

Lehrstuhl für Regelungstechnik und
Systemtheorie, Ruhr-Universität Bochum



Smarte Regelung und Diagnose für den energieeffizienten Betrieb von Pumpen

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 32936/01-24/2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



von

Yannik Löhr, Torsten Gunder, Oliver Berner, Kai König,
Dr.-Ing. Sebastian Leonow, Prof. Dr.-Ing. Martin Mönnigmann

Juni 2021

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32936/01	Referat	24/0	Fördersumme	172.440 €
----	-----------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Smarte Regelung und Diagnose für den energieeffizienten Betrieb von Pumpen**

Stichworte Energie, Energieeffizienz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
39 Monate	01.02.2018	31.03.2021	2

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Ruhr-Universität Bochum	Tel	0234/3224060
	Fakultät für Maschinenbau	Fax	0234/3214155
	Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie	Projektleitung	
	44801 Bochum	Prof. Dr.-Ing. Martin Mönningmann Dr.-Ing. Sebastian Leonow	
		Bearbeiter	
		T. Gunder, O. Berner, Y. Löhr	

Kooperationspartner Forschungsfond Pumpen des Fachverbandes Pumpen + Systeme des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) (Beirat des Projektes)

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Pumpen machen einen Anteil von 22 % am elektromotorischen Energieverbrauch in der Europäischen Union aus. Durch effizienteren Betrieb dieser Pumpen lassen sich hohe Energieeinsparungen erzielen, in der Praxis werden verfügbare Technologien aber oft aufgrund von erhöhten Kosten und erhöhtem Aufwand nicht eingesetzt [1]. Das vorliegende Vorhaben untersucht zwei Kernaspekte zur Erhöhung der Energieeffizienz. Zum einen soll ein günstig zu installierender, adaptiver Regler entwickelt werden, der sich selbst konfiguriert und Energieeinsparungen beim Betrieb von Pumpen erzielt. Zum anderen wird die Nachhaltigkeit dadurch erhöht, dass Methoden zur Analyse des aktuellen Betriebspunkts sowie zur Schadensmustererkennung entwickelt werden, die sich kostengünstig mit konventionellen Smartphones ausführen lassen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im ersten Teilprojekt wird die Notwendigkeit eines günstigen Zweipunktreglers zum Senken der Nutzungshürde energieeffizienter Regelungen von Pumpen identifiziert. Es soll eine Regelung entwickelt werden, die ohne Parametrierung durch den Anwender und mit einem rein binären Messsignal den Prozess energie- und verschleißoptimiert regeln kann. Neben der Entwicklung und simulativen Validierung erfolgt die Umsetzung dieses adaptiven Zweipunktreglers auch in der Programmiersprache C. Der Code wird auf einem Mikrocontroller implementiert und an verschiedenen Prüfständen validiert. Im zweiten Teilprojekt werden existierende Lösungen zur vibrationsbasierten Überwachung von Pumpen evaluiert und auf die Möglichkeit ihrer Umsetzung auf handelsüblichen Smartphones untersucht. Methodische Grundlage für eine Betriebspunkterkennung, Effizienzanalyse und Schadensfrüherkennung ist die schnelle Fourier-Transformation. Dieses Verfahren ist auf einem Smartphone zu implementieren und mit hydraulischen und mechanischen Modellen von Motor und Pumpe zu kombinieren, um Betriebspunkt und Effizienz bestimmen zu können. Neben dem Beschleunigungssensor wird auch das Mikrofon des Smartphones eingesetzt. Darüber hinaus sollen Methoden zur Erkennung häufiger Schadensmerkmale (z. B. Unwucht oder Kavitation) auf dem Smartphone umgesetzt werden. Neben der Nutzung bekannter Methoden sind dabei weitere Entwicklungen nötig, um Schadensmerkmale trotz im Vergleich zu fest montierter Sensorik limitierter Smartphone-Sensorik zu erkennen. Zur Validierung werden an mehreren Prüfständen intakte und beschädigte Pumpen vermessen.

Ergebnisse und Diskussion

Nach Einschätzung des Bewilligungsempfängers konnten beide Teilprojekte erfolgreich abgeschlossen werden. Die dem ersten Teilprojekt zugrundeliegende Forschungsfrage der Umsetzbarkeit eines adaptiven Zweipunktreglers mit limitierten Prozessinformationen und Vermeidung manueller Parametrierung konnte positiv beantwortet werden. Das Ergebnis ist ein Regler in Form von plattformunabhängigem Programmcode, der im „plug&play“-Sinne bestehende Zweipunktregelungen ersetzen und zu einer Reduktion des Energieverbrauchs um bis zu 50 % beitragen kann.

Die Forschungsfrage des zweiten Teilprojekts zielte auf den Nachweis der grundsätzlichen Nutzbarkeit eines Smartphones zur Betriebs- und Zustandsdetektion an Pumpen. Auch diese Frage konnte positiv beantwortet werden. Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere mit einer Fusion der im Smartphone integrierten Sensorik eine zuverlässige Detektion des Betriebs, der Effizienz und etwaiger Schäden erfolgen kann. Mit der entwickelten Software konnten die Algorithmen an verschiedenen Pumpen erfolgreich evaluiert werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Teilergebnisse des Projekts wurden in regelmäßigen Abständen im Projektverlauf auf internationalen Konferenzen veröffentlicht ([2], [3], [4]). Zudem wurde der Projektfortschritt laufend an den Arbeitskreis „Smarte Pumpenregelung“, der sich aus Mitgliedsfirmen des Forschungsfonds Pumpen des Fachverbandes Pumpen + Systeme des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) zusammensetzt, berichtet.

Fazit

Die im Projektantrag formulierten Ergebnisse wurden vollständig erreicht. So ist z. B. ein neuartiger adaptiver Zweipunktregler Bestandteil der Projektergebnisse, der die Effizienz beim Betrieb von Pumpen gegenüber konventionellen Zweipunktreglern deutlich erhöht, ohne dass teure Sensorik oder eine aufwändige Parametrierung nötig sind. Die Umsetzung einer intuitiven Effizienzanalyse mit einem Smartphone senkt die Hürde zur regelmäßigen Überwachung von Pumpen und deckt ineffiziente Betriebsweisen auf, so dass die Betreiber Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz ergreifen können. Zudem wurden Methoden zur Erkennung von Schadensmerkmalen für die Nutzung mit herkömmlichen Smartphones entwickelt und angepasst. Mit diesen Methoden können schädigende und ineffiziente Betriebsweisen der Pumpe frühzeitig erkannt und behoben werden, um einem energieineffizienten Betrieb frühzeitig entgegenzuwirken und die Nachhaltigkeit zu erhöhen.

Inhalt

Projektkennblatt	2
Abbildungsverzeichnis	5
Symbole und Abkürzungen	7
1. Zusammenfassung	9
2. Einleitung.....	10
3. Vorgehen und durchgeführte Arbeiten	14
3.1 Aufbau der Prüfstände.....	14
3.1.1 Prüfstand zur Validierung des adaptiven Zweipunktreglers.....	14
3.1.2 Prüfstand zur Validierung der Smartphone-basierten Effizienz- und Zustandsanalyse	17
3.2 Selbstoptimierender adaptiver Zweipunktregler (AP1).....	18
3.2.1 Entwurf der Algorithmik und simulative Untersuchung (AP1.1)	18
3.2.1.1 Grundlagen der adaptiven Zweipunktregelung	18
3.2.2 Implementierung auf eingebetteter Hardware und Verifikation am Prüfstand (AP1.2).....	22
3.2.2.1 Simulationen in Simulink.....	22
3.2.2.2 Validierung des Regelungsalgorithmus in der realen Anwendung	24
3.2.2.3 Auswirkungen auf die Energieeffizienz.....	25
3.3 Smartphone-basierte Effizienz- und Zustandsanalyse (AP2).....	26
3.3.1 Implementierung der FFT-Analyse und Identifikation geeigneter Messpositionen (AP2.1)	26
3.3.2 Modellbildung, Effizienzanalyse und Schadenmustererkennung (AP2.2).....	28
3.3.3 Umsetzung und Evaluierung der Mobilen App (AP2.3)	45
3.3.3.1 Beschreibung.....	45
3.3.3.2 Anwendung	48
4. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	49
4.1 Adaptiver Zweipunktregler	49
4.2 Smartphone-basierte Effizienz- und Zustandsanalyse.....	50
5. Fazit, Verbreitung und zukünftige Arbeiten	51
6. Literaturverzeichnis	52
Anhang	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfache "An/aus"-Regelung (links) und adaptive Zweipunktregelung (rechts) am Beispiel einer Füllstandsregelung.....	11
Abbildung 2: Übersicht über die Arbeitspakete.....	14
Abbildung 3: R&I Fließbild des Prüfstands zur Validierung des adaptiven Zweipunktreglers.....	15
Abbildung 4: Fotografie des Versuchsstands mit Wasserbehälter auf der rechten Seite und der Kreiselpumpe unter dem Tisch.....	15
Abbildung 5: Fotografien mit Detailansichten des Versuchsstands. Links ist die Pumpe mit Frequenzumrichter dargestellt, rechts der Wasserbehälter mit induktivem Sensor.....	16
Abbildung 6: R&I Fließbild des Prüfstands zur Validierung der adaptiven Zweipunktregelung und der App-basierten Effizienz- und Zustandsanalyse.....	17
Abbildung 7: Fotografie des Prüfstands zur Validierung der Smartphone-basierten Effizienz- und Zustandsanalyse mit Kreiselpumpe (1), binärem Drucksensor (2), Stellventil (3), Frequenzumrichter (4), Durchflusssensor (5) und Tank (6).....	17
Abbildung 8: Regelzyklen des adaptiven Zweipunktreglers (links) und Verhalten des binären Sensors (rechts).....	19
Abbildung 9: Struktogramm des adaptiven Zweipunktreglers.....	22
Abbildung 10: Screenshot des zur Simulation genutzten Simulink-Modells.....	23
Abbildung 11: Simulationsergebnisse des Simulink-Modells. a) Füllstand am Wasserbehälter. b) Messwert des binären Sensors. c) Wellenhöhe als Störung des Wasserstandes. d) Stellgröße des Reglers (blaue Linie) und mittlere Stellgröße (rote Linie).....	24
Abbildung 12: STM32 Mikrocontroller und Signalwandlung.....	25
Abbildung 13: Ergebnisse am Versuchsstand mit implementiertem Regler. a) Füllstand des Wasserbehälters. b) Messwert des binären Sensors. c) Stellgröße des Reglers (blaue Linie) und mittlere Stellgröße (rote Linie).....	25
Abbildung 14: Energieverbrauch der adaptiven Zweipunktregelung im Vergleich mit konkurrierenden Regelungsstrategien.....	26
Abbildung 15: Beschleunigungsmessung im Zeitbereich (links) und das mittels FFT berechnete Frequenzspektrum des Signals (rechts).....	27
Abbildung 16: Messposition zur Durchführung der Effizienzanalyse mit dem Beschleunigungssensor.....	28
Abbildung 17: Kennfeld einer Pumpe.....	29
Abbildung 18: Motorkennlinie mit linearer Approximation zwischen Nenn- und Synchronpunkt.....	29
Abbildung 19: Ermittlung der aktuellen Motorleistung aus der FFT des Schwingungssignals.....	31
Abbildung 20: Ermittlung des Betriebspunkts aus der ermittelten Motorleistung.....	31
Abbildung 21: Verschiebung der Motorkennlinie bei Veränderung der Synchronfrequenz.....	32
Abbildung 22: Ergebnisse der Betriebspunkterkennung für eine Kreiselpumpe.....	33
Abbildung 23: Erkennung einer hydraulischen Blockade.....	34
Abbildung 24: Erkennung des Überlastbetriebs.....	34
Abbildung 25: Schema des Kavitationsprüfstands am Lehrstuhl für hydraulische Strömungsmaschinen (HSM).....	35
Abbildung 26: FFT für variierenden Förderhöhenabfall. mit gleitendem Mittelwert.....	36
Abbildung 27: Auswertung der Kennzahl zur Erkennung von Kavitation.....	36
Abbildung 28: Validierung der Erkennung von Kavitation durch Anwendung der Methode auf Druckmessungen in der Druckleitung.....	37
Abbildung 29: Effektivwerte der Messreihen mit 0% und 8% Gasanteil.....	38
Abbildung 30: Analyse der Merkmale des Frequenzspektrums für 0% und 8% Gasanteil. Eine Verschiebung der zur Drehzahl gehörenden Frequenzspitze ist zu erkennen.....	38
Abbildung 31: Ausbildung zweier trennbarer Cluster bei Betrachtung der zur Hauptdrehfrequenz gehörenden Amplitudenwerte bei verschiedenen Gasanteilen.....	39
Abbildung 32: Ergebnis der linearen und nichtlinearen SVM Klassifikationsfunktionen.....	40
Abbildung 33: Zusammenfassung des vorgeschlagenen Ablaufs beim Training und der Ausführung der Detektion von Gasmitförderung.....	41
Abbildung 34: FFT für eine Beispielmessung.....	42

Abbildung 35: Amplitude bei der Drehfrequenz für verschiedene Durchflüsse.	42
Abbildung 36: Veranschaulichung des Algorithmus zur Unwuchterkennung.	43
Abbildung 37: Vergleich der Amplituden bei der Drehfrequenz für verschiedene Synchronfrequenzen mit intaktem und defektem Laufrad.	43
Abbildung 38: Leistungserhöhung für verschiedene Synchronfrequenzen bei Betrieb mit defektem Laufrad.	44
Abbildung 39: Amplitudenerhöhung bei erster Harmonischen für verschiedene Synchronfrequenzen bei Betrieb mit defektem Laufrad.	44
Abbildung 40: Ablauf der Betriebspunktbestimmung.	47
Abbildung 41: Ausgabe der Frequenzspitzen mit Mikrofon (oben links) und Beschleunigungssensor (oben rechts), Darstellung des ermittelten Betriebspunkts und der Störungserkennung.	48
Abbildung 42: Eingabemaske zum Start der Effizienzanalyse mit der Smartphone-App.	48
Abbildung 43: Effizienzanalyse mit Bewertung des aktuellen Betriebspunkts und Ausgabe der Historie des Wirkungsgrads.	48
Abbildung 44: Betriebspunkterkennung und Effizienzanalyse mit dem PumpAnalyzer.	50

Symbole und Abkürzungen

Römische Buchstaben

a	Amplitude Zeitsignal/Frequenzspektrum	[-]
b	Bias der SVM	
d	Amplitude	[-]
d^*	Optimale Amplitude	[-]
D	Durchmesser des Laufrads	[m]
eff	Effektivwert des Beschleunigungssignals	[m/s ²]
f	Frequenz	[Hz]
f_0	Synchronfrequenz des Motors	[Hz]
f_{ist}	Aktuelle Drehfrequenz des Motors	[Hz]
h	Hysterese	[-]
H	Förderhöhe der Pumpe	[m]
H_{opt}	Optimale Förderhöhe der Pumpe	[m]
G	Gramsche Matrix	[-]
k_{red}	Reduzierungsfaktor der Sprunghöhe	[-]
K_n	Proportionaler Verstärkungsfaktor der Pumpe	[1/(Vs)]
K_y	Verstärkungsfaktor des Prozesses	[1/s]
K_K	Kennzahl zur Kavitationserkennung	[-]
K_U	Kennzahl zur Unwuchterkennung	[-]
m	Mittelwert	[-]
m^*	Optimaler Mittelwert	[-]
M	Drehmoment des Motors	[Nm]
M_{ist}	Drehmoment des Motors	[Nm]
M_{nenn}	Nennmoment des Motors	[Nm]
M_{kip}	Kippmoment des Motors	[Nm]
n	Drehzahl der Pumpe	[1/min]
n_{ist}	Aktuelle Drehzahl des Motors	[1/min]
n_0	Synchrondrehzahl des Motors	[1/min]
n_{nenn}	Nenn Drehzahl des Motors	[1/min]
P	Leistung	[W]
P_{ist}	Aktuelle Leistung des Motors	[W]
P_{nenn}	Nennleistung des Motors	[W]
q	Durchfluss der Pumpe	[m ³ /s]
q_{opt}	Optimaler Durchfluss der Pumpe	[m ³ /s]
s	Sensorsignal, binär	[-]
s_{nenn}	Nennschlupf des Motors	[%]
T_{hyst}	Zeitkonstante der Hysterese	[s]
T_y	Zeitkonstante der Pumpenhydraulik	[s]
t	Zeit	[s]
t^+, t^-	Zeitspanne zum Schalten des Reglers	[s]
t_{mean}	Mittlere Zeitspanne des vergangenen Regelzyklus	[s]
t_{pred}	Mittlere Zeitspanne des nächsten Regelzyklus	[s]
t_0	Zeitpunkt des Zustandswechsels	[s]
u	Angelegte Spannung an Pumpe/Stellgröße	[V,-]
w	Mittelwert der Sensorschaltunkte	[-]
w^+, w^-	Sensorschaltunkte	[-]
w_{SVM}	Normalenvektor	[-]
u_{mean}	Mittlere Stellgröße	[V]

x^*	Datenpunkt	[-]
y	Regelgröße	[-]
y_{hyst}	Ausgang des Tiefpassfilters zur Erzeugung der Hysterese	[-]
y_{mean}	Mittelwert der Regelgröße	[-]
y_{sens}	Binäre Messgröße des Sensors	[-]
y^*	Klassifizierungsfunktion der SVM	[-]
z_{sch}	Schaufelzahl der Pumpe	[-]
z_{st}	Stufenzahl der Pumpe	[-]

Griechische Buchstaben

α	SVM-Parameter	[-]
λ	Skalarer Optimierungsparameter der SVM	[-]
η	Wirkungsgrad der Pumpe	[-]
ρ	Dichte des Fördermediums	[kg/m ³]
Φ	Funktion der SVM	[-]

Abkürzungen

acc	Accelerometer/Beschleunigungssensor
FFT	Schnelle Fourier-Transformation
KV	Kugelventil
MV	Manuelles Ventil
SVM	Support Vector Machine

1. Zusammenfassung

Die theoretisch maximal mögliche Energieeffizienz von Kreiselpumpen wird heute aufgrund des überwiegenden Einsatzes einfacher und kostengünstiger Betriebsweisen nur in Ausnahmefällen erreicht. Da Pumpen 22% des elektromotorischen Energieverbrauchs in der Europäischen Union ausmachen, kann durch den effizienteren Betrieb von Pumpen ein enormes Einsparpotential erzielt werden. Der Einsatz verfügbarer Technologien scheitert in der Praxis oft aufgrund von erhöhten Kosten und erhöhtem Aufwand [1].

Bereits in einem von der DBU geförderten Vorgängerprojekt¹ wurde zur Lösung der Problematik ein innovatives Konzept zur automatisierten Reglerauslegung vorgestellt. Zur Erweiterung der Ergebnisse wurde im hier vorgestellten Projekt nicht nur die Energieeffizienz bei der Nutzung betrachtet, sondern darüber hinaus die Nachhaltigkeit durch eine Steigerung der Lebensdauer vergrößert.

Zum Erreichen des nachhaltigen, energieeffizienten Pumpenbetriebs wurden zwei Kernaspekte untersucht. Zunächst wurde ein besonders einfaches, innovatives Regelungskonzept entwickelt, mit dem die Nutzungshürde für energieeffiziente Regelungen dadurch gesenkt werden soll, dass sie nicht auf teure Sensorik und Nutzerexpertise angewiesen ist. Der zweite Kernaspekt besteht in der spielerisch einfachen Durchführung von Effizienzanalyse und Schadensfrüherkennung mittels herkömmlicher Smartphones oder Tablets, um das Bewusstsein für Energieeinsparpotentiale zu vergrößern.

Im ersten Teilprojekt wurde ein adaptiver Zweipunktregler entwickelt, der eine selbstständige Anpassung an die Regelungsaufgabe vornimmt. Dabei kann dieser auf Störungen reagieren und aufgrund verringerter Drehzahlsprünge einer Pumpe Energie einsparen. Zusätzlich wird der Verschleiß der Komponenten verringert, insbesondere im Vergleich zu einer einfachen Zweipunktregelung. Nach simulativen Tests wurde der adaptive Zweipunktregler auf einem Mikrocontroller implementiert und erfolgreich an zwei Versuchsständen und verschiedenen hydraulischen Konfigurationen validiert.

Im zweiten Teilprojekt wurden Methoden zur Durchführung von Effizienzanalyse und Schadensmustererkennung auf einem Smartphone entwickelt und implementiert. Die Effizienzanalyse nutzt die Sensorik herkömmlicher Smartphones und schließt mittels Maschinenkonstanten wie Motor- und Pumpenkennlinien auf den aktuellen Betriebspunkt. Zusätzlich wurden Methoden zur Erkennung diverser Schäden basierend auf der Veränderung der Schwingungs- und Audiospektren entwickelt und dazu intakte und beschädigte Pumpen vermessen. Abschließend wurde eine prototypische App zur Durchführung der Analysen entwickelt.

Das Projekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem AZ: 32936/01-24/2 gefördert. Zwischenergebnisse wurden regelmäßig dem für das Projekt eigens gegründeten Arbeitskreis „Smarte Pumpenregelung“ des Forschungsfonds Pumpen des Fachverbandes Pumpen + Systeme des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) vorgestellt. Die Mitglieder des Arbeitskreises unterstützten den Lehrstuhl in umfassender Weise durch die Beteiligung an den gemeinsamen Sitzungen, die Bereitstellung von Pumpen und die Durchführung eigener Messungen zur Schadenserkenntung.

Im Anschluss an das Projekt können die erzielten Ergebnisse durch die Industriepartner und den Lehrstuhl verwertet werden. Die im Projekt entwickelte prototypische Software für den adaptiven Zweipunktregler und die Schadenerkennung wurde den Partnern zur Verfügung gestellt und kann dort zur höheren Technologiereifegraden weiterentwickelt werden. Am Lehrstuhl wird die Forschung am Zweipunktregler im Rahmen eines Folgeprojektes weitergeführt. Zudem wurden alle Projektergebnisse auf internationalen Konferenzen veröffentlicht [2], [3], [4].

¹ Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie. „Szenarienbasierte energieeffiziente Regelung von Kreiselpumpen“, Projekt AZ 29723-24/2, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2012-2015.

2. Einleitung

Ausgangssituation und Umweltrelevanz

Viele der heute im Einsatz befindlichen Kreiselpumpen laufen im sogenannten Drossel- oder Bypassbetrieb und erreichen ihre theoretisch maximal mögliche Energieeffizienz nur in Ausnahmefällen. Die effizienteste Art des Betriebs stellt die Drehzahlvariation dar, jedoch ist diese aufgrund höherer Kosten und erhöhter Komplexität in vielen Fällen so unattraktiv für Anwender/-innen, dass ineffiziente, aber einfache und bekannte Betriebsweisen bevorzugt und der erhöhte Energieverbrauch in Kauf genommen werden. Aufgrund des breiten Einsatzspektrums von Kreiselpumpen ist es unmöglich, Regler vor der Auslieferung beim Hersteller einzustellen, so dass obendrein regelungstechnisches Grundwissen vom Anwender gefordert wird, wenn die Pumpe drehzahlvariabel und geregelt betrieben werden soll.

Die große Verbreitung von Pumpen mit einem Anteil von 22% am elektromotorischen Energieverbrauch in der Europäischen Union [5] verdeutlicht das enorme Einsparpotential. Obwohl mittlerweile sehr viele Pumpenhersteller die für einen effizienten Betrieb notwendige Technologie in Form von Frequenzumrichtern anbieten, ist die Verbreitung drehzahl geregelt betriebener Pumpen nach wie vor gering [1]. Drei Gründe sind dafür typisch:

- erhöhte Investitionskosten durch Sensorik
- erhöhter Aufwand durch Installation und Auslegung der Regelung für den Nutzer
- geringer Stellenwert der Pumpe, Einstufung als „unwichtige“ Prozesskomponente

Bereits im Rahmen des von der DBU geförderten Vorgängerprojektes „Szenarienbasierte energieeffiziente Regelung von Kreiselpumpen“ (AZ 29723-24/2) wurde die beschriebene Problematik untersucht und ein innovatives Konzept umgesetzt, das dem Nutzer durch Einsatz einer intelligenten, drehzahlvariablen Pumpe einen effizienten Betrieb ermöglicht, ohne dass dabei Mehrkosten für Sensorik oder Mehraufwand durch Reglerauslegung entstehen. Das Vorgängerprojekt war aber auf umfangreiche Sensorik angewiesen und konnte damit den ersten der drei obigen Hinderungsgründe konzeptbedingt nicht ausräumen.

