

Abschlussbericht

für das Verbundvorhaben

Smarte Pumpen für die Digitale Schifffahrt

„SPuDiS“



Fördermaßnahme: Maritimes Forschungsprogramm

Teilprojekt:

Analyse von FM-Konstellationen und Verifikation von Softsensoren

Antragsteller des Teilprojektes

Brinkmann Pumpen

K.H. Brinkmann GmbH & Co. KG



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03SX548A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Geplante Projektlaufzeit: 01.06.2021 – 31.12.2024

Projektsteckbrief	
Projekttitlel	Smarte Pumpen für die Digitale Schifffahrt (SPuDiS)
Förderkennzeichen	03SX548A
Zuwendungsempfänger	K.H. Brinkmann GmbH & Co. KG
Kooperationspartner	Ruhr-Universität Bochum Herborner Pumpentechnik GmbH & Co KG
Bewilligungszeitraum	01.06.2021-01.02.2022, 01.09.2022-31.12.2024
Änderungen am Arbeits-/Finanzplan (Änderungsbescheide)	Wegen der Abwesenheit von Projektmitarbeitern bei der Ruhr-Universität Bochum, wurde das Projekt im Zeitraum vom 01.02.2022 bis zum 01.09.2022 pausiert. Dies wurde durch eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.12.2024 ausgeglichen.
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens	Pumpen verbrauchen etwa 50% der Energie an Bord von Schiffen [1]. Eine effiziente Regelung des Pumpenbetriebs, insbesondere des Durchflusses, bietet ein enormes Potenzial zur Energieeinsparung, weshalb die Nachfrage nach präzisen Durchflussdaten stetig wächst. Traditionelle Hardware-Durchflussmesser sind kostenintensiv und können in bestehende Anlagen nur mit hohem Aufwand installiert werden. Daher haben sich Softsensoren als die bevorzugte Lösung etabliert. Softsensoren können durch ihre direkte Verbindung zur Pumpe außerdem eine Zustands- und Schadensprädiktion durchführen, was Ausfallzeiten erheblich verringern kann. Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines Softsensors für maritime Pumpen an Bord von Schiffen sowie ein Abbild von Pumpe und Softsensors in Form eines digitalen Zwillings beim Hersteller. Die Kombination verkörpert eine smarte maritime Pumpe, die effizient betrieben und vorausschauend gewartet werden kann.

Zusammenfassung

Pumpen verbrauchen weltweit etwa 22% der Energie im Bereich der elektromotorisch angetriebenen Maschinen [1], wobei allein Kreiselpumpen bereits zu 16 % dieses Verbrauches beitragen. Dennoch werden viele Pumpen nach wie vor manuell gedrosselt, um den gewünschten Durchfluss anzupassen, was einen erhöhten Energiebedarf verursacht. Eine automatische Durchflussregelung auf den optimalen Betriebspunkt bietet ein erhebliches Energiesparpotenzial. Um eine solche Regelstrategie umzusetzen, ist eine präzise Durchflussmessung erforderlich, die in der Praxis regelmäßig an teurer und aufwendig zu installierender Hardware-Durchflusssensorik scheitert. Softsensoren sind kostengünstiger und einfacher zu implementieren, da sie lediglich aus einer Software, die auf einfachen embedded Systems laufen kann, sowie einer einfachen Messung einer sekundären Größe, z.B. dem Motorstrom, besteht.

Allerdings weisen etwa 20% der Kreiselpumpen im maritimen Bereich eine nicht-invertierbare („komplizierte“) Kennlinie auf, was die Zuverlässigkeit existierender Softsensorik-Ansätze stark beeinträchtigt. Zusätzlich müssen auf Schiffen Ersatzteile und Wartungspersonal im Voraus bereitgestellt werden. Wenn ein Softsensor potenzielle Fehlfunktionen oder anomale Betriebszustände vorhersagen könnte, würde dies die Planung von Logistik und Personaleinsatz erleichtern und die Stillstandzeiten erheblich reduzieren.

SPuDiS entspricht den Querschnittszielen MARITIME.green, MARITIME.smart und MARITIME.safe, sowie der Programmsäule „Schiffstechnik“ des Maritimen Forschungsprogramms und der Maritimen Forschungsstrategie 2015.

Das Projekt wird durch die Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ) unter der Förderkennziffer FKZ: 03SX548A unterstützt. SPuDiS wird von einem Konsortium aus drei Partnern bearbeitet, darunter ein akademischer Partner und zwei Industriepartner. Die Ruhr-Universität Bochum ist für die Entwicklung theoretischer Ansätze, Methoden und Algorithmen verantwortlich, während die Industriepartner Herborner Pumpentechnik und Brinkmann Pumpen die notwendigen Daten bereitstellen und Tests durchführen. Darüber hinaus begleitet der nicht geförderte Partner DVZ-

SERVICES GmbH das Projekt beratend und fungiert gleichzeitig als potenzieller Verwerter der smarten maritimen Pumpe. Während der Projektlaufzeit wurde ein regelmäßiger Austausch sichergestellt, einschließlich kontinuierlicher Kommunikation und Berichterstattung an das FZJ.

Das Teilprojekt von Brinkmann Pumpen umfasste drei Arbeitspakete.

Zunächst wurden ein bestehender Motorprüfstand derart erweitert, dass dieser in der Lage ist Asynchronmotoren mit Frequenzumrichter zu vermessen bzw. diese durch geeignete Messgrößen zu charakterisieren. Die dabei gewonnenen Zeitreihen dienen anschließend zur Entwicklung eines Softsensoralgorithmus für die Schätzung des Pumpenarbeitspunktes.

Für die Ausführungsplattform wurde prototypisch ein embedded System aufgebaut, welches in Pumpen integriert werden kann und die Realisierung und Ausführung des Softsensoralgorithmus ermöglicht. Die dazugehörige Implementierung des Softsensoralgorithmus erfolgte in der Programmiersprache C.

Abschließend wurde das embedded System mit den dort enthaltenen Softsensor in verschiedenen Pumpen integriert, um die Genauigkeit der Arbeitspunktschätzung an den Prüfständen des Projektpartners Herborner Pumpentechnik zu ermöglichen.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Technik.....	2
1.3	Zielsetzung des Projekts.....	2
2	Vorgehen und durchgeführte Arbeiten	3
2.1	Planung der Arbeitspakete.....	3
2.2	B1: Erweiterung und Betrieb eines Prüfstands zur Erfassung von Messgrößen für die Entwicklung von Modellen für FM-Konstellationen	4
2.3	B2: Hardwareumsetzung auf industrieller Steuerung.....	10
2.4	B3: Implementierung der Algorithmen und Finalisierung des Prototyps.....	17
3	Zusammenfassung und Ausblick.....	19
4	Literaturverzeichnis	20
5	Anhänge	21
5.1	Lastenheft Prüfstandserweiterung.....	21

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Jahr 2018 entfielen auf die Seeschifffahrt etwa 2,9 % der globalen, durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen [2]. Pumpensysteme tragen an Bord wesentlich zum elektrischen Energiebedarf bei und verursachen rund 50 % des Verbrauchs. Eine verbesserte Betriebsstrategie dieser Aggregate eröffnet daher ein relevantes Potenzial zur Effizienzsteigerung und zur Verringerung der Emissionen.

Ein typisches Kreuzfahrtschiff ist mit circa 25 Pumpen zur Abwasserförderung (Nennleistung jeweils 4 kW) sowie etwa fünf weiteren Pumpen für die Wasseraufbereitung (Nennleistung jeweils 15 kW) ausgestattet. Wird der Betrieb dieser Pumpen so optimiert, dass der Energieverbrauch im Mittel um 20 % reduziert wird, ergibt sich eine jährliche Einsparung von mehr als 300 MWh elektrischer Energie. Dieses Beispiel verdeutlicht die Bedeutung intelligenter Steuerungsansätze für Pumpensysteme im maritimen Sektor.

Zur Optimierung des Betriebs von Pumpen, um das o.g. Einsparpotenzial ausschöpfen zu können, ist es essenziell den Betriebszustand der Pumpen zu kennen. Um diesen effizient und kostengünstig bestimmen zu können, war Zielsetzung des Projekts SPuDiS eine smarte Pumpe zu entwerfen, die eigenständig in der Lage ist ihren Betriebszustand ohne aufwändige Sensorik zu erfassen und diese Informationen vollständig digitalisiert in das Gesamtsystem einzubringen.

Durch die Einbindung in eine geeignete Prozessregelung können Pumpensysteme mit deutlich gesteigerter Energieeffizienz betrieben werden. Eine vorausschauende Instandhaltungsplanung trägt zudem zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit bei und reduziert das Risiko ungeplanter Ausfälle, die andernfalls zu kritischen Betriebssituationen führen könnten.

Damit zeigt SPuDiS eindrucksvoll, wie smarte Pumpensysteme den Schritt in die digitale Schifffahrt nicht nur begleiten, sondern aktiv vorantreiben.

1.2 Stand der Technik

Softsensoren in Form von softwarebasierten Schätzverfahren gewinnen auch im Umfeld maritimer Pumpenanwendungen zunehmend an Bedeutung.

Dabei wurde untersucht, inwieweit eine Druck- bzw. Durchflussschätzung, ohne direkte Messung mittels Sensoren möglich ist. Softsensoren nutzen stattdessen leicht erfassbare Signale wie die elektrische Leistungsaufnahme, die Drehzahl oder Schwingungen, um daraus den Arbeitspunkt von Pumpen indirekt zu berechnen bzw. abzuschätzen.

