

Energiemonitoring zur Prozessanalyse in industriellen Anlagen am Beispiel von Kernschießmaschinen

jm

November 3, 2022

Masterarbeit

Abgabe:
Köthen, Datum

Contents

1	Einleitung	4
2	Problemstellung	4
3	Grundlagen	5
3.1	Kernschießmaschinen	5
3.2	Topologie der Kernschießmaschinen	5
3.3	Datenbusse	6
3.4	Industrielle Steuerungen	6
3.5	Feldbusverteiler	6
3.6	Strommessung	6
4	Lösungsansatz	6
4.1	Erfassung der Messwerte	6
4.2	Übertragung der Messwerte	7
4.3	Datenverarbeitung	8
4.4	Datenspeicherung	8
4.5	Visualisierung	8
5	Implementierung	9
5.1	Wahl des 480V-Sensorsystems	9
5.2	Wahl des 24V-Sensorsystems	11
5.3	Verarbeitungssoftware	11
6	Praktische Versuche	12
6.1	Siemens Anlage LFB65	12
6.2	Allen-Bradley Anlage LL20	16
6.3	Vergleich der Versuche	18
6.4	Ergebnisse	19
7	Fazit	19
	Literatur	20
A	Anhang 1	20

List of Figures

1	Übersicht	4
2	Bestandteile des Projekts	6
3	Datenfluss	11
4	Siemens Versuch	13
5	Aufbau Hengli IFM Sicherungen	13
6	Aufbau Hengli Interfacemodul	14
7	AB Versuch	17

List of Tables

Abkürzungsverzeichnis

SPS Steuerung einer industriellen Anlage

CPU alternativer Name der Steuerung einer industriellen Anlage

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)

DIY selbstgebaut; im Gegensatz zu: industriell hergestellt

LSB Binärzahl mit Nummerierung nach aufsteigender Wertigkeit

Symbolverzeichnis

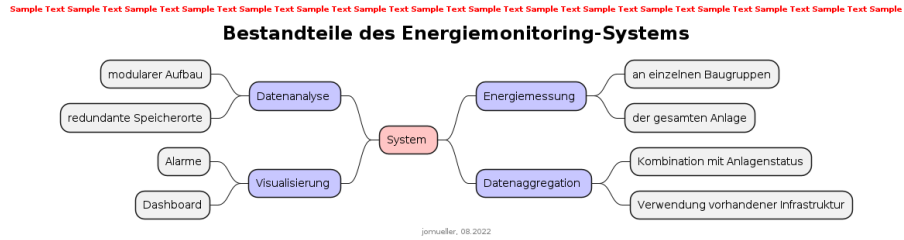


Figure 1: Übersicht

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 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. Die möglichen Auslegungen dieser Teilfunktionen sind im 2. Kapitel Theorie aufgelistet. Folgende Darstellung zeigt die Bestandteile des entwickelten Monitoring-Systems:

Bei der Erhebung der Messwerte entstehen viele Datenpunkte, die einzeln betrachtet keine große Aussagekraft besitzen. Der Schritt der Datenverarbeitung kombiniert die eingehenden Datenströme und extrahiert für den Endnutzer relevante Informationen. Für die Übertragung 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. Die einzubauenden Sensoren werden 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. [] 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 mit Hilfe 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.

- fehlende Energieerfassung
- Aufzeichnung von Anlagenzuständen in einer Datenbank
- Korrelation mit Leistungswerten
- Integration in den vorhandenen Aufbau

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. Die Kernschießmaschinen von Laempe 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. Mit ihnen 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. Eine genaue Aufzählung folgt im Kapitel 3.

3.2 Topologie der Kernschießmaschinen

Die Kommunikationsstruktur von industriellen Anlagen wird in 3 Ebenen unterteilt:

1. Feldebene
2. Kontrollebene
3. 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 Laempe 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



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 Potentialklemmen, 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 Lampe-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. □

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.