Vor dem Hintergrund, dass Pumpen einerseits zu den größten Energieverbrauchern zählen und andererseits häufig nur schlecht oder gar nicht geregelt werden, ist jeder Ansatz in Richtung effizienter Pumpenregelung zunächst mit einer hohen Umweltrelevanz verbunden. Die Projektergebnisse setzen dabei an zwei zentralen Stellen an: Einerseits soll mit dem adaptiven Zweipunktregler aus Teilprojekt 1 das Energiesparpotential in Anwendungen mit rudimentärer Sensorausstattung ausgeschöpft werden, wobei der adaptive Regler im „plug & play“ Sinn in Betrieb genommen werden kann und die Nutzungshürde so extrem niedrig ist.

Andererseits ist mit der Smartphone-App zur Betriebs- und Zustandsanalyse aus Teilprojekt 2 ein Werkzeug zum Auffinden ungueter Betriebssituationen realisiert worden, das durch seine unkomplizierte Bedienung die Akzeptanz zur Auseinandersetzung mit den Pumpen steigert.

Beide Ansätze können den Energiebedarf der Pumpen deutlich senken. Als messbarer Erfolg konnten für den adaptiven Zweipunktregler Energiebedarfsreduktionen um 50% erzielt werden und gleichzeitig ein ruhigerer und schonenderer Betrieb im Vergleich zu den etablierten „An/Aus“-Regelungen realisiert werden. Die Auswirkungen der Smartphone-App zur Betriebs- und Zustandsanalyse sind unmittelbar schwer zu quantifizieren, jedoch ist die entwickelte Algorithmik in der Lage, den Betriebspunkt und etwaige Schäden zuverlässig zu erkennen und zu hohe Energieverbräuche zu quantifizieren. Dies wird bei verbreitetem Einsatz einen positiven Einfluss auf den Betrieb und der Pumpen und das Bewusstsein für deren Zustand haben.

Stand der Technik Zweipunktregelung

Die üblicherweise eingesetzten Zweipunktregelungen sind meistens als einfache „An/Aus“-Regelungen ausgeführt und entstammen Einsatzbereichen, in denen das Stellglied nur binär angesteuert werden kann, wie zum Beispiel Heizelemente in Öfen oder Kühlkompressoren in Klimaanwendungen. Zur Messung wird hier ein binärer Sensor verwendet, der z.B. bei einer Füllstandsregelung als kostengünstiger Schwimmerschalter ausgeführt sein kann und ohne Kalibrierung das Erreichen eines festen Füllstandswertes zuverlässig erkennt. Die Regelung setzt das Sensorsignal in ebenfalls binäre Befehle an das Stellglied in einfachster Weise um:

- Sensor liefert 0-Signal: Füllstand zu niedrig, Pumpe einschalten.
- Sensor liefert 1-Signal: Sollfüllstand erreicht, Pumpe ausschalten.

Gerade bei Anwendungen, in denen Pumpen als Stellglied dienen, ist es hinsichtlich Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit nicht optimal, den Ansatz der An/Aus-Regelung zu verfolgen. Insbesondere durch die wiederholte Beschleunigung des Pumpenläufers wird auf diese Weise mehr Leistung benötigt als z.B. im stationären Betrieb und durch das wiederholte Anhalten der Verschleiß von Dichtungen und Antriebsmotor erhöht.

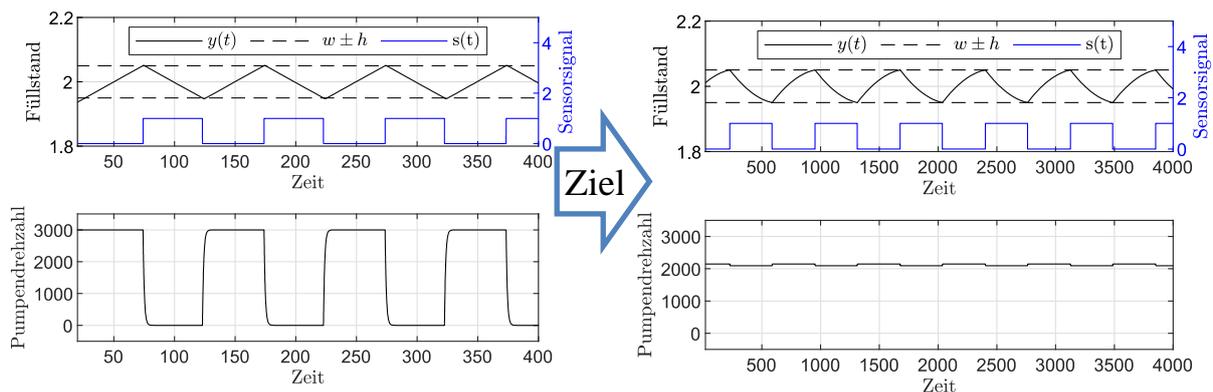


Abbildung 1: Einfache "An/aus"-Regelung (links) und adaptive Zweipunktregelung (rechts) am Beispiel einer Füllstandsregelung.

In Abbildung 1 sind der Füllstands- und Stellgrößenverlauf einer als einfache An/Aus-Regelung und als adaptive Zweipunktregelung ausgeführten Füllstandsregelung dargestellt. Deutlich ist hier das zyklische Verhalten der Regelung zu erkennen: Unterschreitet der Füllstand das Sensorniveau, schaltet der Sensor auf den Wert „0“ und liefert ein An-Signal an die Pumpe. Die Pumpe wird darauf hin eingeschaltet, der Füllstand steigt in Folge wieder an. Beim Überschreiten des Sensorschalters schaltet dieser erneut und liefert jetzt ein Aus-Signal an die Pumpe. Diese wird abgeschaltet und der Füllstand sinkt wieder. So variiert der Füllstand fortwährend in einem schmalen Bereich zwischen den Schaltpunkten des Sensors. Im unteren Diagramm ist der Drehzahlverlauf der Pumpe dargestellt, der analog zum Füllstand zwischen der Maximaldrehzahl und null wechselt.

Abbildung 1 rechts nimmt das Ergebnis des Projektes vorweg. Die Abbildung zeigt den konvergierten Zustand des Füllstands- und Drehzahlverlauf der im Projekt entwickelten adaptiven Zweipunktregelung (die Lernphase sei hier zunächst ausgeblendet). Deutlich sind im rechten unteren Diagramm die stark reduzierten Drehzahlsprünge zu erkennen, welche um einen Mittelwert herum ausgeführt werden. Durch die verringerte Stellgrößenamplitude wird auch die Schaltfrequenz der Regelung reduziert (die Zeitachsen in Abbildung 1 sind nicht gleich, das Zeitintervall in der rechten Abbildung ist zehnmal so groß), was ebenfalls zur Energieeinsparung und Lebensdauerverlängerung der Pumpe beiträgt.

Effizienzanalyse und Schadenserkenkung

Zur Erkennung von schädigenden Betriebszuständen (z.B. Kavitation), aber auch von Lagerschäden und Ausrichtungsfehlern der Kupplung zwischen Antrieb und Pumpe hat sich die Methode der Frequenzanalyse als wirkungsvoll herausgestellt [6]. Dazu wird üblicherweise ein Beschleunigungssensor an einer geeigneten Stelle des Pumpengehäuses befestigt, der kontinuierlich die auftretenden Schwingungen misst und an eine Auswerteeinheit weiterleitet. Die Intelligenz der Zustandsüberwachung mittels Schwingungsanalyse liegt in der Zuordnung von Frequenz und Amplitude der Schwingung zu einer bestimmten Schadenskategorie. Mit Hilfe der schnellen Fourier-Transformation können die aufgezeichneten Messdaten in ihre Frequenz und Amplitude zerlegt werden. Aus der Zerlegung kann dann mit hinterlegten Referenzmodellen für verschiedene Schadensfälle eine Kategorisierung vorgenommen werden. Aus der Übereinstimmungsgüte mit unterschiedlichen Schadensmustern kann entschieden werden, ob ein Schaden an der Pumpe vorliegt und in welchem Stadium sich dieser befindet.

Einen entscheidenden Nachteil der bisher verfügbaren Zustandsüberwachungssysteme stellen die hohen Investitionskosten und die Notwendigkeit der Installation in der Anlage dar. Auch wenn bereits geringe Anpassungen des Betriebspunkts einer Pumpe über die Lebensdauer hinweg enorme Mengen an Energie einsparen können oder durch verhinderte Ausfälle Kosten in Höhe von mehreren zehntausend Euro die Leistungsfähigkeit der Zustandsüberwachung verdeutlichen [7], so genügen die vergleichsweise geringen Investitionskosten bereits für eine Entscheidung gegen die Überwachung der Pumpe.

Dahingehend sehr hohes Potential haben die mittlerweile weit verbreiteten mobilen Endgeräte, wie z.B. Smartphones oder Tablet-PCs. Die Verbreitung von Smartphones ist seit Jahren stetig steigend und lag im Mai 2014 in Deutschland bereits bei über 50%, bezogen auf die Einwohnerzahl [8], so dass die Verfügbarkeit eines solchen Geräts kaum noch eine Einschränkung darstellt. Dass der Einsatz mobiler Geräte heute mehr und mehr auch in der Industrie relevant wird, zeigen insbesondere Projekte im Pumpensektor wie z.B. GO Remote von Grundfos [9] oder spezielle Smartphones [10] für den „harten“ Außeneinsatz in der Industrie.

Es gibt heute schon Lösungen am Markt, die die Pumpenüberwachung mit mobilen oder fest installierten Schwingungsdetektoren realisieren. Darüber hinaus gibt es auch schon Smartphone Apps, die Betriebspunkterkennung aus dem Drehklang des Elektromotors ermöglichen. Diese Apps nutzen das eingebaute Mikrophon des Smartphones als Sensor, der hierbei nutzbare Luftschall enthält aber u.U. nicht genug Informationen, um die notwendige Genauigkeit für eine einfache Störungserkennung zu erreichen. Das hier beschriebene Teilprojekt soll den Nachweis führen, dass mit einem handelsüblichen Smartphone zusammen mit intelligenten Algorithmen eine einfache Erkennung von falschen Betriebszuständen und damit, auch für den „Laien“, eine Optimierung des Pumpenbetriebs möglich ist.

Die zentrale Idee des Teilprojekts beruht auf einer Auswertung der in handelsüblichen Smartphones integrierten Sensorik (insb. Beschleunigungssensor, Mikrofon) und einer Kombination aus Zustands- und Betriebspunktüberwachungsalgorithmen, um eine Effizienzbetrachtung und damit einen nachhaltigen Betrieb der Pumpe zu ermöglichen. Der Nutzer soll mit den zu entwickelnden Algorithmen und einem Smartphone in der Lage sein, sich durch eine kurze Messung an vorgegebenen Stellen der Pumpe (z.B. am Motor oder am Pumpengehäuse) über den Betriebszustand und seine Effizienz zu informieren.

Zielsetzung

Ziel des Projekts ist es, die Nachhaltigkeit und Energieeffizienz von Pumpen mit zwei Maßnahmen zu verbessern:

- Entwicklung eines besonders einfachen, innovativen Regelungskonzepts, um die Nutzungshürde für energieeffiziente Regelungen gegenüber dem Vorgängerprojekt² noch weiter zu senken.
- Spielerisch einfache Effizienzanalyse und Schadensfrüherkennung (z.B. mit Hilfe von Smartphones oder Tablets), um das Bewusstsein für Energieeinsparpotentiale zu vergrößern.

Die Bearbeitung des Projekts war in zwei Teilprojekte unterteilt, mit denen die beiden genannten Maßnahmen umgesetzt werden sollten und die zusammen einen nachhaltigen und energieeffizienten Pumpenbetrieb in einem weit gefächerten Anwendungsbereich möglich machen:

1. **Selbstoptimierender adaptiver Zweipunktregler** – Die Kombination eines sehr einfachen und kostengünstigen Sensors mit einem neuartigen, hier auszuarbeitenden Regler ergibt ein universelles Regelungskonzept, mit dem vollautomatisch und ohne jegliche Nutzerinteraktion (d.h. ohne Einstellung, Parametrierung, Konfiguration, etc.) eine Pumpe vollständig geregelt in Betrieb genommen werden kann. Trotz der Einfachheit kann annähernd die gleiche Energieeffizienz erzielt werden wie mit einer aufwändigen, kontinuierlichen Regelung. Der bei Abschluss des Projekts zur Verfügung stehende Prototyp des adaptiven Zweipunktreglers ist mit genormten Peripherieanschlüssen versehen. Insbesondere ist weder teure Sensorik noch Nutzerexpertise für das Reglertuning notwendig, sodass der Einsatz in einem breiten Spektrum von Anwendungen ermöglicht wird. Geringe Hardwarekosten und der sich vollständig selbst konfigurierende Regler stellen starke Nutzungsanreize dar und helfen, effiziente Pumpenregelungen weiter zu verbreiten.
2. **Smartphone-basierte Effizienz- und Zustandsanalyse** – Die umfangreiche Sensorik heutiger Smartphones kann zur Entwicklung von Diagnosewerkzeugen eingesetzt werden. Kernidee ist die Nutzung von Vibrationsmessungen in Verbindung mit physikalisch-mathematischen Pumpenmodellen, um einerseits die Energieeffizienz einer Pumpe zu ermitteln und andererseits mögliche Schäden frühzeitig zu erkennen. Damit wird es für Nutzer/-innen möglich, das Energiesparpotential von Pumpen auszuschöpfen oder im Ernstfall durch rechtzeitiges Eingreifen größere Beschädigungen und die damit oft einhergehende Umweltgefährdung abzuwenden. Gelingt eine prototypische Umsetzung auf einem Smartphone, so wird die Nutzungshürde deutlich gesenkt und ein Beitrag dazu geleistet, dass ineffizient laufende Pumpen mehr Aufmerksamkeit bekommen und Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung ergriffen werden.

² Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie. „Szenarienbasierte energieeffiziente Regelung von Kreiselpumpen“, Projekt AZ 29723-24/2, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2012-2015.

3. Vorgehen und durchgeführte Arbeiten

Der Arbeitsplan setzt sich aus den fünf in Abbildung 2 vorgestellten Arbeitspaketen zusammen. Die erste Phase (AP 1, 1. – 3. Projektquartal) behandelt ausschließlich Entwurf, Implementierung und Validierung des adaptiven Zweipunktreglers. In der zweiten Projektphase (AP 2, 4. – 8. Projektquartal) wurde der Nachweis erbracht, dass sich eine Betriebspunkt- und Zustandsanalyse auf einem Smartphone umsetzen lässt.

Arbeitspaketplan		Jahr 1				Jahr 2			
Arbeitspakete	1. Quartal	2. Quartal	3. Quartal	4. Quartal	1. Quartal	2. Quartal	3. Quartal	4. Quartal	
1.1 Entwurf Algorithmen adaptiver Zweipunktregler, simulative Untersuchung	RUS VDMA		RUS						
1.2 Umsetzung der Algorithmen aus AP1.1 auf eingebetteter Hardware, Verifizierung am Prüfstand		RUS		VDMA					
2.1 Implementierung FFT Analyse und Identifikation Messpositionen für Effizienzanalyse				RUS VDMA		RUS			
2.2 Modellbildung, Verifizierung und Entwurf der Erkennungsalgorithmen					RUS		VDMA		
2.3 Implementierung der Inhalte auf einem Smartphone, Verifizierung bei VDMA-Partnern							RUS		
							VDMA	VDMA	

Abbildung 2: Übersicht über die Arbeitspakete.

3.1 Aufbau der Prüfstände

Zunächst werden die beiden Prüfstände beschrieben, die zur Validierung der im Projekt entwickelten Methoden eingesetzt wurden. Der in Abschnitt 3.1.1 beschriebene Prüfstand wurde insbesondere im Rahmen von Entwicklung und Verifikation des adaptiven Zweipunktreglers genutzt. Am zweiten Prüfstand wurde neben der Evaluierung des Zweipunktreglers zunächst die Identifikation der Messpositionen und die Validierung der Betriebspunkterkennung durchgeführt. Zudem kam der Prüfstand bei der Entwicklung von Methoden zur Erkennung von Laufrad- und Wälzlagerschäden zum Einsatz.

3.1.1 Prüfstand zur Validierung des adaptiven Zweipunktreglers

Das R&I Fließbild des Versuchsstandes ist in Abbildung 3 dargestellt.

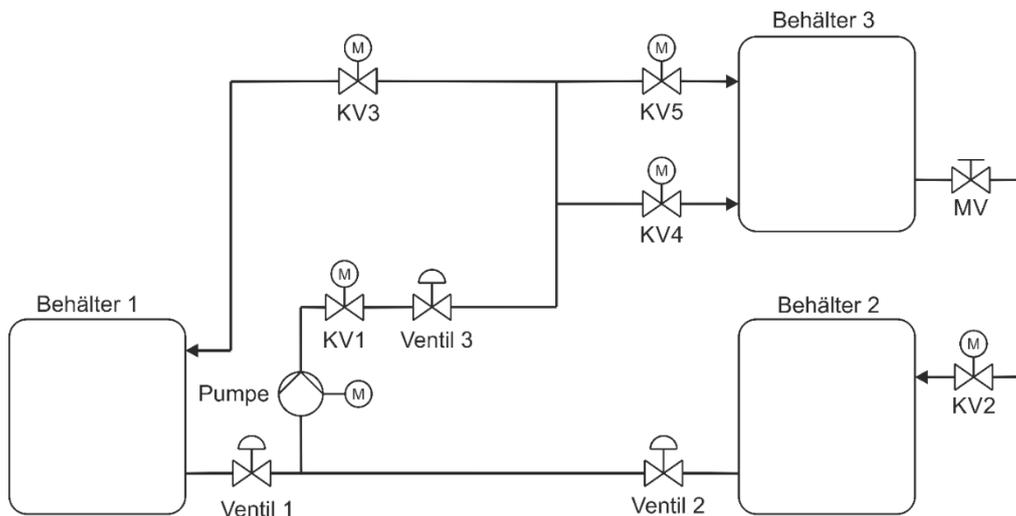


Abbildung 3: R&I Fließbild des Prüfstands zur Validierung des adaptiven Zweipunktreglers.

Die Kreiselpumpe saugt Wasser aus den Behältern 1 und 2 an und fördert dieses auf verschiedenen konfigurierbaren Wegen in den Behälter 3. Kugelventile KV4 und KV5 ermöglichen ein unterschiedliches Einströmen des Wassers in den Behälter 3. Bei KV4 erfolgt die Förderung von unten, sodass wenige Wellen am Wasserbehälter auftreten. Bei KV5 wird das Wasser von oben in den Behälter eingelassen, sodass größere Wellen im Behälter auftreten. Bei den hier dargestellten Abbildungen zu den durchgeführten Versuchen war KV4 geöffnet und KV5 geschlossen. Die Betrachtung des umgekehrten Falls führt zu größeren Störungen durch Wellenbildung, jedoch zu keinen nennenswerten Änderungen an der Regelgüte, sodass diese Variante hier nicht zusätzlich



Abbildung 4: Fotografie des Versuchsstands mit Wasserbehälter auf der rechten Seite und der Kreiselpumpe unter dem Tisch.

aufgeführt ist. Mit dem geöffneten Ventil KV2 fließt das Wasser aus dem Behälter 3 in den Behälter 2. Zusätzlich ist zwischen Behälter 2 und KV2 ein manuelles Ventil (MV) angebracht, wodurch eine Variation des abfließenden Volumenstroms aus Behälter 2 ermöglicht wird. Die Ventile 1-3, KV1 und KV2 waren jederzeit geöffnet. Das Ventil KV3 war geschlossen. Der Füllstand in Behälter 3 wird über einen induktiven Schalter gemessen, der außerhalb des Behälters montiert ist. Zusätzlich ist eine

druckbasierte, kontinuierliche Messung des Füllstands verbaut, die hier jedoch nur zur Evaluierung der Regelgüte dient. Der Regler arbeitet bei allen Versuchen ausschließlich mit der binären Messgröße.

Abbildung 4 zeigt eine Fotografie des Versuchsstands. Die einzelnen Komponenten des Versuchsstands sind ähnlich angeordnet wie in Abbildung 3. Rechts befinden sich die Wasserbehälter 2 und 3. Im Unteren Teil der Abbildung ist die Pumpe sichtbar (unterhalb des Tisches) mit einigen Hydraulikleitungen auf dem Tisch darüber. Am rechten Rand des Bildes ist zudem Wasserbehälter 1 sichtbar. In Abbildung 5 sind zusätzlich Detailansichten des induktiven Sensors an Behälter 3 und der Pumpe mit Frequenzumrichter sichtbar. Der induktive Sensor sendet ein 1-Signal, sobald der Wasserstand dessen Höhe erreicht hat und ein 0-Signal, wenn der Füllstand sich unterhalb des Sensorniveaus befindet. Der Sensor liefert die Logiksignale in Form einer Spannung, wobei 0V dem 0-Signal und 24V dem 1-Signal entsprechen. Das induktive Messprinzip des Sensors bedingt eine verschwindend kleine Hysterese. Der Regler erzeugt durch die Filterung des Sensorsignals eine künstliche Hysterese, so dass die Zeit für einen Arbeitszyklus des Reglers trotz der fehlenden Hysterese des Sensors nicht zu klein wird, siehe Abschnitt 3.2.1.1. Das Signal des Sensors wird vom Regler nach einer Anpassung des Spannungsniveaus zur Verarbeitung durch den Mikrocontroller ausgewertet. Der Regler sendet sein Stellsignal, wiederum nach einer Anpassung der Spannungsniveaus, als 0V bis 10V Signal an den Analogeingang des Frequenzumrichters, der die Drehzahl der Pumpe proportional dazu einstellt.



Abbildung 5: Fotografien mit Detailansichten des Versuchsstands. Links ist die Pumpe mit Frequenzumrichter dargestellt, rechts der Wasserbehälter mit induktivem Sensor.

3.1.2 Prüfstand zur Validierung der Smartphone-basierten Effizienz- und Zustandsanalyse

Das R&I Fließbild des Versuchsstands ist in Abbildung 6 dargestellt, Abbildung 7 zeigt eine Fotografie des Versuchsstands.

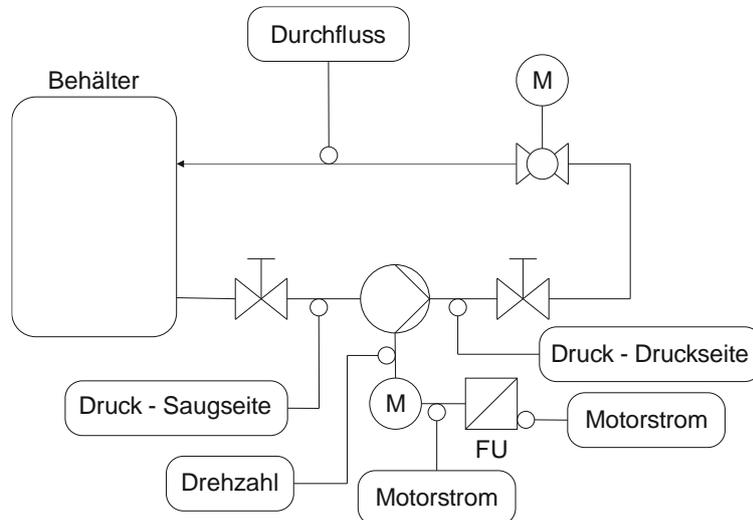


Abbildung 6: R&I Fließbild des Prüfstands zur Validierung der adaptiven Zweipunktregelung und der App-basierten Effizienz- und Zustandsanalyse.

Die Pumpe saugt das Wasser aus dem Behälter an. Das Wasser wird durch mehrere geöffnete Ventile wieder zurück in den Behälter befördert. Das Kugelventil kann elektronisch gestellt werden, um den Durchfluss zu verändern. Die Pumpe wird drehzahlvariabel mit einem Frequenzumrichter betrieben. Die beiden Drucksensoren auf Saug- und Druckseite werden zur Validierung der Zweipunktregelung eingesetzt. Zudem ist ein magnetisch-induktiver Durchflusssensor installiert, der zur Validierung der Smartphone-basierten Effizienz- und Zustandsanalyse notwendig ist.