Während bei Pumpen mit eindeutiger Kennlinie eine einfache Modellbildung auf Basis der Pumpenkennfelder ausreicht, stellt die Durchflussschätzung bei Pumpen mit nicht eindeutiger Kennlinie eine besondere Herausforderung dar. Klassische modellbasierte Softsensoren [3, 4] stoßen hier an Grenzen, da gleiche Druck- oder Leistungswerte mehreren möglichen Förderströmen entsprechen können.

Der Stand der Technik versucht dieses Problem theoretisch durch die Kombination verschiedener Ansätze zu adressieren. Es ist jedoch nicht bekannt, dass eine prozessstabile Realisierung erreicht wurde. Eine ähnliche Problematik zeigt sich, wenn Pumpen Verschleiß unterliegen bzw. wenn sich das zu fördernde Medium in seinen Eigenschaften (Dichte, Feststoffgehalt) mit der Zeit ändert.

1.3 Zielsetzung des Projekts

Als grundlegender Ansatz zur Bestimmung des Pumpenzustands bzw. Betriebszustands von Pumpen soll eine Kombination aus physikalisch-informatischen Modellen zur Durchflussermittlung und künstlicher Intelligenz (KI) entwickelt werden, so dass ein mehrschichtiger, hybrider Algorithmus entsteht.

Die über den Algorithmus verfügende Pumpe soll in einem digitalen Zwilling in einer Cloudlösung beim Pumpenhersteller gespiegelt werden und erlaubt so eine erweiterte Analyse des Betriebs und eine zuverlässige Wartungsplanung, so dass der Hersteller das Bedienpersonal an Bord bei der Wartung optimal anleiten und Ersatzteile vorausschauend fertigen kann.

Der Projektpartner Brinkmann Pumpen charakterisiert in dem Teilvorhaben verschiedene mit Frequenzumrichter betriebene Asynchronmotoren. Die dabei gewonnenen Zeitreihen waren Basis für die nachfolgende Modellentwicklung. Weiterhin hat der Projektpartner Brinkmann Pumpen ein Embedded System konzipiert, welches das entworfene Modell in Form eines Softsensors beinhaltet und ausführte. Das Embedded System wurde nach Integration und Verprobung in unterschiedlichen Pumpen integriert, um diese in praxisnahen Szenarien auf deren Einsatztauglichkeit zu verifizieren.

2 Vorgehen und durchgeführte Arbeiten

2.1 Planung der Arbeitspakete

Im Verbundprojekt wurden durch die Brinkmann Pumpen die drei Arbeitspakete B1-B3 bearbeitet. Die Bezeichnung der Arbeitspakete sowie der Bearbeitungszeitraum sind in Tabelle 1 dargestellt.

Der Schwerpunkt von Brinkmann im Projekt lag dabei in der Durchführung der experimentellen Untersuchungen von mit Frequenzumrichtern betriebenen Asynchronmotoren und deren Charakterisierung, die Datenakquise für die Entwicklung und Parametrierung der Softsensorik sowie die Bereitstellung eines Embedded Systems, auf welches die Softsensorik portiert und ausgeführt wurde.

Tabelle 1: Arbeitspakete inkl. der Bearbeitungszeiträume

Bearbeitungszeitraum	Arbeitspaketplan
06.2021-12.2022	B1: Erweiterung und Betrieb eines Prüfstands zur Erfassung von Messgrößen für die Entwicklung von Modellen für FM-Konstellationen
12.2022-07.2023	B2: Hardwareumsetzung auf industrieller Steuerung.
06.2023-12.2024	B3: Finale Implementierung der Algorithmen und Finalisierung des Prototyps.

2.2 B1: Erweiterung und Betrieb eines Prüfstands zur Erfassung von Messgrößen für die Entwicklung von Modellen für FM-Konstellationen

Im Hauptarbeitspaket B1 wurde ein vorhandener Motorprüfstand um zusätzliche Steuerungstechnik und Sensorik erweitert und in Betrieb genommen, sodass damit verschiedene Messgrößen zur Charakterisierung von Asynchronmotoren ermittelt werden, die durch Frequenzumrichter betrieben wurden.



Abbildung 1: Motorprüfstand zur Messung von unregelmäßig Asynchronmotoren

Anschließend wurden mit Frequenzumrichter ausgestattete Asynchronmotoren unterschiedlicher Hersteller vermessen und Zeitreihen von unterschiedlichen physikalischen Größen erhoben.

2.2.1 B1.1: Erhebung der Anforderungen an die Prüfstandserweiterungen

Zunächst wurde der Ist-Zustand des vorhandenen Motorprüfstands analysiert. Dazu gehörte eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Messgeräte, der elektrischen Anbindung sowie der Steuerungstechnik. Besonderes Augenmerk lag auf den Einschränkungen der bisherigen Messmethoden, die es nicht zugelassen haben, mit Frequenzumrichter betriebene Asynchronmotoren zu charakterisieren.

Auf Grundlage der Projektziele wurden zusätzliche physikalische Größen definiert, die künftig erfasst werden sollten, um die notwendige Charakterisierung der Motoren mit Frequenzumrichter zu gewährleisten:

- Elektrischen Ströme, Spannungen und Leistungen am Motor,
- Mechanische Leistung sowie das Lastmoment,
- Temperaturmessungen an Wicklungen und Lagerstellen,
- Beschleunigungen in x,y,z-Raumachsen.

Alle dazu erhobenen Anforderungen wurden in einem Lastenheft dokumentiert, welches im Anhang dieses Berichts zu finden ist.

2.2.2 B1.2: Konzeption der Prüfstandserweiterungen und Auswahl der Komponenten

Das in der Abbildung 2 schematisch dargestellte Konzept zeigt den ursprünglichen Motorprüfstand mit den zusätzlichen Erweiterungen. Der Aufbau bestand aus einem mobilen Prüfwagen, auf dem der Schaltschrank SPuDiS mit sämtlicher Messtechnik und Steuerungselektronik integriert war.

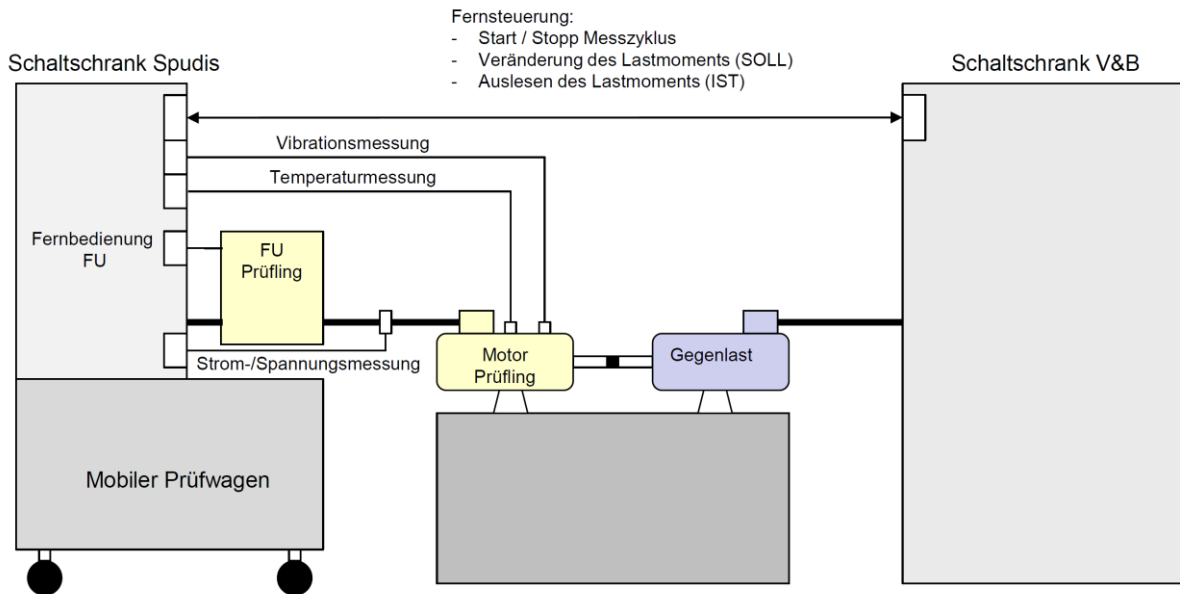


Abbildung 2: Struktureller Aufbau des erweiterten Prüfstands

Der zu prüfende Frequenzumrichter (FU-Prüfling) wurde mit dem Prüfmotor elektrisch verbunden. Zur Erfassung der relevanten elektrischen Betriebsgrößen wurde eine Strom- und Spannungsmessung zwischen FU und Motor integriert, woraus auch die elektrische Leistung ermittelt werden konnte. Ergänzend dazu erfolgte eine Vibrationsmessung durch Erfassung der Schwingbeschleunigung sowie eine Temperaturmessung am Motor, um mechanische und thermische Zustände detailliert charakterisieren zu können.

Als Gegenmomentgeber wurde eine Gegenlastmaschine eingesetzt, die den Motor belastete und so realitätsnahe Betriebsbedingungen erzeugte. Über den Schaltschrank V&B konnte die Gegenlast ferngesteuert betrieben werden. Hierbei waren folgende Funktionen möglich:

- Start/Stop des Messzyklus
- Einstellung des Soll-Lastmoments
- Auslesen des Ist-Lastmoments

2.2.3 B1.3/1.4: Aufbau und Inbetriebnahme der Prüfstandserweiterungen

Die Realisierung der gesamten Erweiterung des Prüfstandes erfolgte in einem mobilen Schaltschrank, welcher an dem bestehenden Motorprüfstand angeschlossen wird und diesen fernbedient.

