

Bachelorarbeit

Jan-Christoph Bädeker

Industrie 4.0 Konzepte situationsgerechter
Wartung und Instandhaltung im
Kommunalbereich

Jan-Christoph Bädeker

**Industrie 4.0 Konzepte
situationsgerechter Wartung und
Instandhaltung im Kommunalbereich**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

LIFETEC-SYSTEMS GmbH
Kiefernweg 1b
21255 Tostedt

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Randolph Isenberg
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Wolfgang Stapel

Abgabedatum: 19.05.2017

Zusammenfassung

Jan-Christoph Bädeker

Thema der Bachelorthesis

Industrie 4.0 Konzepte situationsgerechter Wartung und Instandhaltung im Kommunalbereich

Stichworte

Industrie 4.0, Wartung, Instandhaltung, Kommunalbereich, Pumpendiagnose, RFID, QR-Code

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit werden Konzepte aus dem Bereich der Industrie 4.0 auf den Kommunalbereich übertragen. Die Spanne reicht dabei von leicht umsetzbaren Konzepten der Werkzeug- und Anlagenidentifikation durch QR-Codes und RFID-Chips bis hin zum Einsatz der Augmented Reality Technologie, um den Werker der Zukunft bestmöglich auszurüsten. Abschließend wird für die Firma LIFETEC-SYSTEMS GmbH ein Messkonzept für Pumpendiagnose entwickelt und an einem bestehenden Pumpwerk eines Kunden getestet. Während der Thesis ist ein Betrachtungsschwerpunkt um die Rolle des Menschen in zukünftigen Anwendungsspektren entstanden, der untrennbar mit der Wartung und Instandhaltung verbunden ist.

Jan-Christoph Baedeker

Title of the paper

Industry 4.0 concepts of situation-appropriate maintenance and repair in the municipal sector

Keywords

Industry 4.0, Maintenance, Repair, Pump Diagnosis, RFID, QR-Code

Abstract

In this thesis, concepts from the range of Industry 4.0 are transferred to the municipal sector. The span of these concepts range from easily implementable concepts for identification of tools and machines with QR-Codes and RFID-Chips up to concepts that make use of the augmented reality technology to equip the worker of the future to the best possible extent. Finally, a practical concept for pump diagnosis is developed for the LIFETEC-SYSTEMS GmbH and tested in a pump station of a customer. During this thesis, another focus emerged on the role of the human in future applications, which is inextricably linked to maintenance and repair.

Vorwort

Ich möchte zunächst einen großen Dank an Prof. Dr.-Ing. Randolph Isenberg aussprechen, für seine Unterstützung sowie seine nicht abreißende Motivation für Konzeptentwicklungen dieser Art. Der große kreative Freiraum hat diese Thesis in ihrer vorliegenden Form überhaupt erst ermöglicht.

Ein weiterer Dank gilt meinem jahrelangen Mentor Wolfgang Stapel, der mir unzählbare Einblicke in die unterschiedlichsten Disziplinen innerhalb der Ingenieurwissenschaften und angrenzenden Fachgebiete verschafft hat. Die vielen gemeinsamen Projekte haben meine Kreativität, sowie meine Denkweise in interdisziplinären Handlungsfeldern nachhaltig geprägt. Dir, lieber Wolfgang, sei diese Thesis gewidmet als Zeichen der Anerkennung und der Freundschaft.

Schwerpunkt einer Thesis mit dem Leitgedanken von Konzeptentwicklungen sind die entsprechenden Visualisierungen von Ideen und Rahmenbedingungen. Die vorliegende Bachelorarbeit ist daher von einem durchgängigen Stil von selbst erstellten Skizzen und ausschließlich eigenen Fotos geprägt.

Eine ausgeweitete Abgrenzung des Themas innerhalb des großen Themenkomplexes „Industrie 4.0“ erschien als sehr hilfreich, um schnell den Kern dieser Thesis zu treffen. Aufgrund der großen Mengen an verfügbarer Literatur ist es kaum möglich einen einheitlichen Stand der Technik zu formulieren, der das gesamte Spektrum der Industrie 4.0 abdeckt. Vielmehr ist jedem Kapitel ein eigener, nicht explizit erwähnter Stand der Technik aufgeführt, der die Grundlage für jenes beschriebene Konzept liefert.

Neben einer vertieften Erläuterung grundlegender Begrifflichkeiten im Einleitungsteil, ist ebenfalls ein Glossar weiterer ausgewählter Begriffe im Anhang dieser Thesis. Begriffe, welche in der Thesis *kursiv* abgedruckt sind, finden sich in diesem Glossar wieder.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
1.1. Klärung der Aufgabenstellung	1
1.1.1. Ist-Analyse	2
1.1.2. Soll-Konzept	3
1.2. Vorstellung des Unternehmens	5
1.3. Abgrenzung des Themas	6
2. Wichtige Begriffsdefinitionen	8
2.1. Industrie 4.0	8
2.2. Cyber-Physische Systeme	9
2.3. Instandhaltung	11
2.3.1. Wartung	12
2.3.2. Inspektion	12
2.3.3. Instandsetzung	13
2.3.4. Verbesserung	13
2.4. Situationsgerechte Wartung und Instandhaltung	13
2.4.1. Korrektive Instandhaltung	14
2.4.2. Vorausbestimmte Instandhaltung	15
2.4.3. Zustandsorientierte Instandhaltung	15
2.5. Der Kommunalbereich	17
3. Grundsätzliche Betrachtungen bei der Konzepterstellung	19
3.1. Instandhaltungsebenen	20
3.2. IT-Betriebssicherheitsaspekt	21
3.3. Mensch-Maschine-Interaktion	22
3.4. Ausrüstung des Werkers der Zukunft	24

4.	Konzepterstellung	26
4.1.	Identifikation durch Codes	27
4.1.1.	QR-Code in der Praxisanwendung	28
4.2.	Enhanced Situational Awareness	31
4.2.1.	Einbindung in VR- und AR-Szenarien	33
4.3.	RFID an Werkzeug und Betriebsmitteln	37
4.4.	Erweiterte Bauwerksüberwachung und Hotspots	42
5.	Praxiskonzept Pumpendiagnose	45
5.1.	Optimierungsebenen	46
5.2.	Installationsmöglichkeiten	48
5.3.	Theoretische Grundlagen zur Pumpenmessung	50
5.3.1.	Druckmessung	50
5.3.2.	Durchflussmessung	51
5.3.3.	Betriebspunktmessung und –anzeige	52
5.3.4.	Schwingungsmessung	52
5.4.	Entwicklung des Messkonzepts	54
5.4.1.	Weitere Rahmenbedingungen des Messkonzepts	56
5.4.2.	Vorbereitende Arbeiten	58
5.4.3.	Programmierung des Messgeräts	59
5.4.4.	Installation der Hardware	63
5.5.	Ergebnisse nach Inbetriebnahme	65
6.	Zusammenfassung und Ausblick	68
	Glossar	71
	Literaturverzeichnis	74
	Anhang	A-1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Firmenlogo der LIFETEC-SYSTEMS GmbH	5
Abb. 2	Zeitstrahl der industriellen Revolution	9
Abb. 3	Minimalkonfiguration eines CPS	10
Abb. 4	Fünf Stufen Cyber-physischer Systeme	11
Abb. 5	Tätigkeiten der Instandhaltung	12
Abb. 6	Instandhaltungsstrategien	14
Abb. 7	Ersetzen von Redundanz durch Maschinendiagnose	16
Abb. 8	Grundsätzliche Betrachtungsaspekte	19
Abb. 9	Instandhaltungsebenen	21
Abb. 10	Eingliederung der Mensch-Maschine-Interaktion	23
Abb. 11	Ausrüstung des Werkers der Zukunft	25
Abb. 12	Strichcode	27
Abb. 13	QR-Code	28
Abb. 14	Datenaufbereitung	32
Abb. 15	Augmented Reality Brille	33
Abb. 16	Blick des Werkers 4.0 durch die AR-Brille	34
Abb. 17	Werkzeuge und Betriebsmittel mit RFID-Technologie	38
Abb. 18	RFID-Werkzeug im Praxisszenario	39
Abb. 19	AblaufszENARIO ohne RFID-Einsatz	40
Abb. 20	Netzwerkeingebundene Kamera	42
Abb. 21	Mobilfunkübertragungsgeschwindigkeiten	43
Abb. 22	Verschlüsselter Hotspot durch das Einsatzfahrzeug	44
Abb. 23	Pumpenkennlinie	46
Abb. 24	Komponentenebene	47
Abb. 25	Modulebene	47
Abb. 26	Systemebene	48
Abb. 27	Messsystem als Inzellösung	49
Abb. 28	Druckmessung	50
Abb. 29	Durchflussmessung	51
Abb. 30	Betriebspunktmessung	52
Abb. 31	Schwingungsmessung	53
Abb. 32	PumpMeter Diagnosegerät	57
Abb. 33	Verbindung PumpMeter mit Notebook	58

Abb. 34	Diagrammauswertung und Tripelfindung	60
Abb. 35	Adapterkette bei der Sensorinstallation	64
Abb. 36	Ergebnisse der Betriebspunktanzeige	66
Abb. 37	Zusammenfassende Skizze aller Konzepte	69
Abb. A	Kennlinie der Pumpe #1 (Fa. Herborner Pumpen)	A-2
Abb. B	Kennlinie der Pumpe #3 (Fa. Herborner Pumpen)	A-3
Abb. C	Montage des druckseitig montierten Sensors am Kugelhahn	A-4
Abb. D	Montage des saugseitig montierten Sensors im Wartungsdeckel	A-4
Abb. E	Montage des PumpMeter Moduls zur Pumpendiagnose	A-5
Abb. F	Blick in das Pumpwerk	A-5

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Ausgewählte Programmierparameter PumpMeter	62
---------------	--	----

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
CPS	Cyber-Physisches System
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
3D	dreidimensional
EDGE	Enhanced Data Rates für GSM Evolution
EN	Europäische Norm
fps	frames per second
GPRS	General Packet Radio Service
HUD	Head Up Display
HSPA	High Speed Packet Access
IT	Informationstechnologie
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
LTS	LIFETEC-SYSTEMS GmbH
LTE	Long-Term Evolution
MID	Magnetisch-induktive Durchflussmessung
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
NFC	Near Field Communication
PC	Personal Computer
POI	Point of Interest
QR	Quick-Response
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
RI	Rohrleitungs- und Instrumenten(fließschema)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
VR	Virtual Reality
WWW	World Wide Web

1. Einleitung

Welche Konzepte aus dem großen Themenbereich Industrie 4.0 können auf den Kommunalbereich übertragen werden? Der Kommunalbereich deckt durch den weitreichenden örtlichen Bereich, gegenüber einem im Verhältnis kompakt gebauten Industriestandort, einen höheren Drang nach Datenkommunikation und Vernetzung ab. An dieser Stelle sind durch die langen Datenwege ggf. hohe Potentiale aufzuzeigen. Abwasser- und Zweckverbände sind geprägt durch eine hohe Dichte an Pumpen und Armaturen welche zunächst automatisiert werden können. Um diese Aggregate langfristig zu erhalten und zu warten sind sowohl in der Industrie als auch im Kommunalbereich umfangreiche und intelligente Instandhaltungsstrategien notwendig. Durch die Einbindung von moderner Sensorik gekoppelt mit der *Knowledgebase* von Mitarbeitern – insbesondere denjenigen, die mehrere Maschinengenerationen miterlebt haben – können über Algorithmen entsprechende Erwartungshaltungen bezüglich der Komponentenlebensdauer mit in die Restlebensdauerberechnung einbezogen werden. Der Auswahl von passenden Sensoren und die Konzeptentwicklung für diese vorausschauenden Wartungsstrategien wird ein großer Teil der Thesis gewidmet sein.

1.1. Klärung der Aufgabenstellung

Das Thema dieser Thesis lautet „Industrie 4.0 Konzepte situationsgerechter Wartung und Instandhaltung im Kommunalbereich“. Es sollen im Laufe der Bearbeitung nach umfangreicher Sichtung und Bearbeitung der Literatur und Erlangung eines erweiterten Allgemeinwissens und -verständnisses verschiedene Konzeptansätze, die mit dem Oberbegriff Industrie 4.0 einhergehen, auf den Kommunalbereich übertragen werden. Dabei werden sämtliche Aspekte von der reinen Wartung und Instandhalten bis zu Rolle des Menschen in diesen Prozessen mit einbezogen und auf dieser Basis entsprechende Konzepte entwickelt.

1.1.1. Ist-Analyse

Aktuell befinden sich die Wartungskonzepte und auch die Einbindung der aus der Industrie schon teils umgesetzten Konzepte von Industrie 4.0 für den Kommunalbereich noch in den Anfangsphasen. Erster Schritt zur Festlegung der nächsten Vorgehensschritte ist eine fundierte Analyse über den tatsächlichen Stand, in dem sich die jeweilige Zielgruppe – Kommunalverband oder Industrieunternehmen – befindet.

Wichtiger Bestandteil ist die Rolle der Automatisierung – im Prinzip die treibende Kraft aus Industrie 3.0 – als Grundbaustein für ein weiteres Vorgehen. Ein kleiner Exkurs kann aufzeigen, dass Automatisierung nicht nur der Industrie vorbehalten ist, sondern auch das tägliche Leben der Menschen mitbestimmt. Smart Homes, Smart Cars, Smartphones - mit künstlicher Intelligenz versetzte Alltagsgegenstände lassen den Fortschritt durch Automation täglich sehen, insofern man sich von dem Gedanken abhebt, dass dies heutzutage ohnehin die Normalität darstellt. Auch hier ist eine Querverbindung zu dem in der Einleitung angedeuteten Werkgenerationenwechsel aufzuzeigen – ein Arbeiter, der in den 50er oder 60er Jahren geboren ist, hat eine umfassendere Vorstellung von Technologiefortschritt und kann sich diesen zunutze machen, insofern er bereit ist, sich auf neue Technologien einzustellen. Ein Kind aus der 2000er-Ära kommt schon von Kleinauf mit einer hohen Technologiedichte in Kontakt und sieht dies dementsprechend als die Normalität an.

In diesem Zusammenhang spielt auch bei der anfallenden und zu bearbeitenden Datenmenge ein entsprechender Schutzfaktor eine entscheidende Rolle. Die schiere Menge an Metadaten im Rahmen von „*Big Data*“, die auf den weltweiten Datenservern kursieren, sind potentielle Angriffsziele für Hacker und Bots, die nach Schlupflöchern suchen, um auf diese Daten zugreifen zu können. In den vergangenen 10 Jahren sind etliche Cyberangriffe auf Infrastrukturschleifen entdeckt worden, die von der Atomindustrie bis zur Trinkwasserversorgung reichen. Diese Gefahr wird noch deutlicher aufgrund des Onlineverhaltens der 2000er-Generation und aufwärts. Die weltweit auf Servern abgelegten Daten und Metadaten können die Rohstoffe der Zukunft werden – bei den Mengen von unbedenklich jeden Tag ins *WWW* gestellten Informationen, Bildern und Videos. Entsprechende Schritte sind demnach in der Industrie einzuleiten, um die Unternehmensinfrastruktur zu schützen, sobald diese Generation in den Werkhallen der Zukunft ihre Arbeit aufnimmt.