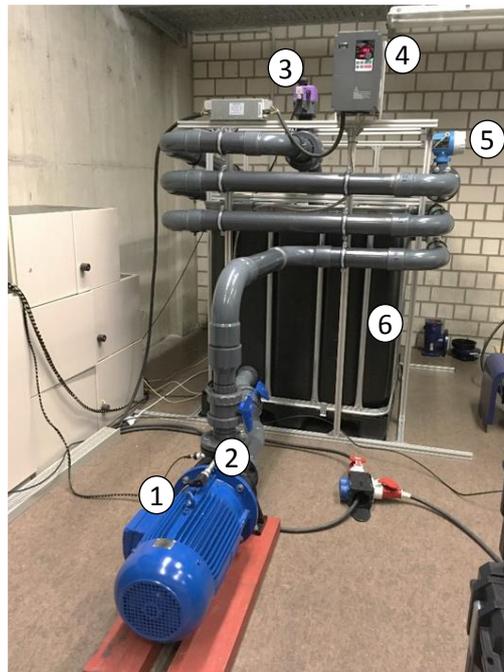


Abbildung 7: Fotografie des Prüfstands zur Validierung der Smartphone-basierten Effizienz- und Zustandsanalyse mit Kreiselpumpe (1), binärem Drucksensor (2), Stellventil (3), Frequenzumrichter (4), Durchflusssensor (5) und Tank (6).

3.2 Selbstoptimierender adaptiver Zweipunktregler (AP1)

3.2.1 Entwurf der Algorithmik und simulative Untersuchung (AP1.1)

Bei der adaptiven Zweipunktregelung erfolgt die Einstellung der Stellgröße auf Basis eines binären Messsignals. Bei dem durchgeführten Projekt wurde der Wasserstand in einem Wasserbehälter geregelt. Dabei konnte der zufließende Volumenstrom durch unterschiedliche Drehzahlen einer einlassseitigen Pumpe durch den Regler verändert werden. Nachfolgend wird immer von diesem Szenario ausgegangen. Es sei aber betont, dass der Regler sich auf zahlreiche andere Anwendungen (Druckregelung, Regelung eines Kühlkreislaufes etc.) ohne Änderung am zugrundeliegenden Regelungsalgorithmus übertragen lässt.

Der Ausgang des Reglers, die Stellgröße, nimmt Werte zwischen 0 und 10 an, die abhängig von der Anwendung skaliert werden müssen. In vielen Fällen wird die Stellgröße direkt in ein 0V bis 10V Analogeingangssignal für den Aktor, z.B. einen Frequenzumrichter, verwendet werden können.

Nachfolgend werden die Grundlagen des Regelungsalgorithmus erläutert.

3.2.1.1 Grundlagen der adaptiven Zweipunktregelung

Der adaptive Regler lernt selbständig eine *mittlere Drehzahl* und eine *minimale Amplitude* (Sprunghöhe), um mit minimalem Energieeintrag eine Zweipunktregelung zu realisieren (vgl. Abbildung 8 bzw. Abbildung 14). Dazu muss gewährleistet sein, dass der Regler fortwährend die Sensorschaltpunkte anfährt, um nicht die Information über den Zustand des Prozesses zu verlieren. Da der Sensor nur ein binäres (0 / 1) Signal erzeugt, ist nur zum Zeitpunkt des Umschaltens des Sensors die genaue Information über die Regelgröße vorhanden (z.B. ein Füllstand, der zu diesem Zeitpunkt genau auf Sensorhöhe ist). Falls Störungen zu einem Ausbleiben des Sensorschaltens führen, wird dies vom Regler erkannt und durch ein erneutes automatisches Adaptieren seiner Parameter ausgeglichen.

Die Vorschrift des Reglers ist durch

$$u(t) = \begin{cases} m + d: s(t) = 0 \\ m - d: s(t) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Gegeben, wobei m den Mittelwert, d die Amplitude, $u(t)$ die daraus resultierende Stellgröße und $s(t)$ das binäre Sensorsignal darstellen. Ziel des Reglers ist es, selbständig die Parameter $m = m^*$ und $d = d^*$ derart zu finden, dass diese dem Drehzahlmittelwert und der minimalen Amplitude entsprechen.

Internes Pumpen- und Prozessmodell

Kern des adaptiven Reglers stellt ein integriertes Pumpenmodell dar, das präzise genug ist, um eine genaue Regelung zu ermöglichen und gleichzeitig einfach genug ist, um eine effiziente Berechnung der Reglerparameter zu erlauben. Es wird angenommen, dass sich die Pumpendrehzahl $n(t)$ proportional zur Stellgröße $u(t)$ des Reglers verhält:

$$n(t) = K_n u(t). \quad (2)$$

Darin ist K_n ein konstanter Verstärkungsfaktor, dessen Wert im späteren Verlauf keine Rolle mehr spielt. Die Hydraulik der Pumpe und des angeschlossenen Prozesses werden über ein dynamisches Modell 1. Ordnung abgebildet:

$$T_y \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_y n(t). \quad (3)$$

Hier ist $y(t)$ die Regelgröße (z.B. ein Füllstand), T_y ist die summierte Zeitkonstante von Pumpenhydraulik und Prozess und K_y die Verstärkung des Prozesses. Wird (2) in (3) eingesetzt, ergibt sich das Gesamtmodell, das das Verhalten der Regelgröße $y(t)$ in Abhängigkeit von der Reglerstellgröße $u(t)$ beschreibt.

Berechnung der mittleren Drehzahl

Der Lernprozess des Reglers zur Ermittlung der mittleren Drehzahl und der minimalen Amplitude gliedert sich in drei aufeinanderfolgende Phasen, von denen die Phasen 2 und 3 wiederholt durchlaufen werden und so eine kontinuierliche Adaption der Reglerparameter an die reale Anlage ermöglichen.

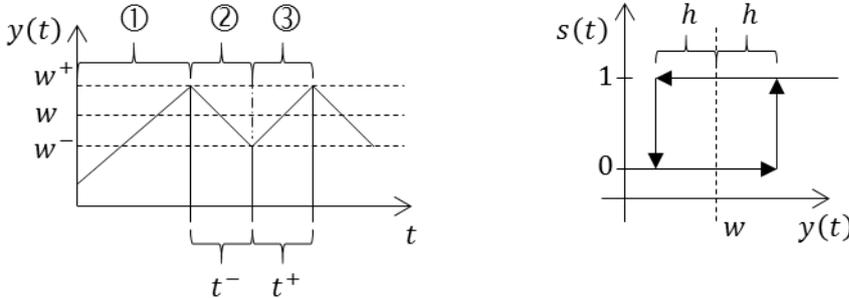


Abbildung 8: Regelzyklen des adaptiven Zweipunktreglers (links) und Verhalten des binären Sensors (rechts)

Phase 1 dient der Initialisierung und wird nur zu Beginn einmal durchgeführt, oder wenn Störungen detektiert wurden. Die Prozessgröße $y(t)$ wird in Phase 1 einmal bis zum oberen Sensorschaltpunkt $w^+ = w + h$ gefahren, d.h. bis der Sensor $s = 1$ ausgibt. Dabei bezeichnet w genau den Mittelpunkt zwischen den Sensorschaltpunkten. Der Schaltzeitpunkt ist der Startpunkt für die Lernphase und wird mit t_0 bezeichnet. In der zweiten Phase wird die Prozessgröße gesenkt bis sie bei $w^- = w - h$ ankommt und der Sensor $s = 0$ ausgibt. Dabei wird einmal die Hysteresespanne des Sensors $2h$ überstrichen. In der dritten Phase wird die Prozessgröße wieder angehoben bis $s = 1$ vorliegt. In den Phasen 2 und 3 werden die Zeitspannen t^- und t^+ gemessen, die bis zum Schalten des Sensors verstreichen. Die beiden Zeiten können zu Beginn, d.h. mit den initialen Reglerparametern, stark ungleich sein.

Im Anschluss an Phase 3 wird der Mittelwert der Regelgröße y_{mean} bestimmt:

$$y_{\text{mean}} = \frac{\left(\int_{t_0}^{t_0+t^-} y(t) dt + \int_{t_0+t^-}^{t_0+t^-+t^+} y(t) dt \right)}{t^+ + t^-} \quad (4)$$

Darin ist $y(t)$ unbekannt, denn der Sensor gibt ja nur das binäre Signal $s(t)$ aus. Durch Auflösen von (3) nach $y(t)$ und Einsetzen in (4) ergibt sich hieraus:

$$\begin{aligned} y_{\text{mean}} &= \frac{\int_{t_0}^{t_0+t^-} K_y n(t) - T_y \frac{dy(t)}{dt} dt + \int_{t_0+t^-}^{t_0+t^-+t^+} K_y n(t) - T_y \frac{dy(t)}{dt} dt}{t^+ + t^-} \\ &= \frac{\int_{t_0}^{t_0+t^-} K_y n(t) dt - T_y [y(t)]_{t_0}^{t_0+t^-}}{t^+ + t^-} + \frac{\int_{t_0+t^-}^{t_0+t^-+t^+} K_y n(t) dt - T_y [y(t)]_{t_0+t^-}^{t_0+t^-+t^+}}{t^+ + t^-} \\ &= \frac{\int_{t_0}^{t_0+t^-} K_y n(t) dt - 2T_y h + \int_{t_0+t^-}^{t_0+t^-+t^+} K_y n(t) dt + 2T_y h}{t^+ + t^-} \\ &= \frac{\int_{t_0}^{t_0+t^-} K_y n(t) dt + \int_{t_0+t^-}^{t_0+t^-+t^+} K_y n(t) dt}{t^+ + t^-} \quad (5) \end{aligned}$$

Durch Einsetzen von (2) in (5) ergibt sich

$$y_{\text{mean}} = \frac{K_y K_n \int_{t_0}^{t_0+t^-} u(t) dt + K_y K_n \int_{t_0+t^-}^{t_0+t^-+t^+} u(t) dt}{t^+ + t^-} \quad (6)$$

Die rechte Seite von (6) entspricht dem mit $K_y K_n$ multiplizierten Mittelwert von $u(t)$:

$$y_{\text{mean}} = K_y K_n u_{\text{mean}} \quad (7)$$

Einsetzen von (7) in (6) ergibt:

$$u_{mean} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+t^-} u(t) dt + \int_{t_0+t^-}^{t_0+t^+} u(t) dt}{t^+ + t^-}. \quad (8)$$

Wird nun u_{mean} in das Modell (2)-(3) eingesetzt, ergibt sich $y(t) = y_{mean} = w$ im eingeschwungenen Zustand, also genau der gewünschte Mittelwert. Da $u(t) = m \pm d$ in den Integraltermen in (8) konstant ist, kann die analytische Lösung für m^* direkt angegeben werden:

$$m^* = \frac{(m-d)t^- + (m+d)t^+}{t^+ + t^-}. \quad (9)$$

Durch Auswerten von (9) am Ende der dritten Regelphase kann somit m^* aus den gemessenen Zeitspannen und den bekannten (Initial-)Parametern m und d bestimmt werden, ohne dass die unbekannt Parameter K_n , K_y and T_y dafür benötigt werden.

Verringerung der Amplitude

Nach Abschluss der dritten Regelphase und der Berechnung von m^* wird eine Reduktion der Amplitude d vorgenommen:

$$d \leftarrow k_{red} \cdot d. \quad (10)$$

Der Reduktionsfaktor $k_{red} < 1$ wurde in allen Untersuchungen des Projekts zu $k_{red} = 0,7$ gewählt. Dabei konvergiert d in Richtung der optimalen (minimalen) Amplitude d^* , deren Erkennung über die im folgenden Abschnitt erläuterten Verweildauern erfolgt.

Schätzung der Verweildauer und Ausgleich von Störungen

Die Zeitspannen t^+ und t^- dienen sowohl zur Berechnung der Parameter m^* und d^* als auch zur Detektion von Störungen. Kleinere Störungen, die eine Anpassung der mittleren Drehzahl m^* erfordern, können durch die Neuberechnung mittels (9) am Ende der 3. Regelphase ausgeglichen werden. Größere Störungen und auch die Detektion der minimalen Amplitude erfordern weitere Maßnahmen. Zunächst wird dazu am Ende der dritten Regelphase die mittlere Zeitspanne des vergangenen Regelzyklus

$$t_{mean} = 0,5(t^+ + t^-) \quad (11)$$

bestimmt. Die mittlere Zeitspanne des nächsten Regelzyklus t_{pred} wird durch die Reduktion der Amplitude d größer sein und kann über

$$\begin{aligned} & \int_{-\ln(\frac{1}{2})T_y}^{t_{pred}} 2d \left(1 - e^{-\frac{t}{T_y}}\right) - d dt - \int_0^{-\ln(\frac{1}{2})T_y} d - 2d \left(1 - e^{-\frac{t}{T_y}}\right) dt \\ &= \int_{-\ln(\frac{1}{2})T_y}^{t_{mean}} 2dk_{red}^{-1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_y}}\right) - dk_{red}^{-1} dt \\ & - \int_0^{-\ln(\frac{1}{2})T_y} dk_{red}^{-1} - 2dk_{red}^{-1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_y}}\right) dt \end{aligned} \quad (12)$$

eine Zuordnung von t_{pred} zu den anderen, jedoch teilweise ungekannten Parametern (z.B. T_y) hergestellt werden. Durch Integration und Umstellung unter Berücksichtigung von $d > 0$ folgt

$$t_{pred} + 2T_y \left(e^{-\frac{t_{pred}}{T_y}} - 1 \right) = \frac{t_{mean}}{k_{red}} + \frac{2}{k_{red}} T_y \left(e^{-\frac{t_{mean}}{T_y}} - 1 \right), \quad (13)$$

wodurch t_{pred} abgeschätzt werden kann. Unter der Annahme, dass die Zeitkonstante T_y klein ist, lässt sich die Berechnung von T_{pred} einfach durchführen. Die Versuche an verschiedenen Pumpen und hydraulischen Prozessen im Rahmen des Projekts bestätigen die Zulässigkeit der Annahme ($T_y = 0$). Es folgt

$$t_{\text{pred}} = \frac{t_{\text{mean}}}{k_{\text{red}}}. \quad (14)$$

Im Regelungsalgorithmus wird t_{pred} genutzt, um gegebenenfalls eine Neueinstellung des Reglers vorzunehmen. Solange keine Störung auftritt, sollte die tatsächliche Verweildauer in einem Zustand mit t_{pred} in etwa übereinstimmen. Gegebenenfalls können Störungen die geschätzte Verweildauer beeinflussen, sodass zusätzlich ein Sicherheitsfaktor k_{sec} genutzt wird, um ein unbeabsichtigtes Zurücksetzen des Reglers zu verhindern. Beim erstmaligen Überschreiten von t_{pred} , d.h. $t^+ > t_{\text{pred}}$ oder $t^- > t_{\text{pred}}$ wird zunächst die Amplitude wieder um einen Schritt erhöht, d.h.:

$$d \leftarrow \frac{d}{k_{\text{red}}}. \quad (15)$$

Dieses erstmalige Überschreiten der Zeitspanne t_{pred} findet standardmäßig in jedem Lernprozess des Reglers statt, da ja d immer weiter reduziert wird. Nach der Ausführung von (15) wird der Faktor $k_{\text{red}} = 1$ gesetzt, um eine weitere Reduktion der Amplitude $d = d^*$ zu verhindern. Sollte eine weitere Überschreitung der Zeitdauer t_{pred} auftreten, wird der Regler auf die Startparameter zurückgesetzt und beginnt wieder in Phase 1, sodass eine neues Anlernen der Parameter und so eine effiziente Anpassung an die geänderten Prozessbedingungen erreicht werden kann.

Vorverarbeitung des Sensorsignals

Allgemein sind Zweipunktregler sind auf binäre Sensoren mit einer Hysterese angewiesen. Eine zu geringe Hysterese würde schnelle Signalwechsel und damit ein ungewolltes hochfrequentes Ein- und Ausschalten der Pumpe auslösen.

Um den vorgestellten Regler auch für Sensoren mit sehr kleiner Hysterese einsetzen zu können, wird das binäre Sensorsignal y_{sens} mit einem Tiefpassfilter (PT1-System) gefiltert. Die Differentialgleichung, die das Verhalten des Tiefpassfilters beschreibt, lautet

$$T_{\text{hyst}} \dot{y}_{\text{hyst}}(t) + y_{\text{hyst}}(t) = y_{\text{sens}}(t),$$

mit T_{hyst} als der Zeitkonstante des Tiefpassfilters. Zur Ermittlung von y wird der Wert von y_{hyst} durch einen relativen Vergleich des aktuellen Wertes mit dem mittleren Wert von 0,5 bestimmt. Die Berechnungsvorschrift hierfür lautet

$$y = \begin{cases} 1 & \text{für } y_{\text{hyst}} > 0,5 \\ 0 & \text{für } y_{\text{hyst}} \leq 0,5 \end{cases}. \quad (16)$$

Die Verzögerung, die das Tiefpassfilter einführt, stellt sicher, dass bei Sensoren mit einer sehr kleinen Hysterese die Umschaltvorgänge nicht zu schnell ablaufen. Im detaillierten Ablauf des Regelalgorithmus im nächsten Abschnitt (Abbildung 9) ist diese Filterung nicht aufgeführt, da sie im Normalfall (Regler ersetzt einen „An/Aus“- Regler) nicht benötigt wird.

Detaillierte Darstellung des Regelungsalgorithmus

In wird der Regelungsalgorithmus in einem Struktogramm dargestellt, dass als Vorlage für die Implementierung diene.

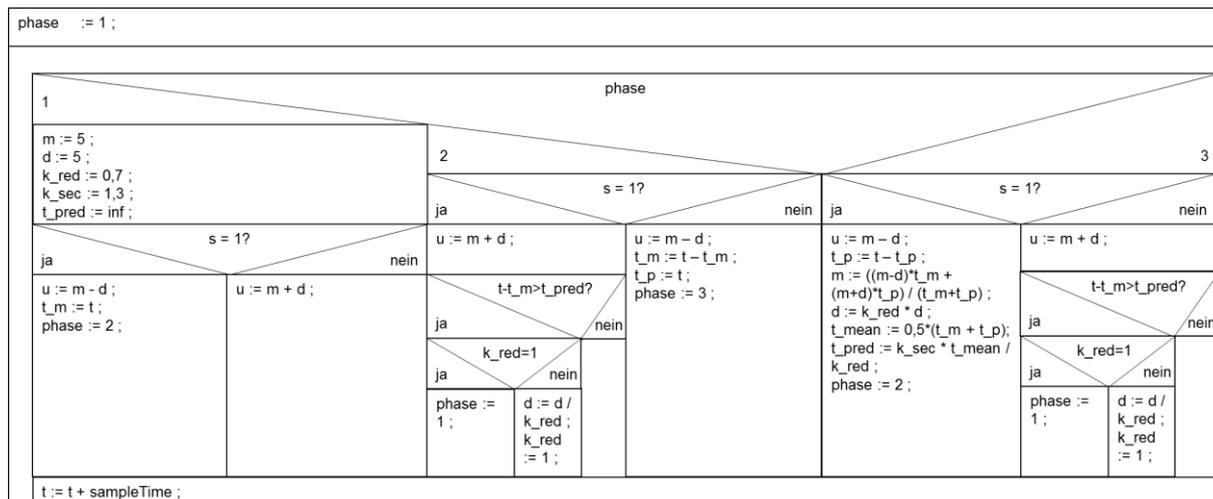


Abbildung 9: Struktogramm des adaptiven Zweipunktreglers.

Darin sind die in den vorherigen Teilkapiteln hergeleiteten Rechenvorschriften enthalten. Der Algorithmus zur adaptiven Zweipunktregelung wurde im Anschluss an das Teilprojekt um Analysen zur Robustheit, weitere Optimierungen der Berechnungen [2], [3] und für die Funktionsweise mit zwei binären Sensoren erweitert [4]. Die Ergebnisse sind auf Fachkonferenzen veröffentlicht worden.

3.2.2 Implementierung auf eingebetteter Hardware und Verifikation am Prüfstand (AP1.2)

Die Erprobung des adaptiven Zweipunktreglers erfolgte in mehreren Teilschritten. Zunächst wurde eine Simulation in Matlab/Simulink durchgeführt, die schnelle Debugzyklen ermöglicht. Anschließend erfolgte ein Test an einem Versuchsstand des Lehrstuhls für Regelungstechnik und Systemtheorie in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurde der Regelungsalgorithmus in Matlab/Simulink umgesetzt. Im zweiten Schritt wurde der Regelungsalgorithmus auf einem stm32-Mikrocontroller in C implementiert. Nachfolgend werden die Entwicklungsschritte genauer beschrieben.

3.2.2.1 Simulationen in Simulink

Zur Entwicklung des adaptiven Zweipunktreglers wurde der Regelungsalgorithmus zunächst in Simulink implementiert, da hier das Verhalten des Reglers bezüglich der Änderungen von Parametern im Regelungsalgorithmus mit kurzen Simulationszeiten rasch überprüft und verschiedene Prozesskonfigurationen simuliert werden konnten. Ein Screenshot des erstellten Simulink-Modells ist in Abbildung 10 dargestellt und zeigt eine Simulation anhand einer Füllstandsregelung.

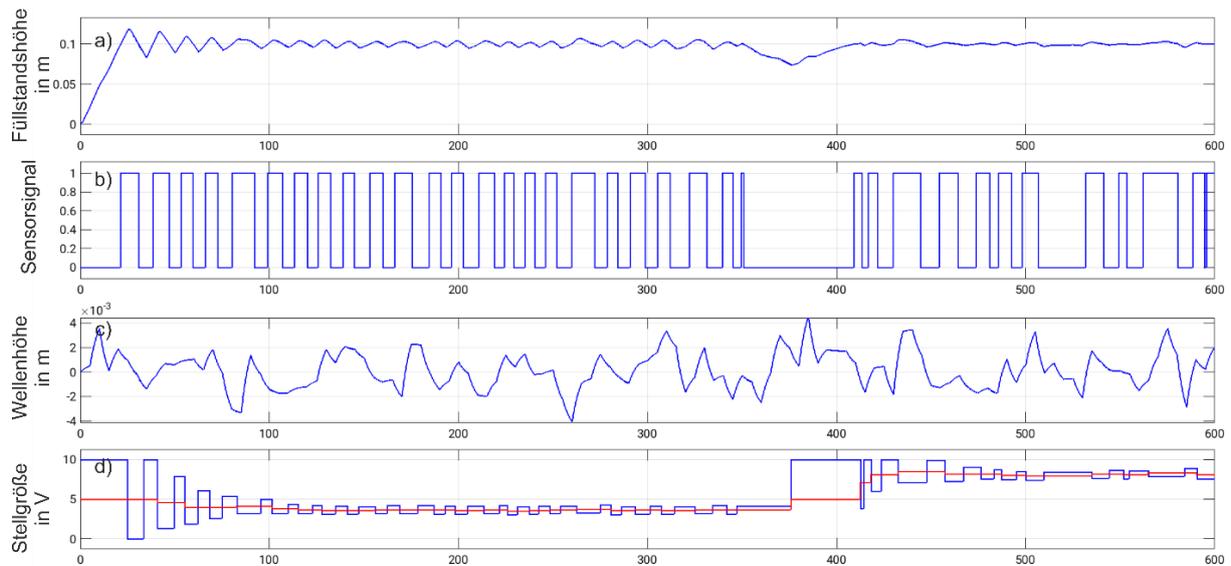


Abbildung 11: Simulationsergebnisse des Simulink-Modells. a) Füllstand am Wasserbehälter. b) Messwert des binären Sensors. c) Wellenhöhe als Störung des Wasserstandes. d) Stellgröße des Reglers (blaue Linie) und mittlere Stellgröße (rote Linie).

Zu Beginn wird der leere Wasserbehälter gefüllt, bis der Füllstand bei etwa 0,11m liegt. Der Wasserstand wird dabei permanent durch die simulierten Wellen gestört, um ein realistisches Szenario zu simulieren. Wenn der Füllstand etwa 0,11m erreicht, ändert sich das Signal des Sensors. Anschließend bleibt der Füllstand immer bei etwa 0,1m mit leichten Schwankungen um diesen Wert. Entsprechend wechselt das binäre Sensorsignal nachfolgend die Werte. Die Stellgröße liegt zu Beginn bei 10V und springt auf 0V, wenn das Sensorsignal sich ändert. Nachfolgend wird die mittlere Stellgröße ermittelt, die bei etwa 4V liegt und damit etwas unter dem Wert zu Beginn. Außerdem wird d immer weiter verringert, sodass die Sprunghöhen geringer werden. Bei $t \approx 280s$ wird das Rücksetzen auf $k_{red} = 1$ durchgeführt, es wurde also das minimale d^* gefunden. Zum Zeitpunkt $t = 350s$ wird das Ventil geöffnet, um den simulierten Prozess so stark zu stören, dass eine automatische Adaption der Reglerparameter nötig wird. Im Rahmen dieser automatischen Adaption werden d und m zunächst zurückgesetzt, sodass der Wasserbehälter wieder befüllt wird. Ab dem Zeitpunkt des Erreichens der oberen Abweichung vom mittleren Füllstand wird die mittlere Stellgröße neu ermittelt und die Abweichung von der mittleren Stellgröße verringert.