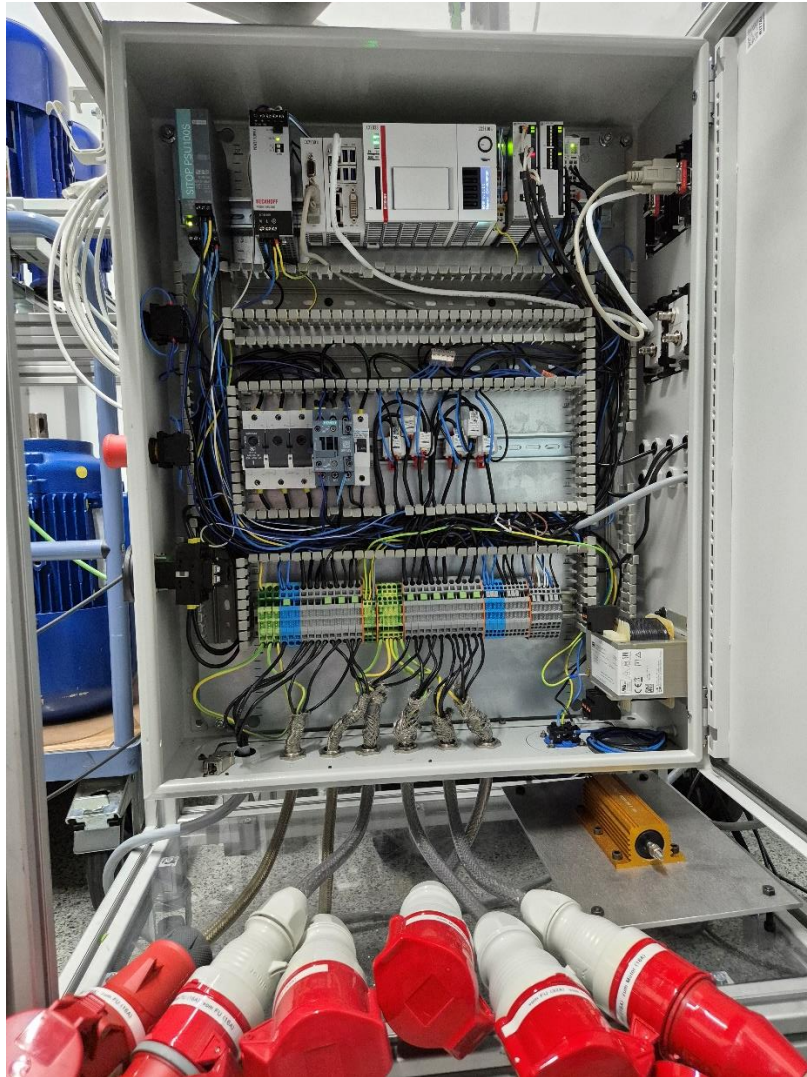


Abbildung 3: Innerer Aufbau des Schaltschranks für die Prüfstands Erweiterungen

Zur Steuerung und Datenverarbeitung wurde eine Beckhoff-SPS-Steuerung auf Basis des CX2033 CPU-Grundmoduls eingesetzt. Dieses SPS-Modul verfügte über die

notwendigen Schnittstellen Ethernet, USB, DVI-D und Modbus RTU, um darüber die Anbindung an Frequenzumrichter und Motorprüfstand zu ermöglichen.

Die 24V Spannungsversorgung erfolgte über das Netzteil CX2100-0014 (130 W), welches die notwendige Energieversorgung für CPU und Peripheriemodule sicherstellte.

Zur Signalerfassung wurden verschiedene EtherCAT-Klemmen eingebunden:

- Die ELM3632 4-Kanal-IEPE-Interface zur Vibrationserfassung.
- ELM3702-0000: 2-Kanal-Analog-Eingang für hochauflösende und schnelle Messungen (24 Bit, 10 kSps), u. a. für die Erfassung von Spannungs-, Strom- und Temperatursignalen.

Die Bedienoberfläche wurde in Form einer Webvisualisierung implementiert, sodass eine Bedienung über einen Webbrowser möglich war.

Die Programmierung des SPS-Systems erfolgte mittels Beckhoff TwinCAT 3 (siehe Abbildung 4) in IEC 61131-3 (Strukturierter Text).

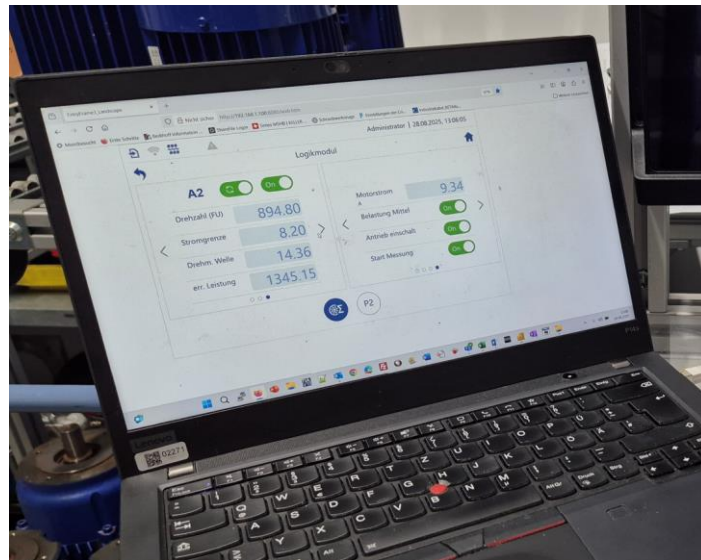


Abbildung 4: Bedienoberfläche in Form einer Webvisualisierung

2.2.4 B1.5: Vermessung der unterschiedlichen FM-Konstellationen zur Modellbildung und Modelloptimierung

In der nachfolgenden Tabelle sind die zu untersuchenden Prüfobjekte aufgeführt:

Tabelle 2: Zusammenfassung der untersuchten Prüfobjekte

	PO001	PO002	PO003	PO004	PO005
Pumpe	3/K80-2-150	0,75/K25-1-109	AKRX/80-2-120	5,5/QSH101-1-184	SBA1302_7,5_5_400_IE3
FU	Danfoss 2,2 kW AQUA Drive FC 202	Kostal 0,55 kW INVEOR 10090801	ABB 11 kW ACQ580-01-026A-4+B056+J400	Danfoss 4 kW AQUA Drive FC 202	Brinkmann FKO 7,5 kW
Motor	VEM IE3 KPR 100LZ/4 2,2kW 1500/min, D400-S690V, 50Hz, B5/V1	EMOD HEF 80L/4a 0,55kW 1500/min, D230-S400V, 50Hz, B5/V1	EMOD SM 160M/2 11/13,2kW 3000/3600/min , D380/D440V, 50/60Hz, B5/V1	Hoyer IE3 HMA3 112M2/4 4/4,8kW 1500/1800/min, D400-S690/D440V, 50/60Hz, B5/V1	Brinkmann IE3_132.200_7,5_5_400_2_LL_MV003

2.2.5 Aufbereitung und Bereitstellung von Zeitreihen für die RUB

Die Messdaten wurden pro Prüfobjekt in Form von Zeitreihen im *.csv Format dem Projektpartner Ruhr-Universität Bochum zur Verfügung gestellt, um die Modelle auslegen und trainieren zu können.

Dazu wurde in Twincat 3 ein Funktionsmodul entworfen, welches die Messdaten aufzeichnet, in einer strukturierten Weise verwaltet und jeden Messwerteblock mit einem Zeitstempel versieht, sodass in einer Nachbereitung eine zeitlich exakte Korrelation der Messwerte bestehen bleibt.

Zeitstempel	Betriebspunkt	Soll-Drehzahl [U/min]	Ist-Drehzahl [U/min]	Motorstrom [A]	Motorspannung [V]	Elektrische Leistung [W]	Drehmoment [Nm]
DT#2022-03-07-15:11:31.794	17	1125	0.2	5.1	43	360	6.814230
DT#2022-03-07-15:11:31.894	17	1125	0.2	5.08	43	360	6.803386
DT#2022-03-07-15:11:31.994	17	1125	-0.3	5.09	43	360	6.812428
DT#2022-03-07-15:11:32.094	17	1125	-0.2	5.1	43	360	6.817853
DT#2022-03-07-15:11:32.194	17	1125	0.4	5.1	43	360	6.807003
DT#2022-03-07-15:11:32.294	17	1125	-0.1	5.09	43	360	6.801577
DT#2022-03-07-15:11:32.394	17	1125	-0.2	5.09	43	360	6.816045
DT#2022-03-07-15:11:32.494	17	1125	0.4	5.1	43	360	6.808811
DT#2022-03-07-15:11:32.594	17	1125	0	5.1	43	360	6.805195
DT#2022-03-07-15:11:32.694	17	1125	-0.1	5.09	43	360	6.819662
DT#2022-03-07-15:11:32.794	17	1125	0.1	5.1	43	360	6.819662
DT#2022-03-07-15:11:32.894	17	1125	0.1	5.09	43	360	6.805195
DT#2022-03-07-15:11:32.994	17	1125	-0.3	5.08	43	360	6.810619
DT#2022-03-07-15:11:33.094	17	1125	0.1	5.09	43	360	6.82147
DT#2022-03-07-15:11:33.194	17	1125	0.3	5.1	43	360	6.810619
DT#2022-03-07-15:11:33.294	18	375	-0.3	5.09	43	360	6.807003
DT#2022-03-07-15:11:33.394	18	375	1.3	5.09	43	360	6.82147
DT#2022-03-07-15:11:33.494	18	375	11.5	5.07	43	360	6.794343
DT#2022-03-07-15:11:33.594	18	375	14.8	5.09	44	370	6.781684
DT#2022-03-07-15:11:33.694	18	375	23.6	5.09	45	370	6.805195
DT#2022-03-07-15:11:33.794	18	375	30.7	5.09	46	380	6.82147
DT#2022-03-07-15:11:33.894	18	375	36.2	5.1	46	380	6.83232
DT#2022-03-07-15:11:33.994	18	375	45	5.11	47	390	6.861256
DT#2022-03-07-15:11:34.094	18	375	56.9	5.09	48	400	6.913701
DT#2022-03-07-15:11:34.194	18	375	70.30001	5.09	49	400	6.967954
DT#2022-03-07-15:11:34.294	18	375	86.9	5.08	51	420	7.022208
DT#2022-03-07-15:11:34.394	18	375	107.4	5.1	53	440	7.121673
DT#2022-03-07-15:11:34.494	18	375	125.7	5.13	55	450	7.19582
DT#2022-03-07-15:11:34.594	18	375	146.4	5.11	58	480	7.297092
DT#2022-03-07-15:11:34.694	18	375	173.9	5.09	62	500	7.418258
DT#2022-03-07-15:11:34.794	18	375	196.7	5.11	64	520	7.543041
DT#2022-03-07-15:11:34.894	18	375	226.9	5.1	67	550	7.685909
DT#2022-03-07-15:11:34.994	18	375	247.4	4.68	69	510	7.738354
DT#2022-03-07-15:11:35.094	18	375	271.3	4.4	69	480	7.727503
DT#2022-03-07-15:11:35.194	18	375	286	3.87	69	420	7.66059
DT#2022-03-07-15:11:35.294	18	375	296.8	3.46	69	370	7.548466

