Kooperation mit der *Laempe Mössner Sinto GmbH* (LMS) wird mit dieser Arbeit ein Energie-Monitoring-System entwickelt, welches Einblicke in die Effizienz und Fehlerprävention der im Unternehmen hergestellten Kernschießmaschinen geben kann.

2 Problemstellung

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 Optimierung des Betriebsablaufes beiträgt. Um dies zu erreichen, müssen Messwerte erhoben, analysiert und schließlich gespeichert werden. Eine mögliche Auslegungen dieser Teilfunktionen ist im 5. Kapitel: *Implementierung* aufgelistet. Folgende Darstellung zeigt die Bestandteile des entwickelten Monitoring-Systems:



jornueller, 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 werden beispielsweise am bestehenden Feldbus angeschlossen, welcher wiederum zu einem Interfacemodul führt. Für die Koordination der Interfacemodule ist in jeder Anlage bereits eine zentrale Steuerungseinheit (SPS oder CPU genannt) zuständig. Diese Steuerungen verwenden ein meist auf Ethernet basiertes Kommunikationsprotokoll, um mit dem Rest der Anlage zu kommunizieren. [8] Ihre Kommunikationspartner können zum Beispiel Interfacemodule, Human-Machine-Interfaces (HMI) oder andere Steuerungen aus anderen Anlagen sein.

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 an einer

echten Anlage getestet. Die dafür notwendigen Komponenten sollten leicht in den bestehenden Aufbau integrierbar sein. Zunächst sollen die elektrische Versorgung, 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 ist es auch sinnvoll die Rohwerte der Messungen zu sichern, um den Analyseschritt mithilfe von echten Messwerten exemplarisch zu testen.

Je präziser die Datenverarbeitung angesetzt ist, desto weniger Daten müssen anschließend gespeichert werden. In allen Fällen sind die zu speichernden Werte periodische Kennzahlen der einzelnen Prozessschritte, welche in einer zeitbasierten Datenbank abgelegt werden müssen. Nur wenn eine Kennzahl 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 ein modularer Aufbau verwendet, der es auch 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.

2.1 Zweck der Arbeit

Die LMS hat es sich als führender Anbieter von Kernschießmaschinen zur Aufgabe gemacht, die Effizienz ihrer Maschinen kontinuierlich zu verbessern[6]. Mit steigenden Energiekosten wird es auch immer bedeutender, wie sich der Energieverbrauch ihrer Produkte über ihre gesamte Lebenszeit optimieren lässt. Die Kernschießmaschinen werden in der Regel in großen Serien gefertigt und sind somit nicht mehr so leicht zu optimieren, wie es bei Einzelstücken der Fall ist. Die Firma LMS hat sich daher entschlossen, die Effizienz ihrer Kernschießmaschinen durch die Entwicklung eines Monitoring-Systems zu überwachen. Dieses soll die Energieeffizienz der Kernschießmaschinen beim Kunden messen und analysieren. Die Ergebnisse sollen in Form von Kennzahlen und Diagrammen dargestellt werden. Sie sollen dabei so aufbereitet werden, dass sie für den Endnutzer einfach zu verstehen sind. Zudem können sie zur Wahl der optimalen Komponenten für neue Anlagenrevisionen beitragen, da bis jetzt noch kein so umfassendes Energie-Monitoring-System für Kernschießmaschinen existiert.¹

Ein zweiter Nutzen ist die genauere Erfassung von Fehlerzuständen. Die Kernschießmaschinen sind sehr komplex und bestehen aus vielen verschiedenen Baugruppen. Die LMS nutzt die durch die Steuerungen bereitgestellten Fehleranalysetools, 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 der Kernschießmaschinen 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.

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 kostenin-

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.

tensiv, intransparent oder nicht erfüllen nicht alle Anforderungen. Zudem können diese oft nicht an die bestehenden Datenbusse der Anlagen angepasst werden, 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.[6] 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 die Rohmaterialien wieder dem Prozess zugeführt. Abbildung 2 zeigt den Materialfluss rund um eine Kernschießmaschine mit den dafür wichtigsten Komponenten.