Mit Hilfe des Simulink-Modells konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Regelalgorithmus grundsätzlich funktioniert. Gleichzeitig konnten die Initialparameter (k_{red} und k_{sec}) für größtmögliche Robustheit eingestellt werden.

3.2.2.2 Validierung des Regelalgorithmus in der realen Anwendung

Im Anschluss an die Simulink-basierte Evaluierung ist der Regler auf einem STM32 Mikrocontroller implementiert und an den Prüfständen getestet worden. Die Wahl ist auf einen STM32 Mikrocontroller gefallen, weil es sich um eine weit verbreitete Hardware handelt. Der konkrete Typ des Mikrocontrollers ist insofern unerheblich, als dass die Anforderungen an die Rechenleistung sehr gering sind. Zusätzlich zum Mikrocontroller ist eine Anschaltung an die Peripherie, insbesondere die erforderliche Signalwandlung umgesetzt worden.

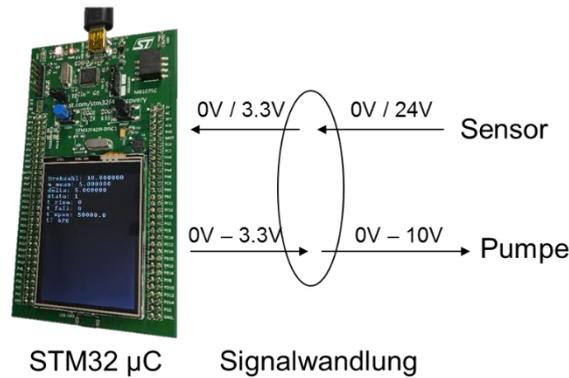


Abbildung 12: STM32 Mikrocontroller und Signalwandlung.

Bei den Tests sind verschiedene Prozesskonfigurationen (Füllstand-, Druck-, Durchfluss- und Temperaturregelungen) erfolgreich erprobt worden. Abbildung 13 zeigt das Ergebnis der Regelung in einer Füllstandsangewandung. Hier ist wie bei der oben zusammengefassten simulativen Erprobung mit dem Simulink-Modell eine schnelle Konvergenz des Reglers zu erkennen. Bei $t \approx 175\text{s}$ ist d^* gefunden worden. Bei $t \approx 420\text{s}$ werden die Reglerparameter erneut automatisch adaptiert. Diese erneute automatische Adaption ist durch Einbringen einer größeren Störung (durch geöffnetes Ablaufventil im Behälter) induziert worden.

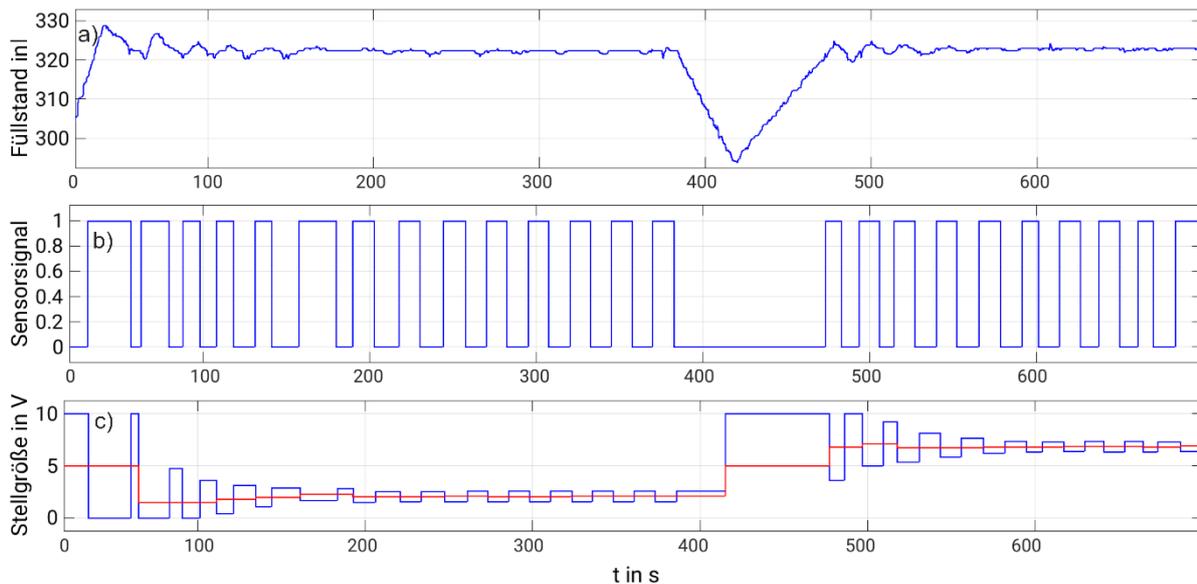


Abbildung 13: Ergebnisse am Versuchsstand mit implementiertem Regler. a) Füllstand des Wasserbehälters. b) Messwert des binären Sensors. c) Stellgröße des Reglers (blaue Linie) und mittlere Stellgröße (rote Linie).

3.2.2.3 Auswirkungen auf die Energieeffizienz

Während der Prüfstandsversuche wurde jeweils der Energiebedarf der Pumpe aufgezeichnet. Zum Vergleich wurden eine klassische PID-Regelung (die aufwendigere, wertkontinuierliche Messtechnik erfordert und hier als Benchmark dient) und ein einfacher „An/Aus“-Regler zusätzlich implementiert. Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse für eine Füllstands- und eine Druckregelstrecke, die jeweils mit verschiedenen Pumpen betrieben werden (KSB Etanorm G32-125.1 an der Füllstandsregelstrecke und Herborner F050-160A für die Druckregelstrecke). Beide Prüfstände sind in Abbildung 4 und Abbildung 7 dargestellt. In Abbildung 14 ist links der über der Zeit integrierte Energieverbrauch der jeweils drei Reglervarianten dargestellt. Deutlich ist hier zu Beginn ein ähnliches Verhalten zwischen dem adaptiven Zweipunktregler und dem einfachen „an/aus“-Regler zu erkennen, das Verhalten des adaptiven Zweipunktreglers konvergiert aber schnell in Richtung des Benchmark-PID-Reglers.

Jeweils ca. auf der Hälfte der Zeitreihen wurde gezielt eine größere Störung induziert, die zur automatischen Adaption des Reglers führte. So steigt hier der Energiebedarf des adaptiven Zweipunktreglers kurzfristig wieder, nähert sich aber schnell wieder dem Verbrauch der PID-Regelung an.

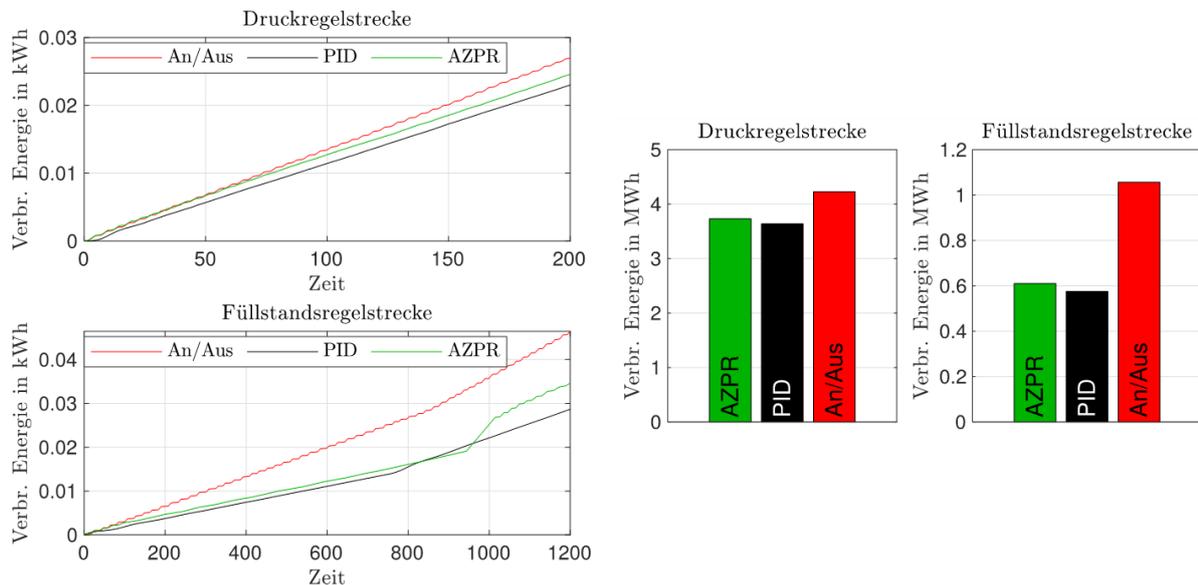


Abbildung 14: Energieverbrauch der adaptiven Zweipunktregelung im Vergleich mit konkurrierenden Regelungsstrategien.

Im rechten Diagramm in Abbildung 14 ist der Energieverbrauch auf ein Jahr Betrieb extrapoliert. Hier konnte in beiden Prozessen eine signifikante Einsparung durch den Einsatz des adaptiven Zweipunktreglers anstelle des einfachen „An/Aus“-Reglers erzielt werden. Im Fall der Füllstandsregelung konnten mehr als 0,4 MWh und damit ca. die Hälfte der Energie eingespart werden. In Kombination mit der durch die plug&play Fähigkeit und der Weiternutzung einfacher binärer Sensorik geringen Nutzungshürde des adaptiven Zweipunktreglers werden hier in Summe hohe Energieeinsparungen erwartet.

3.3 Smartphone-basierte Effizienz- und Zustandsanalyse (AP2)

Die Überwachung des Zustands einer Pumpe wird in vielen Fällen vernachlässigt, solange die Förderleistung nicht merklich einbricht oder die Pumpe durch starke Vibrationen und Geräuschentwicklung auffällig wird. Der Verzicht auf teure Messtechnik führt dazu, dass viele Betreiber gar nicht wissen, in welchem Betriebspunkt und Zustand sich die eingesetzten Pumpen befinden. So ist es für den Betreiber folglich unmöglich zu entscheiden, ob eine Pumpe effizient läuft oder Optimierungsbedarf besteht. Das Spektrum der Anwendungsfälle reicht hier von großen Industrieanwendungen bis zu kleinen Heizungsumwälzpumpen in Privathaushalten. Das Ergebnis sind die zahlreichen Fälle, in denen Pumpen z.B. wesentlich überdimensioniert sind, damit auch ohne Kenntnis der internen Größen eine gewisse Fördermenge gewährleistet werden kann. Der dauerhaft erhöhte Energieverbrauch wird zugunsten der einmalig eingesparten Sensorik in Kauf genommen.

3.3.1 Implementierung der FFT-Analyse und Identifikation geeigneter Messpositionen (AP2.1)

Der erste Entwicklungsschritt bestand in der Implementierung einer schnellen Fourier-Transformation (FFT) zur Nutzung auf einem Smartphone, um basierend darauf geeignete Messpositionen für die Betriebspunkt- und Zustandserkennung der Pumpe zu identifizieren. Bereits zu Beginn des zweiten Teilprojekts wurde dazu eine einfache Software entwickelt, um Schwingungsdaten mit dem im Smartphone integrierten Beschleunigungssensor aufzunehmen und mittels der FFT-Analyse im Frequenzbereich zu analysieren.

Implementierung der FFT-Analyse

Die FFT wird in der Programmiersprache Java für die Nutzung auf Smartphones mit einem Android-Betriebssystem implementiert. Es wurde eine Klasse *fft* erstellt, mit der die Vorwärts-Transformation der FFT durchgeführt werden kann³. Die Implementierung der FFT basiert auf der Klasse *FastFourierTransformer* aus der Apache Commons Math Library⁴. Zunächst findet ein Zero-Padding statt, wobei die Zeitreihe der Sensordaten mit Nullen auf die Länge der nächsten 2er Potenz erweitert wird. Diese erweiterte Zeitreihe wird dann gefenstert, um spektrale Streuung zu unterdrücken. Anschließend wird das komplexe Frequenzspektrum mit der Methode „forward“ der oben genannten Klasse ermittelt. Tabelle 1 fasst die Methoden der Klasse zusammen.

Tabelle 1: Methoden der Klasse *fft*.

Methode	Bedeutung
forward	Durchführen der FFT, inklusive Fensterung
setSamplingrate	Festlegen der Abtastrate
nextPowerOf2	Ermitteln der nächsthöheren Potenz von 2
getMagnitudeSpectrum	Rückgabe des Spektrums
getValues	Rückgabe der komplexen, fouriertransformierten Daten
get	Rückgabe eines Elements der komplexen, fouriertransformierten Daten
getSamplingrate	Rückgabe der Abtastrate
getWindowize	Rückgabe der Fenstergröße

Zur Interpretation der FFT werden die Daten mit der Klasse *spectrum* in das Frequenzspektrum und die dazugehörigen Frequenzen umgewandelt. Abbildung 15 zeigt beispielhaft das Signal einer Beschleunigungsmessung über zehn Sekunden und das berechnete Frequenzspektrum.

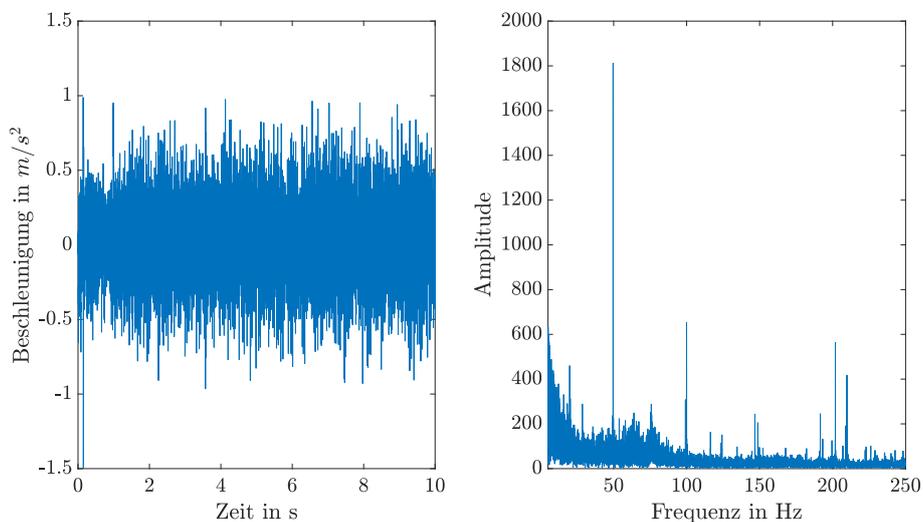


Abbildung 15: Beschleunigungsmessung im Zeitbereich (links) und das mittels FFT berechnete Frequenzspektrum des Signals (rechts).

Identifikation einer geeigneten Messposition

Um eine geeignete Messposition zu identifizieren, wird hier kurz auf das Verfahren zur Betriebspunkterkennung vorgegriffen (Beschreibung siehe Kapitel 3.3.2). Der Betriebspunkt wird basierend auf den Zustandsgrößen des Motors ermittelt, wobei die Drehfrequenz des Motors für die

³ <https://www.programcreek.com/java-api-examples/?code=vitrivr%2Fcineast%2Fcineast-master%2Fsrc%2Forg%2Fvitrivr%2Fcineast%2Fcore%2Futil%2Fdsp%2Ffft%2FFFT.java#>

⁴ Apache Commons Math, Class FastFourierTransformer. Online verfügbar unter <https://commons.apache.org/proper/commons-math/javadocs/api-3.4/org/apache/commons/math3/transform/FastFourierTransformer.html>.

Erkennung ausschlaggebend ist. Entsprechend muss aus den Messungen auf die Drehfrequenz geschlossen werden können, so dass Messpositionen am Motor zielführend sind. Aufgrund unterschiedlicher Bauweisen hängt die genaue Messposition zusätzlich vom Pumpentyp ab.

Der Beschleunigungssensor des Smartphones misst die Beschleunigung in drei Raumrichtungen bezogen auf den freien Fall. Herkömmliche Aufgaben dieses Sensors umfassen die Erkennung der Orientierung des Smartphones oder die Unterstützung von Spielen. Aus diesen Anforderungen resultieren relativ kleine Abtastraten von weniger als 100 Hz. Verfügbare Smartphones bieten Abtastraten von 100 Hz bis 500 Hz, je nach Alter und Preiskategorie des Smartphones. Die Amplituden der Beschleunigungssignale hängen von der Position ab, mit der das Smartphone an die Pumpe angelegt wird. Um die aus der Drehfrequenz des Motors zu ermitteln, ist es sinnvoll, das Smartphone auf eine möglichst ebene Fläche am Motorgehäuse zu halten und dabei leichten Druck auszuüben. Abbildung 16 zeigt exemplarisch eine geeignete Messposition.

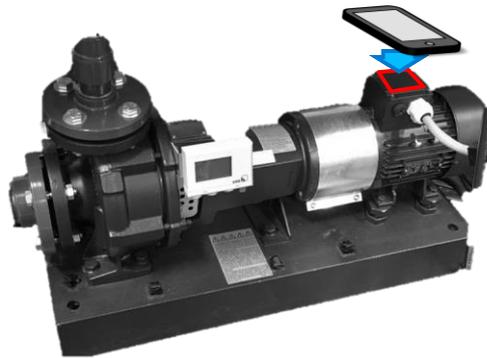


Abbildung 16: Messposition zur Durchführung der Effizienzanalyse mit dem Beschleunigungssensor.

Neben dem Beschleunigungssensor lässt sich auch das integrierte Mikrofon für die Betriebspunkt- und Zustandsanalyse nutzen. Im Gegensatz zum Beschleunigungssensor erfasst das Mikrofon die Audiosignale mit einer sehr hohen Abtastrate von 44,1 kHz, da der hörbare Bereich von 20 Hz bis 20 kHz abgedeckt werden muss. Ziel der Audiomessungen ist es ebenfalls, die Drehfrequenz des Motors zu ermitteln. Die relevante Größe ist der Körperschall des mit gleicher Frequenz rotierenden Lüfters, der in der Regel an der Lüfterhaube des Motors gut gemessen werden kann. Entsprechend sollte das Mikrofon möglichst nahe an den Lüfter gehalten werden. Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass der durch die Rotation erzeugte Schall auch in der oben definierten Messposition ausreichend gut mit dem Mikrofon detektiert wird, so dass die Sensorfusion von Beschleunigungssensor und Mikrofon an einer gemeinsamen Messposition möglich ist.

Um eine ausreichend hohe Auflösung des Frequenzspektrums zu erzielen, sollte die Dauer der Beschleunigungsmessung nicht weniger als 20 Sekunden und die Dauer der Audiomessung nicht weniger als 10 Sekunden betragen.

3.3.2 Modellbildung, Effizienzanalyse und Schadenmustererkennung (AP2.2)

Nachfolgend werden Erkennungsalgorithmen für den Betriebspunkt einer Pumpe sowie für diverse Schadensfälle vorgestellt, wobei zusätzlich zur Erkennung des Betriebspunkts auch eine Analyse der Effizienz implementiert wird.

Grundlegend für die Erkennung ist wiederum die Modellierung der Pumpe mit einer zweckmäßigen Genauigkeit. Zielführend sind in diesem Fall die Nutzung von Kennlinien, die die Kenngrößen Förderhöhe H , Effizienz η und Leistung P in Abhängigkeit des Durchflusses q über den gesamten Betriebsbereich angeben. Abbildung 17 illustriert die Kennlinie und zeigt außerdem den optimalen Betriebspunkt, der bei Erreichen der höchsten Effizienz vorliegt.

Um ohne hydraulische Messgrößen auf den Betriebspunkt der Pumpe zu schließen, werden Kenngrößen des Motors ermittelt. Daher ist neben der hydraulischen Modellierung ein Ersatzmodell für den Motor erforderlich. Kreiselpumpen werden oft von Asynchronmaschinen (ASM) betrieben. Asynchronmaschinen erzeugen ein Drehmoment durch den Schlupf, der auftritt, wenn sich der Rotor mit einer vom Drehfeld abweichenden Drehzahl dreht. Abbildung 18 zeigt die Motorkennlinie einer ASM. Der Betriebsbereich liegt zwischen dem Kippunkt, d.h. dem Punkt mit maximalem Drehmoment M_{kipp} , und dem Synchronpunkt mit der Drehzahl n_0 , an dem kein Drehmoment mehr aufgebracht wird. Der Betriebsbereich des Motors wird durch den Nennpunkt, d.h. den Punkt mit Nennmoment M_{nenn} bei Nenndrehzahl n_{nenn} charakterisiert, bei dem der Motor die Nennleistung $P_{\text{nenn}} = 2\pi M_{\text{nenn}} n_{\text{nenn}}$ liefert.

Die Motorkennlinie wird mit einem linearen Ersatzmodell abgebildet, das auf bekannten Kenndaten des Motors basiert. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass einzig bekannte Größen verwendet werden. Konkret wird die Kennlinie im Betriebsbereich durch eine Gerade zwischen dem Nennpunkt und dem Synchronpunkt angenähert. Beide Punkte lassen sich aus Angaben auf dem Typenschild des Motors ermitteln.

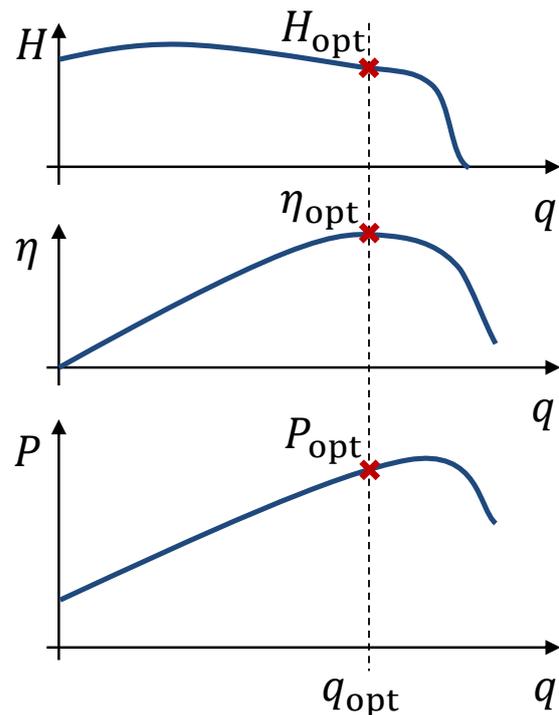


Abbildung 17: Kennfeld einer Pumpe.

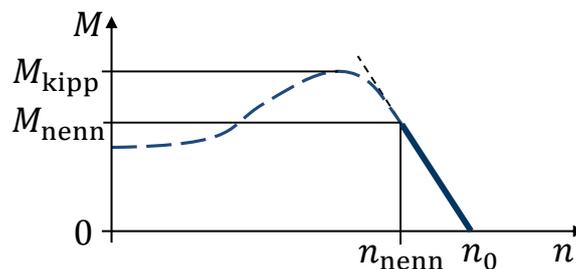


Abbildung 18: Motorkennlinie mit linearer Approximation zwischen Nenn- und Synchronpunkt.

Das zweite Ziel dieses Arbeitspakets besteht in der Entwicklung von Methoden zur Schadensmustererkennung, die ausschließlich die Sensorik eines Smartphones benötigt. Zunächst wurde aus der Vielzahl möglicher Schadensfälle eine Auswahl getroffen. Diese Auswahl basierte auf der Analyse der zu erwartenden Merkmale eines Schadensfalls hinsichtlich ihrer Detektierbarkeit mit Smartphone-Sensorik. Als erster Anhaltspunkt wurde gemeinsam mit den Mitgliedern des VDMA-Arbeitskreises eine Übersicht der Schadensfälle aus dem „Leitfaden für die Störungsfrüherkennung“ der TU Kaiserslautern [11] erstellt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht zu detektierender Schadensfälle und deren Merkmale [11].