Abbildung 5: Format zur Bereitstellung der Messdaten in Form von Zeitreihen

Sobald der Messablauf abgeschlossen wurde, konnten die in der SPS gespeicherten Messwerte im *.csv Format exportiert werden (siehe Abbildung 5).

2.3 B2: Hardwareumsetzung auf industrieller Steuerung

2.3.1 B2.1: Beschreibung der Hardware-Architektur

Im Rahmen des Projektes kam ein Embedded System zum Einsatz, das verschiedene physikalische Parameter erfasste, um die Betriebspunkte von Asynchronmotoren sensorisch zu bestimmen und gleichzeitig den Softsensor ausführen zu können. Die Hardwareplattform vereinte elektrische Messgrößen, Temperatur-, Vibrations- und niederfrequenten Mikrofon mit einem leistungsfähigen Mikrocontroller und geeigneten Schnittstellen zur Datenübertragung.

Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt den grundsätzlichen Hardwareaufbau.

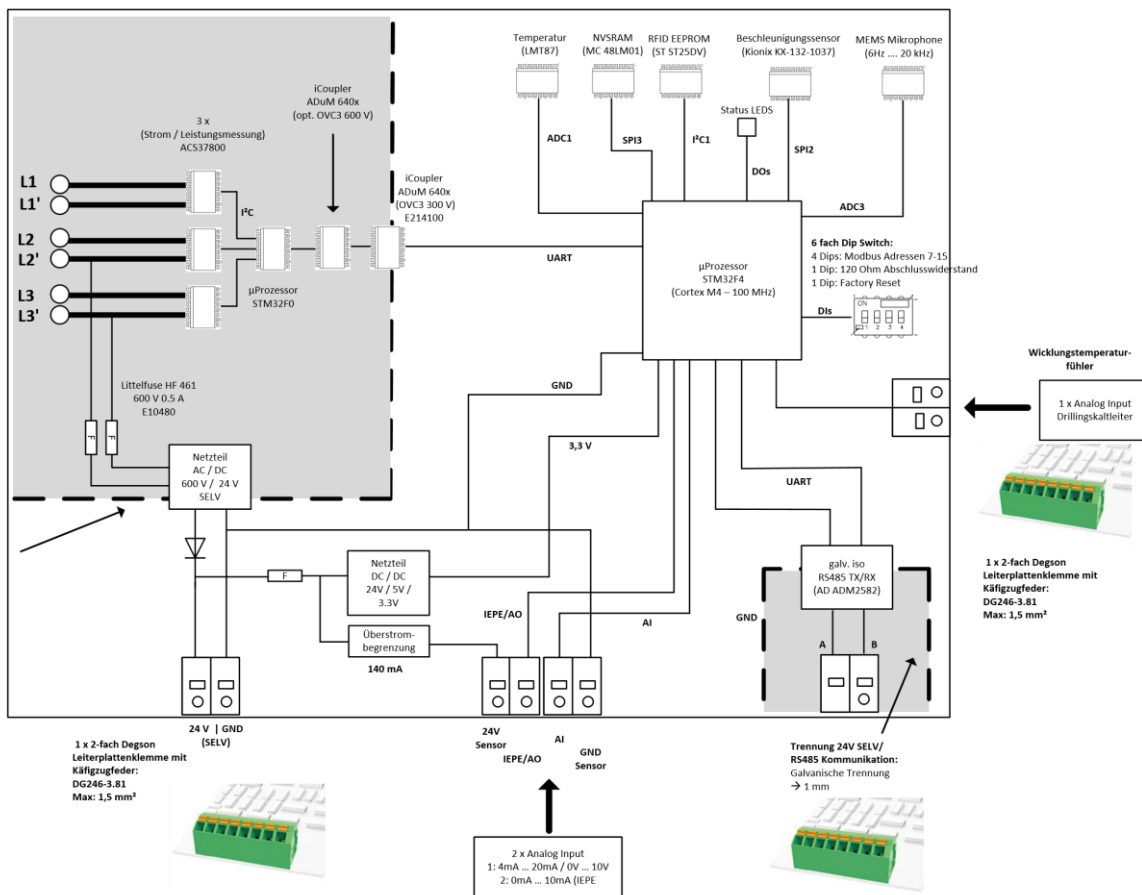


Abbildung 6: Hardware-Architektur des Embedded Systems

Zur Versorgung des Systems wurde die Netzspannung genutzt und über ein 600 V AC / 24 V DC Netzteil auf eine sichere SELV-Spannung transformiert. Sekundärseitig wurden DC/DC-Wandler eingesetzt, die die erforderlichen Betriebsspannungen von 3,3 V bereitstellen. Damit war die galvanische Trennung zwischen Netz- und Auswerteelektronik gewährleistet.

Für die elektrische Erfassung wurde ein ACS37800 vom Hersteller Allegro MicroSystems zur Strom- und Leistungsaufnahme integriert. Zusätzlich kamen Isolationsbausteine zum Einsatz, um eine sichere, galvanische Trennung zu ermöglichen. Eine Überstromschutzschaltung begrenzte die Ströme, um die Baugruppe vor Beschädigungen zu schützen.

Herzstück des Systems war ein STM32H7 Mikrocontroller (Cortex-M4, bis 200 MHz). Dieser übernahm die Signalverarbeitung und steuerte die gesamte Sensorik. Für die Speicherung von Parametern und Betriebsdaten wurden ein NVRAM (MC48LM01) sowie ein SPI EEPROM (ST25DV) eingesetzt, welches über NFC-Technologie verfügt und kabellos ausgelesen werden kann.

Um eine ganzheitliche Zustandserfassung zu ermöglichen, wurden unterschiedliche Sensoren in das Embedded System integriert:

- Ein Temperatursensor (LM75) für die Umgebungserfassung.
- Ein RTD-Eingang für Wicklungstemperaturfühler der Motoren.
- Ein Beschleunigungssensor zur Schwingungsanalyse.
- Ein MEMS-Mikrofon zur akustischen Überwachung (20 Hz – 20 kHz).

Diese ermöglichten eine detaillierte Charakterisierung der Motoren und Pumpen.

Für den Anschluss von externen Sensoren bzw. zur Vernetzung wurde das embedded System weiterhin mit vielfältigen I/O-Schnittstellen ausgestattet:

- Digitale Ausgänge zur Signalisierung von Zuständen.
- Analoge Eingänge (0–10 V / 4–20 mA) für externe Sensoren.
- Ein galvanisch isolierter RS485-Transceiver (ADM2587E) für Modbus RTU zur Anbindung an das Cloud-Gateway.
- Eine IEPE-Schnittstelle für den Anschluss von externen piezoelektrischen Schwingungssensoren.

Der Prototyp bestand aus drei 4-lagigen Leiterplatten, die unter Verwendung von Abstandsbolzen aufeinander gesteckt und zusammengeschaubt wurden.