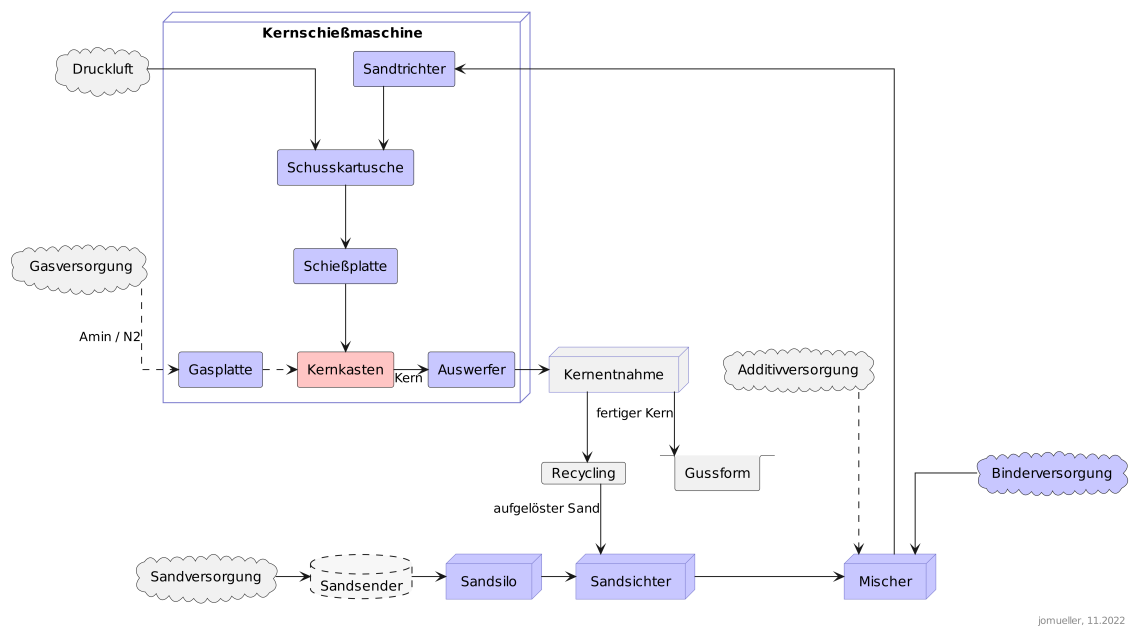


Abbildung 2: Herstellung von Kernen

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 Signalgeber. Sie sind über Feldbusverteiler mit der nächsthöheren Kontrollebene verbunden. Bei LMS wird neben traditionellen analog verbundenen Geräten hauptsächlich auf das IO-Link Bussystem zurückgegriffen. Dadurch sind in allen Teilen ihren Anlagen IO-Link-Feldbusverteiler verbaut, auf die für die Umsetzung der Energiemessung zurückgegriffen werden kann. 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-Machine-Interface (HMI) angepasst werden können, dann geschieht dies in der Überwachungsebene. Sie ist die höchste Automatisierungsebene, die man am Ort der Anlage vorfinden kann. In ihr befindet sich auch der Hauptteil des Energieüberwachungssystems, da dieses nicht zur Steuerung der Anlage beiträgt.

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 kleine 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. Dadurch wird die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten vereinfacht und beschleunigt. 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 im 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. Jedoch ist er nicht so weit verbreitet wie die anderen beiden Feldbusse.