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 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, so dass 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

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 und es kann deswegen auch auf fertige universelle Visualisierungsoberflächen zurückgegriffen werden.

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:

1. 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 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.

2. 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 Reperaturaufwände gering zu halten. Zudem muss es die entsprechenden Zertifizierungen besitzen, um die Sicherheit des Systems zu gewährleisten.

3. 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 Laempe eingesetzt.

4. 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

Hersteller	Artikelnummer	Beschreibung	Feldbus	Kennwerte
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

(Stand: 10.2021)

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 Laempe hergestellten Produkten; wird aber bei Kernschießmaschinen nur sehr selten eingesetzt. Außerdem unterstützen alle Mitsubishisteuerungen das EtherNet/IP-Protokoll [1], 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 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 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.

5.2 Wahl des 24V-Sensorsystems

- Alternativen für Kleinstspannungskreise
- Stromshunts mit ADC über IO-Link
- Netzteile mit Modbus
- elektronische Sicherungen mit IO-Link
- Wahl der Sensoren
- IFM elektronische Sicherung mit IO-Link

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 selbst geschriebene Programm “PLC-Connector” ist in diesem Abschnitt genauer beschrieben. Die Benutzerschnittstelle zum Benutzer des Systems kann im nachhinein durch ein generisches Interface zur Datenbank geschehen, da die dort enthaltenen Daten schon durch das Programm “PLC-Connector” und dessen entsprechende Signalverarbeitungsmodule aufbereitet sind.

1. Inputs

11

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 entgegen nimmt und die für die Auswertung interessante Informationen extrahiert. Eine erste *Middleware* nimmt beispielsweise die Werte mehrerer *Inputs* entgegen 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* entgegen nehmen 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.

6 Praktische Versuche

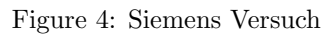
Der gewählte Messaufbau wurde bisher an zwei Kernschießanlagen getestet. Dazu wurden alle benötigten Sensoren im Steuerungsschrank temporär verbaut und die aufgenommenen Daten extern mit einer weiteren ET200 Siemens Steuerung verarbeitet. Bei den Kernschießmaschinen handelt es sich um eine Anlage mit 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. Diese erfassten Rohdaten konnten zur Analyse und für die Erarbeitung der Middleware-Module des PLC-Connector Programms (siehe vorheriges Kapitel) wiederholt eingespielt werden. Zum Zeitpunkt der beiden Versuche fand noch keine tiefgehende Analyse statt.

6.1 Siemens Anlage LFB65

Der erste praktische Test wurde an einer Kernschießmaschine vom Typ LFB65 in der KW 19 2022 durchgeführt. Als Sensoren sind hier zum Einen Strommessung an der 24V Versorgung und zum Anderen eine Instrumentierung der elektrischen Einspeisung vorgesehen.

Wie bereits im obigen Diagramm dargestellt, wird die Strommessung der 24V-Ebene durch einen digitalen Leitungsschutzschalter von IFM übernommen. Dieser besteht aus einem Kopfmodul (Typ DF2101) und bis zu 16 daran angereihten Sicherungskanälen. Das Kopfmodul besitzt eine IO-Link Schnittstelle, über die die Versorgungsspannung und die Ströme der einzelnen Sicherungskanäle abgefragt werden kann.