Nr	Störung	Merkmale
1	Lastpunkt, Abreißen wg. zu hohem Gasgehalt, Blockade der Pumpe	Drehzahl des Motors
2	Kavitation, Gasmitförderung	Effektivwerte des gefilterten Zeitsignals
3	Halbfrequenzwirbel Gleitlager	Halbe Harmonische, Phase + Amplitude
4	Unwucht	Erhöhte Amplitude bei Drehfrequenz
5	Fluchtungsfehler Wellenkupplung	Verhältnis der 1. bzw. 2. Harmonischen zur Amplitude bei Drehfrequenz
6	Oberschwingung Fluchtungsfehler Wellenkupplung und Schaufeldurchgang	Harmonische doppelte Schaufelzahl, Phase + Amplitude
7	Erfassung der Amplitude von Eigenschwingungen	feste Frequenzbänder
8	Verschleiß Wälzlager	Harmonische Wälzkörperzahl, Phase + Amplitude
9	Blockade der Pumpe	Temperatur Pumpgehäuse, Leistungsaufnahme
10	evtl. Blockade der Pumpe (Messstelle nahe genug an der Pumpe)	Temperatur Saugseite
11	Kavitation	stat. Druck Saugseite
12	Lastpunkt	Förderstrom, Leistungsaufnahme

Bei der Analyse der zwölf Schadensfälle wurde zunächst geprüft, welche der Merkmale grundsätzlich mit einem Beschleunigungssensor mit einer maximalen Abtastfrequenz von 500 Hz (höchster Wert in aktuellen Smartphones) ermittelt werden können. Für die Bewertung wird angenommen, dass die zu untersuchenden Pumpen mit einer maximalen Synchronfrequenz f_0 von 50 Hz (Netzbetrieb) betrieben werden und damit die Drehfrequenz des Motors unterhalb von 50 Hz liegt. Konzeptbedingt können mit Beschleunigungssensor und Mikrofon des Smartphones keine Störungen identifiziert werden, deren Merkmale sich nur durch Druck-, Förderstrom- oder Temperaturmessungen identifizieren lassen.

Die in Tabelle 2 grün hinterlegten Schadensfälle wurden in Zusammenarbeit mit den Partnern des VDMA-Arbeitskreises zur weiteren Untersuchung ausgewählt. Darüber hinaus wurde festgelegt, dass zusätzlich Laufradschäden untersucht werden.

Betriebspunkterkennung und Effizienzanalyse

Die Betriebspunkterkennung basiert auf der Frequenzanalyse der Schwingungen des Motors. Die Vibration wird mit einem Beschleunigungssensor gemessen und das Beschleunigungssignal mittels schneller Fourier-Transformation analysiert. Ziel ist es dabei, die Drehfrequenz des Motors zu ermitteln, um daraus mithilfe der Motorkennlinie (siehe Abbildung 18) die aktuelle mechanische Leistung zu bestimmen, mit der aus der Pumpenkennlinie (siehe Abbildung 17) auf den aktuellen Durchfluss geschlossen werden kann.

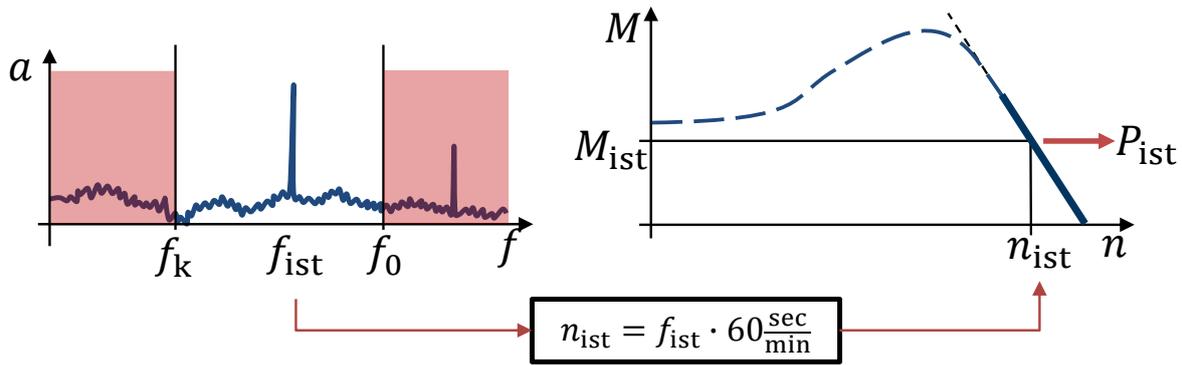


Abbildung 19: Ermittlung der aktuellen Motorleistung aus der FFT des Schwingungssignals.

Abbildung 19 beschreibt die Ermittlung der aktuellen Motorleistung aus der FFT des Schwingungssignals. Dazu wird die Frequenzspitze im Frequenzspektrum im Betriebsbereich des Motors identifiziert, der zwischen dem Kippunkt (Kippmoment M_{kipp} bei Frequenz f_k) und dem Synchronpunkt f_0 . Die zur Frequenzspitze gehörende Frequenz f_{ist} ist die aktuelle Drehfrequenz des Motors, dessen aktuelle Drehzahl demnach als $n_{\text{ist}} = f_{\text{ist}} \cdot 60 \frac{\text{sec}}{\text{min}}$ berechnet werden kann. Überträgt man die Drehzahl n_{ist} in die Motorkennlinie, bzw. in deren lineare Annäherung, lässt sich das aktuelle Drehmoment M_{ist} ablesen und daraus mit $P_{\text{ist}} = 2\pi M_{\text{ist}} n_{\text{ist}}$ die aktuelle Leistung berechnen.

Aus der Leistung P_{ist} kann der aktuelle Durchfluss q_{ist} bestimmt werden. Aus dem aktuellen Durchfluss lassen sich mithilfe der Pumpenkennfelder auch die aktuelle Effizienz η_{ist} und Förderhöhe H_{ist} bestimmen, siehe Abbildung 20.

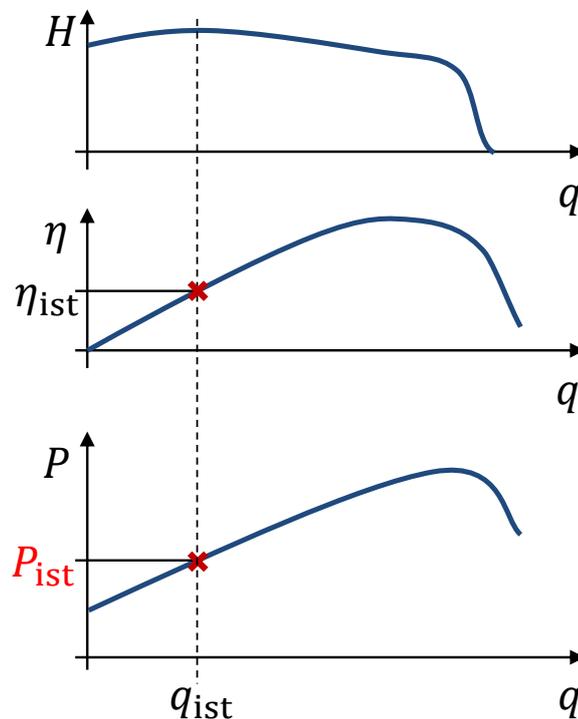


Abbildung 20: Ermittlung des Betriebspunkts aus der ermittelten Motorleistung.

Zur Bewertung der aktuellen Effizienz wurden Betriebsbereiche im $\eta = f(q)$ Kennfeld entsprechend [12] ausgehend von der maximalen Effizienz η_{opt} klassifiziert:

- optimaler Betrieb $\eta_{\text{ist}} \geq 0.92\eta_{\text{opt}}$

- guter Betrieb (Teillast) $0.53\eta_{opt} \leq \eta_{ist} < 0.92\eta_{opt}$
- normaler Betrieb (Teillast, Kavitation) $0.1\eta_{opt} \leq \eta_{ist} < 0.53\eta_{opt}$

Neben einer schlechten Effizienz bedeutet ein Betrieb im normalen Bereich auch, dass die Lebensdauer der Lager reduziert wird und dass Kavitation auftreten kann.

Während die Kennfelder für Pumpe und Motor in der Regel nur für Netzbetrieb angegeben sind, können Pumpen bei Betrieb mit einem Frequenzumrichter auch mit anderen Synchronfrequenzen f_1 betrieben werden. Abweichende Synchronfrequenzen haben zur Folge, dass sich Motor- und Pumpenkennlinie verschieben. Die Verschiebung der Motorkennlinie hängt vom Nennschlupf $s_{nenn} = n_0 - n_{nenn} = \text{const.}$ ab. Zur Anpassung der linearen Annäherung der Motorkennlinie (vergleiche Abbildung 18) wird daraufhin der Nennpunkt mit

$$n_{Nenn,1} = n_{Nenn} - s_{Nenn} \quad (17)$$

$$P_{Nenn,1} = P_{Nenn} \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^3 \quad (18)$$

$$M_{Nenn,1} = \frac{30P_{Nenn,1}}{\pi n_{Nenn,1}} \quad (19)$$

verschoben. Abbildung 21 skizziert die Verschiebung von Nennpunkt und Motorkennlinie.

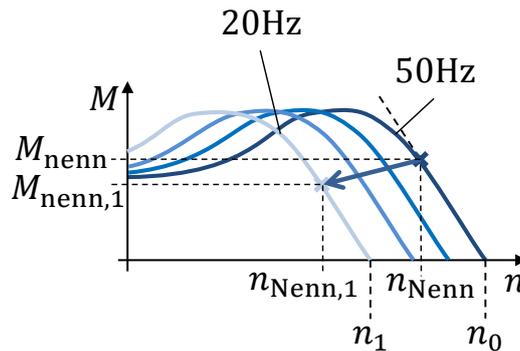


Abbildung 21: Verschiebung der Motorkennlinie bei Veränderung der Synchronfrequenz.

Die Verschiebung der hydraulischen Kennlinien kann basierend auf den Ähnlichkeitsgesetzen [13, p. 134] mit

$$q_1 = q_0 \frac{n_1}{n_0} \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^2 \frac{\eta_{v,1}}{\eta_{v,0}}, \quad (20)$$

$$H_1 = H_0 \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^2 \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^2 \frac{z_{st,1}}{z_{st,2}} \frac{\eta_{h,1}}{\eta_{h,0}}, \quad (21)$$

$$P_1 = P_0 \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^3 \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^5 \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{z_{st,1}}{z_{st,2}} \frac{\eta_{v,1}}{\eta_{v,0}} \quad (22)$$

berechnet werden, wobei der Index 0 die Auslegung und der Index 1 den Betrieb bei veränderter Synchronfrequenz kennzeichnet. Durch die Veränderung der Synchronfrequenz ändert sich ausschließlich die Drehzahl, es gilt also $n_1 \neq n_0$, während Durchmesser des Laufrads D , Stufenzahl z_{st} und Dichte ρ konstant sind. Zusätzlich wird in der Praxis für die Wirkungsgrade $\eta_1 \approx \eta_0$ angenähert. Praktisch bedeutet das, dass sich die in Abbildung 17 gezeigten Kennfelder durch das Verhältnis zwischen der ursprünglichen Synchrondrehzahl n_0 und der neu eingestellten Synchrondrehzahl n_1 in erster (Durchfluss), zweiter (Förderhöhe) und dritter (Leistung) Ordnung verändern.

Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse der Betriebspunkterkennung für die am Prüfstand (siehe Abbildung 7) installierte Kreiselpumpe bei Betrieb mit Synchronfrequenzen von 30, 40 und 50 Hz. Rot eingezeichnet sind die Ergebnisse der Smartphone-Messungen mit dem Beschleunigungssensor, blau eingezeichnet Ergebnisse mit dem Mikrofon. Die gestrichelten Kreise kennzeichnen die Abweichung von der mit einem zu Validierungszwecken fest montierten Durchflusssensor durchgeführten Referenzmessung. Der mittlere Fehler bezogen auf den Durchfluss am optimalen Betriebspunkt liegt bei ca. 4,4 % für die Messung mit dem Beschleunigungssensor und 2,5 % für die Messung mit dem Mikrofon.

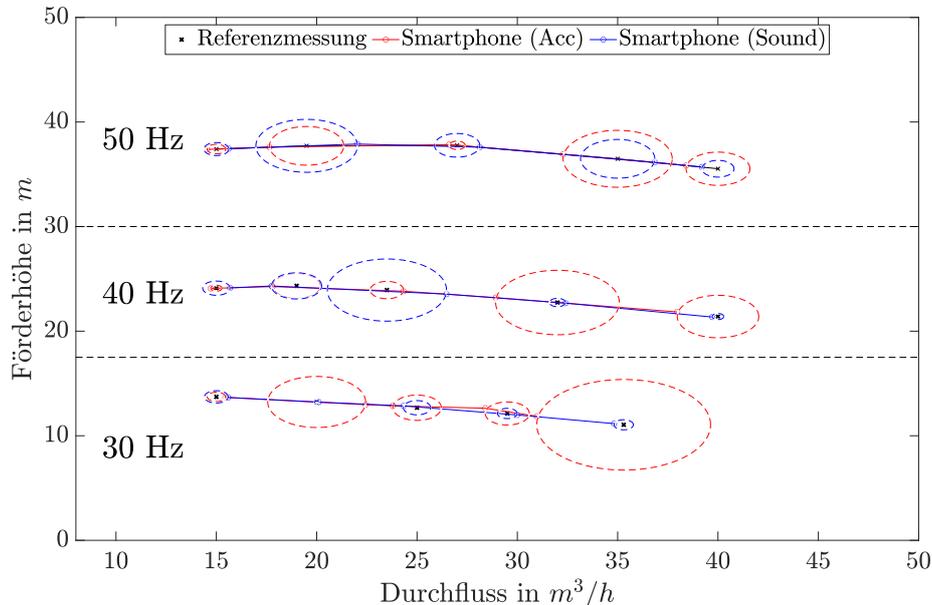


Abbildung 22: Ergebnisse der Betriebspunkterkennung für eine Kreiselpumpe.

Durch Einsatz von Sensorfusion kann der Fehler bei der Bestimmung des Betriebspunkts reduziert werden. Dazu wird zunächst die aktuelle Drehfrequenz f_{ist} des Motors von beiden Sensoren unabhängig bestimmt, bevor der in Abbildung 19 und Abbildung 20 beschriebene Algorithmus zur Bestimmung des mit der gemittelten Drehfrequenz $f_{ist} = \frac{1}{2}(f_{ist}^{acc} + f_{ist}^{sound})$ durchführt wird. Es sei angemerkt, dass zur Ermittlung von f_{ist}^{sound} nicht nur die aktuelle Drehfrequenz aus der Frequenzanalyse genutzt wird, sondern auch die höheren Harmonischen. Konkret werden weitere Frequenzspitzen identifiziert und die Drehfrequenz als Mittelwert der zugehörigen Frequenzen als

$$f_{ist}^{sound} = \frac{\sum_{i=1}^{2z_{sch}} \frac{f_{peak,i}}{i}}{2z_{sch}} \quad (23)$$

berechnet, wobei $f_{peak,i}$ der Frequenz bei der Frequenzspitze im Bereich $[i \cdot f_{kip}, i \cdot f_0]$ entspricht und z_{sch} die Schaufelzahl des Laufrads ist.

Die hier beschriebene Vorgehensweise zur Betriebspunktbestimmung einer Pumpe basierend auf Auswertung der Motorkennlinie ist im Patent „EP 2 433 010 B1“ [14] geschützt. Nach Absprache mit dem Patentinhaber, der Fa. KSB, darf das Verfahren im Rahmen dieses Forschungsprojekts eingesetzt werden. Im Weiteren wird in diesem Bericht mit Fußnoten auf das Patent hingewiesen, wenn nötig.

Erkennung von hydraulischen Störungen

Hydraulische Störungen, die nach der Bewertung von Tabelle 2 mit dem Smartphone identifiziert werden können, sind die hydraulische Blockade und die Überlast. Bei einer hydraulischen Blockade wird kein Fluid gefördert, obwohl der Motor eine Leistung erzeugt. Dieser Punkt ist im Kennfeld (siehe unterer Graph in Abbildung 17) eindeutig bestimmt. Die Blockade lässt sich also mit dem

Algorithmus zur Betriebspunkterkennung erkennen. Konkret wird die aktuelle Leistung aus dem Frequenzspektrum des Beschleunigungssensors gemäß dem in Abbildung 19 gezeigten Vorgehen ermittelt und anschließend in die Kennlinie der Pumpe übertragen. Eine Blockade liegt vor, wenn der abgelesene Durchfluss 0 beträgt, siehe Punkt (q_1, P_1) in Abbildung 23⁵.

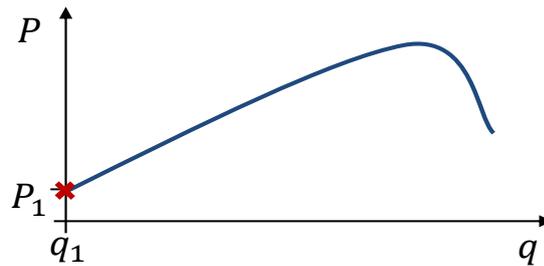


Abbildung 23: Erkennung einer hydraulischen Blockade

Der Überlastbetrieb einer Pumpe liegt dann vor, wenn die Pumpe mit höherer Leistung und höherem Durchfluss als im Auslegungspunkt betrieben wird. Als Auslegungspunkt q_{opt} wird häufig ein Punkt im Kennfeld mit möglichst hoher Effizienz η_{opt} gewählt. Für höhere Durchflüsse $q_{ist} > q_{opt}$ folgt dann $\eta_{ist} < \eta_{opt}$, unabhängig davon, ob die mechanische Leistung weiter steigt oder sinkt. Ein Vorliegen von Überlast wird ebenfalls mittels des Algorithmus zur Betriebspunkterkennung erkannt. Es muss dabei zwischen Pumpen mit eindeutig und nicht-eindeutig umkehrbaren Kennlinien unterschieden werden. Eindeutig umkehrbare Kennlinien (a) sind dadurch gekennzeichnet, dass die Pq-Kennlinie eine bijektive Funktion ist, d.h. jeder Leistung kann genau ein Durchfluss zugeordnet werden. Im Gegensatz dazu kann bei nicht-eindeutig umkehrbaren Kennlinien (b) nicht über den gesamten Betriebsbereich eindeutig von der Motorleistung auf den Durchfluss geschlossen werden, weil die Leistung nicht monoton steigt, sondern für höhere Durchflüsse wieder abfällt. Im Fall einer eindeutigen Kennlinie kann für Leistung P_2 der Durchfluss q_2 abgelesen werden (siehe Abbildung 24, links). Schließt man daraus auf eine Effizienz, die bei höherem Durchfluss als im Auslegungspunkt geringer ist als die maximale Effizienz, wird die Pumpe im Überlastbetrieb betrieben. Bei nicht-eindeutigen Kennlinien folgt aus Messung der Leistung P_3 , dass der aktuelle Durchfluss $q_{3,1}$ oder $q_{3,2}$ betragen kann (siehe Abbildung 24, rechts). Daraus folgt, dass nicht eindeutig auf eine Effizienz geschlossen werden kann. Entsprechend lässt sich nicht auf zweifelsfrei auf den Überlastbetrieb schließen, da sich die Effizienz auch in der Nähe des Auslegungspunktes befinden und damit nahezu optimal sein kann. Entsprechend kann für Pumpen mit dieser Eigenschaft nur festgestellt werden, dass die Pumpe entweder annähernd optimal oder in Überlast betrieben wird. Obwohl in diesem Fall keine eindeutige Aussage möglich ist, kann davon

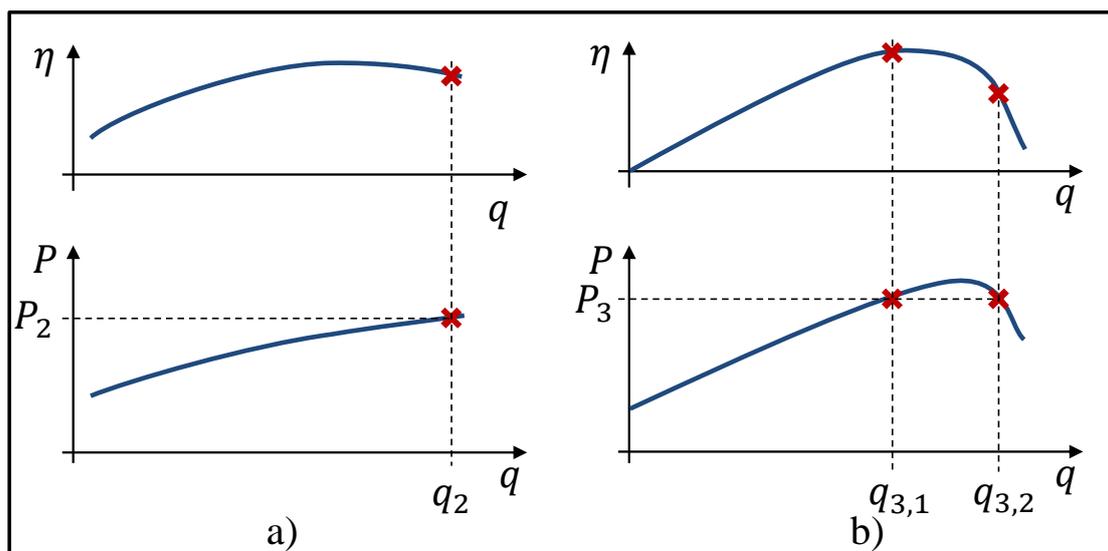


Abbildung 24: Erkennung des Überlastbetriebs.

ausgegangen werden, dass die Rückmeldung dieser beiden Möglichkeiten an den Benutzer/die

⁵ Die auf der Bestimmung des Betriebspunktes basierende Erkennung von hydraulischen Störungen betrifft Teile der im Patent „EP 2 433 010 B1“ [14] geschützten Vorgehensweise.

Benutzerin des Smartphones eine relevante Information ist, denn auf ihrer Basis kann über die Notwendigkeit einer genaueren Prüfung entschieden werden.

Erkennung von Kavitation

Kavitation bezeichnet das Auftreten und Implodieren von Hohlräumen durch Bilden von Dampf- oder Gasblasen in einer Flüssigkeit. Kavitation führt beispielsweise zu einem Abfall der Effizienz oder Förderhöhe, bis hin zum vollständigen Einbrechen der Förderhöhe. Beim Implodieren treten hohe Temperaturen oder Drücke auf, die die Pumpen beschädigen können. Laut [11] handelt es sich bei Kavitation um eine intensitätsbehaftete Störung, die zu einer breitbandigen Anregung verschiedener Frequenzen führt. Daraus wurde abgeleitet (siehe Tabelle 2), dass sich Kavitation mit Hilfe des Beschleunigungssensors feststellen lässt, wenn eine Erhöhung der Effektivwerte des gefilterten Zeitsignals im Vergleich zum kavitationsfreien Betrieb vorliegt.

Um die Effektivwerte des gefilterten Zeitsignals des Beschleunigungssensors auszuwerten, wurde ein Kavitationsprüfstand am Lehrstuhl für hydraulische Strömungsmaschinen (HSM) an der Ruhr-Universität Bochum genutzt (siehe Anlagenschema in Abbildung 25), den der Lehrstuhl freundlicherweise für diesen Zweck zur Verfügung gestellt hat. Am Prüfstand wird eine

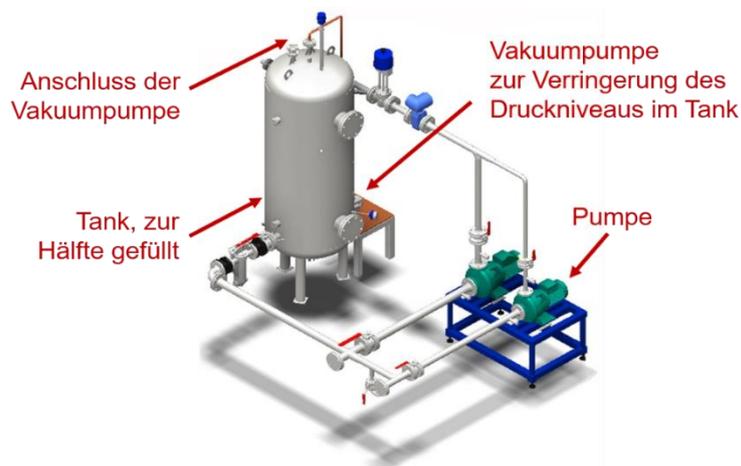


Abbildung 25: Schema des Kavitationsprüfstands am Lehrstuhl für hydraulische Strömungsmaschinen (HSM).