3.6 Strommessung

Die Strommessung 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. Diese sind in der Lage, die Stromstärke zu messen und die daraus resultierende Energie zu berechnen. Die Stromstärke wird dabei über einen *Hall-Sensor* gemessen. Dieser ist in der Lage, die magnetische Flussdichte zu messen. Die magnetische Flussdichte wird durch den Stromfluss im Kabel erzeugt. Die Stromstärke wird dann über eine Formel berechnet. Die Energie wird dann über die Stromstärke und die Spannung berechnet. Die Spannung wird über einen *Spannungsteiler* gemessen. Dieser besteht aus zwei Widerständen, die in Reihe geschaltet sind. Der Spannungsteiler ist in der Lage, die Spannung zu reduzieren, so dass sie mit einem *Analog-Digital-Wandler* (ADC) gemessen werden kann.

Alternativ zum Hall-Sensor kann auch eine andere Art von Stromsensoren verwendet werden. Diese ist in der Lage, die Stromstärke direkt zu messen. Sie besteht aus einem *Stromwandler* (CT) und einem Messwiderstand im Sekundärstromkreis. Die Spannung über diesen Widerstand ist proportional zur Stromstärke. Diese Spannung 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 Energie-Erfassungssystems können in fünf Kategorien unterteilt werden: die Datenerfassung, -übertragung, -verarbeitung, -speicherung und Datenvisualisierung. Darstellung 3 zeigt die Zuordnung der Aufgaben zu den Komponenten, welche in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

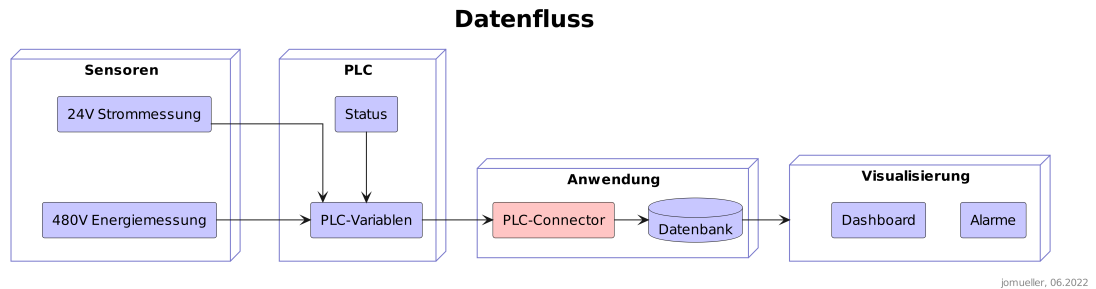


Abbildung 3: Bestandteile des Projekts

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 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 da wo sich die elektronischen Untersicherungen befinden. Diese Sicherungen werden, neben den Netzteilen selbst, in der Implementierung für die Messung der Ströme instrumentiert.

Der meistverwendete Feldbus in LMS-Anlage ist IO-Link. Dieser Bus ist für die Kommunikation mit den Sensoren und Aktoren der Anlage vorgesehen. Die Sensoren werden über den IO-Link-Bus mit Strom versorgt und können so ohne zusätzliche Versorgungsspannung betrieben werden. Die hinzugefügten Energiesensoren werden vorzugsweise auch in dieses Bussystem integriert. Es ist

aber auch möglich, die Energiesensoren direkt an das Steuernetzwerk einzubinden. Wenn dies nicht geschehen kann, dann werden die Signale, so wie bei allen anderen Sensoren auch, über Feldbusverteiler beziehungsweise Interfacemodule mit IO-Link-Unterstützung zu der zentralen Steuerung der Anlage geleitet.

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. 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. [8]

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 eigens für diese 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 Hubtisches 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 gesetzt sein, 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 Hubtisch 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 verschiedene Kriterien definiert, die ein System erfüllen muss. Diese Kriterien sind:

- Die Messwerte müssen unmittelbar abrufbar sein.

Wie bereits in der Theorie erwähnt, ist es 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 Alarme 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.

- 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 mehr in den zu betrachtenden Kernschießmaschinen eingesetzt. 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 Mitsubishisteuerungen das EtherNet/IP-Protokoll [7], auf das durch seine weit verbreitete Verwendung in Rockwell-Anlagen eher zurückgegriffen werden sollte. Somit können in allen Mitsubishi Anlagen die 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)

²Stand: 10.2021

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 mithilfe 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. Mithilfe 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 per 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 8 der zweikanaligen Sicherungsmodule *DF2220* entschieden.