Das Kopfmodul DF2101 ist in diesem Versuch direkt an das zentrale 24V, 40A Netzteil der Anlage (links am Rand des Bildes) angeschlossen. Die 8 Sicherungsmodule vom Typ DF2220 mit je 2 Kanälen, welche individuell zwischen 1 und 10A einstellbar sind, übernehmen die Funktion der ursprünglich eingesetzten Sitop Sicherungen von Siemens (grau im Bild, zwischen dem Netzteil und den IFM Modulen). 4 von 5 Sitop-Sicherungen mit je 4 Kanälen sind komplett deaktiviert,



Am AI Energy Meter sind für die Messung der Versorgungsspannung auch die drei Phasen der Einspeisung angeschlossen. Diese werden vor den Hauptschalter der Anlage abgegriffen (siehe

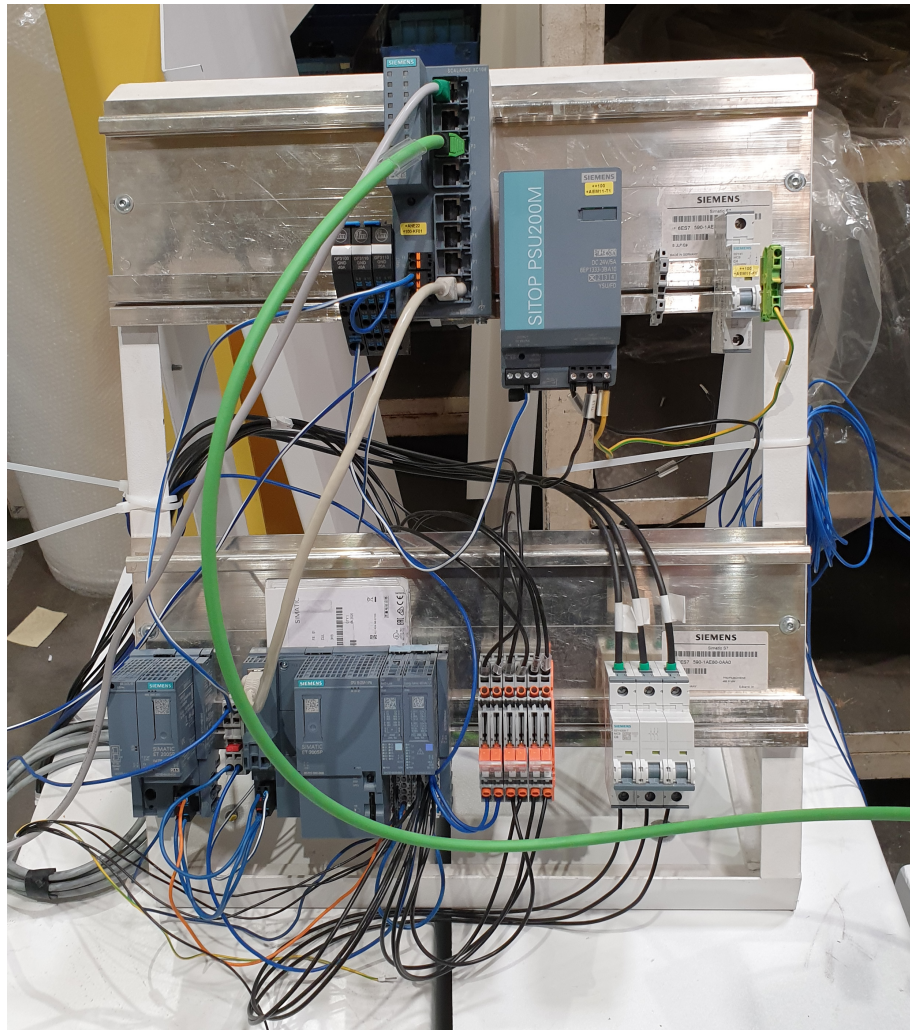


Figure 6: Aufbau Hengli Interfacemodul

EPLAN Anhang 1) und mit einem dreipoligen Leitungsschutzschalter (LS) mit 6A Nennstrom abgesichert. Der LS ist rechts vom Trenner montiert.

Das Energy Meter 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.¹

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 obigen Bild 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.²

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 En-

¹Es ist hierbei anzumerken, dass die Einspeisung in industriellen Anlagen, wie dieser Kernschießmaschine, ein kombiniertes PE-N System verwendet wird. Die Trennung in Neutral- und Schutzleiter findet somit erst im Schaltschrank der Anlage statt.