Kreiselpumpe⁶ zur Förderung von Wasser in einen Tank eingesetzt. Zur Erzeugung von Kavitation wird eine Vakuumpumpe betrieben, die das Druckniveau im Tank senkt. Dabei kann der Förderhöhenabfall flexibel eingestellt werden.

Zur Entwicklung einer Methode zur Erkennung von Kavitation wurden mit dem Smartphone zahlreiche Schwingungsmessungen bei kavitationsfreiem und kavitationsbehaftetem Betrieb durchgeführt. Dabei wurden unterschiedlich hohe Einbrüche der Förderhöhe eingestellt. Anschließend wurde zunächst der Effektivwert des Zeitsignals analysiert. Es wurde festgestellt, dass die im „Leitfaden für die Störungsfrüherkennung“ vorgeschlagene Methodik sich mit einem Smartphone nicht umsetzen lässt. Hauptgrund dafür ist die, insbesondere im Vergleich zu einem fest montierten Beschleunigungssensor, geringere Reproduzierbarkeit von Messposition und Anpressdruck. Variiert der Druck, mit dem das Smartphone an den Motor gepresst wird, unterscheidet sich auch die Amplitude und es lässt sich keine Erhöhung des Effektivwerts feststellen.

Als Alternative wurde anschließend das Frequenzspektrum des Beschleunigungssignals auf Merkmale für das Auftreten von Kavitation untersucht. Da es sich bei Kavitation um eine intensitätsbehaftete Störung handelt, wurde für unterschiedlich starke Kavitation, d.h. für einen verschiedenen starken Abfall der Förderhöhe, die Frequenzanalyse durchgeführt. Abbildung 26 zeigt den gleitenden

⁶ Typ der Pumpe: WILO BL32/220-1,5/4, Monoblock end-suction pump.

Mittelwert der Amplitude im Bereich von 0 bis 250 Hz für einen Förderhöhenabfall von 0% (schwarze Linie), 3% (blaue Linie), 10% (rote Linie) und 20% (magentafarbene Linie), wobei jeweils zwei Messungen durchgeführt wurden und der Durchfluss $q = \frac{20m^3}{h} = 1.33 \cdot q_{opt}$ betrug. Aus der Frequenzanalyse kann eine Korrelation zwischen dem Förderhöhenabfall und der Amplitude der FFT für bestimmte Frequenzbereiche erkannt werden.

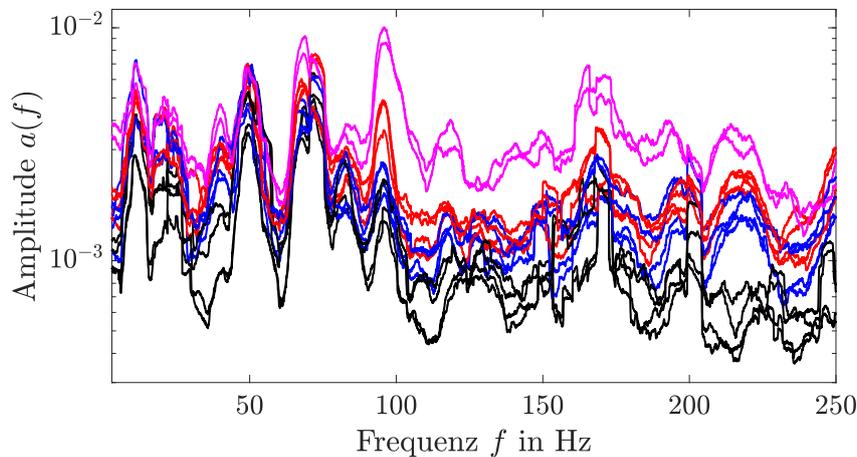


Abbildung 26: FFT für variierenden Förderhöhenabfall. mit gleitendem Mittelwert.

Zur Detektion von Kavitation wird daher der normierte Mittelwert in einem festzulegenden Frequenzbereich als Kennzahl

$$K_K = \frac{1}{a(f_{ist})} \frac{1}{f_{end} - f_{start}} \int_{f_{start}}^{f_{end}} a(f) df \quad (24)$$

definiert, wobei f_{start} und f_{end} das Suchintervall begrenzen und der Faktor $\frac{1}{a(f_{ist})}$ den Mittelwert auf die Höhe der Amplitude bei der aktuellen Drehfrequenz der Pumpe bezieht. Als Intervall bietet sich ein Bereich in der Nähe der Schaufelpassierfrequenz an.

Abbildung 27 zeigt die Auswertung der Kennzahl K_K für die Messungen aus Abbildung 26, mit $f_{start} = 144\text{Hz}$ und $f_{end} = 194\text{Hz}$. Für alle Durchflüsse gilt für den Betrieb ohne Kavitation $K_K < K_K^{min} = 0.0375$, mit steigendem Förderhöhenabfall steigt auch die Kennzahl. Die Kennzahl lässt also neben der Erkennung von Kavitation auch Rückschlüsse auf die Intensität der Kavitation zu.

Zur Anwendung der Kennzahl für die Kavitationserkennung muss in der Praxis ein Schwellwert K_K^{min} für den kavitationsfreien Betrieb durch wiederholte Referenzmessungen bei verschiedenen Durchflüssen ermittelt werden.

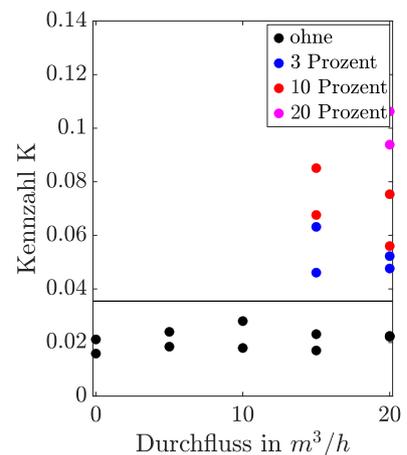


Abbildung 27: Auswertung der Kennzahl zur Erkennung von Kavitation.

Um das beschriebene Vorgehen zu validieren, wurde die Methodik auch auf Druckmessungen angewendet, da Kavitation in der Pumpe die Druckpulsation verstärkt. Entsprechend wurde die Druckpulsation in der Druckleitung nahe der Pumpe im Frequenzbereich analysiert, wozu Messungen mit unterschiedlich starkem Förderhöhenabfall genutzt werden konnten⁷. Abbildung 28 zeigt links den Mittelwert der Amplitude des Frequenzspektrums und rechts die berechnete Kennzahl K_K für den Betrieb im Bestpunkt mit dem Durchfluss q_{opt} . Es ist zu sehen, dass auch für die Druckpulsation ein Schwellwert für die Kennzahl definiert werden kann, so dass ein Wert $K_K > K_K^{min}$ den Schluss auf Kavitation zulässt.

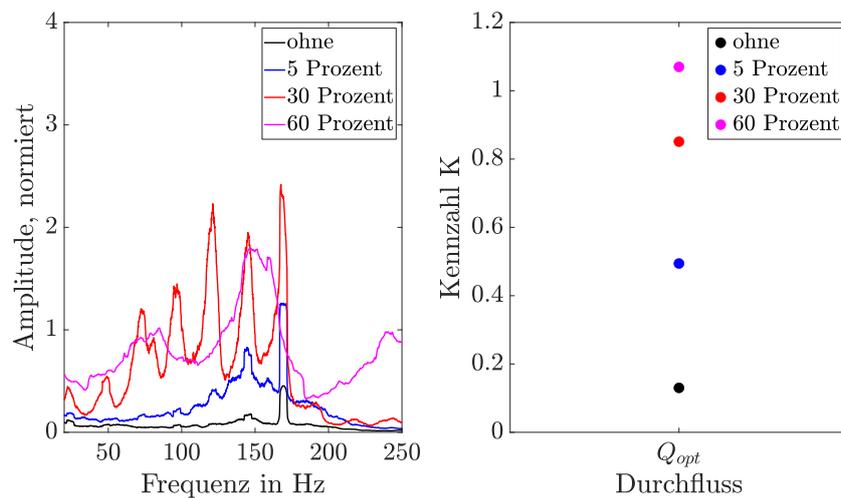


Abbildung 28: Validierung der Erkennung von Kavitation durch Anwendung der Methode auf Druckmessungen in der Druckleitung.

Erkennung von Gasmitförderung

Die Förderung von Gas (oft Luft) als Teil des Fördermediums ist ein häufig auftretender Betriebsfall, der bei den im Projekt betrachteten Zentrifugalpumpen zu einem deutlichen Förderhöhenabfall führen kann und in stärkeren Ausprägungen den Förderstrom komplett einbrechen lässt („Abriss“ der Förderung). Eine Detektion des Gasanteils ist daher einerseits aus energetischen Gründen sinnvoll, andererseits kann ein erhöhter Gasanteil auch auf Schäden in der Saugleitung oder den vorangeschalteten Prozesskomponenten hindeuten.

Die Datenbasis für die Untersuchungen zur Gasmitförderung wurden von der Firma Brinkmann Pumps bereitgestellt, die dazu eine Zentrifugalpumpe (Tauchbauweise, Festdrehzahl) in einem Prüfstands Aufbau mit definierten Gasanteilen im Fördermedium betrieben hat. Dabei wurden alle Kombinationen der folgenden Betriebsituationen abgebildet:

- Durchflüsse bei 50%, 80%, 100% und 120%, bezogen auf den Bestpunkt, und
- Gasanteile bei 0%, 2%, 5% und 8%.

Es lässt sich zunächst feststellen, dass eine Erkennung des Gasanteils anhand des Effektivwertes des Zeitsignals, wie in [11] vorgeschlagen, nicht möglich ist. Abbildung 29 zeigt die zu den Messreihen mit 0% und 8% Gasanteil gehörenden Effektivwerte eff

⁷ Die Messungen wurden mit dem in Abbildung 25 dargestellten Prüfstand durchgeführt und vom HSM zur Verfügung gestellt.

$$eff = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2},$$

wo n die Anzahl der Datenpunkte und a_i die entsprechenden Datenpunkte bezeichnen. Die Messreihen wurden zuvor um ihren Gleichanteil korrigiert.

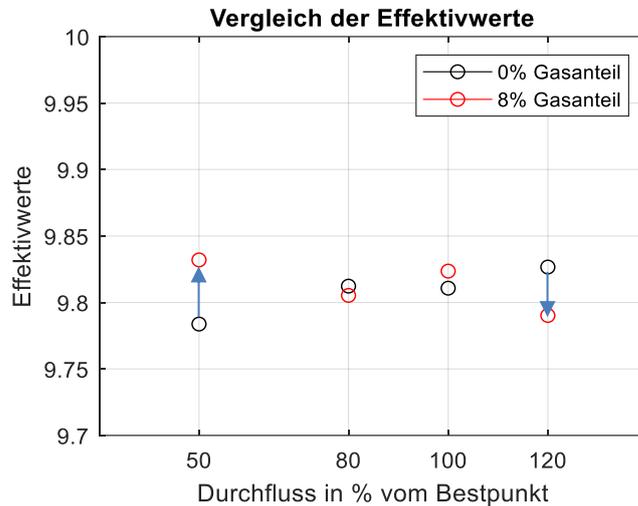


Abbildung 29: Effektivwerte der Messreihen mit 0% und 8% Gasanteil.

Aus Abbildung 29 ist direkt ersichtlich, dass keine eindeutiger Trend des Merkmals „Effektivwert des Zeitsignals“ zu erkennen ist. Die variierenden Faktoren Ausrichtung, Entfernung und Anpressdruck des manuell geführten Smartphones lassen eine zuverlässige Merkmalsklassifikation nicht zu. In [11] wurde mit fest montierten Beschleunigungssensoren gearbeitet, so dass hier die Vergleichbarkeit der Messungen gegeben war.

In Folge wurden daher im Projekt Merkmale des Frequenzspektrums auf deren Korrelation zum Gasanteil untersucht. Als vielversprechend hat sich hier die zur Hauptdrehfrequenz der Pumpe gehörende Frequenzspitze herausgestellt. Hier sind mit steigendem Gasanteil deutliche Verschiebungen in Richtung der Synchronfrequenz zu erkennen, wie in Abbildung 30 gezeigt.

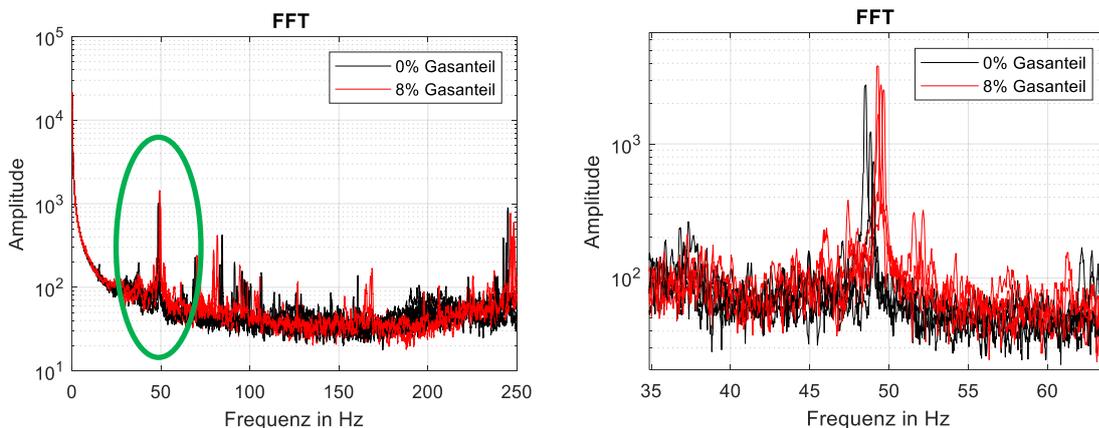


Abbildung 30: Analyse der Merkmale des Frequenzspektrums für 0% und 8% Gasanteil. Eine Verschiebung der zur Drehzahl gehörenden Frequenzspitze ist zu erkennen.

Das Phänomen ist mit der mit steigendem Gasanteil - aufgrund der geringer werdenden Dichte des Fördermediums - sinkenden Leistungsübertragung in der Pumpe zu erklären, die beim antreibenden Asynchronmotor zu einer höheren Drehfrequenz führt. Es fallen außerdem leicht erhöhte Amplituden

bei höheren Gasanteilen auf, die vermutlich auf eine leichte Unwucht durch das nicht homogen verteilte Gas im Laufradumfang hindeuten (vergleiche auch den Abschnitt „Unwuchterkennung“). Abbildung 31 zeigt die zur Drehfrequenz f_i gehörenden Amplitudenwerte a_i der Messreihen für 0% und 8% Gasanteil über der Frequenz aufgetragen. Deutlich ist die Ausbildung zweier trennbarer Cluster zu erkennen, die hier zunächst von Hand durch die eingezeichneten Kurven getrennt wurden.

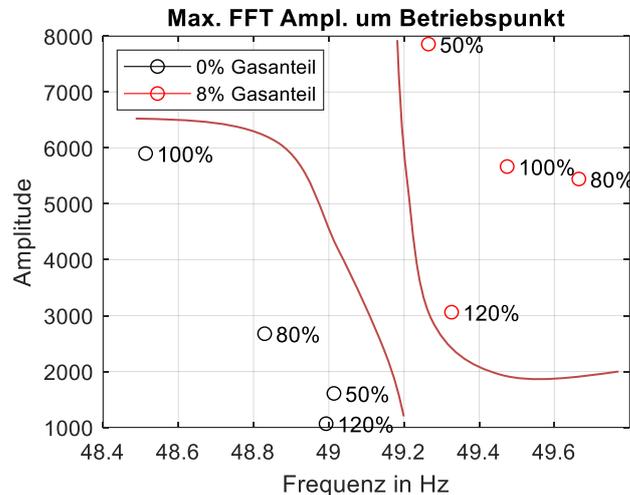


Abbildung 31: Ausbildung zweier trennbarer Cluster bei Betrachtung der zur Hauptdrehfrequenz gehörenden Amplitudenwerte bei verschiedenen Gasanteilen.

Als Verfahren zur automatisierten Trennung der Cluster wurde eine Support Vector Machine, im Folgenden kurz SVM genannt, verwendet. Hierbei handelt es sich um ein maschinelles Lernverfahren zur automatisierten Klassifikation eines Datenpunktes bezüglich seiner Zugehörigkeit zu einem oder mehreren Clustern. Im vorliegenden Fall wurden nur die Datensätze für 0% und 8% Gasanteil für das Training der SVM genutzt, da sich hier die größten Abstände der Datenpunkte ergeben. Das Training erfolgt über die Minimierung des Gütefunktional

$$\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(0, 1 - y_i (\langle w_{SVM}, x_i \rangle - b)) \right] + \lambda \|w_{SVM}\|_2,$$

wobei hier $y_i \in \{-1, 1\}$ die zu den Datenpunkten $x_i = (f_i, a_i)$ gehörende Klassifikation (0%, 8%) darstellt. Der Normalenvektor w_{SVM} , der Biaswert b und der Faktor λ sind hierbei die zu optimierenden Parameter, die nach der Optimierung eine Hyperebene definieren, die die beiden Cluster der Datenpunkte mit größtmöglichem Abstand trennt. Das Problem kann als klassisches quadratischen Optimierungsproblem formuliert und als dieses effizient gelöst werden. Für die Optimierung kann ein gewisser Anteil der Datenpunkte vernachlässigt werden, der sich hinter der Front der übrigen Datenpunkte befindet und keinen Einfluss auf die trennende Hyperebene hat. Falls die beiden Cluster der Datenpunkte nicht linear getrennt werden können, existieren verschiedene nichtlineare Transformationen, mit denen auch in komplizierteren Fällen eine eindeutige Trennung der Cluster möglich wird. Abbildung 32 zeigt links das Trainingsergebnis mit linearer Klassifizierungsfunktion. Eine klare Trennung der beiden Cluster ist erkennbar. Ebenfalls sind die drei Stützvektoren eingezeichnet, die die Klassifizierungsfunktion definieren.

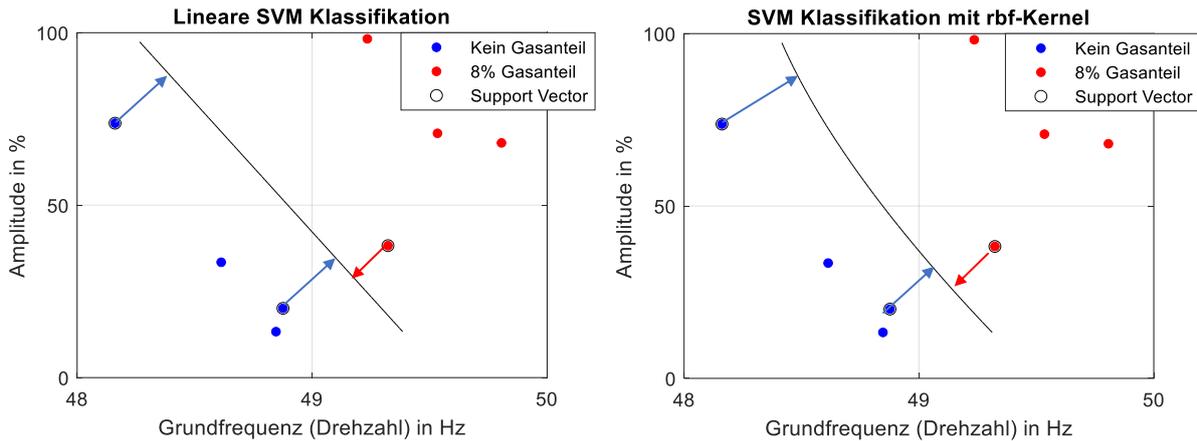


Abbildung 32: Ergebnis der linearen und nichtlinearen SVM Klassifikationsfunktionen

Die Klassifizierungsfunktion hat die einfache Struktur

$$y^* = \text{sgn}(\langle w, x^* \rangle + b),$$

ordnet also einem (neuen, unbekanntem) Datenpunkt x^* eine Klassifikation $y^* \in \{-1, 1\}$ wie folgt zu:

- $y^* = +1$: Datenpunkt gehört zur „gut“-Gruppe (Gasanteil 0%)
- $y^* = -1$: Datenpunkt gehört zur „schlecht“-Gruppe (Gasanteil 8%).

Die konkreten Zahlenwerte der Parameter ergeben sich hier zu $w = (-4,77 \quad -3,18)^T$ und $b = 3,73$.

In Abbildung 32 ist rechts das Ergebnis des Trainings einer nichtlinearen Trennung auf Basis einer radialen Basisfunktion dargestellt, die auf folgende Klassifikationsfunktion mit $m = 3$ Stützvektoren führt:

$$y^* = \text{sgn} \left(\left(\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i G(x^*, x_i) \right) + b \right),$$

wobei α_i ein aus der Optimierung hervorgehender Parameter ist und $G(x, x_i) = \langle \phi(x^*), \phi(x_i) \rangle$ eine Gramsche Matrix in einem über die Funktion ϕ transformierten, höherdimensionalen Raum darstellt (Kernel-Trick), in dem eine eindeutige Trennung der Datencluster mit linearen Hyperebenen stattfinden kann. Für das in Abbildung 32 rechts dargestellte Ergebnis wurde für ϕ eine radiale Basisfunktion gewählt, so dass sich die Einträge von G zu

$$G(x^*, x_i) = \exp(-\|x^* - x_i\|_2)$$

ergeben. Die übrigen Parameter sind $\alpha = (11,93 \quad 0,92 \quad 12,85)^T$ und $b = 0,29$.

Der Abstand zu den Datenpunkten und damit die Robustheit der Klassifikationsfunktion gegenüber Ausreißern sind mit dem nichtlinearen Ansatz noch etwas höher als mit dem linearen, die aufwendigere Implementierung der Klassifikationsfunktion rechtfertigt diese Wahl jedoch zumindest im vorliegenden Fall nicht.

Das Training der SVM wurde auf einem PC durchgeführt. Das Training kann vom Pumpenhersteller durchgeführt werden, sodass eine Umsetzung auf einem PC im Vergleich zu einer Umsetzung auf einem Smartphone vorteilhaft ist. Die Ergebnisse, d.h. die Parameter w und b der Klassifizierungsfunktion, werden in der Software hinterlegt, die auf dem Smartphone ausgeführt werden kann. Die Auswertung der Klassifizierungsfunktion für neue Datenpunkte ist recheneffizient

und kann auf einem Smartphone, also insbesondere durch den Betreiber bzw. die Betreiberin der Pumpe, durchgeführt werden.

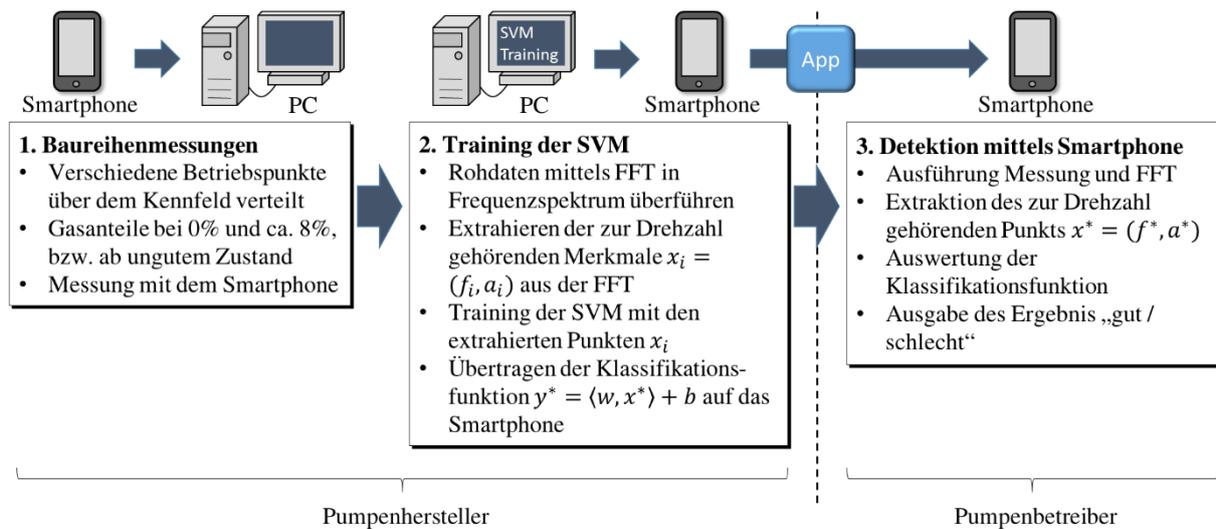


Abbildung 33: Zusammenfassung des vorgeschlagenen Ablaufs beim Training und der Ausführung der Detektion von Gasmitförderung.