1.1.2. Soll-Konzept

Auf den Automatisierungsschwerpunkt aufbauend soll ein Praxiskonzept entwickelt werden, die den Einsatz von modernen – und zeitgleich günstiger gewordenen – Messtechniken und Diagnosetools mit der Vorbeugung von Wissensverlust der älteren Werkergenerationen kombinieren sollen. Dazu muss in erster Linie eine für entsprechende Aggregate geeignete Messtechnik und korrespondierende Sensorik gefunden werden, mit denen sich gezielte Messgrößen erfassen lassen. Nach der Zusammenführung auf ein computerbasiertes Datenlogger-System für die Langzeiterfassung werden die Erfahrungen der Werker mit eingebracht, um die durch die Sensoren aufgenommenen Veränderungen vom Soll-Zustand mithilfe der Erfahrungen zu charakterisieren und zu priorisieren. Diese Langzeitdatenspeicherung und Auswertung der Aggregate und Komponenten hilft den Diagnoseprozess über die Zeit hin zu präzisieren, da die Ereignisse und Diagnose mit den tatsächlichen Zuständen bei einer Instandsetzung des Aggregats abgeglichen werden können. Ebenfalls kann die Langzeitdatenspeicherung beispielsweise von Maschinenlagern durch Vibrations- und Beschleunigungssensoren Aufschluss über den charakteristischen Verschleiß liefern – Daten die durchaus auch für Teilelieferanten interessant sind und für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess der Produkte eingebunden werden können – beispielsweise bei Lagerherstellern.

Interessant für die Konzeptgestaltungen sind in erster Linie die Randbereiche der aus der Instandhaltung und der Produktlebenszyklen bekannten „*Badewannenkurve*“. Das Verhalten des Aggregats, wenn es sich langsam dem Ende seines Zyklus nähert, ist hier besonders hervorzuheben und zu vertieft zu untersuchen. Ziele dieser Analysen richten sich nach der Frage, wie zuverlässig man vorab feststellen kann, wann der Versagensfall der jeweiligen Komponente eintritt bzw. mit wie viel Restzeit zu rechnen ist.

Bei einem Erfolg solcher Maßnahmen kann auch ein weiterer in der Philosophie von Industrie 4.0 verankerter Punkt angesprochen werden – die Logistik. Um Lagerhaltungskosten zielgerichtet zu minimieren sind Aussagen über die verbleibende Restlebensdauer von Komponenten Dreh- und Angelpunkt für die möglichst optimierte und intelligente Lagerhaltung.

Ein weiterer Aspekt, der sich während der Bearbeitung dieser Theses als omnipräsent erweist, ist der Faktor Mensch und die Rolle, die der Mensch in einer Welt der Generationen 4.0 spielt. Durch entsprechende Ausrüstung, die den Werker der Zukunft bestmöglich unterstützen soll, werden viele Konzeptideen überhaupt erst ermöglicht.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis, sollen weitere Konzepte entwickelt werden, die sich im Bestfall untereinander ergänzen und den Werker der Zukunft bestmöglich unterstützen.

1.2. Vorstellung des Unternehmens

Die vorliegende Bachelorthesis wurde in Kooperation mit der LIFETEC-SYSTEMS GmbH erstellt. Das Unternehmen mit aktuellem Firmensitz in D-21255 Tostedt wurde gegründet, um ein ganzheitliches und nachhaltiges Ingenieurwesen in den Bereichen Wasser, Abwasser, Abfall, Energie, Organisationsberatung, Agrartechnologie und Bodenmanagement, Entwicklungs- und Konstruktionsmanagement, sowie in Projektentwicklung und -realisierung zu etablieren.



Abb. 1 Firmenlogo der LIFETEC-SYSTEMS GmbH.

Hierfür bietet das Unternehmen technische und beratende Ingenieurleistungen für Kommunal-, Industrie- und Infrastrukturprojekte an und arbeitet Hand in Hand mit Unternehmen aus Wissenschaft und Forschung, um den bestmöglichen Nutzen für seine Kunden gewinnen zu können.

Die Leistungen der LIFETEC-SYSTEMS GmbH im technischen Ingenieurbereich reichen von der Probenanalyse, Konzeptentwicklung, Verfahrens- und Komponentenauswahl bis zur technischen Anlagenplanung. Unterstützt durch Experten aus Wissenschaft und Forschung, möchte das Unternehmen nachhaltige Entwicklungen sozial verträglich, ökonomisch rentabel und umweltfreundlich machen. Hierfür bietet die LIFETEC-SYSTEMS GmbH ihr Leistungsspektrum auch zur wissenschaftlichen und technischen Begleitung von Forschungsprojekten, sowie zur Planung und Realisierung von Versuchsanlagen an.

Durch die vielfältigen Leistungsbereiche der LIFETEC-SYSTEMS GmbH zählen zum typischen Kundensegment unter anderem Anlagenplaner und -betreiber, Ver- und Entsorgungsbetriebe, Kommunen und Verbände sowie Hochschulen und Forschungsinstitute.

1.3. Abgrenzung des Themas

Die Welt der vierten Generationen von Industrie 4.0, Logistik 4.0, Kommune 4.0, Arbeit 4.0 und weiteren Neuerungen der Technikbranche liefert ein derart komplexes Netz an Informationen, Zusammenhängen und Bedingungen, welches in Gänze den Rahmen einer Bachelorthesis übersteigen würde. Die sinnvolle Absteckung der Systemgrenzen bei der Aufgabenstellung ist daher von besonderer Priorität. Es gilt, einen effizienten Lösungsansatz und zugleich eine Konzeptübertragung aus dem industriellen Bereich für den Kommunalbereich der entsprechenden Problemstellung zu finden.

Der Beweggrund, dieses Thema vertieft zu betrachten, liegt in den klaren Ähnlichkeitsstrukturen eines kommunalen Zweckverbands und eines Industriestandortes. Da diese Zweckverbände auch als Unternehmensform betrachtet werden, die als Produkte die Trinkwasserbereitstellung von der Förderung, Aufbereitung und Verteilung zu den Einwohnern und Gewerbe sowie den Rückweg des Abwassers über die Ableitung und Reinigung haben, sind viele Prozesse in ihrer Struktur sehr ähnlich.

Zweckverbände werden gegründet, um auch kleinen Gemeinden und Städten die Möglichkeit zu eröffnen, sich weiterhin selbst durch eigene Brunnen, Quellen und Wasserwerke mit Trinkwasser zu versorgen und auch die Abwasserreinigung durch Kläranlagen in Eigenregie durchzuführen. Durch steigenden Kostendruck und die Verschuldung der Gemeinden werden auch große Versorgungsunternehmen Teil der Verhandlungen über Zukunftsaussichten und übernehmen anschließend mindestens die Trinkwasserversorgung, welches zu erhöhten Kosten für die Bürgerinnen und Bürger führt. Um die kommunale Eigenständigkeit zu bewahren, schließen sich daher häufig mehrere kleinere Gemeinden zusammen und bewirtschaften alle zugehörigen Bauwerke von einer zentralen Station aus. Dadurch werden Laufwege verkürzt, Erfahrungen auch bereichsübergreifend ausgetauscht und Mitarbeiter bedarfsgerecht eingesetzt – Parallelen zu Optimierungsmaßnahmen, beispielsweise den kontinuierlichen Verbesserungsprozessen sind zu erkennen und verdeutlichen auch hier die Ähnlichkeit mit der Industrie.

Die umfassendsten Gemeinsamkeiten sind jedoch bei der maschinentechnischen Ausrüstung sowie deren Vernetzung in Leit- und Steuersystemen zu finden. In Zweckverbänden ist jedes Bauwerk mit Maschinentechnik von Pumpen, Armaturen,

Rührwerke und Schiebern ausgestattet. Eben diese vorhandenen Vernetzungen und IT-Strukturen, ohne die ein effizienter Betrieb nicht möglich wäre, liefert einen soliden Grundstock an kommunikationstechnischer Infrastruktur für die Industrie 4.0 Konzepte dieser Thesis.

Die Bestätigung über die Notwendigkeit einer sicheren und zukunftsfähigen Instandhaltungsstrategie ist bereits in den vertraglichen Grundlagen einer Zweckverbandsgründung oder, im Erweiterungsfalle, aus den Betriebsführungsverträgen ersichtlich, dass schwerpunktartig die Instandhaltung den Kern der Verträge darstellt. Der Firma LIFETEC-SYSTEMS GmbH liegen Unterlagen vor, aus denen ersichtlich ist, dass die Instandhaltung überwiegend ca. 80% des Tagesgeschäfts der einzelnen Mitarbeiter ausmacht.

Trotz des hohen Stellenwerts der Instandhaltung wird jedoch die maschinentechnische Instandhaltung häufig vernachlässigt oder in der Priorität als gering gewertet. Mögliche Gründe liegen darin, dass diese Tätigkeiten normalerweise über das städtische oder gemeindliche Bauamt geregelt werden. Dort arbeiten überwiegend Bauingenieure in leitender Position sowie Baufacharbeiter, jedoch nur selten ein Maschinenbauer, Maschinenschlosser oder Elektriker. Schwerpunkte des gesamten Sanierungsaufwands sind daher tendenziell eher im Baubereich angesiedelt. Obwohl die Maschinentechnik die meisten Betriebskosten, beispielsweise durch die Energieverbräuche verursacht, spielen hier die Optimierungsmaßnahmen meist eine untergeordnete Rolle.

Diese Thesis weist in ihrer Struktur einen Teil für wichtige Begriffsdefinitionen, Grundlagen bei der Bearbeitung sowie anschließend die Teile für die ausgewählten Konzepte auf, wovon ein Konzept auch schon während der Bearbeitungszeit in die Praxis umgesetzt wurde. Diesem Konzept ist daher ein großer und ausführlicher Teil der Arbeit gewidmet.

2. Wichtige Begriffsdefinitionen

Zur besseren Verständlichkeit und zeitgleichen Aufschlüsselung des Thesistitels sind im Folgenden die grundlegenden Begrifflichkeiten vertieft erläutert. Weitere ausgewählte Begriffe finden sich im Glossar am Ende dieser Thesis. Diese Begriffe sind im Fließtext zur leichteren Identifikation *kursiv* abgedruckt.

2.1. Industrie 4.0

Diese Thesis befasst sich vertieft mit Konzeptansätzen aus dem Konglomerat der verschiedenen *Generationen 4.0*, vorrangig mit denen *der Industrie 4.0*. Dieser Begriff geht auf die Basis der Industriellen Revolutionen zurück, von denen die erste Revolution Industrie 1.0 auf die Mechanisierung um 1790 zurückgeht. Dreh- und Angelpunkt dieser Revolution und somit das greifbare Aushängeschild war die Dampfmaschine, welche die Fertigung und Produktion dieser Zeit revolutionierte. Die zweite Revolution Industrie 2.0 in dieser Reihe war die Einführung der Massenproduktion um 1910, von denen das Fließband häufig als bekanntester Gegenstand in Erinnerung bleibt und dieses Bild maßgeblich prägt. Die dritte Revolution Industrie 3.0 wird durch die Automatisierung und Einführung des Personal Computers (PC) in den 1970er Jahren eingeleitet. Während diese Daten die jeweilige Einführung und den Start der jeweiligen Revolution darstellen, geht die allgemeine Auffassung über den Ist-Stand und die Zukunft je nach Ansichtweise auseinander. Für diese Thesis gilt durchweg die Annahme, dass man sich zur Zeit der Bearbeitung bereits im Zeitalter von Industrie 4.0 befindet.

Weitere Stimmen sehen diese Hauptrevolution (4.0) erst weitaus später. Laut einer Studie der MHP („Industrie 4.0 – Evolution oder Revolution“) beispielsweise, befindet sich der Abschluss der Automationsperiode Industrie 3.0 im Jahr 2010. Anschließend an diesen Zeitraum sieht die Porsche Company vielmehr eine Unterteilung der zukünftigen Revolutionen in unterschiedliche Abschnitte. Die Studie beginnt mit dem Abschnitt *Industrie 3.3* mit Beginn ab ca. 2018 und mit Schwerpunkt auf die Maschinenintegration. Es schließt ab ca. 2025 die *Industrie 3.6* mit einem Schwerpunkt auf dynamische Logistiknetzwerke an. Abschließend wird erst ab ca. 2035 mit dem Begriff *Industrie 4.0* diese unterteilte Revolution beendet mit einem Fokus auf Cyber-

Physische Produktionssysteme.¹ Beide Zeitlinien sind in Abb. 2 zusammengefasst dargestellt.

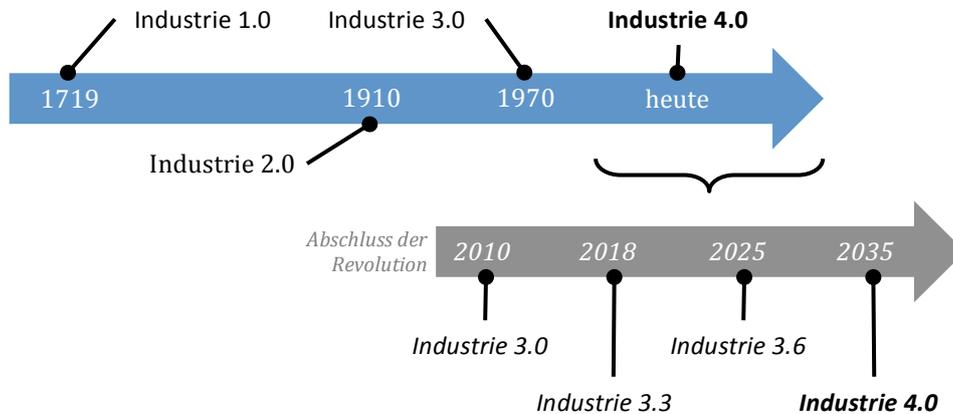


Abb. 2 Zeitstrahl der industriellen Revolution: Zusätzlich zu den Hauptrevolutionen ist ebenfalls die Revolution nach der MHP-Studie ergänzt und grafisch in Form von Zeitstrahlen dargestellt.

Unabhängig von den verschiedenen Argumentationen, ob man sich zur Zeit der Erstellung dieser Thesis im Zeitabschnitt Industrie 4.0 befindet, wird darauf hingewiesen, dass die behandelte Thematik einen Schwerpunkt auf die Technik, Logistik, Datenverarbeitung, Digitalisierung und die Einbindung des Menschen setzt, unabhängig von Marketingaspekten oder weiteren ungewollten Nebenerscheinungen, welche der Oberbegriff Industrie 4.0 ebenfalls mit sich bringt.

2.2. Cyber-Physische Systeme

Ein Begriff der häufig direkt mit Industrie 4.0 in Verbindung gebracht wird und auch ein fundamentaler Baustein für dessen Theorien und Konzepte liefert, ist das Cyber-Physische System oder CPS. Diese Systeme zeichnen sich aus durch eingebettete Software, Verfügung über Sensoren und Aktoren sowie eine Datenerfassung, Datenauswertung und -speicherung. Darüber hinaus sind sie mit Kommunikationseinrichtungen untereinander, sowie in globalen Netzen verbunden. Sie verfügen über ein Netz aus weltweit zugreifbaren Daten und Diensten, sowie eine

¹ vgl. Oliver Kelkar, "Beschäftigt sich Ihr Unternehmen bereits mit Industrie 4.0?," MHP - A

Mensch-Maschine-Schnittstelle.² CPS können bidirektional wirken und sind häufig eine Integration von physischen Prozessen mit einer digitalisierten und computerisierten Komponente.