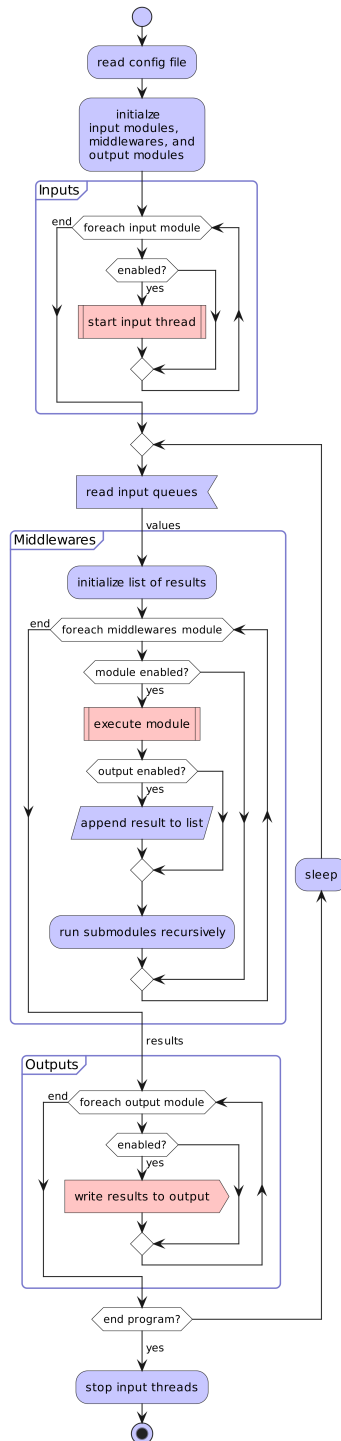
5.3 Verarbeitungssoftware

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 selbst geschriebene Programm „PLC-Connector“ ist in diesem Abschnitt genauer beschrieben. Es ist der Arbeit beigelegt und zusätzlich unter <https://github.com/jm-hsa/smart-energy-monitor> abrufbar. 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

³Stand: 10.2021

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 Softwareverzeichnis 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 auf 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 Datensinken, 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 zentralen Programm mittels `python3 main.py -c config.yml` geladen und gibt die Typen, die Parameter und bei Middlewares die Untermodule der Module vor. Die Module werden dann entsprechend initialisiert und ausgeführt. Beispiele für mögliche Konfigurationsdateien sind in der beigeführten Software enthalten.

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 mithilfe 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 (vgl. Anlage B).