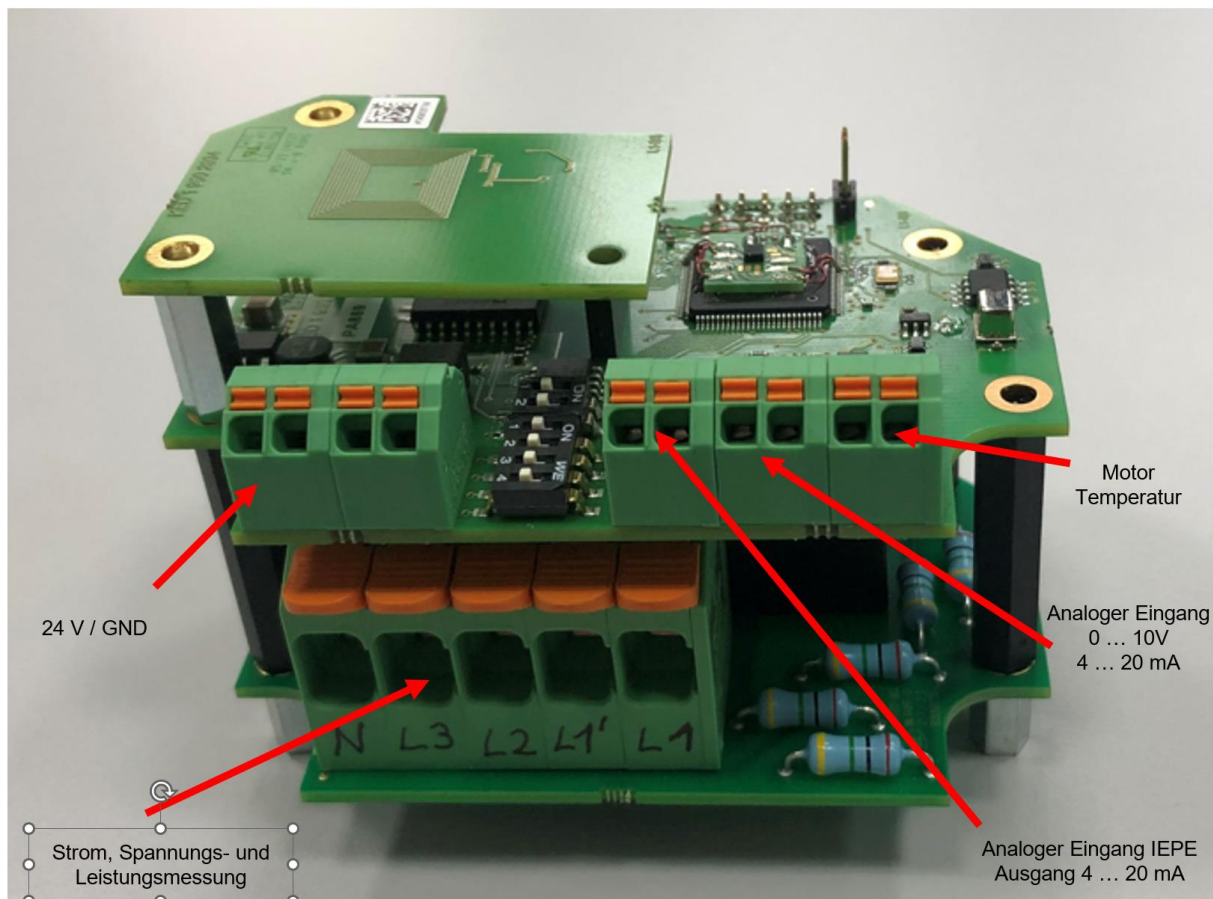


Abbildung 7: Leiterplattenaufbau des embedded Systems

Der Prototyp war ausschließlich für Laborzwecke konzipiert. Ziel war es, damit die Funktionalität und das Zusammenspiel der einzelnen Sensorkomponenten mit der Datenverarbeitungseinheit zu validieren. Eine EMV-gerechte Auslegung wurde in diesem Stadium nicht umgesetzt. Ebenso wurden Sicherheitsrichtlinien (z. B. Berührungsschutz, Isolationsanforderungen) nicht berücksichtigt.

2.3.2 B2.1: Beschreibung der Software-Architektur sowie Entwicklungsumgebung

Für die Softwareentwicklung wurde die STM32CubeIDE verwendet. Diese Entwicklungsumgebung integriert einen Code-Generator (STM32CubeMX), Compiler und Linker, sowie einen Debugger mit SWD/JTAG-Schnittstelle. Durch die einheitliche Plattform konnte der Entwicklungsprozess effizient gestaltet und die Hardware-nahe Programmierung mit einer modernen IDE unterstützt werden.

Als Betriebssystem wurde FreeRTOS eingesetzt. FreeRTOS ist ein Echtzeitbetriebssystem, das speziell für Mikrocontroller entwickelt wurde und kostenfrei eingesetzt werden darf.

Wesentliche Eigenschaften waren:

- Task-basierte Architektur für die parallele Bearbeitung mehrerer Funktionen.
- Scheduler für die Priorisierung von zeitkritischen Abläufen.
- Queues und Semaphoren für eine sichere und geordnete Kommunikation zwischen den Tasks.

Die Softwarearchitektur folgte klaren Strukturierungsprinzipien, um Robustheit und Erweiterbarkeit sicherzustellen:

- Modularisierung: Jede funktionale Komponente (z. B. Sensorerfassung, Signalverarbeitung, Kommunikation, Softsensor) wurde als eigenständiges Softwaremodul entwickelt.
- Kapselung: Module hatten definierte Schnittstellen, wodurch interne Implementierungsdetails verborgen blieben.
- Entkopplung: Die Kommunikation zwischen Modulen erfolgte über die von FreeRTOS angebotene IPC-Mechanismen Queues und Events, was prozessuale Abhängigkeiten minimierte.

Die Modularisierung spiegelte sich in einer klaren Task-Struktur wider: Sensor-Task: Erfassung von Strömen, Spannungen, Temperaturen und weiteren physikalischen Größen.

- Signalverarbeitungs-Task: Vorverarbeitung der Messdaten und Bereitstellung für Algorithmen.
- Softsensor-Task: Berechnung und Schätzung von nicht direkt messbaren Größen durch den Softsensor, insbesondere Durchfluss.
- Kommunikations-Task: Austausch von Daten über die Modbus-RTU Schnittstelle
- System-Monitoring-Task: Überwachung von Fehlerzuständen und Ressourcen

2.3.3 Integration des Softsensors in die Software-Architektur

Der entwickelte Quelltext für den Softsensor wurde in mehrere Module aufgeteilt, die eine klare Struktur ermöglichen.

Alle Softwareanteile für den Softsensor wurden in der Entwicklungsumgebung STM32CubeIDE in einem separaten Ordner eingebunden.