In dieser Arbeit wird auf eine vom Projekt CyProS der RWTH Aachen abgeleitete Minimalkonfiguration zurückgegriffen, welche sich aus dem physischen System, einer Verarbeitungseinheit, einem Kommunikationsinterface, sowie einem Datenspeicher zusammensetzen³ Diese minimalistische Herangehensweise an ein komplexes System ist in Abb. 3 dargestellt.

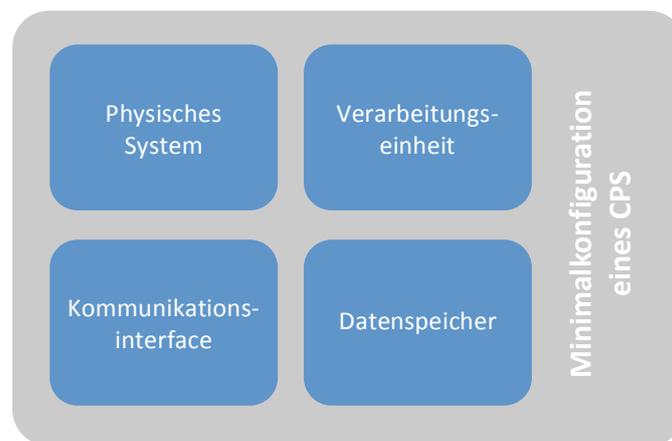


Abb. 3 Minimalkonfiguration eines CPS: Diese Konfiguration basiert auf Grundlage des Projekt CyProS der RWTH Aachen und dient als Basis für diese Thesis.

Die Acatech Studie aus 2012 beschreibt innerhalb der Begrifflichkeit des CPS verschiedene Ebenen der CPS und unterteilt diese in fünf Stufen steigender Komplexität, dargestellt in Abb. 4. Diese Struktur unterstreicht, dass man sich zur Zeit der Erstellung dieser Thesis noch in den Anfängen von Industrie 4.0 bewegt, bzw. dass verschiedene Branchen diesen Ansatz bereits unterschiedlich weit entwickelt haben.⁴

² vgl. WITTENSTEIN SE, "Cyber-Physische Produktionssysteme (CyProS): Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik," 2012, <http://www.projekt-cypros.de/definition-cps.html>, accessed May 2017.

³ vgl. Ibid.

⁴ vgl. acatech, "acatech STUDIE März 2012: agendaCPS," Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, 2012, https://www.bmbf.de/files/acatech_STUDIE_agendaCPS_Web_20120312_superfinal.pdf, accessed May 2017.

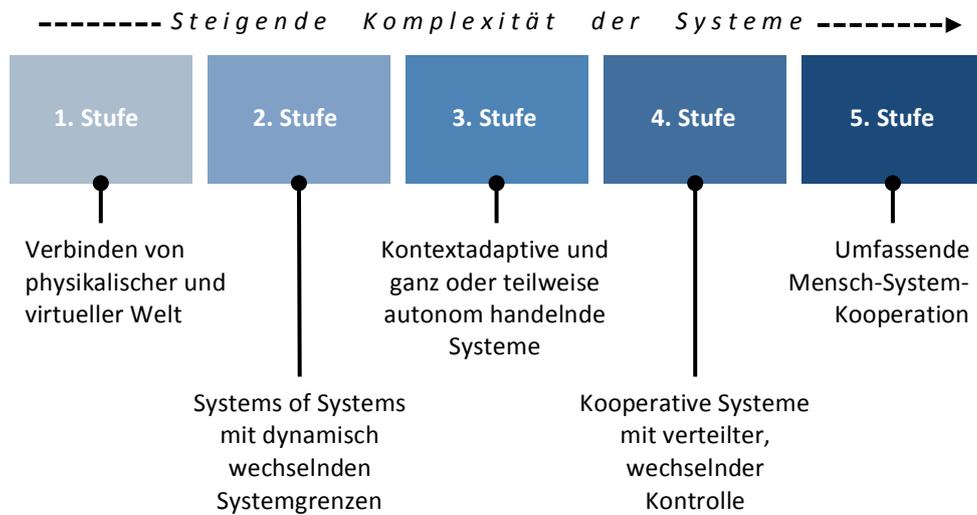


Abb. 4 Fünf Stufen Cyber-Physischer Systeme: Auf Grundlage der Acatech Studie⁵ werden typische Merkmale der Stufen steigender Komplexität grafisch dargestellt.

Während die erste CPS-Stufe die ersten Schritte zur Verbindung der physikalischen und virtuellen Welt umsetzt, ist die zweite CPS-Stufe „Systems of Systems“ ein grundlegender Baustein für die angeführten Konzepte dieser Thesis. Dies stützt sich besonders in der großen Flut an Daten durch die massive Digitalisierung und Automation der ersten CPS-Stufe, welche dann durch übergreifende Systeme geordnet, aufbereitet und dargestellt werden können. Die Bewältigung der Datenflut, sowie das Priorisieren der Daten durch ein automatisiertes System ist eine wichtige Hilfestellung für den Werker und verkörpert einen Hauptgedanken von Industrie 4.0 in dieser Thesis.

2.3. Instandhaltung

Der Schwerpunkt dieser Thesis liegt im Bereich der Instandhaltung. Diese ist laut der DIN EN 13306 definiert als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer

⁵ vgl. Ibid.

Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.“⁶

Weiterhin ist die Instandhaltung nach der DIN 31051 unterteilt nach Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung.⁷ Dieser Zusammen ist in der folgenden Abb. 5 hierarchisch dargestellt.

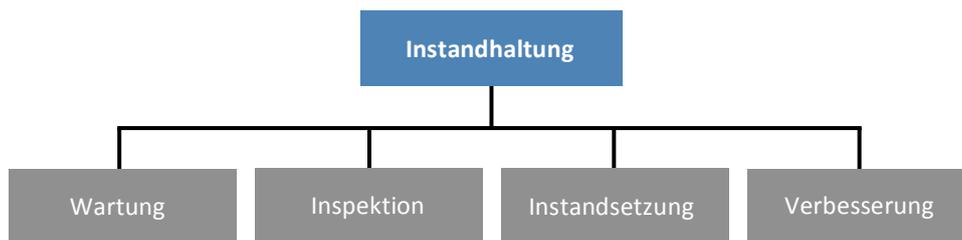


Abb. 5 Tätigkeiten der Instandhaltung: Die an die DIN 31051 angelehnte Skizze zeigt die Verschiedenen Tätigkeiten innerhalb der Instandhaltung und verdeutlicht auch das Verhältnis zwischen den Begriffen Wartung und Instandhaltung.

2.3.1. **Wartung**

Die Tätigkeit der Wartung ist definiert als „Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats.“⁸ Sie ist auch ein wichtiger Teil der präventiven Instandhaltung nach der DIN EN 13306. Die Wartung soll den Soll-Zustand der jeweiligen Betrachtungseinheit bewahren, sowie die Funktionsfähigkeit aufrechterhalten.

2.3.2. **Inspektion**

Inspektion ist definiert als „Maßnahmen zur Feststellung des Ist-Zustandes einer Einheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten

⁶ *Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung* (09/2015).

⁷ vgl. *Grundlagen der Instandhaltung* (09/2012).

⁸ *Ibid.*

der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung.“⁹ Demnach liefert die Inspektion eine Momentaufnahme der jeweiligen Betrachtungseinheit in vorher durch den Betreiber oder Dienstleister festgelegten Betrachtungsabständen.

2.3.3. Instandsetzung

Das Instandsetzen ist definiert als die „physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen.“¹⁰ Instandsetzung ist ein fundamentaler Teil der Instandhaltung und prinzipiell die Reparatur eines Defekts.

2.3.4. Verbesserung

Die Verbesserung ist definiert als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Zuverlässigkeit und / oder Instandhaltbarkeit und / oder Sicherheit einer Einheit, ohne ihre ursprüngliche Funktion zu ändern.“¹¹ Der Teil Verbesserung als Unterpunkt des Instandhaltungskonstrukts hat in dieser Thesis einen besonderen Schwerpunkt, da sich zusätzliche Ausrüstungen von technischen Anlagen bei gleichbleibender Ursprungsfunktion und die daraus folgende Unterstützung und Entlastung der Werker in diesem Bereich bewegt.

2.4. Situationsgerechte Wartung und Instandhaltung

Diese Thesis befasst sich detailliert mit dem Aspekt der situationsgerechten Instandhaltung. Innerhalb der verbreiteten Instandhaltungsstrategien, die in der DIN EN 13306 festgehalten werden, unterscheidet die Norm zwischen den grundlegenden Strategien der korrektiven und präventiven Instandhaltung. Innerhalb dieser Strategien wird ferner zwischen der vorausbestimmten und zustandsorientierten Instandhaltung

⁹ Ibid.

¹⁰ Ibid.

¹¹ Ibid.

unterschieden.¹² Die Instandhaltungsstrategien werden in Abb. 6 hierarchisch abgebildet.

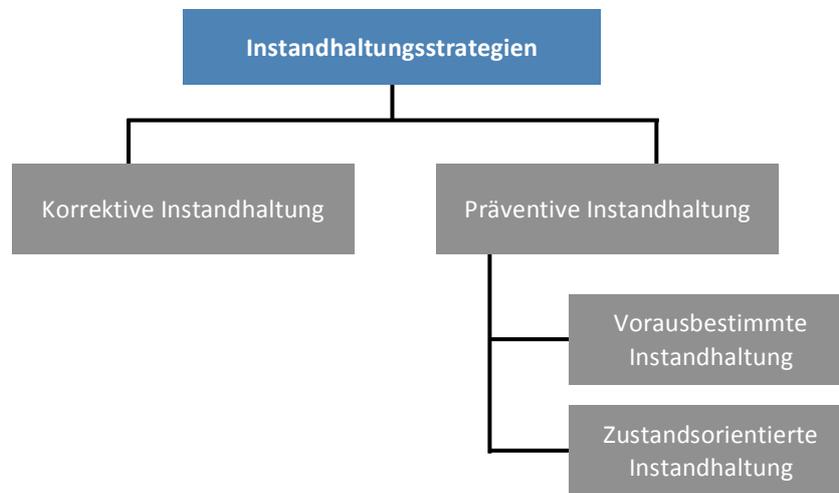


Abb. 6 Instandhaltungsstrategien: Die an die DIN EN 13306 angelehnte grafische Repräsentation der Instandhaltungsstrategien zeigt die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Herangehensweisen an die Hauptthematik Instandhaltung.

2.4.1. Korrektive Instandhaltung

Die korrektive Instandhaltungsstrategie verkörpert das Modell, welches überwiegend in der Vergangenheit zur Anwendung kam. Anlagen und technische Ausrüstung wurden erst dann repariert, wenn Fehler und Schäden offensichtlich sichtbar wurden. Diese Strategie reizte die volle Lebensdauer der Maschinen und Anlagen aus, da nur repariert wurde, wenn eine Komponente die Funktion komplett verwehrt. Dagegen spricht die Tatsache, dass durch diese Vorgehensweise Stand- und Ausfallzeiten erzwungen werden, die wiederum die gesamte Funktion eines Bauwerks beeinträchtigen können. Die Diskrepanz zwischen den Kosten eines Totalausfalls und Stillstands der Maschine sowie eventuellen Folgeschäden aufgrund des Versagens eines Bauteils ist sehr hoch, wenn sie dem Versagen eines eventuell sehr günstigen Bauteils gegenübergestellt wird. Daher wird diese Strategie heutzutage seltener gewählt. Ausnahmen hierbei bilden Installationen mit doppelter oder eventueller

¹² vgl. *Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung* (09/2015).

dreifacher Redundanz, in denen die Nachteile des Funktionsausfalls des Gesamtbauwerks zu vernachlässigen sind.

2.4.2. Vorausbestimmte Instandhaltung

Die erste präventive Instandhaltungsstrategie der vorausbestimmten Instandhaltung sieht vor, regelmäßige Intervalle von Wartung, Inspektion und Instandsetzung einzusetzen, um die Komponenten zu untersuchen, denen das Ende ihrer Lebenserwartung unmittelbar bevorsteht. Dies ist aufgrund der stark streuenden zu erwartenden Lebensdauern von Komponenten und Baugruppen innerhalb einer Betrachtungseinheit ein kompliziertes Unterfangen, welches durch den zusätzlichen Personalaufwand durch kürzere Zyklen zwischen den Inspektionen und Wartungen weiter in seiner Effizienz beeinträchtigt wird. Daher bestreitet diese Instandhaltungsstrategie eine Art Mittelweg, wo der erhöhte Betreuungsaufwand der Maschinen gegenüber einer Umstellung auf redundante Maschinerie eine wirtschaftliche Alternative darstellt.

2.4.3. Zustandsorientierte Instandhaltung

Die weitere präventive Instandhaltungsstrategie, die zustandsorientierte Instandhaltung, dient dieser Thesis als maßgebliche Grundlage. In dieser Strategie sind die Zyklen der Wartungen und Instandhaltungen flexibel gewählt und basieren auf Kalkulationen von unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Betriebsgrößen. Diese werden aufgrund von Ausfallwahrscheinlichkeiten, Herstellerangaben und Betriebserfahrungsaspekten errechnet und legen maßgeblich den Zeitpunkt der Instandhaltung fest. In dieser Strategie kommt das Thema der situationsgerechten Wartung und Instandhaltung zum tragen. Sie ermöglicht eine Art des „vorausschauenden Fahrens“ einer Anlage in Bezug auf die optimale Ausnutzung der Lebensdauer jeder Komponente. Maßgeblich trägt eine permanente Überwachung der jeweiligen Aggregate dazu bei. Vorteil dieser Instandhaltungsstrategie ist prinzipiell die Kombination der positiven Eigenschaften der korrektiven und vorausbestimmten Instandhaltung. Hierzu werden die Aspekte der vollen Ausreizung der einzelnen Komponenten- und Baugruppenlebensdauern mit den eingesparten Kosten für lange Stand- und Ausfallzeiten, sowie das minimierte Risiko von Folgeschäden kombiniert.

Diese Art der Instandhaltung nutzt bereits Grundzüge der Digitalisierung und Automatisierung durch das notwendige permanente *Condition Monitoring*. Der Einsatz des Messequipments und die entstehenden Mehrkosten durch die Überwachung müssen jedoch gegenüber den potentiellen Einsparung wirtschaftlich abbildbar bleiben, um zum Einsatz zu kommen.

Es ist denkbar, dass in Szenarien doppelt oder dreifach redundanter Aggregate im Erneuerungsfall statt eines Ersatzaggregats das Messequipment und die Voraussetzungen für das *Condition Monitoring* eingeführt werden können. In diesem Fall würde die Permanentüberwachung des Aggregats und die Prognosedaten über die voraussichtliche Lebensdauer der Komponenten die Redundanz ersetzen, wie in Abb. 7 grafisch erläutert. Dieses Szenario ist eine am ehesten wirtschaftlich abbildbare Möglichkeit, diese moderne Art der Instandhaltung einzuführen.