Abschließend muss zur Thematik der Gasmitförderung festgehalten werden, dass die Messungen mit 2% und 5% Gasanteil keine eindeutige Klassifikation zulassen. Die Ergebnisse für 8% Gasanteil sehen dennoch sehr vielversprechend aus. Weitere Evaluierungen und Veröffentlichungen sind im Anschluss an das Projekt durch den Lehrstuhl geplant, insbesondere um die Grenzen der Detektierbarkeit schärfen zu können.

Entwurf einer Unwuchterkennung

Eine Unwucht tritt bei Rotoren auf, deren Drehachse nicht mit der Schwerpunktachse übereinstimmt. Aus der Unwucht resultiert eine Fliehkraft, die synchron mit der Drehfrequenz umläuft. Demzufolge führt die Unwucht zu einer erhöhten Amplitude bei der Drehfrequenz. Dieses theoretische Ergebnis konnte durch reale Messungen an einer Pumpe (KSB) bestätigt werden. Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse für eine Beispielmessung an dieser Pumpe bei einem Durchfluss von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ und der gezielt eingebrachten Unwucht. Es ist zu erkennen, dass die Amplitude bei der Drehfrequenz (hier knapp unter der Synchronfrequenz von 50 Hz) im Fall mit Unwucht (rechter Plot) deutlich gegenüber dem Fall ohne Unwucht (linker Plot) erhöht ist. Dieses Ergebnis konnte bei allen betrachteten Betriebspunkten bestätigt werden.

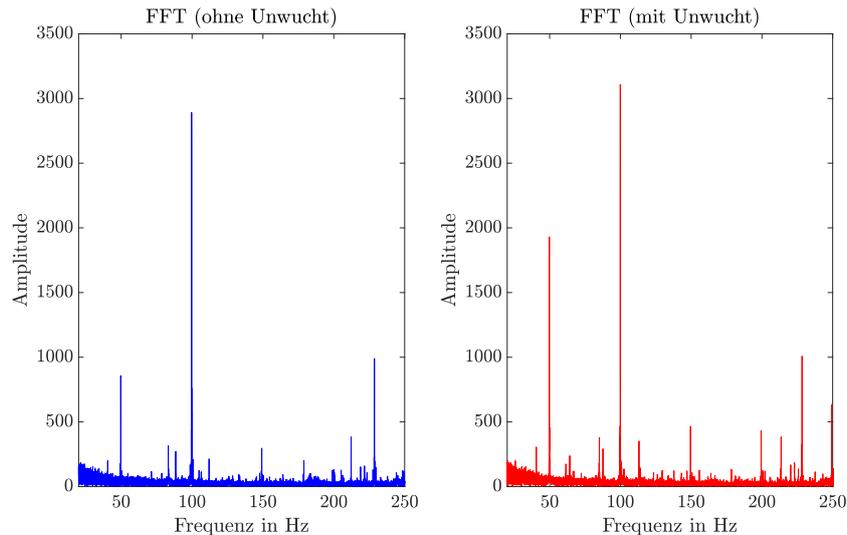


Abbildung 34: FFT für eine Beispielmessung.

In Abbildung 35 ist die Amplitude bei der Drehfrequenz für unterschiedliche Durchflüsse aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass in allen Fällen eine signifikante Amplitudenerhöhung auftritt (> 30 %). Die Amplitudenerhöhung bei der Drehfrequenz an einem Betriebspunkt 0 wurde somit als Kennzahl

$$K_U = \frac{a_{0,U}(n) - a_0(n)}{a_0(n)}$$

definiert, wobei $a_{0,U}(n)$ die Amplitude im Fall mit Unwucht und $a_0(n)$ die Amplitude im Fall ohne

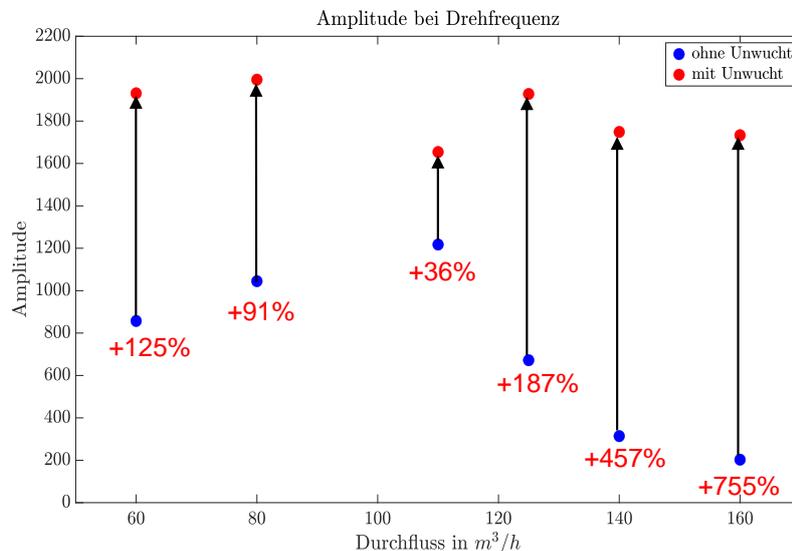


Abbildung 35: Amplitude bei der Drehfrequenz für verschiedene Durchflüsse.

Unwucht darstellt. Mit diesem Ergebnis ergeben sich zwei Möglichkeiten zur Umsetzung einer Unwuchterkennung mit dem Smartphone, die in Abbildung 36 veranschaulicht werden.

Fall 1: Konstanter Betriebspunkt

Bei Inbetriebnahme der Pumpe beim Betreiber wird eine Referenzamplitude am Betriebspunkt für den Fall ohne Unwucht ermittelt. Soll im laufenden Betrieb der Pumpe eine Unwucht erkannt werden, so muss lediglich die zur Drehfrequenz gehörende Amplitude gemessen werden. Falls diese deutlich erhöht ist (> 30 %), so ist von einer Unwucht auszugehen.

Fall 2: Variierender Betriebspunkt

Bei Betriebspunktänderungen im laufenden Betrieb können durch Messung mittels Smartphone mit geringem Aufwand weitere Referenzamplituden aufgenommen werden. Zur Erkennung einer Unwucht im laufenden Betrieb muss lediglich die gemessene Amplitude mit der dazugehörigen Referenzamplitude verglichen werden. Weitere Referenzamplituden können auch aus bereits vorhandenen Messungen interpoliert werden.

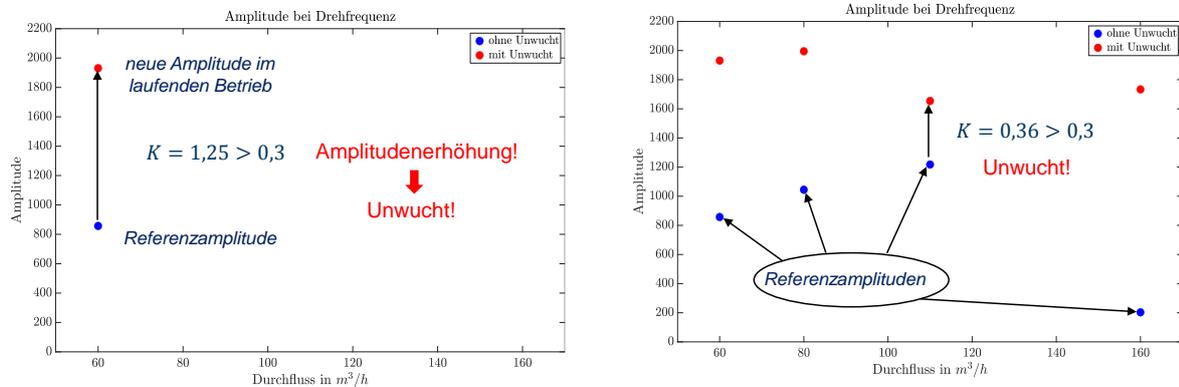


Abbildung 36: Veranschaulichung des Algorithmus zur Unwuchterkennung.

Das Kriterium zur Erkennung einer Unwucht ist sehr einfach und gut mit dem Smartphone umsetzbar. Eine zur Drehfrequenz gehörende Amplitude kann ebenfalls sehr einfach durch Anhalten des Smartphones an die Pumpe ermittelt werden. Das Smartphone liefert diese Amplitude direkt mit Hilfe einer FFT der Signale des Beschleunigungssensors.

Erkennung von Laufradschäden

Laufradschäden reduzieren den Wirkungsgrad und können Unwuchten oder veränderte Vibrationen bei der Drehfrequenz und auch bei höheren Harmonischen, z.B. bei der Schaufelpassierfrequenz verursachen. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Schadensfällen sind die genauen Merkmale aber abhängig von den diversen Formen der Laufradschäden. Für die Detektion von Rissen oder fehlenden Schaufeln mit Beschleunigungssensoren wird beispielsweise eine Prüfung der Amplitude Frequenzspitze bei der Schaufelpassierfrequenz und deren Seitenbändern vorgeschlagen [15], [16]. Die vorgeschlagenen Verfahren lassen sich mit dem Beschleunigungssensor des Smartphones im Allgemeinen nicht anwenden, da Schaufelpassierfrequenzen nur in seltenen Fällen bei weniger als 250 Hz liegen und diese daher nicht erfasst werden können.

Alternativ wurden drei Methoden zur Erkennung eines beschädigten Laufrads untersucht. Dazu wurden am in Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Prüfstand Messungen mit intaktem und beschädigtem Laufrad aufgenommen und die Beschleunigungssignale im Frequenzbereich ausgewertet. Zur Simulation der Beschädigung wurde das Laufrad an mehreren Stellen eingeschliffen. Zunächst wurde dann das oben beschriebene Vorgehen zur Prüfung auf Unwucht durchgeführt.

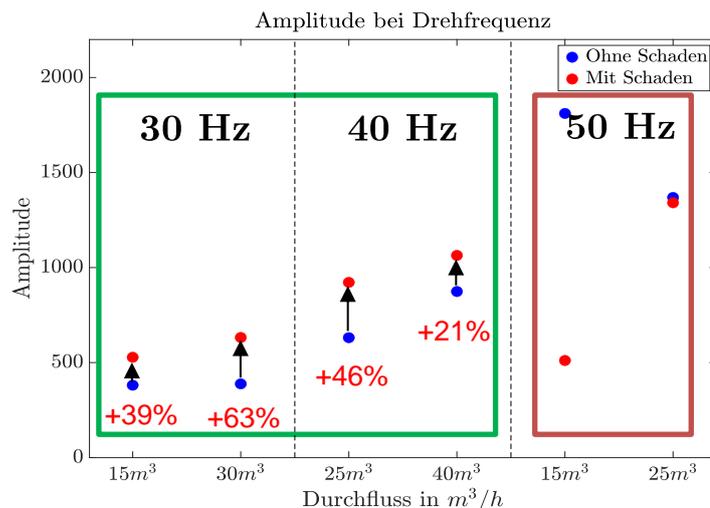


Abbildung 37: Vergleich der Amplituden bei der Drehfrequenz für verschiedene Synchronfrequenzen mit intaktem und defektem Laufrad.

Abbildung 37 vergleicht die Höhe der Amplitude bei der Drehfrequenz für verschiedene Synchronfrequenzen an jeweils zwei Arbeitspunkten. Die Ergebnisse zeigen, dass sich zwar für den

Betrieb mit $f_0 = 30$ Hz und $f_0 = 40$ Hz Überhöhungen einstellen, diese aber bei $f_0 = 50$ Hz nicht zu sehen sind. Zudem sind die Überhöhungen kleiner als im Falle der Unwucht, so dass die Methodik für die Erkennung des untersuchten Laufradschadens nicht geeignet ist.

Als alternativer Ansatz wurde mithilfe der Betriebspunkterkennung geprüft, ob bei gleichem Durchfluss eine Leistungserhöhung ermittelt werden kann, da durch beschädigte Laufräder der hydraulische Wirkungsgrad reduziert wird⁸. Abbildung 38 zeigt die berechnete Leistungserhöhung für verschiedene Arbeitspunkte beim Betrieb mit verschiedenen Synchronfrequenzen. Erneut lässt sich nur bei den niedrigeren Synchronfrequenzen eine Erhöhung der Leistung feststellen.

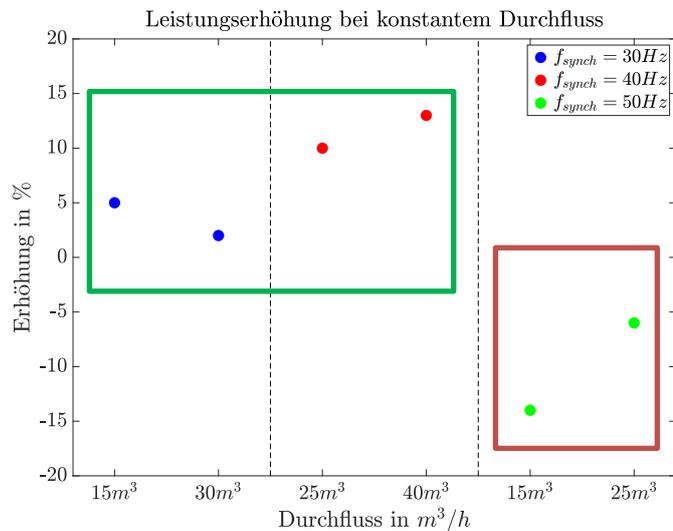


Abbildung 38: Leistungserhöhung für verschiedene Synchronfrequenzen bei Betrieb mit defektem Laufrad.

Zuletzt wurde die Höhe der Amplitude bei höheren Harmonischen der Drehfrequenz untersucht. Dieses Vorgehen orientiert sich an den in der Literatur vorgeschlagenen Verfahren. Aufgrund der Limitierung des Frequenzbereichs wird die erste Harmonische der Drehfrequenz $f_{1H} = 2f_{ist}$ ausgewertet. Die Überprüfung erfolgt analog zur Prüfung auf Unwucht, d.h. die Veränderung Amplitude des Frequenzspektrum bei f_{1H} wird analysiert. Abbildung 39 zeigt, dass bei allen Synchronfrequenzen Erhöhungen mit einem Faktor von ungefähr 2 auftreten. Die Erhöhungen um ein Vielfaches bei 30 Hz deuten darauf hin, dass eine zu kleine Amplitude beim Betrieb mit intaktem Laufrad gemessen wurde.

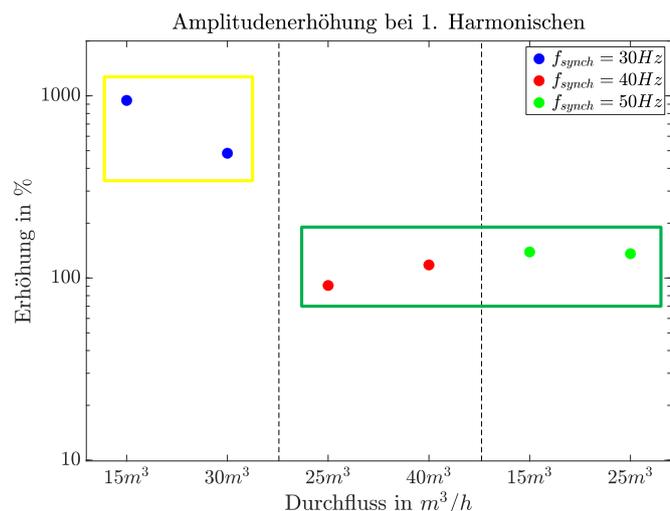


Abbildung 39: Amplitudenerhöhung bei erster Harmonischen für verschiedene Synchronfrequenzen bei Betrieb mit defektem Laufrad.

Die Diversität der Laufradschäden und ihrer Auswirkungen lassen nach bisherigem Kenntnisstand keine eindeutige Zuordnung beliebiger Laufradschäden zu einem Merkmal zu. Von den drei oben vorgestellten Methoden deuten für die vorliegende Beschädigung alle bei bestimmten Betriebspunkten auf einen Schaden hin, z.B. durch das Erkennen einer Unwucht. Einzig die Prüfung auf Überhöhung der Amplitude bei der ersten Harmonischen der Drehfrequenz detektiert den Schaden für alle Arbeitspunkte. Als Ergänzung der Störungserkennung mit der Sensorik des Smartphones sollte nach der Prüfung auf Unwucht bei der Drehfrequenz auch deren erste Harmonische überprüft werden.

Erkennung von Wälzlagerschäden

Die beschädigten Lager zur Vermessung der Auswirkungen beschädigter Wälzlager auf das Frequenzspektrum wurden aufgrund von Lieferverzögerungen und trotz zweifacher Projektlaufzeitverlängerung nicht während der Projektlaufzeit geliefert, so dass keine Untersuchungen

⁸ Die Prüfung auf Veränderung der Antriebsleistung benötigt Teile der im Patent EP 2 433 010 B1 [14] geschützten Vorgehensweise.

durchgeführt werden konnten. Auf die Lieferverzögerungen hatte weder der VDMA-Arbeitskreis noch der Lehrstuhl Einfluss.

3.3.3 Umsetzung und Evaluierung der Mobilien App (AP2.3)

Im letzten Arbeitspaket wurden die entwickelten Algorithmen zur Betriebspunkterkennung und Effizienzanalyse und die umsetzbaren Methoden zur Schadensfrüherkennung in einer prototypischen Smartphone-App implementiert. Basis für alle in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Verfahren ist die Auswertung von Beschleunigungs- und Audiomessungen mittels schneller Fourier-Analyse (FFT). Die Umsetzung der FFT wurde bereits in Abschnitt 3.3.1 erläutert (siehe z.B. Tabelle 1).

3.3.3.1 Beschreibung

Die Software wurde in der Programmiersprache Java mit AndroidStudio zur Nutzung auf Android-Smartphones entwickelt. Die App verfügt über zwei einfache Ansichten. In der Hauptansicht wird die App initialisiert und parametrisiert, die Messungen durchgeführt und nach erfolgter Messung die Übersicht zu ermitteltem Betriebspunkt und Schadensmerkmalen angezeigt. Die zweite Ansicht zeigt das Ergebnis der Effizienzanalyse für den Arbeitspunkt, gibt falls nötig Handlungsanweisungen und zeigt eine Historie des Wirkungsgrads.

Beim Start werden zunächst der Beschleunigungssensor und das Mikrofon⁹ als `SensorListener` initialisiert. Die Abtastrate des Beschleunigungssensors hängt vom Smartphone ab und liegt für aktuelle Smartphones bei 400-500 Hz. Die Abtastrate des Mikrofons liegt bei 44,1 kHz. Das Beschleunigungssignal wird mit der Methode `onSensorChanged` aufgezeichnet, die Messwerte können als Array gespeichert werden. Das Audiosignal wird mit den Android-Klassen „`MediaRecorder`“ und „`AudioRecord`“ aufgezeichnet. Dazu wird die Klasse „`AudioRecorder`“ mit den Methoden „`flush`“, „`WriteAudio2File`“ und „`recordAudio`“ genutzt.

Vor Beginn einer Messung muss per Drop-Down-Menü der Typ der zu untersuchenden Pumpe ausgewählt werden. Die Kennfelder und Motordaten der Pumpe (siehe Modellierung in Abbildung 17 und Abbildung 18) müssen in einer `.properties` Datei auf dem Smartphone hinterlegt sein. Eine beispielhafte `.properties` Datei für die im Prüfstand in Abbildung 7 installierte Kreiselpumpe findet sich in Anhang A1. Neben den Kennfeldern sind in der Datei auch ermittelte Referenzwerte für die Schadensmerkmalenerkennung anzugeben. Die Pumpendaten werden nach Auswahl als Attribute eines Objekts der Klasse „`Pumpe`“ gespeichert. Die weiteren Methoden der Klasse „`Pumpe`“ werden zur Bestimmung des Betriebspunkts genutzt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Methoden der Klasse "Pumpe".

Methode	Bedeutung
Pumpe	Zuweisen der Attribute der Pumpe
BP	Bestimmung des Betriebspunkts aus gemessener Drehzahl
interpolieren	lineare Interpolation – vorwärts
backinterpolate	lineare Interpolation – rückwärts
extrapolieren	lineare Extrapolation

Weitere Eingabemöglichkeiten sind die Angabe der Synchronfrequenz, die Auswahl der Sensorfusion und die Angabe der Messdauer (Standardwerte: 10 Sekunden für die Audiomessung, 20 Sekunden für die Beschleunigungsmessung).

⁹ Die Berechtigung zum Mikrofon-Zugriff muss in Android gesondert über die Systemeinstellungen einmalig nach Installation erteilt werden. Gleiches gilt für den Zugriff auf den Speicher.

Bei Abweichen der Synchronfrequenz von der hinterlegten Synchronfrequenz für den Pumpentyp werden die Attribute des Objekts „Pumpe“ basierend auf den Ähnlichkeitsgesetzen (17)-(22) aktualisiert. Anschließend wird ein Bandpassfilter als Objekt der Klasse „Filter“ erzeugt, um den relevanten Frequenzbereich ober- und unterhalb der vorgegebenen Synchronfrequenz zu isolieren.

Nach Abschluss einer Messung werden das Beschleunigungs- und Audiosignal separat verarbeitet. Das Audiosignal wird nur genutzt, wenn die Sensorfusion aktiviert wurde. Beide Signale werden zunächst mittels FFT im Frequenzbereich analysiert und dabei die Frequenzen und Amplituden des Spektrums als Array gespeichert. Zudem erfolgt die grafische Ausgabe der Frequenzspektren beider Signale im Bereich der Synchronfrequenz.

Die Bestimmung der aktuellen Drehzahl erfolgt durch Ermittlung der höchsten Amplitude des Frequenzspektrums und Zuordnen der zugehörigen Frequenz im Bereich zwischen Kipp- und Synchronfrequenz. Beim Audiosignal werden zusätzlich die höchsten Amplituden unterhalb der ersten zwölf Vielfachen der Synchronfrequenz identifiziert und einbezogen. Die Untersuchung von bis zu zwölf Vielfachen der Synchronfrequenz ist aufgrund der hohen Abtastfrequenz mit dem Mikrofon möglich.

Nach Ermittlung der Motordrehzahl wird die Methode „BP“ der Klasse Pumpe aufgerufen, der Betriebspunkt bestimmt und im Array „betriebspunkt“ gespeichert. Die Werte für Durchfluss, Förderhöhe, Leistung und Drehzahl werden dem Benutzer angezeigt. Zudem werden die ermittelten Drehfrequenzen beider Sensoren ausgegeben.

Zuletzt wird die Erkennung von Merkmalen der Kavitation (siehe „Erkennung von Kavitation“ in Abschnitt 3.3.2) durchgeführt. Dazu wird die Kennzahl K_K nach (24) für die aktuelle Beschleunigungsmessung berechnet und mit den hinterlegten Referenzen verglichen. Dem Nutzer wird angezeigt, ob Schadensmerkmale erkannt wurden und falls ja, welcher Schadensfall vorliegen könnte.

Die Ansicht zur Effizienzanalyse wird per „Intent“ gestartet und erhält Daten über den Betriebspunkt zur weiteren Auswertung. Die Bewertung des Betriebspunkts hinsichtlich der Effizienz und das Setzen einer Effizienzampel erfolgen schwellwertbasiert, Grundlage dafür ist das hinterlegte Wirkungsgradkennfeld der Pumpe. Zur Anzeige der Wirkungsgradhistorie werden SharedPreferences genutzt. Diese erlauben das einfache Speichern persistenter Daten, die jederzeit ausgelesen werden können. Die Historie wird als Graph mit der Klasse „LineGraphSeries“ grafisch dargestellt.

Das in Abbildung 40 gezeigte Flussdiagramm fasst den Programmablauf der Software zusammen¹⁰. Die Beschreibung der Anwendung und Darstellungen der Nutzeroberfläche folgen in Abschnitt 3.3.3.2. Details zum Speichern der Messung sind in Anhang A2 angegeben.

¹⁰ Teile der implementierten Betriebspunkterkennung sind wie bereits in Kapitel 3.3.2 kommentiert durch ein dort benanntes Patent der Fa. KSB geschützt.