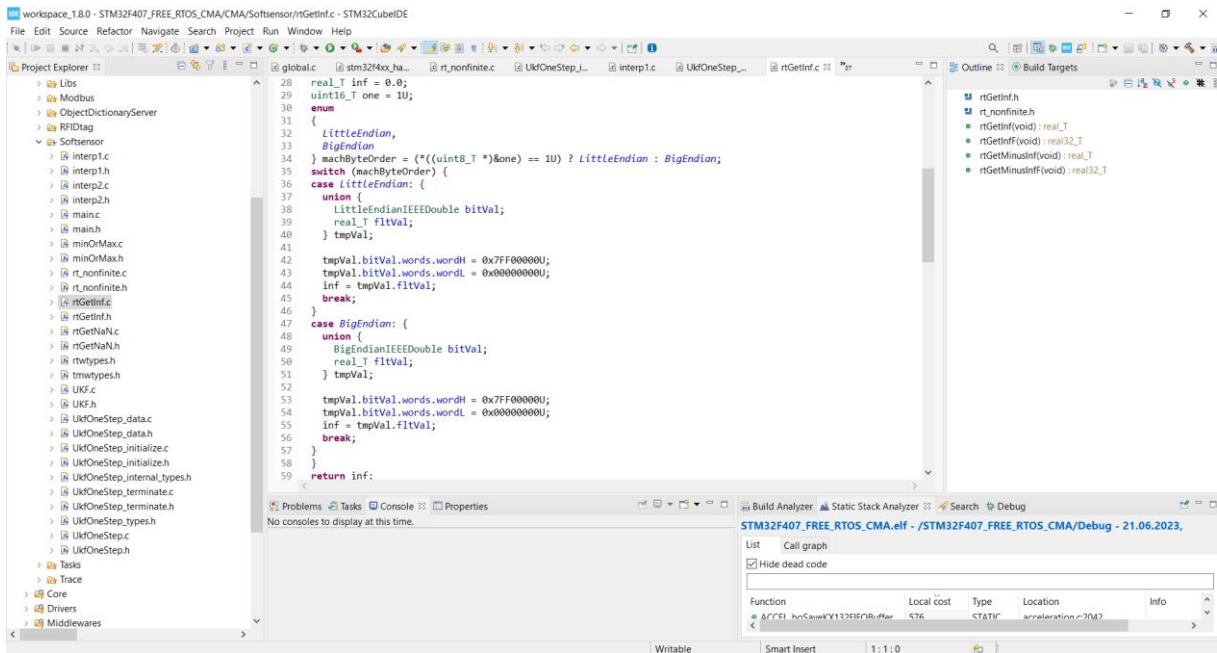


Abbildung 8: Darstellung der Entwicklungsumgebung STM32CubeIDE

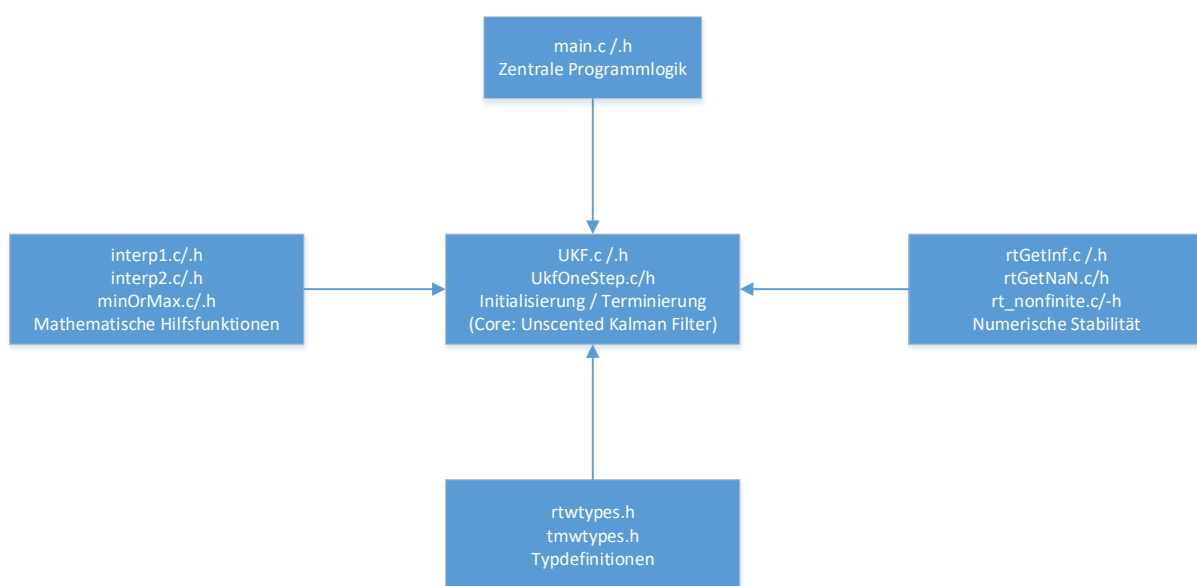


Abbildung 9: Architekturübersicht des Softsensor-Quelltextes

Die Dateien main.c und main.h enthielten den Einstiegspunkt des Programms. Dies beinhaltete die zentrale Programmlogik für das System, die Aufrufe der Softsensor-Funktionen sowie die zyklische Berechnung des geschätzten Pumpendurchflusses implementiert. Zum zyklischen Aufruf wurden eigens ein eigenen Betriebssystem-Thread mit einer minimalen Zykluszeit von 1 ms aufgesetzt.

Die Module interp1.c/h, interp2.c/h und minOrMax.c/h stellten grundlegende numerische Funktionen zur Verfügung, z. B. lineare und bilineare Interpolation oder die Bestimmung von Minimal- und Maximalwerten. Diese Funktionen dienten als mathematische Basisbausteine für die Verarbeitung von Eingangsdaten.

In den Modulen rtGetInf.c/h, rtGetNaN.c/h und rt_nonfinite.c/h wurden Hilfsroutinen implementiert, um spezielle numerische Werte wie ∞ oder NaN korrekt behandeln zu können. Dies war insbesondere bei der Simulation und Filterung von Signalen relevant, um numerische Stabilität sicherzustellen.

Den Kern des Softsensors bildeten die Module UKF.c/h (Unscented Kalman Filter) sowie die dazugehörigen Routinen UkfOneStep.c/h, UkfOneStep_initialize.c/h, UkfOneStep_terminate.c/h und die internen Typdefinitionen (UkfOneStep_internal_types.h). Der Unscented Kalman Filter (UKF) wurde als Zustandsbeobachter verwendet, um aus elektrischen und mechanischen Motordaten (z. B. Strom, Spannung, Drehzahl) eine Schätzung des Durchflusses abzuleiten. Dazu wurde ein Zustandsmodell der Pumpe implementiert, das auf nichtlinearen Gleichungen beruhte.

Die Headerdateien rtwtypes.h und tmwtypes.h definierten standardisierte Datentypen (z. B. real_T, int_T) zur Sicherstellung der Portabilität des Codes. Diese Strukturen ermöglichten eine einfache Integration in Embedded-Systeme mit unterschiedlichen Mikrocontrollern.

2.4 B3: Implementierung der Algorithmen und Finalisierung des Prototyps

Die finale Implementierung und der Aufbau des gesamten Prototyps erfolgte im Arbeitspaket B3. Unter simulierten Realbedingungen wurde das Verhalten des gesamten Pumpenaggregats charakterisiert. Dazu wurde das embedded System in unterschiedlichen Pumpen eingebaut, die teilweise nicht-invertierbare Leistungskennlinien aufwiesen.

Da das embedded System sinusförmige Spannungsverläufe voraussetzt, musste zwischen dem Ausgang des Frequenzumrichters und dem jeweiligen Motor ein Sinusfilter integriert werden, der die PWM-modulierten Ausgangsspannung des Frequenzumrichters in eine äquivalente Sinusspannung umformt.

Sowohl im Hause Brinkmann und am Prüfstand der Herborner Pumpentechnik wurden unterschiedlichste Betriebspunkte (Druck, Durchfluss, Drehzahl) der Pumpen erfasst und mit den Berechnungen des Softsensors in verglichen. Die Betriebspunkte wurden in kurzen zeitlichen Abständen variiert, um auch die Genauigkeit bei der Betriebspunktschätzung in dynamischen Anwendungen mit schnell veränderlichen Verbrauchern bzw. Sollwertänderungen ermitteln zu können.

Iterativ wurden die Parameter des Softsensors für die verschiedenen Pumpen optimiert und anschließend erneut verfahren. Zur Verbesserung der Handhabbarkeit wurden die Parameter des Softsensors auf Modbus-Parameter abgebildet, sodass eine Optimierung des Softsensors keine Neuübersetzung der Software des Mikroprozessorsystems erforderte.

Zu Beginn der Messungen wurden Abweichungen bis hin zu 15% in der Durchflussschätzung festgestellt, was für eine praxisnahe Anwendung nicht ausreichend ist. Im Rahmen diverser Optimierungsschleifen am Softsensormodell bzw. der Ermittlung der Parametersätze der Softsensoren, ist es jedoch gelungen diese bis auf maximal 5-6 % zu reduzieren. Die vollständigen Ergebnisse sind dem Bereich des Projektpartners Ruhr Uni Bochum zu entnehmen.

Neben der Betriebspunktbestimmung mittels Softsensors erfolgte im Arbeitspaket B3 Untersuchungen zur KI-gestützten Zustands- und Schadensprädiktion. In diesem Zusammenhang wurde das notwendige Prüfumfeld konzipiert und aufgebaut. Nachdem das Konzept zur Anbindung des embedded Systems an die Cloud erarbeitet wurde, erfolgte die Realisierung dieser Anbindung. Dazu wurden Software-Module für das Datengateway konzipiert und implementiert, die den Datenaustausch zum embedded Systems über das Modbus RTU Protokoll ermöglicht und andererseits an die Cloud koppelt, die von der Herborner Pumpentechnik aufgebaut wurde.

Die definierten Prüfobjekte wurden im Anschluss daran in verschiedene Verschleiß- bzw. Beschädigungszustände versetzt und erneut Zeitreihen aufgezeichnet, welche elektrische Größen, Betriebspunkte und Beschleunigungsinformationen beinhalteten. Diese wiederum wurden nach Erfassung und Aufzeichnung an das Gateway übermittelt und zum Training von KI-basierenden Modellen verwendet. Es stellte sich dabei frühzeitig heraus, dass der ursprüngliche Datenaustausch über Modbus sowohl vom zeitlichen Ablauf als auch von der Datenrepräsentation nicht effizient genug erfolgte und einen Engpass darstellen.

Um Datendurchsatz zu erhöhen, wurde der Modbus Treiber des embedded Systems erweitert und von der Verwendung einzelner Read PDUs auf einen Blocktransfer umgestellt. Eine Steigerung um mehr als 300% konnte erreicht werden.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel, eine smarte Pumpe durch die Abbildung in einem digitalen Zwilling innerhalb einer Cloudlösung des Herstellers zu realisieren, konnte aus Sicht von Brinkmann Pumpen konzeptionell weitestgehend erreicht werden.

Die dazu notwendige Softsensorik konnte erfolgreich auf dem embedded System realisiert werden. Da der Fokus auf Pumpen mit Frequenzumrichter lag, musste jedoch die PWM-modulierte Ausgangsspannung der Frequenzumrichter mittels eines Sinusfilters wieder in einem sinusförmigen Verlauf gewandelt werden, um eine korrekte Messwerterfassung zu gewährleisten. Da dies jedoch für die produktive Nutzung unwirtschaftlich ist, müsste für eine mögliche Produktisierung dieses Konzepts eine direkte Messung und Auswertung der PWM-modulierten Ausgangsspannung durch das Embedded System möglich sein, ohne dabei einen Sinusfilter verwenden zu müssen. Dies würde wiederum hohe Abtastraten der Spannungsverläufe sowie angepasste Signalverarbeitungsalgorithmen erfordern.

Die Untersuchungen zur Entwicklung der KI-gestützte Zustands- und Schadensprädiktion zeigten ebenfalls gute Ergebnisse. Mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 80 % konnten die verschiedenen Schadens- und Verschleißmuster zuverlässig erkannt werden, was eine grundsätzliche Machbarkeit bekräftigt. Nichtsdestotrotz wurden in diesem Verbundprojekt nur wenige, unterschiedliche Schadens- und Verschleißmuster isoliert betrachtet. Um jedoch allgemeingültig Anomalien bei Pumpen zuverlässig erkennen, unterscheiden und daran anpassen zu können, bedarf es deutlich umfangreichere Untersuchungen, die ggfs. in einem weiterführenden Forschungsprojekt bearbeitet werden sollten.

Alles in einem wurde in diesem Verbundprojekt erfolgreich demonstriert, das grundsätzlich eine Betriebspunktschätzung und Schadenserkenkung mit den angedachten Technologien prinzipiell möglich ist, was eine essenzielle Grundlage für eine prädiktive Ersatzteilversorgung von Pumpen in maritimen Anwendungen darstellt.