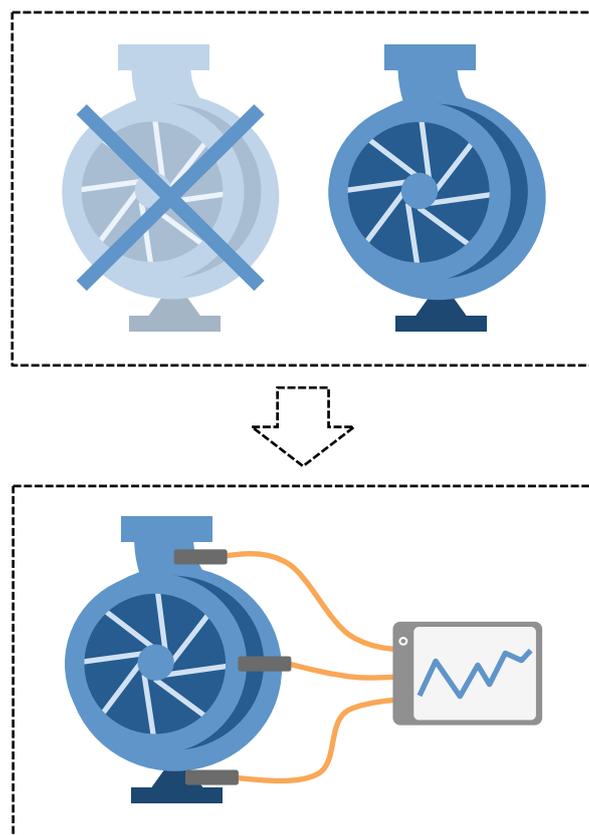


Abb. 7: Ersetzen von Redundanz durch Maschinendiagnose: Im Falle einer abgängigen Pumpe in redundanter Aufstellung wird die ausgefallene Pumpe nicht durch eine weitere Pumpe ersetzt, sondern die gesparten Kosten in ein Condition Monitoring investiert. Auf diese Weise können Betriebe sukzessive ihre Instandhaltungsstrategien in Richtung der Zustandsorientierung ändern.

Weitere Vorteile, welche durch die Nutzung des permanenten *Condition Monitorings* entstehen, sind Möglichkeiten einer detaillierteren nachträglichen Aufschlüsselung des Fehlerhergangs, sowie die Abgleichung mit den Herstellerangaben. Bei hoher Diskrepanz zwischen den erwarteten und tatsächlichen Lebensdauern von Komponenten oder Baugruppen können auch in Folgeanalysen der korrekten Anlagenfahrweise, zulässigem Einsatzgebiet oder auch der korrekten technischen Dimensionierung und Auslegung der Komponenten gezielt geprüft werden.

2.5. Der Kommunalbereich

Sowohl die Zielgruppe, als auch das hauptsächliche Betrachtungsumfeld dieser Thesis ist der Kommunalbereich. Damit sind vorrangig Trinkwasserver- sowie Abwasserentsorgungsbetriebe gemeint, sowie viele technologisierte Unternehmen aus diesem Umfeld, die aufgrund ihrer technischen Ausstattung oder Arbeitsschwerpunkte mit den Konzepten dieser Thesis bedient werden können. Eine zukunftsweisende Struktur in diesem Sektor ist ein Kommunalverbund, beispielsweise in Form eines Zweckverbands. Durch diese Konstellation haben kleine Gemeinden und Städte einer Region die Möglichkeit, in einem Zusammenschluss die eigene Versorgung trotz steigender rechtlicher Anforderungen, steigenden Kosten im Personal- und Servicebereich zu einem konstanten Preisniveau anbieten zu können und somit einer Privatisierung zu entgehen. In Deutschland sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Thesis laut dem Institut für Umweltverfahrenstechnik der Universität Bremen ca. 350 Zweckverbände aktiv.¹³

Dabei haben diese Kommunalunternehmen den Vorteil, dass sie aufgrund der Zusammenlegung über einen festen Mitarbeiterstamm verfügen können und z.B. neben einem Wassermeister und einem Klärmeister auch Fachpersonal aus dem anderen technischen Bereich ausbilden und einsetzen kann. Dadurch steigt die Unabhängigkeit von externen Dienstleistern, das interne Fachwissen, sowie die Möglichkeit, eine umfassende Datenhistorie der Betriebsdaten aufzuzeichnen und intern auszuwerten.

¹³ vgl. Institut für Umweltverfahrenstechnik der Universität Bremen, "Wasser-, Abwasser(zweck)verbände: in Deutschland, Österreich, der Schweiz und Liechtenstein," <http://www.wasser-wissen.de/linklisten/abwasserzweckverbaende.htm>.

Der Begriff „kommunal“ ist in diesem Zusammenhang keineswegs mit „untertechnologisiert“ oder „technisch minderbemittelt“ zu verbinden. Ohne einen Grundstock an Digitalisierung und IT-technischen Verbindungen wären diese großen kommunalen Zusammenschlüsse nicht effizient bewirtschaftbar. Der Kommunalbereich liefert daher einen soliden Nährboden für technologische Konzepte und Visionen abseits des Industriebereiches.

3. Grundsätzliche Betrachtungen bei der Konzepterstellung

Dieser Thesis liegen verschiedene grundlegende Faktoren zu Grunde, die bei der Ausarbeitung der Konzepte mit einfließen. Die Konzepte stützen sich auf eine Kombination aus Innovation, vorhandenem Wissen für Transferleistungen, sowie Aspekten der Sicherheit für den IT-Bereich und den laufenden Betrieb, wie in der folgenden Abb. 8 dargestellt.

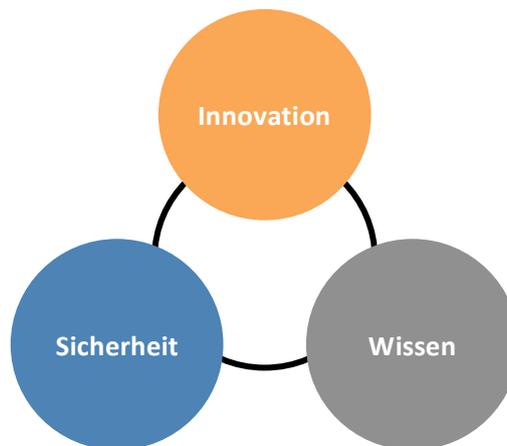


Abb. 8: Grundsätzliche Betrachtungsaspekte: Die vorgestellten Konzepte fußen als Rahmenbedingung auf einer Kombination aus Innovation, Sicherheit und Wissen. Dieses Muster zieht sich bei den ausgewählten Konzeptionen als Bearbeitungsweise durch die Thesis.

Diese Betrachtungsweisen sichern einerseits technologisch fortschrittliche Projekte, beziehen jedoch andererseits auch Wissen von erfolgreichen Projekten aus ähnlich aufgebauten Konzepten mit ein. Dieser Transfer und die Anpassung von Konzeptcharakteristika aus Industrie 4.0 auf Konzepte des Kommunalbereichs ist Titel und Hauptaugenmerk dieser Thesis. Durch die starke Verstrickung der Kommunikations- und IT-Technik im Bereich von Industrie 4.0, wird auch dem Sicherheitsaspekt ein ähnlich hoher Stellenwert zugerechnet. Die leichte Angreifbarkeit von IT-Infrastrukturen ohne entsprechende Schutzmaßnahmen macht diesen Schritt unumgänglich.

Weitere Schwerpunkte für die Konzepte, die sich in der Bearbeitung der Thesis ergeben haben, sind eine Kombination vom Faktor Technik, Faktor Mensch sowie der

Mensch-Maschine-Interaktion als Bindeglied. Für ein ganzheitliches Konzept spielt neben der technischen Innovation auch der Mensch eine entscheidende Rolle – besonders aufgrund der hohen Diversität von Aufgaben- und Problemstellungen im Kommunalbereich. Daher ist im Rahmen dieser Thesis neben den Ansätzen der Generationen 4.0 auch ein „Mitarbeiter 4.0“ bzw. einen „Werker 4.0“ zu betrachten und entsprechend auszurüsten. Während in industriellen Prozessen, beispielsweise durch den Einzug von Industrierobotern oder massiver Automatisierung, viele Arbeiten vom Menschen entkoppelt werden, können im hier betrachteten Kommunalbereich durch den Einsatz von Technik das volle Potential eines *Werkers 4.0* erst ausgeschöpft werden.

3.1. Instandhaltungsebenen

Die hohe Komplexität der Instandhaltungsmaßnahmen wird in der DIN EN 13306 in verschiedene Ebenen gegliedert, welche nach zunehmender Komplexität sortiert werden, wie auch in Abb. 9 grafisch dargestellt.

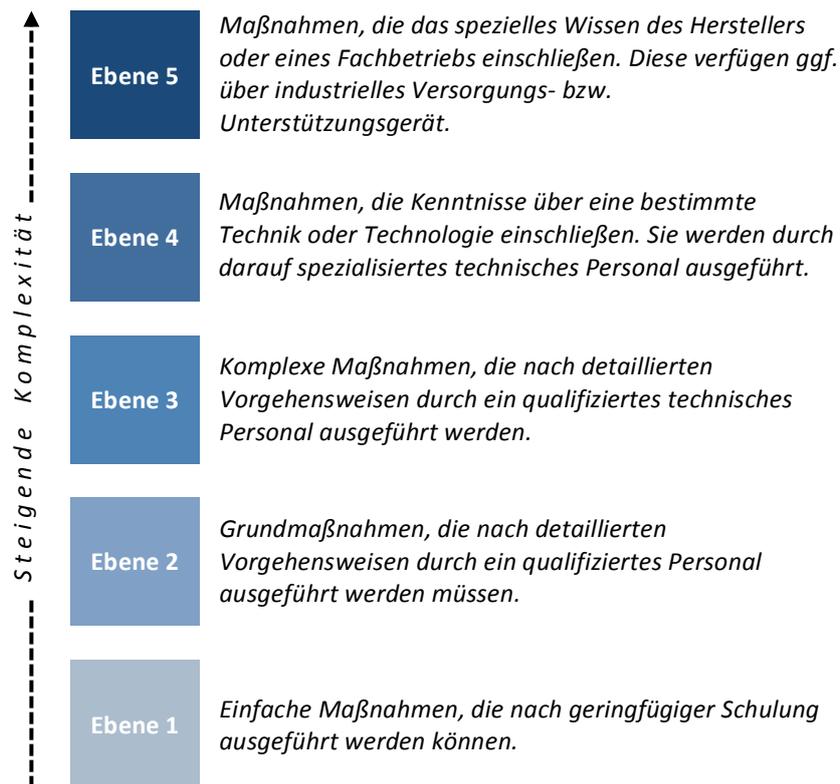


Abb. 9 Instandhaltungsebenen: Angelehnt an die DIN EN 13306¹⁴ sind die verschiedenen Ebenen steigender Komplexität visuell dargestellt, sowie deren maßgebliche Tätigkeiten dargestellt.

Durch den Einsatz von IT-Mitteln, Technik und den zu entwickelnden Konzepten aus dem Bereich von Industrie 4.0 soll ein *Werker 4.0* entsprechend unterstützt und ausgerüstet werden, um auch Tätigkeiten höherer Instandhaltungsebenen ausüben zu können.

3.2. IT-Betriebssicherheitsaspekt

Leichte Angreifbarkeit, zugängliche Daten sowie kontroverse Nachrichtenthemen wie die Vorratsdatenspeicherung zeigen auf, welchen potentiellen Stellenwert die Ressource „Daten“ zukünftig haben kann. Bedingt durch den Schwerpunkt von

¹⁴ vgl. *Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung* (09/2015).

Automation, Netzstrukturen und Digitalisierung im Komplex *Industrie 4.0*, wird sich dem Thema der Betriebssicherheit – besonders der *IT-Sicherheit* – angenommen.

Um Zugriffe und Metadaten von Angreifern in Netzwerken festzustellen, werden häufig simulierte Nebennetzwerke, sogenannte *Honeypots* genutzt, um potentielle Angreifer anzulocken und anschließend inkognito auszuwerten. Mehrere dieser Honeypots können zu sogenannten *Honeynets* zusammengeschlossen werden, um noch vertiefter Angriffsmuster der Hackerangriffe zu analysieren. Diese Ergebnisse fließen anschließend in Überarbeitungen oder zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der IT-Sicherheit.

Der TÜV SÜD simulierte 2015 über ein *Honeynet* ein kleines regionales Wasserwerk und stellte dieses ans WWW um Hackerangriffe zu registrieren. Cyberangriffe begannen direkt nachdem das Wasserwerk ans Netz gestellt wurden. Insgesamt kam es dabei im Zeitraum von acht Monaten zu 250 Hackerangriffen pro Tag. Die insgesamt ungefähr 60.000 Hackeranfragen in dem Zeitraum hatten ihren Ursprung aus ca. 150 Ländern. Bedenklich und zugleich sehr aufschlussreich dabei ist, dass die Angriffe nicht nur über die öffentliche Internetleitung der Büros mit zugehörigen Internetprotokollen, sondern auch vermehrt über Industrieprotokolle (*Modbus TCP* oder *S7COMM*) erfolgten.¹⁵ Dies ist ein Zeichen dafür, dass es ebenfalls Sicherheitslücken auf den Steuerebenen und dem Intranet geben kann und diese eine hohe Anfälligkeit für Cyberangriffe vorweisen können.

3.3. Mensch-Maschine-Interaktion

Um realisierbare holistische Konzepte im Kommunalbereich zu entwickeln, bedarf es drei fundamentalen Stützen, die sich durch jedes Konzept dieses Theses ziehen. Neben einer Weiterentwicklung der Technik, zum Beispiel der Automatisierung von Komponenten und Baugruppen, muss auch die Komponente Mensch entsprechend geschult und ausgerüstet sein, um die Neuerungen aus dem Technikbereich voll nutzen zu können. Das Bindeglied zwischen diesen beiden Säulen ist die Mensch-

¹⁵ vgl. TÜV SÜD, "Das Honeynet-Experiment: Hackerangriffe auf virtuelles Wasserkraftwerk belegen Gefahren für Industrie 4.0," 2015, <http://www.tuev-sued.de/management-systeme/newsletter/2015/4/das-honeynet-experiment-hackerangriffe-auf-virtuelles-wasserkraftwerk-belegen-gefahren-fuer-industrie-4.0>, accessed May 2017.

Maschine-Interaktion (MMI), welche das Zusammenspiel zwischen der Werkergeneration 4.0 und den neuen Konzepten auf Komponenten- und Systemebene darstellt und optimiert, wie auch in Abb. 10 grafisch im Zusammenhang mit dem Bezug zum Konzept dargestellt.

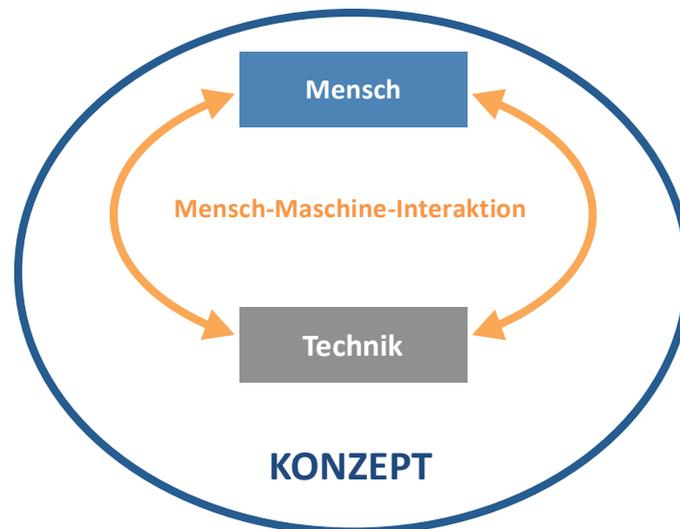


Abb. 10: Eingliederung der Mensch-Maschine-Interaktion: Die Mensch-Maschine-Interaktion ist das Bindeglied zwischen den Kernaspekten Mensch und Technik.