²Auf dem Teststand befinden sich auch ein weiteres Netzteil, ein Leitungsschutzschalter und ein ET-200SP Interfacemodul, welche alle während des Versuchs nicht verwendet wurden.

ergy 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 Laempe 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. Die Steuerung wurde von einem Laempe-Mitarbeiter so programmiert, dass sie eine große Menge an Ausgangsstatusbits in einen eigens zum Auslesen angelegten Speicherbereich (vgl. Datenbaustein DB3 im Diagramm) kopiert. Beim Auslesen wird der Inhalt von DB3 als Bytearray zum PLC-Connector übertragen. Die Struktur des Statusflags im Datenbaustein ist dabei folgendermaßen definiert:

byte[]								
LSB-								
0	7	6	5	4	3	2	1	0
Byte	Unterteil	Unterteil	Auswerfer	Auswerfer	Auswerfer	Auswerfer	Abdrücker	Abdrücker
0	einfahren	ausfahren	1 heben	1 senken	2 heben	2 senken	Seitenteil links einfahren	Seitenteil links ausfahren
Byte	Abdrücker	Abdrücker	Rolltor	Rolltor	Gaswagen	Gaswagen	Schwenkplatte	Schwenkplatte
1	Seitenteil rechts einfahren	Seitenteil rechts ausfahren	schließen	öffnen	ausfahren	einfahren	abklappen	einklappen
Byte	Losteil 1	Losteil 1	Losteil 2	Losteil 2	Losteil 3	Losteil 3	Losteil 4	Losteil 4
2	Unterteil einfahren	Unterteil ausfahren	einfahren	ausfahren	einfahren	ausfahren	einfahren	ausfahren
Byte	Losteil 5	Losteil 5	Seitenteil links	Seitenteil rechts	Seitenteil links und rechts öffnen	Sandschleuse schließen	Sandschleuse öffnen	Sandmessung 3 Wege Ventil schließen
3	einfahren	ausfahren						
Byte	Sandmessung	Schuss	Hubtisch	Hubtisch	Oberteil	Oberteil		
4	3 Wege Ventil öffnen		senken	heben	heben	senken		

Für die Übertragung der Daten von der ET-200SP CPU werden 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	°

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 ganzzahliger 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.

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 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 Flags kann nämlich direkt erfolgen:

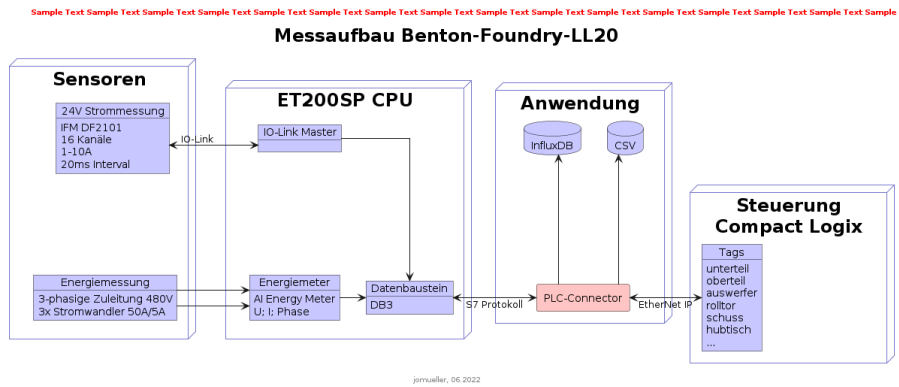


Figure 7: AB Versuch

Tag[Byte Offset]	LSB 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

Tag[Byte Offset]	LSB Bit Index	Name
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
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

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 geringhält. 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 Umsetzungs faktoren. Im ersten Test wurden Wandler mit einem Umsetzungs faktor 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

7 Fazit

A Anhang 1

Anhang 1

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig 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