4 Literaturverzeichnis

- [1] A. S. V. Kalaiselvan, U. Subramanian und P. Shanmugam: "A comprehensive review on energy efficiency enhancements initiatives", in *Applied Energy*, Bd. 181, pp. 495-513, 2016
- [2] International Maritime Organization: "2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS," Marine Environment Protection Committee (MEPC), London, 2023.
- [3] T. Hieninger, F. Goppelt, R. Schmidt-Vollus und E. Schlücker: "Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes," *Energy Efficiency*, Bd. 14, Nr. 2, p. 23, 2021.
- [4] J. Tamminen, J. Viholainen, T. Ahonen, J. Ahola, S. Hammo und E. Vakkilainen: "Comparison of model-based flow rate estimation methods in frequency-converter-driven pumps and fans," *Energy Efficiency*, Bd. 7, pp. 493-505, 2014.
- [5] Y. Jiang, S. Yin, J. Dong und O. Kaynak: "A Review on Soft Sensors for Monitoring, Control, and Optimization of Industrial Processes," *IEEE SENSORS JOURNAL*, Bd. 21, Nr. 11, pp. 12868-12881, 2021.
- [6] T. Ahonen, J. Tamminen und J. Kestilä: "Frequency-Converter-Based Hybrid Estimation Method for the Centrifugal Pump Operational State," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, , Bd. 59, Nr. 12, pp. 4803-4809, 2012.

5 Anhänge

5.1 Lastenheft Prüfstandserweiterung

SPuDis - Anforderungen an die Prüfstandserweiterungen zur Vermessung von FM-Konstellationen

Lastenheft

Version 0.2



Brinkmann Pumpen
K.H. Brinkmann GmbH & Co. KG
Friedrichstraße 2
58791 Werdohl
Deutschland
<http://www.brinkmannpumps.de>

VERZEICHNISSE

SPuDis - Anforderungen an die Prüfstandserweiterungen zur Vermessung von FM-Konstellationen

Lastenheft

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis	6
2	Zweck des Dokuments	7
3	Anforderungen an den Prüfstand.....	7
3.1	Definition und Anforderungen an die Prüfobjekte (PO)	8
3.2	Anforderungen an die Messgrößen (MG)	9
3.3	Anforderungen an die Stellgrößen (SG)	12
3.4	Anforderungen an die Messszenarien (MS)	13
3.5	Anforderungen an die Aufzeichnung, Auswertung und das Datenformat (AAD).....	14
4	Abschätzung Datenaufkommen / Mengengerüst	14

2 Zweck des Dokuments

Im Rahmen des Förderprojekts Smarte Pumpen für die digitale Schifffahrt (kurz SPuDis) sollen Softsensoren für Pumpen u.a. zur Schätzung des geförderten Durchflusses entwickelt werden. Die Softsensoren bedienen sich aus physikalischen Messgrößen, die von Frequenzumrichter standardmäßig bereitgestellt werden.

Die Algorithmen der Softsensor sollen auf einem hybriden (analytisch + stochastisch) Modell basieren. Die zur Modellbildung notwendigen Messreihen sollen über Prüfstände für unterschiedliche Pumpentypen ermittelt werden. Dabei werden die Pumpen in die Komponenten Hydraulik und Frequenzumrichter-Motor unterteilt, sodass eine separate Modellierung der Einzelbestandteile eine Kombination von unterschiedlichen Hydrauliken mit Frequenzumrichter-Motor Konstellationen möglich ist.

In diesem Zusammenhang beinhaltet das vorliegende Dokument die Anforderungen an den Prüfstand zur Vermessung der Frequenzumrichter-Motor Konstellationen, um geeignete Messreihen zur Modellentwicklung gewinnen zu können. Auch sollen die Messreihen dazu dienen, die von den Frequenzumrichter bereitgestellten Messgrößen mit durch externe Sensoren erfasste Messgrößen zu vergleichen, sodass eine qualitative Beurteilung (Genauigkeit, Varianz) FU-Messgrößen möglich wird.

3 Anforderungen an den Prüfstand

Daten des aktuellen Motorprüfstands:

Maximale Leistung: 30 kW (2 polige Maschinen 13 kW – 15 kW)

Achtung: Achsenhöhe nur bis 265 mm veränderbar.

Befestigung über Winkel zwischen Stator und Prüfstandsgrundplatte

3.1 Definition und Anforderungen an die Prüfobjekte (PO)

ID	Anforderung	Q	P	Autor
PO001	Definition Prüfgegenstand 1: Referenzpumpe: 3/K80-2-150 FU: Danfoss 2,2 kW AQUA Drive FC 202 Motor: VEM IE3 KPR 100LZ/4 2,2kW 1500/min, D400-S690V, 50Hz, B5/V1	m	1	BP
PO002	Definition Prüfgegenstand 2: Referenzpumpe: 0,75/K25-1-109 FU: Kostal 0,55 kW INVEOR 10090801 Motor: EMOD HEF 80L/4a 0,55kW 1500/min, D230-S400V, 50Hz, B5/V1	m	1	BP
PO003	Definition Prüfgegenstand 3: Referenzpumpe: AKRX/80-2-120 FU: ABB 11 kW ACQ580-01-026A-4+B056+J400 Motor: EMOD SM 160M/2 11/13,2kW 3000/3600/min, D380/D440V, 50/60Hz, B5/V1	m	1	BP
PO004	Definition Prüfgegenstand 4: Referenzpumpe: 5,5/QSH101-1-184 FU: Danfoss 4 kW AQUA Drive FC 202 Motor: Hoyer IE3 HMA3 112M2/4 4/4,8kW 1500/1800/min, D400-S690/D440V, 50/60Hz, B5/V1	m	1	BP
PO005	Definition Prüfgegenstand 5: Referenzpumpe: SBA1302_7,5_5_400_IE3 FU: Brinkmann FKO 7,5 kW Motor: Brinkmann IE3_132.200_7,5_5_400_2_LL_MV003	m	1	BP
PO006	Eine Kombination anderer FM Konstellationen (außer Prüfgegenstand 1-5) ist nicht vorgesehen.	m	1	BP

3.2 Anforderungen an die Messgrößen (MG)

ID	Anforderung	Q	P	Autor
MG001	Die Drehzahl des Antriebs muss durch den Frequenzumrichter erfasst werden. Abtastrate: 10 Hz (alle 100 ms) Genauigkeit: Auflösung: Einheit: U/min Datenformat/Datentyp: float 4.1	m	1	BP
MG002	Die Drehzahl des Antriebs muss durch einen externen Sensor erfasst werden. Abtastrate: 200 Hz (alle 500 μ s) Genauigkeit: Auflösung: Einheit: U/min Datenformat/Datentyp: float 4.1	m	1	BP
MG003	Die Frequenz des elektrischen Felds (Synchron Drehzahl) muss durch den Frequenzumrichter erfasst werden. Abtastrate: 10 Hz (alle 100 ms) Genauigkeit: Auflösung: Einheit: Hz Datenformat/Datentyp: float 2.2	m	1	BP
MG004	Die Frequenz des elektrischen Felds (Synchron Drehzahl) muss durch einen Sensor erfasst werden. Abtastrate: Genauigkeit: Auflösung: Einheit: Hz Datenformat/Datentyp: float 2.2	m	1	BP
MG005	Das Drehmoment des Antriebs muss durch den Frequenzumrichter erfasst werden. Abtastrate: 10 Hz (alle 100 ms) Genauigkeit: unbekannt Auflösung: Einheit: Nm Datenformat/Datentyp: float 3.1	m	1	BP

MG006	Das Drehmoment des Antriebs muss durch einen externen Sensor / eine externe Last erfasst werden. Abtastrate: Genauigkeit: unbekannt Auflösung: Einheit: Nm Datenformat/Datentyp: float 3.1	m	1	BP
MG007	Die Wellenleistung P2 des Antriebs muss durch den Frequenzumrichter erfasst werden. Abtastrate: Genauigkeit: unbekannt Auflösung: Einheit: kW Datenformat/Datentyp: float 3.1	m	1	BP
MG008	Die Wellenleistung P2 des Antriebs muss durch einen externen Sensor / eine externe Last erfasst werden Abtastrate: Genauigkeit: unbekannt Auflösung: Einheit: kW Datenformat/Datentyp: float 3.1	m	1	BP
MG009	Der gesamte Strom aus den drei Phasen der Zuleitung des Antriebs muss durch den Frequenzumrichter erfasst werden. Abtastrate: 10 Hz (alle 100 ms) Genauigkeit: unbekannt Auflösung: Einheit: A Datenformat/Datentyp: float 2.2 Hinweis: Es ist nicht nötig jede Phase einzeln zu vermessen.	m	1	BP
MG010	Die Ströme in den drei Phasen der Zuleitung des Antriebs müssen durch externe Sensoren einzeln erfasst werden. Abtastrate: 200 Hz Genauigkeit: Auflösung: Einheit: A Datenformat/Datentyp: float 2.2	m	1	BP

	Hinweis: Jede Phase ist einzeln zu messen. Sollen die Messreihen in Stern und /oder Dreieckschaltung durchgeführt werden.			
MG011	Die Spannung mindestens in einer der drei Phasen der Zuleitung des Antriebs muss durch den Frequenzumrichter erfasst werden. Abtastrate: 10 Hz (alle 100 ms) Genauigkeit: Auflösung: Einheit: V Datenformat/Datentyp: float 3.1 Hinweis: Asymmetrien in den Spannungen bleiben unberücksichtigt.	m	1	BP
MG012	Die Spannungen in den drei Phasen der Zuleitung des Antriebs müssen durch externe Sensoren einzeln erfasst werden. Abtastrate: Genauigkeit: Auflösung: Einheit: V Datenformat/Datentyp: float 3.1 Hinweis: Jede Phase ist einzeln zu messen.	m	1	BP
MG013	Die Wirkleistung, Scheinleistung und Blindleistung des Antriebs müssen durch externe Sensoren erfasst werden. Abtastrate: Genauigkeit: Auflösung: Einheit: kW, kVA, kVAR Datenformat/Datentyp: float 3.1	m	1	BP
MG014	Die Wirkleistung, Scheinleistung und Blindleistung des Antriebs müssen durch FU erfasst werden. Abtastrate: Genauigkeit: Auflösung: Einheit: kW, kVA, kVAR Datenformat/Datentyp: float 3.1	m	1	BP
MG015	Der Leistungsfaktor (cos phi) muss durch externe Sensoren erfasst werden. Abtastrate: Genauigkeit: Auflösung: Einheit: - Datenformat/Datentyp: float 1.3	m	1	BP