Trotz des technischen Fortschritts und der Übernahme vieler technischer Tätigkeiten und Aufgaben durch Automatisierung und Robotik, ist der Mensch nachwievor ein fester Bestandteil im technischen Alltag und soll daher ebenfalls in dieser Thesis mitbetrachtet werden. Der Faktor Mensch wird daher in die betrachteten Konzepte gezielt eingebracht und die MMI als Schnittstelle beschrieben. Gerade wegen der Frage nach der Rolle des Menschen in zukünftigen technischen Prozessen ist diese Betrachtung sehr aufschlussreich.

Häufig führen sowohl in industriellen als auch in kommunalen Umfeldern Werkergenerationenwechsel zu Erfahrungsverlusten für die kommende Generation an Mitarbeitern. Hinzu kommt die Abhängigkeit von der Weiterbildungsbereitschaft der Mitarbeiter im IT-Bereich, denn hier wird die Spanne zwischen den Generationen tendenziell noch größer. Die aktuelle und auch nächste Generation von Arbeitern, Werkern, Auszubildenden, etc. ist mit einem vollkommen anderen Verständnis von

Computertechnologie und Kommunikationstechnik aufgewachsen, als vorherige Generationen. Die Mitglieder dieser Generation werden auch als sogenannte „*digital natives*“ bezeichnet, welche die Permanentverbindung mit dem Internet als allgegenwärtig und nahezu als Selbstverständlichkeit ansehen. Durch diesen natürlichen Umgang mit der Ressource Internet ist diese Generation zwar intuitiver im Umgang mit digitalisierten Weiterentwicklungen als ältere Generationen, sie werden jedoch wahrscheinlich nicht die fundamentalen Zusammenhänge der Technik ergreifen, die jener Digitalisierung zu Grunde liegt.

In einem Szenario, wo große Mengen an Werkererfahrungen gezielt in Algorithmen eingebunden werden, um mit diesen Erfahrungswerten die Präzision von Vorhersagen z.B. von Aussagen über eine verbleibende Restlebensdauer zu erhöhen, ist der geregelte und intensive Erfahrungsaustausch zwischen den Werkergenerationen entscheidend. Letztendlich kann nur vermitteltes Wissen von jüngeren Generationen weiter genutzt oder ggf. in entsprechende mathematische Zusammenhänge eingebracht werden. Daher unterliegen die Transition und der Austausch zwischen diesen Werkergenerationen besonderer Wichtigkeit, um Erfahrungs- und Wissensverlusten gezielt vorzubeugen und dieses vorhandenen Potential bestmöglich auszunutzen. Viele dieser Erfahrungen münden im Bereich der Wartung und Instandhaltung. Daher unterliegen sie besonders wegen des Industrie 4.0 Aspekts der Vorbeugung von Wissensverlusten der Betrachtung dieser Thesis.

3.4. Ausrüstung des Werkers der Zukunft

Im Zuge der Erarbeitung dieser Thesis ist der Faktor Mensch stärker in den Vordergrund gerückt als ursprünglich angenommen. Während sich bislang etliche Themen im Bereich um Industrie 4.0 bezüglich des Menschen mit dem Thema *Reverse Engineering* beschäftigen, soll die Ausrüstung und Ausstattung von angemessenen Gerätschaften zur Implementierung des Menschen in dieser Thesis einen wichtigen Teilaspekt darstellen.

Während in Industrieunternehmen zur sämtliche Fotografiegeräte oder Smartphones mit integrierter Kamera und Mikrophon Unterbindung von Industriespionage teils streng verboten sind, sind diese Geräte in weitläufigen Geländen und geografisch verstreuten

Einsatzstellen wichtige Gegenstände im Berufsalltag. Durch den Fortschritt im Sektor der mobilen Kommunikationsendgeräte, sind Tablets und Smartphones wegen ihrer hohen Speicherkapazität und Rechenleistung daher wichtige Hilfsgeräte, sowohl in der Darstellungsfunktion als auch zur Verbindung ins WWW. Sie werden daher als Grundausstattung eines jenen *Werkers 4.0* vorausgesetzt, um diesen auch in den beschriebenen Konzeptansätzen entsprechend zu unterstützen - dies ist auch in Abb. 11 visualisiert. Bei der Wahl entsprechender Geräte sollte aufgrund der unterschiedlichen Betriebsorte und -bedingungen auf entsprechende Resistenz gegenüber Schmutz, Öl, Luftfeuchtigkeit, Temperaturschwankungen, etc. geachtet werden. Falls für die beschriebenen Konzepte noch weitere Ergänzungen bezüglich der Ausstattung der *Werker 4.0* erforderlich sein sollten, werden diese explizit aufgeführt und beschrieben. Ebenfalls werden dort entsprechende softwareseitige Voraussetzungen vertieft erläutert.

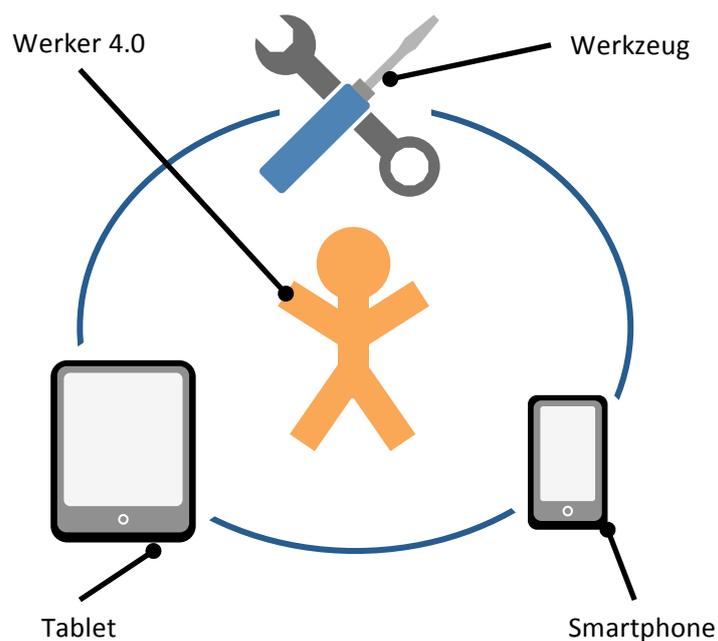


Abb. 11: Ausrüstung des Werkers der Zukunft: Der Werker der Zukunft, in dieser Thesis überwiegend als Werker 4.0 tituiert, wird neben seinem situationsgerechten Werkzeug für den Alltag in seiner Ausrüstung durch ein Industrie-Smartphone und ein Industrie-Tablet komplementiert.

4. Konzepterstellung

Im Folgenden werden die ausgewählten Konzepte dargestellt, welche aus dem großen Umfeld Industrie 4.0 auf den Kommunalbereich übertragen werden sollen. Da sich die vorgestellten Konzepte teilweise untereinander bedingen oder Teilaspekte der Konzepte wiederum als Voraussetzung nutzen, sind diese nach aufsteigender Komplexität und nach Grundlagen sortiert aufgeführt.

Neben Konzepten, welche teilweise als futuristisch eingestuft werden könnten, liegt der Bearbeitungsschwerpunkt auf Konzepten, welche mit überschaubarem Aufwand auch in die Praxis übertragen werden können. Dies wurde beispielsweise mit dem Praxiskonzept der Pumpendiagnose aus Kapitel 5 bereits während der Thesis getan.

4.1. Identifikation durch Codes

Als Einstieg und zusätzliche Grundvoraussetzung für weitere Konzepte, soll eine eindeutige Identifizierungsnomenklatur für mobile Endgeräte umgesetzt werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Thesis begegnet man bereits häufig im Alltag mehreren Arten von ein- oder zweidimensionalen abstrakten Codeformen, beispielsweise eines eindimensionalen Strichcodes, wie in Abb. 12 dargestellt.

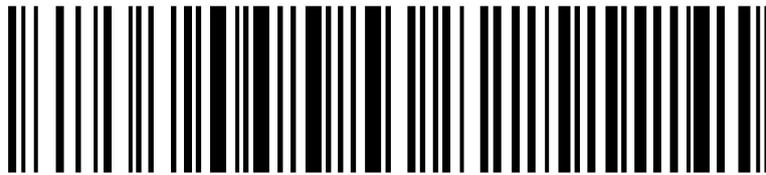


Abb. 12: Strichcode: Beispiel eines eindimensionalen Codes in der Form „Code-128“. Dieser generierte Strichcode ist eine Repräsentation des Inhalts „Industrie 4.0“¹⁶.

Da Barcodes nur verhältnismäßig wenige Zeichen speichern können, wird für dieses Konzept auf die Form eines zweidimensionalen Codes zurückgegriffen. Zur besseren Bewältigung der Informationsflut und zum zeitgleich optimierten Input für die betriebswirtschaftlichen Daten, soll daher an jedem Aggregat oder technischen Anlage ein Quick-Response-Code (QR-Code) angebracht werden um den Werker vor Ort zu unterstützen. Vorteile eines QR-Codes gegenüber einem Barcode liegen in der Menge der speicherbaren Informationen durch die zusätzliche vorhandene Dimension, wie auch in Abb. 13 dargestellt. Durch die hohe Kapazität an möglichen Zeichen und Informationen in einem QR-Code (4.296 alphanumerische Zeichen¹⁷) können viele Kombinationsmöglichkeiten oder alternativ an dieser Stelle schon Verschlüsselungen eingebaut werden.

¹⁶ vgl. TEC-IT Datenverarbeitung GmbH, "ONLINE BARCODE GENERATOR: Code-128," 2017, <http://barcode.tec-it.com/de/Code128?data=Industrie%204.0>, accessed May 2017.

¹⁷ vgl. Wilko Hartz, "Basiswissen QR-Code," 2013, <http://qrcode.wilkohartz.de>, accessed May 2017.



Abb. 13 QR-Code: Beispiel eines zweidimensionalen Codes in der Form eines Quick-Response-Codes (QR-Code). In diesem generierten QR-Code ist der vollständige Thesistitel „Industrie 4.0 Konzepte situationsgerechter Wartung und Instandhaltung“¹⁸ repräsentiert.

Während es bei Barcodes in der Regel erforderlich ist, eine Assoziation oder die Art des Strichcodes in einer Datenbank des Gerätes zu hinterlegen um diese zu entschlüsseln, kann bei einem QR-Code ohne Umwege kompletter Text direkt hinterlegt und als Code generiert werden. Entscheidend bei einer Umgebung die sehr schmutzig, fettig und ölig ist, ist eine hohe Fehlerkorrekturmöglichkeit des QR-Codes. In vier Ebenen kann von Level L (Low) bis zu 7%, Level M (Medium) bis zu 15%, Level Q (Quartile) 25% und Level H (High) bis zu 30% des Inhalts wiederhergestellt werden¹⁹ – Teile des QR-Codes können demnach verdreht oder verdeckt sein und verbleiben dennoch lesbar. Diese Eigenschaft prädestinieren den Einsatz solcher Codeformen in den Bauwerken, die in dieser Thesis beleuchtet werden und werden daher für dieses und folgende Konzepte ausgewählt.

4.1.1. QR-Code in der Praxisanwendung

Durch Scannen des QR-Codes mit dem Smartphone oder Tablet als Grundausstattung des *Werkers 4.0* kann durch die individuellen Codes auf eine im Intranet hinterlegte Seite verwiesen werden. Durch eine menüartige Struktur kann dort zwischen dem

¹⁸ vgl. TEC-IT Datenverarbeitung GmbH, "ONLINE BARCODE GENERATOR: QR Code," 2017, <http://barcode.tec-it.com/de/QRCode?data=Industrie%204.0%20Konzepte%20situationsgerechter%20Wartung%20und%20Instandhaltung%20im%20Kommunalbereich>, accessed May 2017.

¹⁹ vgl. DENSO WAVE INCORPORATED, "Error Correction Feature," http://www.qrcode.com/en/about/error_correction.html, accessed May 2017.

Betriebstagebuch, erweiterten Unterlagen und dem Wartungs- und Instandhaltungsmenü navigiert werden. Alternativ kann von bereits bestehenden Applikationen oder Programmen, beispielsweise um einen VR- oder AR-Ansatz aus dem folgenden Kapitel 4.2 anzuführen, ebenfalls auf diese eindeutige Zuordnung der Aggregate oder Maschinen zurückgegriffen werden.

Im Betriebstagebuch, welches von den Betreibern meist sehr akribisch und möglichst umfangreich geführt wird, können Betriebsstunden, letzte Wartungsintervalle und weitere Kommentare über das Betriebsverhalten entnommen werden. Zu den erweiterten Unterlagen zählen die Bedienungsanleitungen, Zeichnungen, Stücklisten, Ersatzteillisten mit Bestellnummern sowie weitere Hinweise der Hersteller und des Betreibers bezüglich aller Betriebssicherheitsaspekte.

Das Untermenü für die Wartung und Instandhaltung bildet den Schwerpunkt des Konzeptes und nutzt die Vorzüge von Mensch-Maschine-Interaktion bestmöglich aus. In größeren Kommunalverbänden werden bei Erweiterungen und Aufschaltung von Bestandsbauwerken alleine bei den Pumpen unterschiedliche Baureihen unterschiedlicher Größen unterschiedlicher Hersteller angetroffen. Um den Werker entsprechend zu entlasten, können in diesem Menü step-by-step Anleitungen zum Beispiel für einen Ölwechsel detailliert dargestellt werden, die sich erfahrungsgemäß von Hersteller zu Hersteller unterscheiden. In diesem Beispiel würden dem *Werker 4.0* vor Ort zunächst alle Maßnahmen aufgezeigt werden, z.B. Hinweise zur Einhaltung der Sicherheitsvorschriften bei Außerbetriebnahme des entsprechenden Aggregats. Anschließend kann die Ölsorte, vorgesehene Ölmenge, sowie die Positionen der Einfüllstutzen grafisch angezeigt werden und die erneute Inbetriebnahme angeleitet werden.

Begleitet durch eine entsprechend zu entwickelnde App soll die Möglichkeit geschaffen werden, die fertiggestellten Arbeiten als *Feedback-Loop* mit in das übergreifende Informationssystem einzubinden. Die Zeit vor Ort kann direkt mit in das Zeiterfassungssystem im betriebswirtschaftlichen Bereich eingebracht werden und erspart im Nachhinein das Eintragen per Hand. Überwiegend werden die Mitarbeiter für alle Arbeiten im Kommunalbereich gemeindeübergreifend eingesetzt, werden jedoch ggf. separat nach den Leistungen für die jeweilige Gemeinde abgerechnet. Darüber hinaus kann über diese entsprechende App die Dokumentationsmöglichkeiten

für die Mitarbeiter gezielt erweitert werden. So können entsprechende Fotos der Maßnahmen direkt mit in das Betriebstagebuch eingebracht werden, ebenso wird die Möglichkeit genutzt Notizen in ein Textfeld oder über eine Spracheingabe zu hinterlegen.