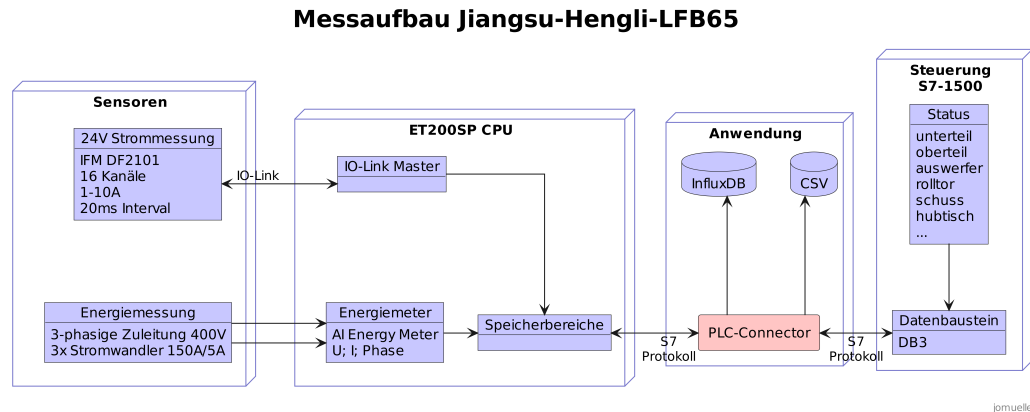


Abbildung 5: Siemens Versuch

Die Strommessung der 24V-Ebene wird durch einen digitalen Leitungsschutzschalter von IFM übernommen. Dieser besteht aus einem Kopfm modul (Typ DF2101) und bis zu 16 daran angereihten Sicherungskanälen. Am Kopfm modul 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 Kopfm modul DF2101 ist in diesem Versuch direkt an das zentrale 24V, 40A Netzteil der Anlage (links am Rand des Fotos im Anhang A) angeschlossen. Die 8 Sicherungs module vom Typ DF2220 mit je zwei Kanälen, welche individuell zwischen 1 und 10A einstellbar sind, übernehmen die Funktion der ursprünglich eingesetzten Sitop Sicherungen von Siemens (grau im Foto A, 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 B) versorgt. Die Verteilung der Kanäle ist im Anhang 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 Foto B 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 ??) und mit einem dreipoligen Leitungsschutzschalter (LS) mit 6A Nennstrom abgesichert. Der LS ist rechts vom Trenner montiert.

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

⁴Es ist hierbei anzumerken, dass die Einspeisung in industriellen Anlagen, wie dieser Kernschießmaschine, ein

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 B 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 $[0.1, 0.2, \dots, 10.0]$ 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 Programm der CPU besteht aus

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 ??) 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 C 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:

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	°

kombiniertes PE-N System verwendet wird. Die Trennung in Neutral- und Schutzleiter findet somit erst im Schalt-schrank der Anlage statt.

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
--------	----------------	---------

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.

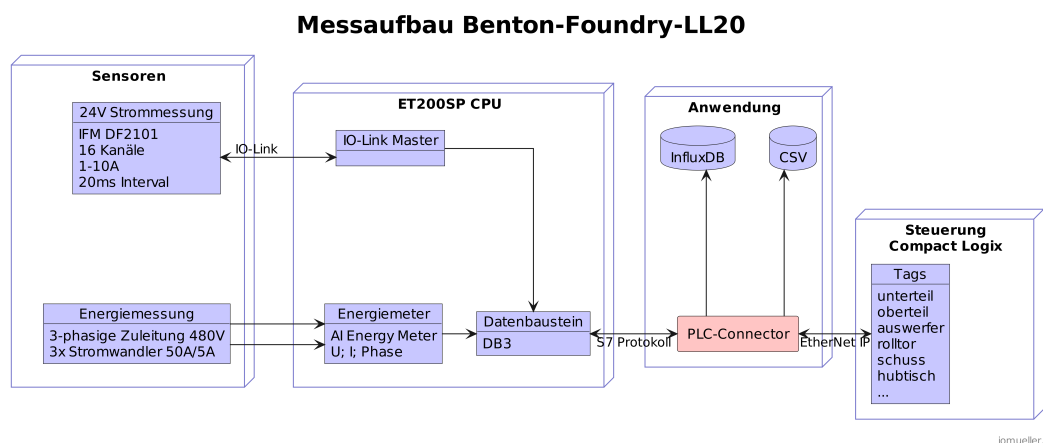


Abbildung 6: AB Versuch

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 mithilfe 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 D. Diese Tags werden von der PLC-Connector Anwendung aller 20ms über das EtherNet/IP Protokoll (EIP) von der Steuerung abgefragt. Dabei können mehrere Leseanfragen in einem EIP 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.