MG016	Der Leistungsfaktor (cos phi) muss durch den Frequenzumrichter erfasst werden. Abtastrate: Genauigkeit: Auflösung: Einheit: - Datenformat/Datentyp: float 1.3	m	1	BP
MG017	Die Richtung des Drehfelds ist durch Auswertung der Phasenlage der Außenleiterspannungen durch externe Sensoren zu messen.	m	1	BP
MG018	Die Motortemperatur ist durch einen externen Sensor zu erfassen. Der Temperatursensor ist am Statorgehäuse des Antriebs zu befestigen. Abtastrate: 200 Hz Genauigkeit: Auflösung: Einheit: °C Datenformat/Datentyp: float 3.1 Hinweis: Je nach Motortemperatur ist die benötigte elektrische Leistung für die Bereitstellung eines definierten Drehmoments unterschiedlich.	m	1	BP

3.3 Anforderungen an die Stellgrößen (SG)

ID	Anforderung	Q	P	Autor
SG001	Die Drehzahl des Antriebs auf dem Prüfstand muss einstellbar sein. Änderungsrate: 10 Hz Einheit: U/min Datenformat/Datentyp: float 3.1	m	1	BP
SG002	Das Lastdrehmoment des Prüfstands muss einstellbar sein. Änderungsrate: 10 Hz Einheit: Nm Datenformat/Datentyp: float 3.1	m	1	BP

3.4 Anforderungen an die Messszenarien (MS)

ID	Anforderung	Q	P	Autor																																																																																																													
MS001	In einem Messszenario sind der Drehzahl- und Drehmomentbereich jeweils in 20 Schritten anzufahren, sodass insgesamt 400 Arbeitspunkte pro Messszenario vermessen werden.	m	1	BP																																																																																																													
MS002	Die Schrittweite bei der Drehzahlvorgabe beträgt bei 2 poligen Antrieben 2,5 Hz und bei 4 poligen Antrieben 1,25 Hz.	m	1	BP																																																																																																													
MS003	Es muss der gesamte Drehzahlbereich (0...50 Hz bzw. 0...25Hz) des Antriebs angefahren werden.	m	1	BP																																																																																																													
MS004	Die Schrittweite der Drehmomentvariation ist abhängig vom maximalen Drehmoment des Antriebs, welches in 20 Schritte unterteilt wird. Die Schrittweite ergibt sich aus: maximales Drehmoment / 20.	m	1	BP																																																																																																													
MS005	Die Drehzahlvariation wird beendet, sobald der Nennstrom des Antriebs um 5% überschritten wird bzw. das maximale Drehmoment erreicht ist.	m	1	BP																																																																																																													
MS006	In einem Messszenario wird zuerst das statische Verhalten durch das Anfahren der 400 Arbeitspunkte ermittelt. Danach erfolgt das Messen des dynamischen Verhaltens durch gezielte, große Lastwechsel durch Sprünge in der Drehzahl und dem Drehmoment.	m	1	BP																																																																																																													
MS007	Folgende Lastwechsel müssen durchfahren werden:																																																																																																																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nr.</th> <th colspan="2">Von</th> <th colspan="2">Nach</th> </tr> <tr> <th>Drehzahl</th> <th>Drehmoment</th> <th>Drehzahl</th> <th>Drehmoment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>10%</td><td>10%</td><td>100%</td><td>10%</td></tr> <tr><td>2</td><td>100%</td><td>10%</td><td>10%</td><td>10%</td></tr> <tr><td>3</td><td>10%</td><td>10%</td><td>100%</td><td>10%</td></tr> <tr><td>4</td><td>100%</td><td>10%</td><td>100%</td><td>100%</td></tr> <tr><td>5</td><td>100%</td><td>100%</td><td>10%</td><td>10%</td></tr> <tr><td>6</td><td>10%</td><td>10%</td><td>10%</td><td>50%</td></tr> <tr><td>7</td><td>10%</td><td>50%</td><td>10%</td><td>10%</td></tr> <tr><td>8</td><td>10%</td><td>10%</td><td>50%</td><td>10%</td></tr> <tr><td>9</td><td>50%</td><td>10%</td><td>50%</td><td>50%</td></tr> <tr><td>10</td><td>50%</td><td>50%</td><td>10%</td><td>10%</td></tr> <tr><td>11</td><td>10%</td><td>10%</td><td>25%</td><td>25%</td></tr> <tr><td>12</td><td>25%</td><td>25%</td><td>75%</td><td>25%</td></tr> <tr><td>13</td><td>75%</td><td>25%</td><td>25%</td><td>25%</td></tr> <tr><td>14</td><td>25%</td><td>25%</td><td>25%</td><td>75%</td></tr> <tr><td>15</td><td>25%</td><td>75%</td><td>25%</td><td>25%</td></tr> <tr><td>16</td><td>25%</td><td>25%</td><td>75%</td><td>75%</td></tr> <tr><td>17</td><td>75%</td><td>75%</td><td>25%</td><td>25%</td></tr> <tr><td>18</td><td>25%</td><td>25%</td><td>100%</td><td>100%</td></tr> <tr><td>19</td><td>100%</td><td>100%</td><td>25%</td><td>25%</td></tr> <tr><td>20</td><td>25%</td><td>25%</td><td>10%</td><td>10%</td></tr> </tbody> </table>				Nr.	Von		Nach		Drehzahl	Drehmoment	Drehzahl	Drehmoment	1	10%	10%	100%	10%	2	100%	10%	10%	10%	3	10%	10%	100%	10%	4	100%	10%	100%	100%	5	100%	100%	10%	10%	6	10%	10%	10%	50%	7	10%	50%	10%	10%	8	10%	10%	50%	10%	9	50%	10%	50%	50%	10	50%	50%	10%	10%	11	10%	10%	25%	25%	12	25%	25%	75%	25%	13	75%	25%	25%	25%	14	25%	25%	25%	75%	15	25%	75%	25%	25%	16	25%	25%	75%	75%	17	75%	75%	25%	25%	18	25%	25%	100%	100%	19	100%	100%	25%	25%	20	25%	25%	10%	10%
	Nr.	Von		Nach																																																																																																													
		Drehzahl	Drehmoment	Drehzahl	Drehmoment																																																																																																												
	1	10%	10%	100%	10%																																																																																																												
	2	100%	10%	10%	10%																																																																																																												
	3	10%	10%	100%	10%																																																																																																												
	4	100%	10%	100%	100%																																																																																																												
	5	100%	100%	10%	10%																																																																																																												
	6	10%	10%	10%	50%																																																																																																												
	7	10%	50%	10%	10%																																																																																																												
	8	10%	10%	50%	10%																																																																																																												
	9	50%	10%	50%	50%																																																																																																												
	10	50%	50%	10%	10%																																																																																																												
	11	10%	10%	25%	25%																																																																																																												
	12	25%	25%	75%	25%																																																																																																												
	13	75%	25%	25%	25%																																																																																																												
	14	25%	25%	25%	75%																																																																																																												
	15	25%	75%	25%	25%																																																																																																												
	16	25%	25%	75%	75%																																																																																																												
	17	75%	75%	25%	25%																																																																																																												
18	25%	25%	100%	100%																																																																																																													
19	100%	100%	25%	25%																																																																																																													
20	25%	25%	10%	10%																																																																																																													
MS008																																																																																																																	

3.5 Anforderungen an die Aufzeichnung, Auswertung und das Datenformat (AAD)

ID	Anforderung	Q	P	Autor
AAD001	Die Aufzeichnung der Messergebnisse muss in einer Excel konformen csv Datei erfolgen.	m	1	BP
AAD002	Alle Mess- und Stellgrößen sollen zyklisch und mit Zeitstempel versehen in tabellarischer Form in die csv Datei geschrieben werden.	m	1	BP
AAD003	Alle Mess- und Stellgrößen sollen zyklisch mindestens alle 1 ms aufgezeichnet werden. Messgrößen mit niedriger Abtastrate (aus Frequenzumrichter) werden mit identischer Auszeichnungsrage in die csv Datei geschrieben.	m	1	BP
AAD004	Die Namen der Messdateien sollen folgender Aufbau aufweisen: FM_Kennung_Antrieb_Kennung_FU_[YYYY-MM-DD-hh-mm].csv	m	1	BP
AAD005	Die Abweichung der Messgrößen aus dem Frequenzumrichter und externen Sensoren soll ermittelt und prozentual in der Messdatei enthalten sein.	m	1	BP

4 Abschätzung Datenaufkommen / Mengengerüst

- Arbeitspunkte (stationäre Messungen): 400 Stk.
 - Arbeitspunkte (dynamische Messungen): 20 Stk.
 - Zeitlicher Abstand zwischen Arbeitspunkten: 10s
 - Samplerate = 1000 Samples / s
 - Messgrößen = 32
 - Datenbreite Messgröße = 4 byte
-
- Messdauer pro Szenario: $(400 + 20) * 10 \text{ s} = 4200 \text{ s}$ (70 min)
 - Größe der csv Datei: $4200 \text{ s} * 1000 \text{ Samples / s} * 32 * 4 \text{ byte} = 537 \text{ Mbyte}$