Die Implementierung von vorrangig schnellen und einfachen eindeutigen Identifikationsmaßnahmen der Aggregate ist ein in der Praxis schnell umgesetztes Konzept. Es liefert darüber hinaus eine Grundlage für erweiterte Konzepte. Ausgewählte Konzeptansätze dieser Thesis nutzen diese code-basierten Identifikationsmaßnahmen zur Vereinfachung des Umgangs mit vielen unterschiedlichen Aggregaten und Betriebsmitteln für die Wartung und Instandhaltung. Dieses Konzept steigert daher durch ein vereinfachtes Identifikationssystem den Gesamtwirkungsgrad der mit Wartung und Instandhaltung verknüpften Arbeiten.

4.2. Enhanced Situational Awareness

Um die Werkergeneration 4.0 und ihr entsprechendes Umfeld zu beschreiben, wird in dieser Thesis der Begriff des *erweiterten Situationsbewusstseins*, der sogenannten „Enhanced Situational Awareness“ eingeführt. Ursprünglich und überwiegend im Bereich der Luftfahrt genutzt, verkörpert dieser Begriff jedoch wichtige Schwerpunkte im Umfeld Industrie 4.0.

In der Luftfahrtbranche wird der Begriff der Enhanced Situational Awareness häufig in Zusammenhang mit Designschwerpunkten des Cockpit-Layouts genannt. Ein modernes *Airliner*-Cockpit verkörpert dabei heutzutage mehr als die typischen Instrumente Höhenmesser, Geschwindigkeitsmesser und künstlicher Horizont. Diese Cockpits sind Darsteller von Unmengen von Informationen, die den Piloten zur rechten Zeit übersichtlich und aufbereitet zur Verfügung gestellt werden sollen und müssen.

Genau an dieser Stelle soll die Verknüpfung zu den Gedanken aus Industrie 4.0 hergestellt werden, wo es ebenfalls um massive Datenströme, sowie deren Aufbereitung und Darstellung geht. Aus Sicht eines Werkers der Generation 4.0 sind diese riesigen Datenströme gleichzeitig eine Be- und Entlastung, denn es gilt die zum aktuellen Zeitpunkt wichtigen und konstruktiven Daten aus dem großen Datenpool der wichtigen, jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nicht priorisierten, Daten herauszufiltern. Im Endeffekt sollen dem *Werker 4.0* die aufbereiteten Daten als Werkzeuge an die Hand gegeben werden. Dies wird in Abb. 14 visuell dargestellt und zeigt den Weg der Daten vom übergreifenden *Datenpool* bis zum *Werker 4.0*.

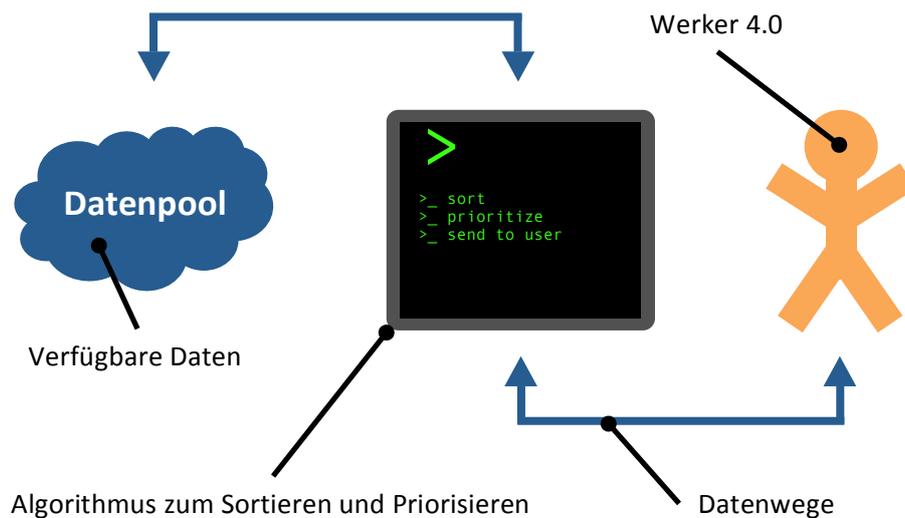


Abb. 14 Datenaufbereitung: In dieser Skizze ist schematisch verdeutlicht, wie ein noch weiter zu entwickelnder Algorithmus oder eine entsprechende Software-Applikation aus dem großen Datenpool der Massendigitalisierung eine situationsgerechte Auswahl an Daten für den Werker 4.0 bereitstellt. Diese Verbindungswege sind bidirektional, damit einerseits neue Dokumente mit entsprechenden Schlagwörtern versehen und in die Datenbank implementiert werden, andererseits selbstlernende Algorithmen implementiert werden können, die die Qualität der situationsgerechten Bereitstellung von Daten stetig verbessern.

Die Datenströme sind auch Konsequenz des häufig mit Industrie 4.0 verknüpften Megatrends der Digitalisierung. Daher ist es eine fundamentale Grundlage für diese Betrachtung, dass neben einer korrekten Sortierung und Priorisierung der Daten, die Erfassung der jeweiligen Situation oberste Priorität hat. Diese situationsgerechte Ausrüstung des Werkers mit Daten bildet den Schwerpunkt eines Konzepts um den Bereich der *Enhanced Situational Awareness*.

Durch die aktuellen Modernisierungsmaßnahmen sind Werker heutzutage bereits überwiegend mit einem Tablet ausgerüstet, welches in einem industrietypischen „*ruggedized*“ Design auch den fordernden Arbeitsumgebungen in Bauwerken standhält. Durch die Möglichkeit, auf diesen Endgeräten sowohl Zeichnungen, als auch Anleitungen, RI-Schemata, bidirektionale Eingriffe in den Betrieb, sowie Sicherheitsanweisungen darzustellen, sind sie ein solides Fundament für die Visualisierung einer vertieften Betrachtung.

4.2.1. Einbindung in VR- und AR-Szenarien

Um den Werker beim Wartungsvorgang zu unterstützen, münden die Aspekte der Enhanced Situational Awareness ultimativ im Bereich der *Virtual Reality* (virtuellen Realität) oder der *Augmented Reality* (erweiterten Realität). Dafür nutzt der *Werker 4.0* als Visualisierungshilfe beispielsweise eine AR-Brille, wie in Abb. 15 dargestellt.

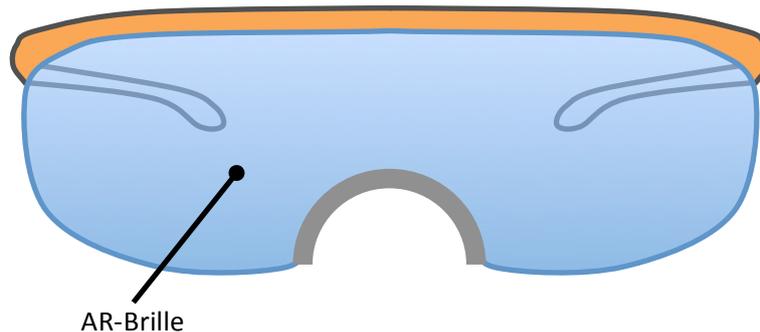


Abb. 15: Augmented Reality Brille: Eine Brille ausgestattet mit Sensoren zur eindeutigen Feststellung der Lage und Blickrichtung im Raum, sowie ein in das Glas eingelassenes interaktives Display, welches situationsgerechte Daten direkt in das Blickfeld des Nutzers einblendet. Diese Daten reichen von Indikatoren oder *Points of Interest (POI)* von Maschinen, bis hin zu Werkzeugempfehlungen bei Wartungsvorgängen.

Die VR-Anwendung kommt durch die voll virtuelle Visualisierung eher in vorbereitenden Maßnahmen zum Tragen, z.B. im Zuge eines Komponentenaustauschs einer Wartungsmaßnahme. Dort würde man sich mit Hilfe von VR-Eingabegeräten, z.B. 3D-Mäusen oder 3D-Handschuhen, frei um das dreidimensional gerenderte Objekt bewegen und den Wartungsvorgang virtuell durchgehen, ggf. auch mit Unterstützung durch dreidimensionale Explosionsdarstellungen bei tiefer liegenden oder generell schwer erreichbaren Baugruppen oder Komponenten.

Die AR-Anwendung hingegen hilft dem Werker vor Ort im fortgeführten Beispiel direkt beim Wartungsvorgang. Durch den Einsatz von AR-Brillen als erweiterte Grundausstattung des *Werkers 4.0*, haben die Nutzer die Möglichkeit das Aggregat teiltransparent darzustellen. So sind die verschiedenen Servicepunkte aus allen Perspektiven sichtbar – eine enorme Hilfestellung falls diese durch die Platzierung des Aggregats verdeckt oder schwer erreichbar sein sollte. Durch den Einsatz einer AR-

Brille können die Wartungs- und Montagearbeiten Schritt für Schritt virtuell eingeblendet und als Overlay auf das physische Objekt übertragen werden. Ergänzt wird diese Konzeptualisierung durch Einblendung von aufbereiteten Daten und Informationen, beispielsweise über das notwendige Werkzeug und korrespondierende Anzahl der benötigten Schrauben, wie in Abb. 16 als Blick durch die AR-Brille visualisiert dargestellt.

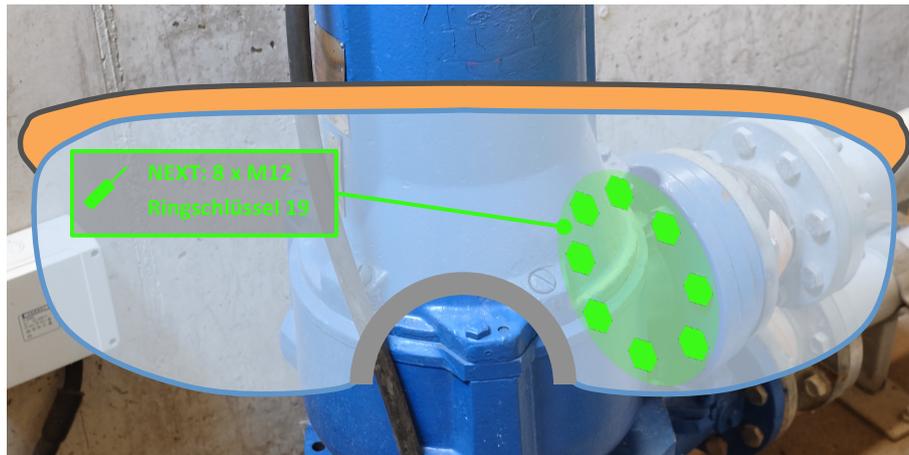


Abb. 16 Blick des Werkers 4.0 durch die AR-Brille: Ein simulierter Blick durch die Brille aus dem Szenario mit Einbindung von Augmented Reality. Dem Werker 4.0 werden die, für den Wartungsschritt notwendigen, Verbindungsschrauben angezeigt, sowie die passenden empfohlenen Werkzeuge. Durch das Overlay der Schraubenpositionen können auch Schrauben angezeigt werden, welche nicht im direkten Blickfeld des Werkers liegen, beispielsweise verdeckt durch die Rohrleitung. Durch den Einsatz von Head-Tracking kann sich der Werker beliebig durch den Raum bewegen, das Blickfeld und das zugehörige Overlay werden dynamisch angepasst.

Eine wichtige Voraussetzung für dieses Augmented Reality Szenario im Bauwerk sind platzierte Infrarot-LEDs, die wiederum dafür Sorgen, dass die AR-Brille durch ihre integrierten IR-Empfänger ihre Position und Betrachtungsrichtung eindeutig identifizieren kann. Nur so kann gewährleistet werden, dass das in der Brille projizierte Aggregat auch korrekt als Overlay dargestellt werden kann und auch die entsprechende Bewegungsfreiheit für den Werker erhalten bleibt. Geläufig ist der Begriff des „Head-Trackings“, welcher beschreibt, wie sich die natürliche Bewegung des Kopfes – und damit der AR-Brille – in der eingeblendete Darstellung widerspiegelt. Der Inhalt wird dabei dynamisch an die Gegebenheiten angepasst.

Die Sinnhaftigkeit dieses Systems im Kommunalbereich ist daher begründet, dass in großen Kommunalverbänden eine Vielzahl unterschiedlicher Aggregate verschiedener Klassifizierungen, Größen und Herstellern verbaut sind. Um den Werker diesbezüglich zu entlasten und da eine vollständige Kenntnis aller verbauten Aggregate nur schwer möglich ist, sind die Vorteile ggf. höher als im reinen Industriebereich, wo die Wahrscheinlichkeit ähnlicher oder gar baugleicher Aggregate innerhalb eines Betriebs als weitaus höher einzustufen ist.

Um die für die 3D-Darstellungen erforderlichen Daten nicht vollständig und permanent auf den Datenträgern der Ausrüstung des Werkers 4.0 speichern zu müssen, ist dieser Konzeptansatz gut mit dem QR-Code Konzept des vorhergehenden Kapitels 4.1 kombinierbar. Dem Szenario entsprechend wird der QR-Code durch das Tablet oder Smartphone gescannt und anschließend ein zugeschnittenes Datenpaket heruntergeladen. Damit dies auch in Gebieten geringer Netzabdeckung mit ausreichender Geschwindigkeit funktioniert, kann zusätzlich ein verschlüsselter Hotspot im Einsatzfahrzeug bereitgestellt werden. Dieser Ansatz wird in Kapitel 4.4 vertieft erläutert.

Auch außerhalb eines Reparaturszenarios können AR-Anwendungen mit implementiert werden, indem Sie bei Routinearbeiten, z.B. Ölwechseln, dem Nutzer entsprechende *Points of Interest* (POIs) der Maschine in das Sichtfeld einblenden.

Im Optimalfall können durch die Anwendung nach entsprechender Einführung in das VR- und AR-System, auch Tätigkeiten, die einer höheren, nach DIN EN 13306 definierten Instandhaltungsebene entsprechen, von Mitarbeitern ausgeführt werden, die sonst nicht über diese Qualifikation verfügen würden. Zeitgleich bietet die Nutzung des VR-Anteils eine realistische Grundlage für realitätsnahe Anteile einer entsprechenden Schulung, wo auch in Gruppenarbeit gute und effiziente Lösungen erarbeitet werden können.

Durch die Einblendung der situationsgerechten und aufbereiteten Daten direkt in das Sichtfeld des Werkers, schließt sich ebenfalls der nomenklatorische Kreis mit dem aus der Luftfahrt geprägten Begriff der *Enhanced Situational Awareness*. Dort wird diese Aufgabe durch das *Head-up-Display (HUD)*, einer als Projektionsfläche dienenden, häufig klappbaren Glasscheibe mit Projektor erfüllt, welche ebenfalls ausgewählte

Daten direkt in das Sichtfeld des Piloten einblendet. Diese Technik wird zum Zeitpunkt dieser Thesis bereits häufig von der Luftfahrt in den Automobilbereich übertragen und sorgt auch dort für ein erweitertes Situationsbewusstsein.

4.3. RFID an Werkzeug und Betriebsmitteln

Eines der entscheidenden Unterschiede zwischen einem Industriestandort und einem Zweckverband ist die Weitläufigkeit des zu betreuenden Geländes. Während Industriestandorte sehr kompakt bebaut werden, umfassen Zweckverbände Areale, die oft eine Fläche von 400km² überschreiten können.