6.4 Ergebnisse

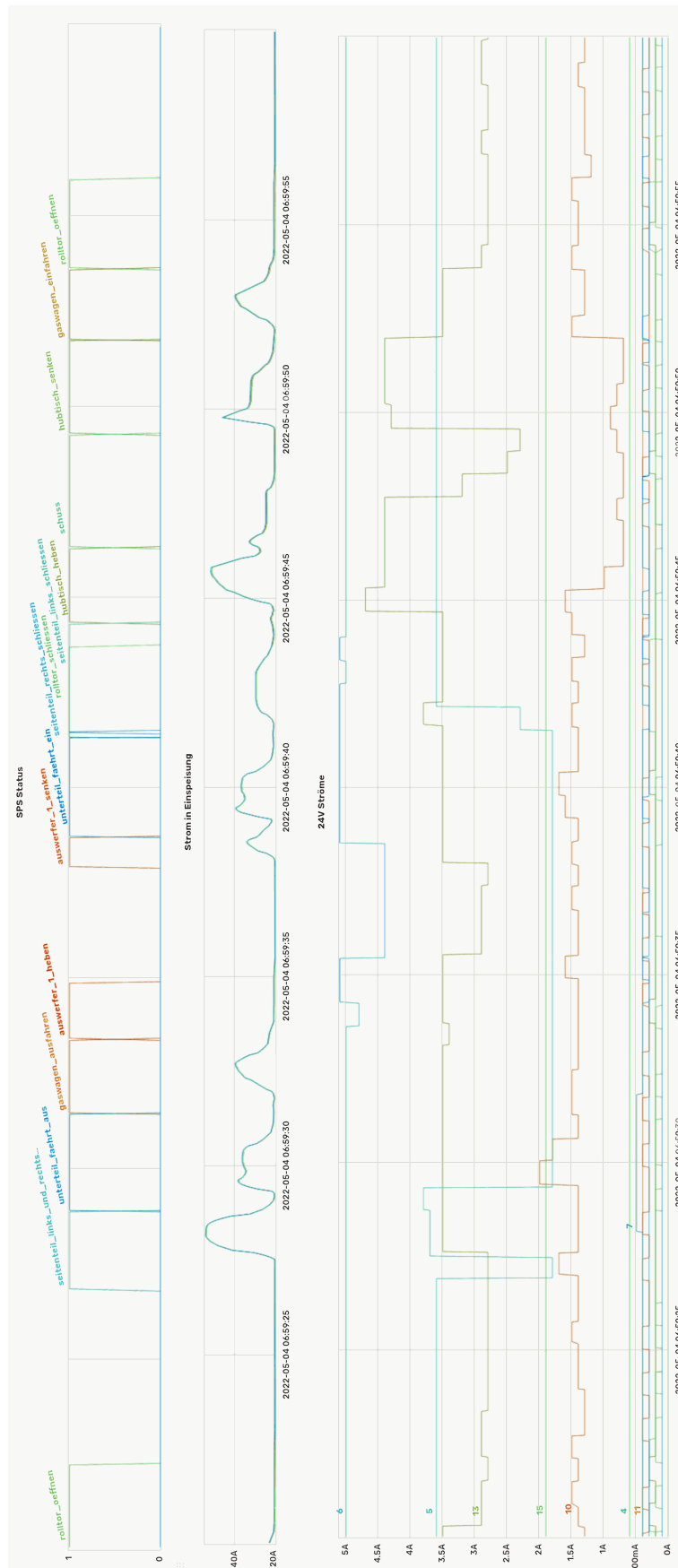


Abbildung 7: Messergebnisse eines Anlagenzykklus an der LFB65

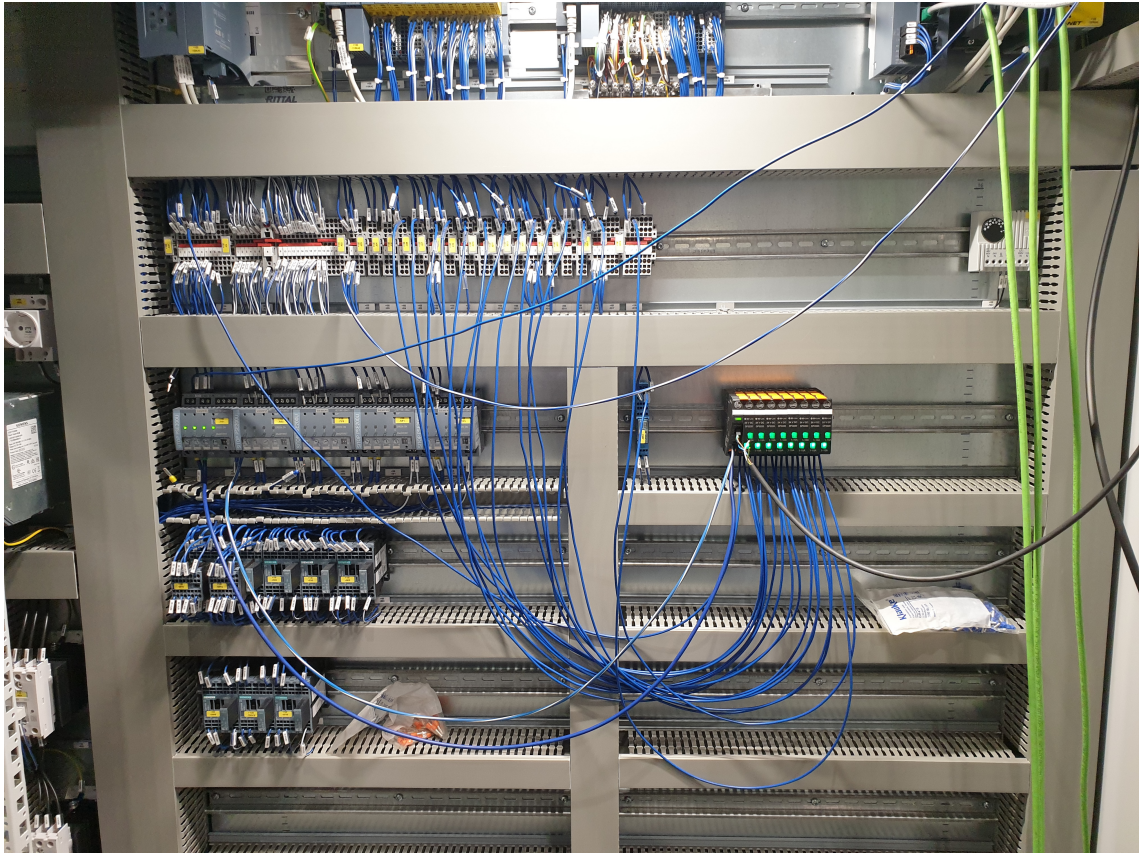
7 Fazit

Literatur

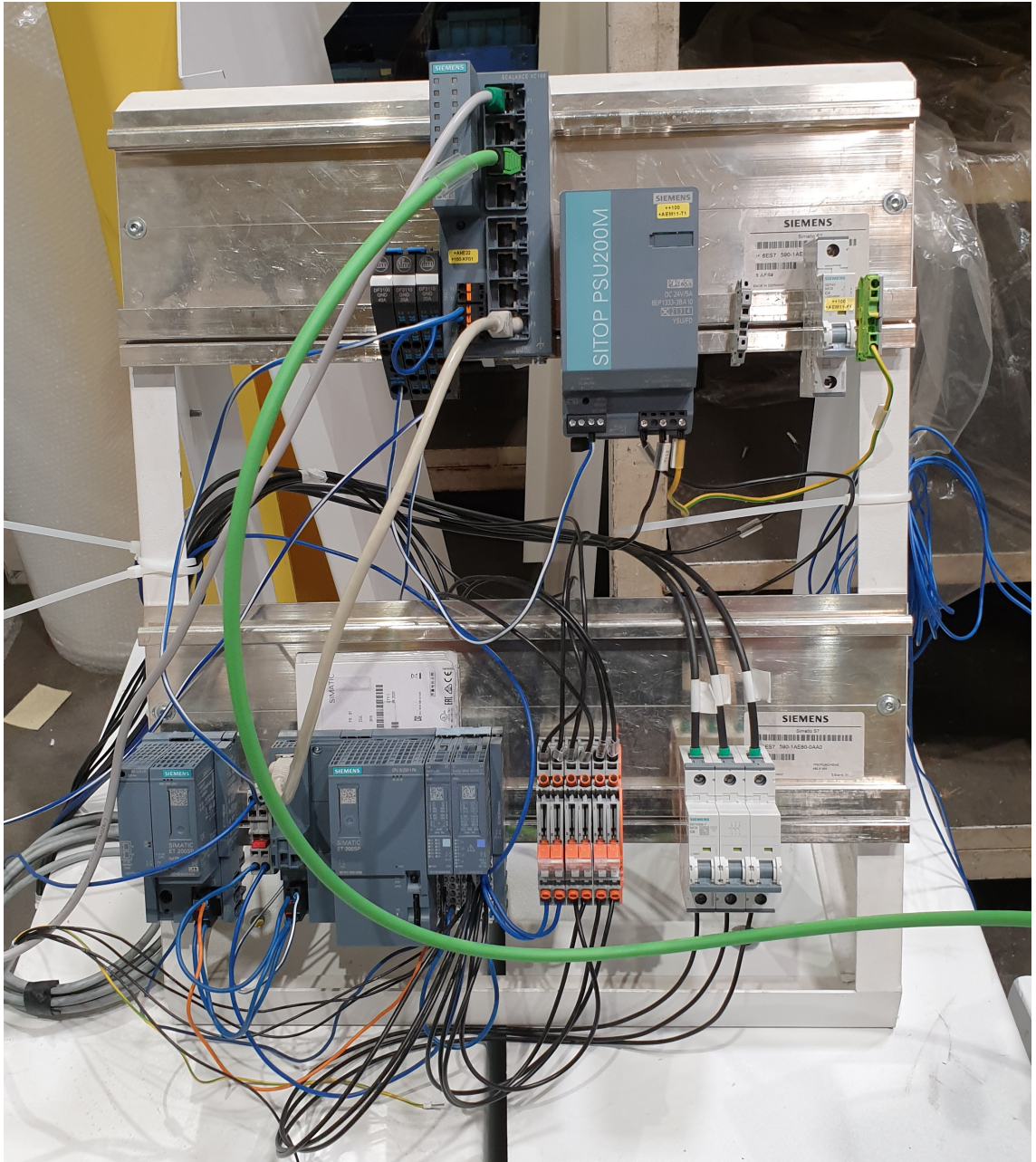
- [1] *Betriebsanleitung Kernschießmaschine LFB65*. 113638-02.03-001. Laempe Mössner Sinto GmbH. 2022.
- [2] *Betriebsanleitung Kernschießmaschine LL20*. 113620-02.03-001. Laempe Mössner Sinto GmbH. 2022.
- [3] Paul Brooks. „EtherNet/IP: Industrial Protocol White Paper“. In: 2001. URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/enet-wp001_-en-p.pdf.
- [4] „EPLAN Kernschießmaschine LFB65“. 2022.
- [5] „EPLAN Kernschießmaschine LL20“. 2022.
- [6] Laempe Mössner Sinto GmbH. In: (). URL: <https://www.laempe.com/>.
- [7] *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>.
- [8] „PROFINET - Die Lösungsplattform für die Prozessautomatisierung“. In: Ausgabe Juni 2018 (Juni 2018). URL: <https://de.profibus.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=133941&token=6fe9bec50142ed0883d65cd69c665a9740d1231c>.

Anhang

A IFM Sicherungen im Schaltschrank der LFB Anlage



B Datenerfassung an der LFB Anlage



C 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	
Byte 4	Bit 0	

Tabelle 4: Struktur des Datenbausteins DB3 im LFB Versuch

D 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
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

Tag[Byte Offset]	BE Bit Index	Name
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_gate_open
B18[73]	1	sand_sender

Tabelle 5: Ausgelesene PLC-Tags im LL20 Versuch

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