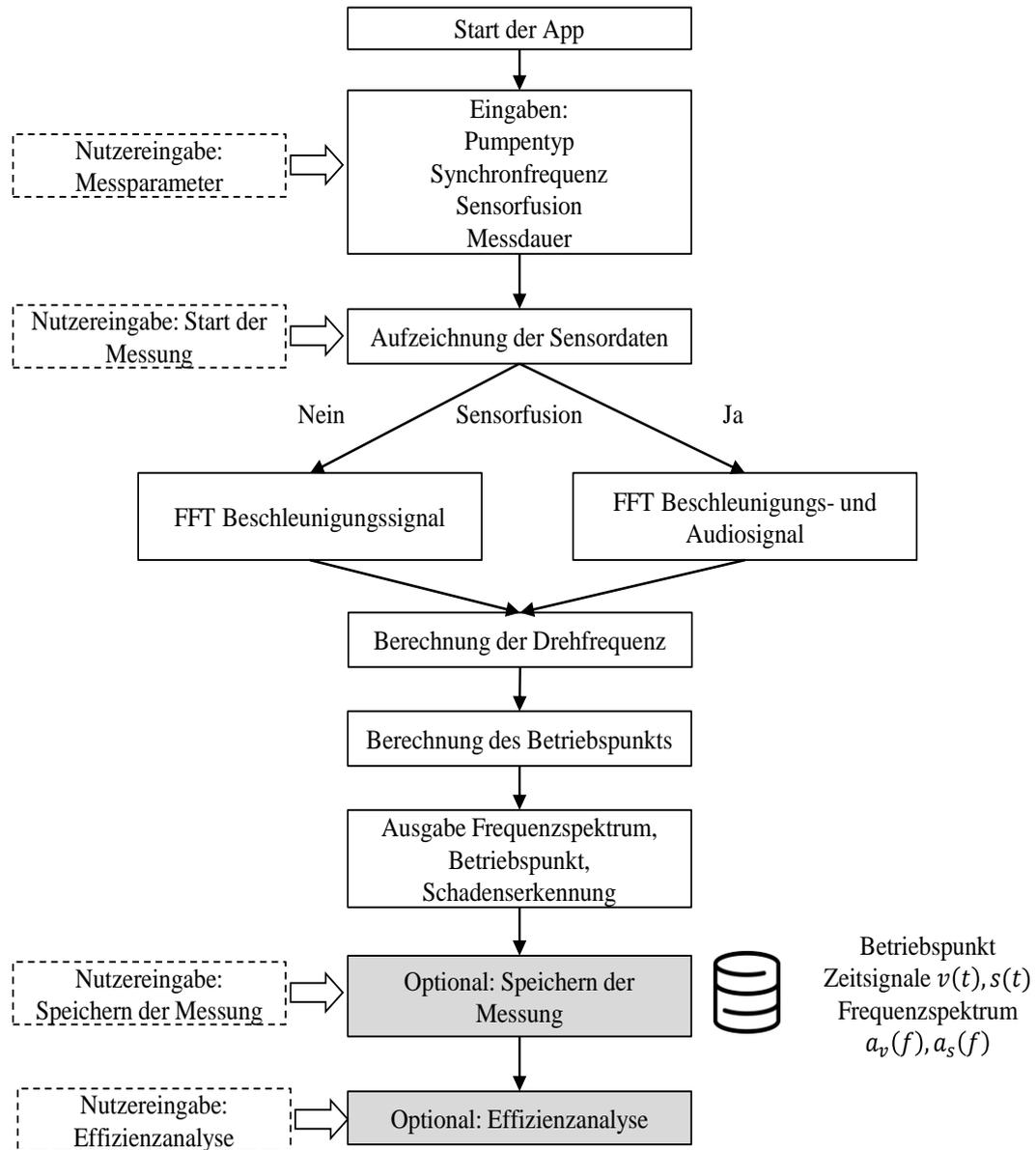


Abbildung 40: Ablauf der Betriebspunktbestimmung.

3.3.3.2 Anwendung

Die entwickelte prototypische Smartphone-Software bestimmt für einstellbare Synchronfrequenzen den Betriebspunkt und die Effizienz einer Pumpe. Dazu kann zwischen der alleinigen Auswertung des Beschleunigungssensors oder der Sensorfusion mit zusätzlicher Auswertung des Mikrofons zur Bestimmung der Drehfrequenz des Motors gewählt werden. Der Pumpentyp kann mit einem Drop-Down Menü aus allen als .properties-Datei auf dem Smartphone hinterlegten Pumpen ausgewählt werden.

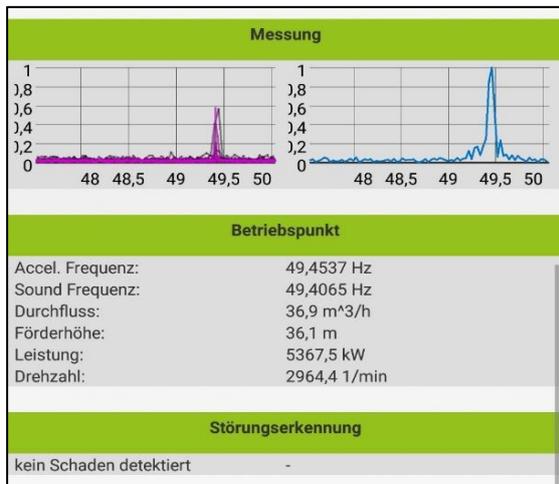


Abbildung 41: Ausgabe der Frequenzspitzen mit Mikrophon (oben links) und Beschleunigungssensor (oben rechts), Darstellung des ermittelten Betriebspunkts und der Störungserkennung.

detektiert wurde. Im Fall der intensitätsbehafteten Störungen wie Kavitation wird auch die erkannte Schwere des Schadens angezeigt (vgl. Abschnitt *Erkennung von Kavitation* in Kapitel 3.3.2).

Wahlweise kann eine abgeschlossene Messung mit den weiteren Buttons gespeichert werden oder es kann auf die Ansicht der Effizienzanalyse umgeschaltet werden. Die in Abbildung 43 gezeigte Effizienzanalyse bewertet den gemessenen Betriebspunkt hinsichtlich des Wirkungsgrads und gibt Handlungsanweisungen für den weiteren Betrieb der Pumpe. Zudem ist eine Effizienzampel zur Veranschaulichung des aktuellen Wirkungsgrades implementiert und es wird ein Überblick über den Wirkungsgrad der letzten 20 Messungen grafisch dargestellt.

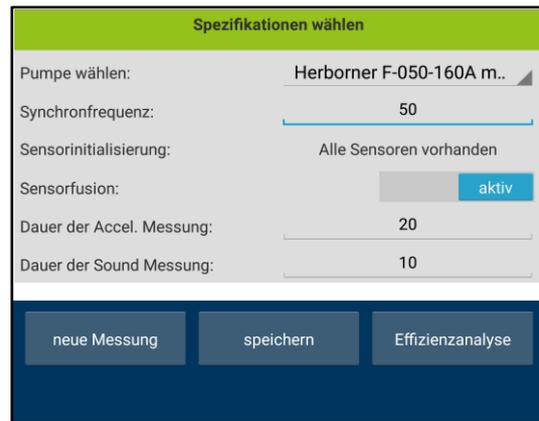


Abbildung 42: Eingabemaske zum Start der Effizienzanalyse mit der Smartphone-App.

Abbildung 42 zeigt die Benutzeroberfläche der Software mit Auswahl von Pumpe, Synchronfrequenz, Sensorfusion und Messdauern. Mit den Buttons kann eine neue Messung gestartet werden. Nach Abschluss der Messung werden die zur Bestimmung der Drehfrequenz des Motors relevanten Bereiche des Frequenzspektrums grafisch dargestellt und der ermittelte Betriebspunkt angezeigt (siehe Abbildung 41). Neben dem Betriebspunkt wird angezeigt, ob ein Schaden

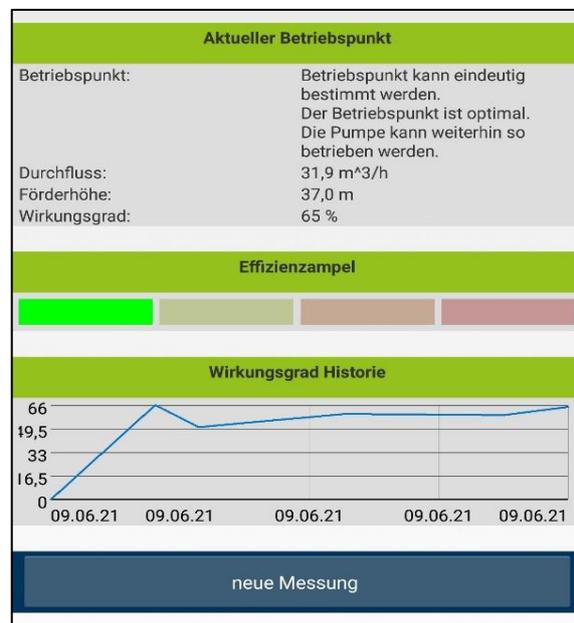


Abbildung 43: Effizienzanalyse mit Bewertung des aktuellen Betriebspunkts und Ausgabe der Historie des Wirkungsgrads.

4. Zusammenfassung der Ergebnisse

4.1 Adaptiver Zweipunktregler

Im ersten Teilprojekt wurde ein adaptiver Zweipunktregler entwickelt, der eine selbstständige Anpassung an die Regelungsaufgabe vornimmt. Der adaptive Zweipunktregler kann auf Störungen reagieren und erzielt durch systematische Verringerung von Drehzahlsprüngen eine Reduktion des Energieverbrauchs der Pumpe. Zusätzlich wird der Verschleiß der Komponenten verringert, insbesondere im Vergleich zu einer einfachen Zweipunktregelung.

Nach theoretischen Vorüberlegungen wurde der Algorithmus aus den Vorarbeiten des adaptiven Zweipunktreglers so angepasst, dass bereits nach einem einzelnen Arbeitszyklus die mittlere Stellgröße sehr genau berechnet werden kann. Das in der Realität nichtlineare Modell wurde mit einem PT1-Ersatzmodell beschrieben. Die Verringerung der Sprunghöhe der Pumpendrehzahl erfolgt bis zu einer minimalen Sprunghöhe, um ein robustes Verhalten gegenüber Störungen sicherzustellen. Die Verweildauer in den Zuständen des Regelungsalgorithmus wird benutzt, um Störungen zu detektieren.

Der Regelungsalgorithmus wurde zunächst mit Matlab/Simulink simulativ getestet, um die grundlegende Struktur des Regelungsalgorithmus zu entwickeln und zu überprüfen. Anschließend erfolgten Tests an einem Versuchsstand des Lehrstuhls für Regelungstechnik und Systemtheorie, um eine Validierung des Regelungsalgorithmus in der Realität vorzunehmen. Erste Tests wurden dabei weiterhin mit Matlab/Simulink durchgeführt. Abschließend wurde der Regelungsalgorithmus erfolgreich auf einem stm32 Mikrocontroller in C implementiert. Bei der Validierung in den verschiedenen Szenarien am Versuchsstand hat sich die automatische Adaption des Reglers als äußerst robust erwiesen. Die Ergebnisse des ersten Teilprojekts wurden auf internationalen Konferenzen veröffentlicht ([2], [3], [4]).

4.2 Smartphone-basierte Effizienz- und Zustandsanalyse

Die Entwicklung einer prototypischen Smartphone-App zur Betriebspunkt- und Zustandsüberwachung wurde in der zweiten Projektphase erfolgreich abgeschlossen. Es wurde ein Algorithmus zur Betriebspunkterkennung implementiert, der auf einer Frequenzanalyse (schnelle Fourier-Transformation, FFT) des Signals von Beschleunigungssensor und Mikrophon eines Smartphones basiert. Die Validierung der Betriebspunkterkennung erfolgte am eigenen Prüfstand. Abbildung 44 zeigt exemplarisch einen per App erkannten Betriebspunkt.

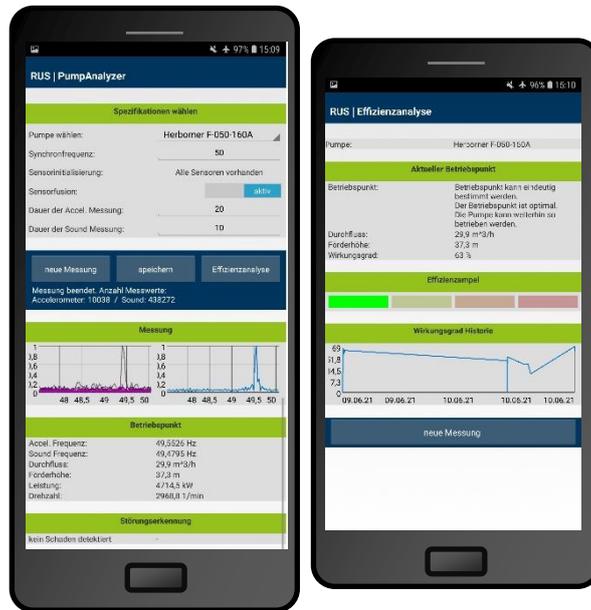


Abbildung 44: Betriebspunkterkennung und Effizienzanalyse mit dem PumpAnalyzer.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der zweiten Projektphase eine Reihe von Methoden zur Schadensfrüherkennung basierend auf der in konventionellen Smartphones üblichen Sensorik (Beschleunigungssensor, Mikrophon) entwickelt. Es wurde gezeigt, dass sich Schadensmuster der meisten der untersuchten Schadensfälle (z.B. hydraulische Störungen, Kavitation, Unwucht) mithilfe des Smartphones erkennen lassen. Einzig für die eindeutige Erkennung der sich sehr divers äußernden Laufschäden reicht die Sensorik des Smartphones nach den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen nicht aus. Tabelle 4 fasst die Merkmale zur Schadensdetektion mit dem Smartphone zusammen.

Tabelle 4: Übersicht über die Methoden zur Schadenserkennung mit dem Smartphone.

Störung	Erkennungsmerkmal
Lastpunkt, Blockade	Analyse des Betriebspunkts
Kavitation	Erhöhung des normierten Mittelwerts der Amplitude des Frequenzspektrums unterhalb von 250 Hz
Gasmitförderung	Verschiebung der Frequenzspitzen im Bereich der Drehfrequenz
Unwucht	Erhöhung der Frequenzspitzen bei der Drehfrequenz
Laufschäden	Divers, z.B. Erhöhung der Frequenzspitzen bei höheren Harmonischen
Lagerschäden	Voraussichtlich veränderte Vibrationen bei speziellen Frequenzen (abhängig von Bauart des Lagers)

5. Fazit, Verbreitung und zukünftige Arbeiten

Fazit

Die im Arbeitspaketplan vorgesehenen Ziele konnten nach Einschätzung des Lehrstuhls für Regelungstechnik und Systemtheorie erreicht werden. Aufgrund eines Wechsels des Projektbearbeiters hat das Projekt vom 01.10.2018 bis zum 30.11.2019 pausiert. Nach Wiederaufnahme der Arbeiten im Dezember 2019 wurde das Projekt bis März 2021 kostenneutral verlängert, um trotz Verzögerungen durch die Corona-Pandemie auch das zweite Teilprojekt erfolgreich abzuschließen.

Der adaptive Zweipunktregler ermöglicht den effizienten Pumpenbetrieb ohne den Einsatz teurer Sensorik und Aktorik. Es können signifikante Einsparungen gegenüber dem unregelmäßigen Betrieb erzielt werden, die einzig ein kostengünstig zu ermittelndes, binäres Sensorsignal benötigen. Neben dem geringen Investitionsaufwand lernt bzw. adaptiert der Regler seine Parameter nach der Inbetriebnahme in kurzer Zeit selbst, so dass kein Expertenwissen für die Konfiguration nötig ist.

Die intuitive, Smartphone-basierte Effizienzanalyse kann zusammen mit der Erkennung potentieller Schadensmerkmale einen Beitrag zur regelmäßigen Überprüfung von Pumpen eingesetzt werden und leistet so einen Beitrag für den effizienteren Betrieb der Pumpen. Im Projektverlauf wurde festgestellt, dass bestehende Methoden zur Erkennung Schadensmerkmalen für eine Umsetzung auf Smartphones, deren Sensoren nie für einen solchen Zweck vorgesehen waren, geeignet sind. Aus diesem Grund wurden für einige Schadensfälle auch neuartige und mit Smartphones umsetzbare Methoden entwickelt.

Verbreitung der Ergebnisse

Die Verbreitung der im Projektverlauf erzielten Ergebnisse geschieht auf zwei Ebenen. Zum einen wurden während des Projektverlaufs Teilergebnisse zum adaptiven Zweipunktregler veröffentlicht, die allgemein zugänglich sind und so von interessierten Firmen genutzt werden können. Neben der Veröffentlichung wurde der prototypische Quellcode des adaptiven Zweipunktreglers an die Mitglieder des VDMA-Arbeitskreises verteilt, um die Hürde für die industrielle Nutzung der entwickelten Technologie zu senken.

Die Verbreitung der Ergebnisse des zweiten Teilprojekts geschieht primär durch Weitergabe der prototypischen App an die Mitglieder des Arbeitskreises. Bei der Nutzung muss beachtet werden, dass der Algorithmus zur Betriebspunkterkennung in Teilen durch das oben benannte Patent der Fa. KSB geschützt ist, so dass die Nutzung durch andere Hersteller möglicherweise limitiert ist.

Zukünftige Arbeiten

Neben der im Projekt entwickelten Füllstands- und Druckregelung für Pumpen wird in einem Anschlussprojekt untersucht, in welchen zusätzlichen Anwendungsbereichen der adaptive Zweipunktregler mit geringem Investitionsaufwand die Energieeffizienz erhöhen kann.

6. Literaturverzeichnis

- [1] G. Wohlauf, S. Thomas und W. H. O. Irrek, „Erhöhung der Effizienz im Bereich der Umwälzpumpen in Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistung,“ 2005. [Online]. Available: http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/EnEffFonds_Anhang2_Programm1.pdf. [Zugriff am 07 05 2021].
- [2] S. Leonow, T. Gunder und M. Mönnigmann, „A self-learning binary controller for energy efficient pump operation,“ in *Proceedings of the 4th International Rotating Equipment Conference (IREC19)*, Wiesbaden, 2019.
- [3] S. Leonow und M. Mönnigmann, „A self learning binary controller for increased control performance,“ in *Proceedings of the 18th European Control Conference 2019*, Neapel, 2019.
- [4] S. Leonow und M. Mönnigmann, „Adaptive control for systems with two binary measurements,“ *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 2, Nr. 21th IFAC World Congress (virtual), pp. 3779-3784, 2020.
- [5] A. Almeida, P. Fonseca, H. Falkner und P. Bertoldi, „Market transformation of energy-efficient motor technologies,“ *Energy Policy*, Bd. 31, Nr. 6, pp. 563-575, 2003.
- [6] Sterling SIHI GmbH, „Zustandsüberwachung von rotierenden Maschinen,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.sterlingsihi.com/cms/de/home/produkte-und-service/zustandsueberwachung.html>. [Zugriff am 20 02 2015].
- [7] Sterling SIHI GmbH, „Online-Zustandsüberwachung SIHI detect,“ 2015. [Online]. Available: http://www.sterlingsihi.com/cms/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1424534261&hash=754b7f03457098b9110905d23e24f893aba170ee&file=fileadmin/Dokumente_WEB/SIHIdetect/SIHIdetect%20Loesungen%20DE%20022014.pdf . [Zugriff am 20 02 2015].
- [8] Statista, „Anzahl der Smartphone Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2014,“ 2015. [Online]. Available: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonennutzer-in-deutschland-seit-2010/> . [Zugriff am 20 02 2015].
- [9] Grundfos, „GO Remote,“ 2015. [Online]. Available: <http://de.grundfos.com/products/find-product/grundfos-go.html>. [Zugriff am 13 01 2015].
- [10] ECOM Mobile Safety, „Ex-geschützte Handys für Atex Zone 1 & 2,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.ecom-ex.com/de/produkte/kommunikation/handys/> . [Zugriff am 14 01 2016].
- [11] Lehrstuhl für Strömungs- und Verdrängermaschinen der TU Kaiserslautern, „Leitfaden zur Störungsfrüherkennung,“ Fachgemeinschaft Pumpen im VDMA, Kaiserslautern, 2004.
- [12] D. Kollmar, „Betrieb von Kreiselpumpen,“ 2012. [Online]. Available: http://www.mb.uni-siegen.de/iftsm/lehre/2012-04-12_vortrag_uni_siegen.pdf. [Zugriff am 19 05 2021].
- [13] J. F. Gülich, *Kreiselpumpen: Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*, Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- [14] C. Emde, S. Laue, Silovic und Marjan, „Verfahren und Vorrichtung zur Betriebspunktbestimmung einer Arbeitsmaschine“. Europäisches Patentamt Patent EP 2 433 010 B1, 23 09 2015.

- [15] W. Abdulkarem, A. Rajakannu und K. F. Al-Raheem, „Centrifugal pump impeller crack detection using vibration analysis,“ in *2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology*, Dubai, 2014.
- [16] Mohanty, A. Ranjan, P. K. Pradhan, Mahalik und D. S. G. Nitaijour P., „Fault detection in a centrifugal pump using vibration,“ *International Journal of Automation and Control*, Nr. 6, pp. 261-276, 2021.
- [17] Umweltbundesamt, „Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen>. [Zugriff am 20 02 2015].

Anhang

A1 Angabe der Pumpendaten auf dem Smartphone

Für jede Pumpe muss eine Textdatei mit der Endung „properties“ auf dem Pfad Android\data/de.rus.rub.pumpanalyzer/files/Pumpendaten abgelegt werden. Die Datei muss den Namen der Pumpe, Angaben zum Nennpunkt des Motormodells, den optimalen Betriebspunkt der Pumpe, die Kennfelder des Pumpenmodells und notwendige Werte für die Störungserkennung enthalten.

Eine exemplarische Datei hat folgenden Inhalt:

```
pumpenname = Herborner F-050-160A
// Nennpunkt des Motormodells
PNenn = 7500;
nNenn = 2950;
f0_typ = 50;
// optimaler Betriebspunkt
qopt = 48.5;
Hopt = 33.9;
Popt = 6290;
etaopt = 72.5;
// Pumpenmodell
H_data = 36.75;37.2;38.1;36.3;33.931;29.2;28.3;27.4;14.7;2
q_data = 0;12;25;36;48.5;58;63;64;65;66
P_data = 2400;3350;4500;5300;6290;7050;7320;7330;7340;5460
eta_data = 0;32;58.5;68.5;72.5;71;69;67.7;66;7
// Kavitationserkennung (default)
faultKav_NPSH = 0; 0; 5; 10; 20
faultKav_Characteristic = 0;0.2;0. 3;0.4;0.5
```

A2 Speichern von Messungen mit der PumpAnalyzer App

Zum Speichern der Messungen muss ein Ordnername „new_folder“ angegeben werden. Der Ordner „new_folder“ wird unter Android\data/de.rus.rub.pumpanalyzer/files/Messdaten angelegt. Folgende Dateien werden beim Speichern einer Messung in dem neuen Ordner abgelegt:

Dateiname	Datentyp	Inhalt
AccelerationOverTime	Textdatei (.txt)	Zeitsignal der Beschleunigungsmessung
FFTFrequencies	Textdatei (.txt)	Frequenzspektrum Beschleunigungssignal – Frequenzen
FFTValues	Textdatei (.txt)	Frequenzspektrum Beschleunigungssignal – Amplitude
FFTFrequencies_audio	Textdatei (.txt)	Frequenzspektrum Audiosignal – Frequenzen
FFTValues_audio	Textdatei (.txt)	Frequenzspektrum Audiosignal – Amplitude
FilteredAccelerationOverTime	Textdatei (.txt)	Gefiltertes Zeitsignal der Beschleunigungsmessung
OperatingPoint	Textdatei (.txt)	Ermittelter Arbeitspunkt
SoundOverTime	Audiodatei (.pcm)	Rohdaten der Audiomessung

Die Datei OperatingPoint enthält neben dem gemessenen Betriebspunkt auch Informationen über die Zeit der Messung, den Pumpentyp, und mit Nenndrehzahl und Synchronfrequenz zwei Messparameter.

Zum Speichern der Arrays in Textdateien kommen die Methoden „save_array“ und „save_array_float“ zum Einsatz, die die Java-Klassen „FileWriter“ und „BufferedWriter“ nutzen. Die Audio-Rohdaten werden mit der Methode WriteAudio2File der „AudioRecorder“-Klasse gespeichert.