Bei der vereinfachten Annahme kreisrunden Gebiets mit einem Radius von beispielsweise 12km, also einer Fläche von ca. 450km², ergeben sich, bei absolut zentral gelegenen Verwaltungszentralen und Werkstätten, entsprechend lange Wege zu den entlegenen Randgebieten. Gekoppelt mit einer reduzierten Mitarbeiterzahl – die Zusammenlegung und Gründung zu einem Zweckverband erfolgt häufig gekoppelt mit einer Reduzierung des Personals – hat eine effiziente und sauber geplante Einsatzsteuerung höchste Priorität.

Neben dem geregelten Wartungs- und Instandhaltungsplan, welcher die Grundlage für alle maschinentechnischen Arbeiten bildet, ist die Registrierung, Identifizierung und Fehlerbehebung von eingehenden Alarmmeldungen ein wesentlicher Aspekt im Tagesgeschehen. Je effizienter diese spontan auftretenden Fehler abgearbeitet werden können, umso weniger Verzug entsteht im übergeordneten „Fahrplan“ durch das Wartungs- und Instandhaltungsmanagement. Der Gravitätsgrad der Alarmmeldung reicht von kleinen Leckagen in den Rohrleitungssystemen bis hin zu Totalausfällen der Maschinerie und Bauwerke. Daher bedarf jedes Alarmereignis einer differenzierten Einzelfallbetrachtung.

Vor dem Hintergrund einer volldigitalisierten Maschinendiagnose, umfassenden Handbuchsammlung und der Kombination mit dem Wartungsmanagement können im ersten Schritt über eine Datenbank unter anderem die benötigten Werkzeuge und Betriebsmittel für jede Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahme verknüpft werden. Auf diese Weise kann jeder Maßnahme – im Wartungsfahrplan fest eingeplant oder als Alarmmeldung – ein kompletter Datensatz an Werkzeug- und Betriebsmittelbedarf zugeordnet werden.

Zur eindeutigen und schnellen Identifizierung werden Werkzeuge, Betriebsmittel und weiteres für den Betriebsalltag entscheidendes Zubehör mit RFID-Chips (*radio frequency identification*) ausgestattet, wie in Abb. 17 dargestellt. Die RFID-Technik

ermöglicht dabei ein berührungsloses und eindeutiges Identifizieren und kommt ohne zusätzliche Stromversorgung aus, da die Empfangenen Radiowellen den Chip mit Energie versorgen. Diese Form der *Near Field Communication* (Nahfeldkommunikation) ist zum Zeitpunkt der Thesis bereits weit im Alltag verbreitet, beispielsweise in der aktuellsten Form des Personalausweises der Bundesrepublik Deutschland.

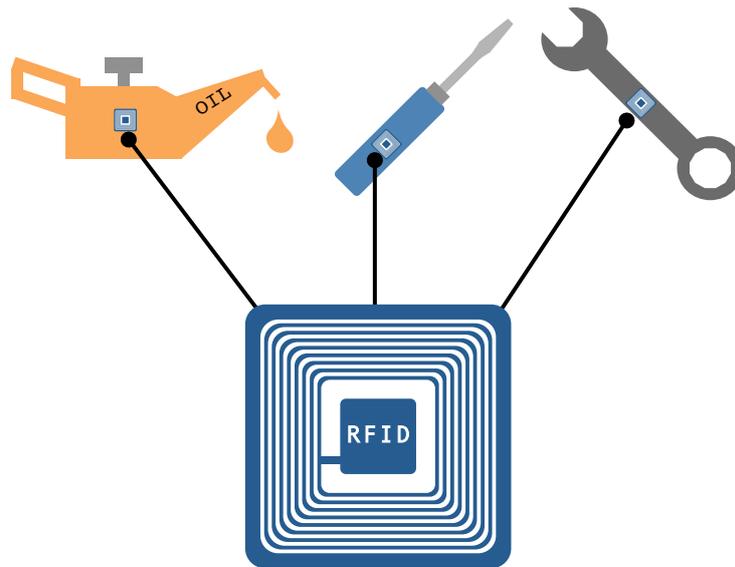


Abb. 17 Werkzeuge und Betriebsmittel mit RFID-Technologie: Die Ausstattung von Werkzeugen und Betriebsmitteln mit RFID-Chips ermöglicht eine eindeutige Identifikation des jeweiligen Betrachtungsgegenstands.

Alleinstellungsmerkmal dieses Konzeptes ist, neben den RFID-Chips an den Werkzeugen und Betriebsmitteln, der entsprechende RFID-Empfänger in den Einsatzfahrzeugen, der in Echtzeit das aktive Inventar des Einsatzfahrzeugs aufzeigt und dies grafisch auf einem Tablet des Werkers 4.0 oder installierten Borddisplays im Einsatzfahrzeug visualisiert anzeigt. Dieser Datenweg des Konzeptes ist in Abb. 18 vertieft erläutert.

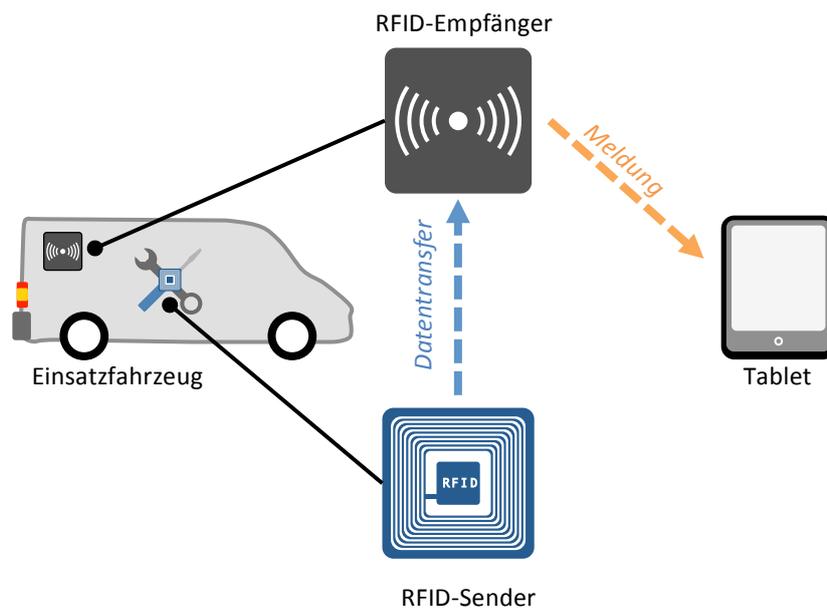


Abb. 18: RFID-Werkzeug im Praxisszenario: Das Einsatzfahrzeug ist mit einem RFID-Empfänger ausgerüstet und verfügt dadurch in dem vorliegenden Szenario über ein Echtzeit-Inventar, welches auf einem Tablet oder dem Borddisplay des Fahrzeugs angezeigt werden kann.

In dem in dieser Thesis beleuchteten Umfeld, findet dieses Prinzip besondere Anwendung im Alarmfall. In einem Szenario, wo planmäßige Wartungsarbeiten an Örtlichkeit #1 durch das Kommunalunternehmen durchgeführt werden und gleichzeitig eine kritische Alarmmeldung an Örtlichkeit #2 eintritt, kann es kurzfristig zu einer Prioritätenverschiebung der Tätigkeiten kommen. Nach dem Eingang der Alarmmeldung in der Zentrale sowie Auswertung und Formulierung der ersten Schritte zur Behebung des Problems, bekommt der *Werker 4.0* auf seinem Tablet oder Smartphone in Echtzeit angezeigt, ob er mit seinen Bordmitteln dazu imstande ist, das Problem zu beheben. In zweiter Instanz wird sofort überprüft, ob Ersatzteile notwendig sind, diese mit dem Lagerbestand abgeglichen und ggf. automatisiert bestellt. Dieses Vorgehen ersetzt die typischen Iterationsschritte wie in Abb. 19 grafisch dargestellt.

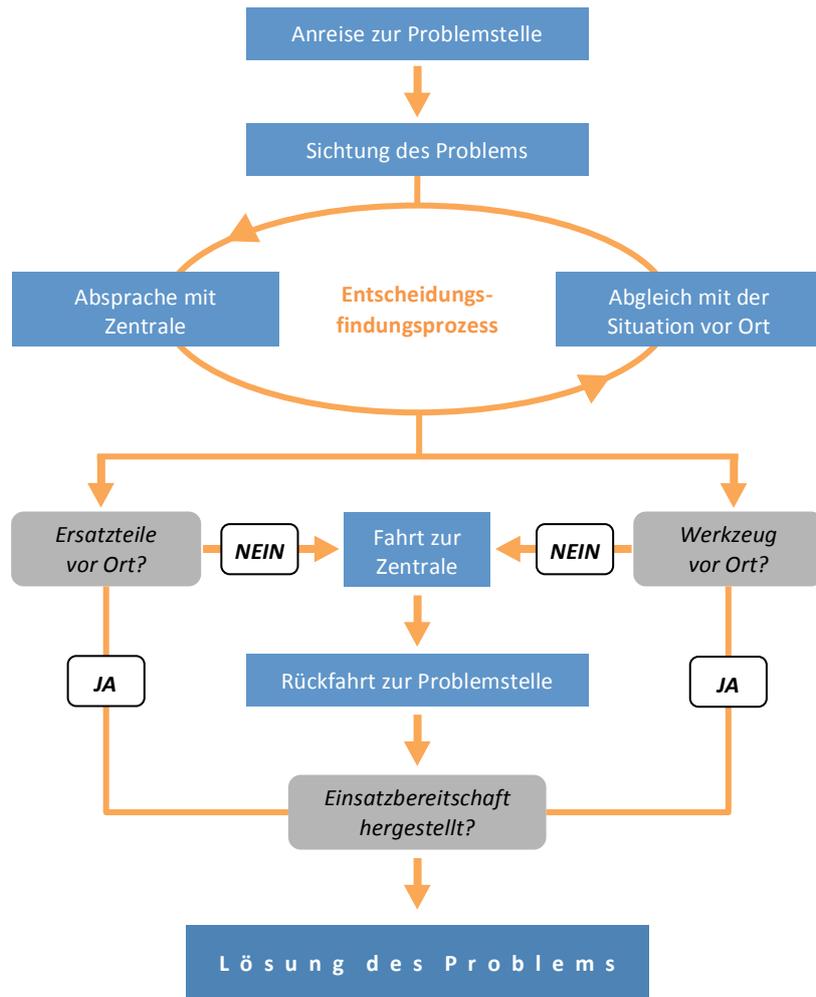


Abb. 19 Ablaufszenario ohne RFID-Einsatz: Es geht aus den vorliegenden Unterlagen und der Betriebserfahrung der LTS hervor, dass ohne den Einsatz der in diesem Konzept verankerten RFID-Technologie das dargestellte vereinfachte Ablaufschema als Normalfall vorliegt.

Durch die Vielfalt an zusätzlicher Information kann bereits in der Zentrale entschieden werden, welche Maßnahmen bei entsprechenden Alarmmeldungen ergriffen werden können. All diese Maßnahmen und Informationen tragen ebenfalls zu einer erhöhten *situational awareness*, einem erhöhten Situationsbewusstsein, wie im Kapitel 4.2 beschrieben, bei und ermöglichen den Beteiligten eine umfassendere Problemlösung und eine vereinfachte und sicherere Entscheidungsfindung.

Da in diesem Konzept lediglich die Anwesenheit des entsprechenden Werkzeugs oder Betriebsmittels überprüft, sowie deren Meldung versendet wird, ist im Bereich der IT-Sicherheit mit wenig Gefahren zu rechnen. Um dennoch eine höchstmögliche

Sicherheit zu erreichen, kann durch Hinterlegung einer unternehmensinternen Werkzeugnomenklatur auch dieser Kommunikationsweg „verschlüsselt“ werden. Mögliche Nomenklaturen können dabei von einer laufenden Nummer im einfachsten Fall bis hin zu vollkommen verschlüsselten Bezeichnungen für die einzelnen Werkzeugteile reichen.

Positiver Nebeneffekt dieses Konzepts für das Unternehmen ist die permanente Anwesenheitsüberwachung des Werkzeugs. Dadurch können teure Werkzeugverluste minimiert und im tatsächlichen Verlustfall der Vorfall bestmöglich dem entsprechenden Fahrzeug und Mitarbeiter zugeordnet werden. In den bereits beschriebenen Szenarien mit weit verstreuten Örtlichkeiten, bringt dies eine zusätzliche Sicherheit durch einen schnellen „Werkzeug-Check“ vor der Abreise zum nächsten Einsatz.

Ebenfalls sind in diesem Konzept Parallelen zu dem weiteren Industrie 4.0 Schwerpunkt der *Logistik 4.0* zu ziehen. Grundsätze einer intelligenten Lagerhaltung mit einer automatisierten Nachbestellung von Betriebsmitteln, z.B. Maschinenöl, können je nach Ausbaustufe der vorhandenen IT-Infrastruktur im Unternehmen schnell implementiert werden und liefern gute Ansatzpunkte für Erweiterungen der in dieser Thesis vorgestellten Konzeptansätze.

4.4. Erweiterte Bauwerksüberwachung und Hotspots

Eine Ergänzung durch netzwerkeingebundene Kameras in den Bauwerken würde im Vorfeld noch umfassendere Analysen ermöglichen, wie auch in Abb. 20 visualisiert. Durch die ergänzte visuelle Komponente kann dem Mitarbeiter in der Zentrale der Entscheidungshorizont gezielt erweitert werden, da sofort die eingehenden Alarme oder unrealistische Messwerte mit der Realität vor Ort visuell abgeglichen werden können. Für den Hergang des Alarmereignisses und ggf. zur nachträglichen Ursachenforschung werden diese Videoanalysen daueraufgezeichnet und archiviert. Während Netzwerkkameras kein Novum darstellen, so ist dennoch aufgrund der Betriebserfahrung der LIFETEC-SYSTEMS GmbH festzustellen, dass diese nicht zur Standardausstattung der betrachteten Bauwerke gehören. Aufgrund der heutzutage üblichen Netzwerk- und Internetgeschwindigkeiten und der leichten Implementierbarkeit werden diese Kameras zukünftig eine wichtige Rolle in der Fernüberwachung entlegener Bauwerke einnehmen.

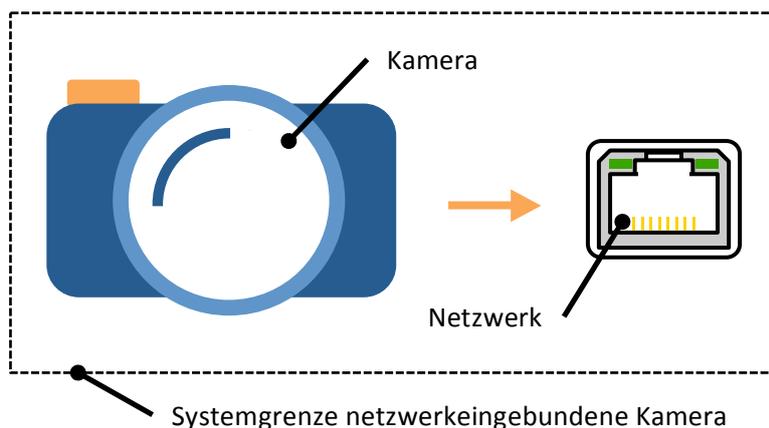


Abb. 20 Netzwerkeingebundene Kamera: Zum erhöhten Situationsbewusstsein können mehrere Kameras genutzt werden, um das Geschehen vor Ort kontinuierlich aufzuzeichnen. Je nach Lage des Bauwerks kann die Datenübertragung per Internet oder Mobilfunk erfolgen.

Um die Datenmenge bei einer Daueraufzeichnung jedoch möglichst gering zu halten, kann im Normalbetrieb die Aufzeichnung auf wenige Bilder pro Sekunde, beispielsweise 1 fps bis 5 fps (frames per second) gedrosselt werden, im Alarmereignis fährt das System die Aufzeichnungsqualität auf die üblichen Standards 24 fps oder 30 fps hoch.

Um auch eine in der Vergangenheit nicht unübliche Langzeitvideoaufzeichnung auf den Standard einer aktuellen vierten Technikgeneration zu heben, bedarf es nur weniger Schritte. Durch die stetig ausgebaute Netzabdeckung im Bereich des Mobilfunks, sind bei den zur Zeit dieser Thesis weit verbreiteten Netzstandards UMTS 3G (Universal Mobile Telecommunications System), HSPA 3.5G (High Speed Packet Access) und LTE/LTE-Advanced 4G (Long-Term Evolution) problemlos Livestreams oder ein Stream von gespeicherten Videoausschnitten der kritischen Geschehnisse vor Ort möglich. Der Ausbau der möglichen Übertragungsgeschwindigkeiten²⁰ ist in Abb. 21 als Grafik dargestellt.

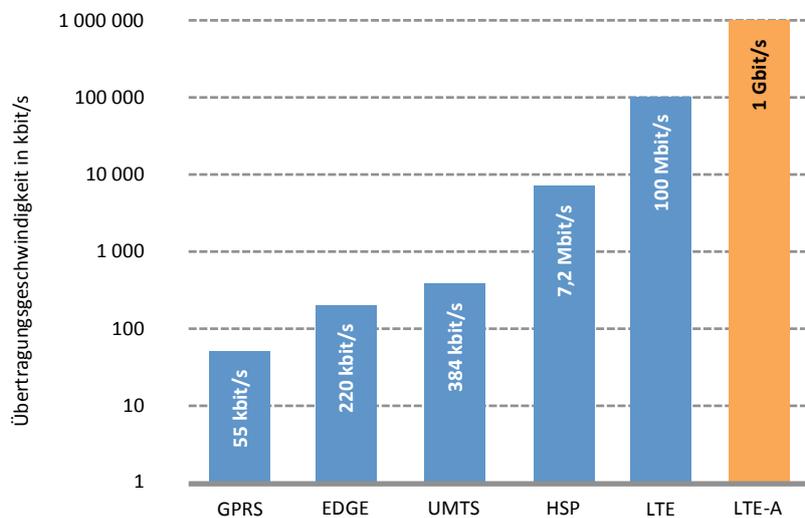


Abb. 21 Mobilfunkübertragungsgeschwindigkeiten: Dieses skizzierte Diagramm zeigt qualitativ den logarithmischen Anstieg der Übertragungsgeschwindigkeiten des Mobilfunknetzes. Der Netzstandard LTE-A ist zum Zeitpunkt dieser Thesis in Deutschland nicht verfügbar, zeigt jedoch auf, welche Standards zukünftig vorherrschen werden. Diese Übertragungsgeschwindigkeiten ermöglichen den problemlosen Zugriff auch auf große Datenpakete unabhängig vom Standort.

Nicht jedes Gebiet verfügt über den flächendeckenden Ausbau der neuesten Mobilfunkstandards. Diese werden meist vorrangig in Großstädten und Ballungszentren eingeführt, ehe sie auf den ländlichen Bereich übertragen werden. Um den Einsatzfahrzeugen eine ausreichende Bandbreite auch bei geringerer

²⁰ vgl. CHIP Digital GmbH, "Die Unterschiede von GPRS, EDGE, UMTS und LTE," 2016, http://praxistipps.chip.de/die-unterschiede-von-gprs-edge-umts-lte_10079, accessed May 2017.

Netzabdeckung zu ermöglichen, können auf den Fahrzeugen stärkere Antennen verbaut werden, die im Duplex- oder Triplex-Modus laufen. Dadurch werden zwei oder drei Mobilfunkverbindungen parallel geschaltet und ermöglichen bei geringen Synchronisationsverlusten eine dennoch akzeptable Datenrate, die das zwei- bzw. dreifache einer Einzelverbindung bereitstellt. Diese stabile Verbindung zum WWW ist Grundlage, um sofort vor Ort einsatzbereit und mit hoher Bandbreite online zu sein. Dafür liefert das fest installierte Modul im Einsatzfahrzeug einen lokalen und verschlüsselten Hotspot für die elektronische Ausstattung der *Werker 4.0*, wie in Abb. 22 schematisch dargestellt. Die Zeit der Anreise zur Problemstelle kann bereits genutzt werden, um begleitende Dokumente, Betriebsanleitungen, etc. auf den lokalen Geräten zwischen zu speichern und auf Abruf bereitzustellen. Auf diese Weise werden unnötige Wartezeiten durch Downloads und eventuell suboptimalen Mobilfunkempfang auf ein Minimum reduziert.

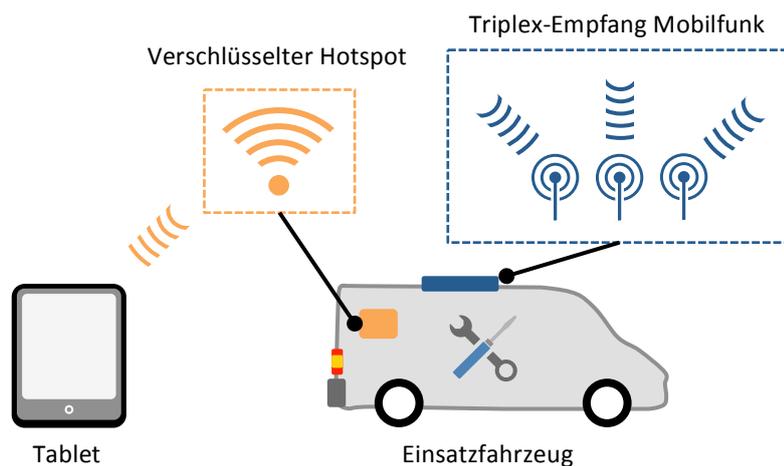


Abb. 22 Verschlüsselter Hotspot durch das Einsatzfahrzeug: Mit Hilfe von Duplex- oder Triplex-Empfangsmodulen kann auch in Bereichen unzureichender Netzabdeckung eine konstante Datenrate ermöglicht werden. Diese werden dem Werker 4.0 durch einen verschlüsselten Hotspot im Einsatzfahrzeug zur Verfügung gestellt.

Für den Fall eines Abrufs der QR-Codes aus Kapitel 4.1 dieser Thesis im Inneren eines Bauwerks, hilft dieser verschlüsselte lokale Hotspot schnell die entsprechenden notwendigen Daten auf die Endgeräte des *Werkers 4.0* zu laden. Hierzu zählen beispielsweise situationsgerecht benötigte Augmented Reality Daten über ein gewähltes Aggregat wie im Konzept aus Kapitel 4.2 beschrieben.

5. Praxiskonzept Pumpendiagnose

Der Konzeptteil der Thesis, welcher schon während der Erstellung durch die Firma LIFETEC-SYSTEMS in die Praxis umgesetzt wird, behandelt als Zielaggregat der Optimierung die Abwasserpumpe. Pumpen gehören generell in Zweckverbänden und anderen Formen von Ver- und Entsorgungsunternehmen zu den Großverbrauchern. Durch die vielen Stellglieder in der Pumpenauslegung und die sehr empfindliche Reaktion von Pumpaggregaten auf verschiedene Last- und Betriebsszenarien, sind demnach im Bereich der Pumpen die meisten Optimierungspotentiale zu erwarten. Dennoch ist bei einer umfassenden und holistischen Annäherung an Optimierungsmaßnahmen sowohl die Konzeption als auch die Fahr- und Regelweise des Gesamtsystems zu betrachten.

In einem typischen Bauwerk eines Zweckverbands, zum Beispiel einem Abwasserpumpwerk, findet sich häufig als maschinentechnische Ausrüstung eine Kombination von Pumpen, Armaturen, Rohrleitungssystem und der dazugehörigen elektrotechnischen Steuerungs- und Leittechnik.

Dabei sind die Pumpen empfindliche Aggregate und reagieren auf Fahrweisen außerhalb ihres Auslegungspunktes mit Laufunruhe, sowie gesenkter Lebensdauererwartung der Komponenten. Charakteristisches und individuelles Merkmal jeder Pumpe ist die zugehörige Kennlinie jedes Aggregats. Die Kennlinie beschreibt das Verhältnis von Durchflussstrom zum anliegenden Widerstand, ausgedrückt als Förderhöhe. Jede Pumpe wird werksseitig mit Angaben zu einem optimalen Betriebspunkt geliefert. Der Betriebspunkt ist ein Punkt auf der Kennlinie und beschreibt daher ein Wertepaar von Durchfluss und Förderhöhe. Mögliche Auswirkungen von teillastigen (weniger Durchfluss) sowie überlastigen (mehr Durchfluss) Fahrweisen sind in Abb. 23 schematisch dargestellt. Auf die Wichtigkeit der Kenntnis über den aktuellen Betriebspunkt der Pumpe wird im Kapitel 5.3.3 vertieft eingegangen.

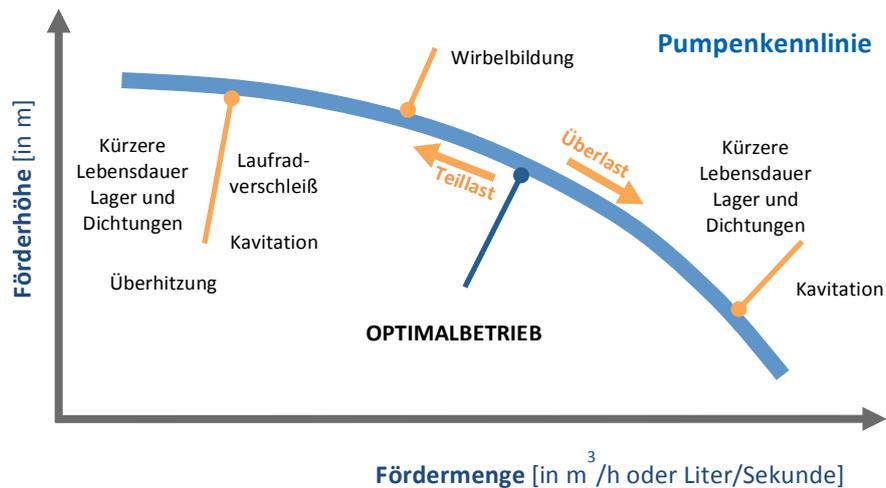


Abb. 23 Pumpenkennlinie: Die Pumpenkennlinie zeigt den individuellen Verlauf zwischen Fördermenge und Förderhöhe für jedes Pumpaggregat an. Der Betriebspunkt ist ein Punkt auf der Kennlinie und befindet sich häufig im Bereich, der mit „Optimalbetrieb“ gekennzeichnet ist.

5.1. Optimierungsebenen

Die grundsätzliche Betrachtung der verschiedenen, teils hochkomplexen mechanischen und elektronischen Zusammenhänge kommt zu der Erkenntnis, dass das höchste Optimierungspotential auf der Systemebene zu finden ist. In dieser Thesis wird dabei zwischen der Komponentenebene, der Modulebene und der Systemebene unterschieden.

Auf der Komponentenebene sind nur vereinzelte Verbesserungsmöglichkeiten gegeben, denn es kann generell durch die sehr engen Systemgrenzen nur an den Einzelwirkungsgraden optimiert werden. Dies ist in Abb. 24 entsprechend visualisiert. Ein typisches Beispiel einer Optimierung auf Komponentenebene wäre der Ersatz eines abgängigen Motors durch ein Modell gleicher technischer Daten, aber einer höheren Energieeffizienzklasse.

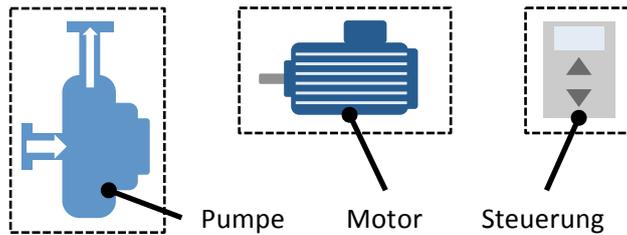


Abb. 24 Komponentenebene: Auf dieser Ebene sind die Systemgrenzen eng gewählt. Beispielhaft sind hier im dargestellten Beispiel eine Pumpe, ein Motor und ein Steuergerät bzw. Frequenzumrichter abgebildet.

Auf der Modulebene, wie in Abb. 25 dargestellt, wird bereits das Zusammenspiel von mehreren Komponenten – analog zum Verhältnis zwischen Bauteil und Baugruppe – betrachtet und optimiert. Auf dieser Optimierungsebene kann auf ein möglichst gut abgestimmtes Zusammenspiel zwischen den Komponenten geachtet werden. Ein Beispiel wäre eine situationsgerechte Anfahrautomatik des Frequenzumrichters für die Kombination aus Motor, Pumpe und dem Pumpmedium. Durch die vergrößerte Systemgrenze, ist auf Modulebene auch eine aussagekräftigere Auslegungsüberprüfung möglich.

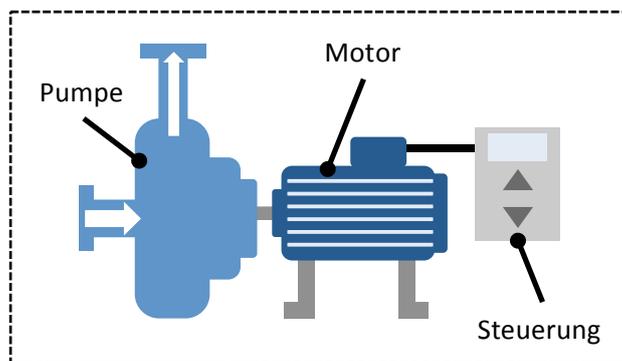


Abb. 25 Modulebene: Auf dieser Ebene wird die Systemgrenze weiträumiger gezogen. So kann auf dieser Ebene bereits auf das Zusammenspiel von Komponenten geachtet werden.

Die Systemebene umfasst neben der Modulebene weitere Peripherieaggregate und erweitert dadurch die Systemgrenze der Optimierungsbetrachtung erheblich. Dieser

Zusammenhang ist in Abb. 26 dargestellt. Die Einbeziehung von Leitsystem, Armaturen, sowie der Rohrleitung ermöglichen Optimierungen im Bereich der bedarfsgesteuerten Fahrweise mit geeigneten Regelstrategien, sowie die Einbeziehung von Strömungswiderständen, Dimensionierungen von Rohrleitungen, Armaturen und Systemkomponenten. Die meisten Stellglieder für einen möglichst optimalen Gesamtwirkungsgrad sind daher auf Systemebene zu finden.

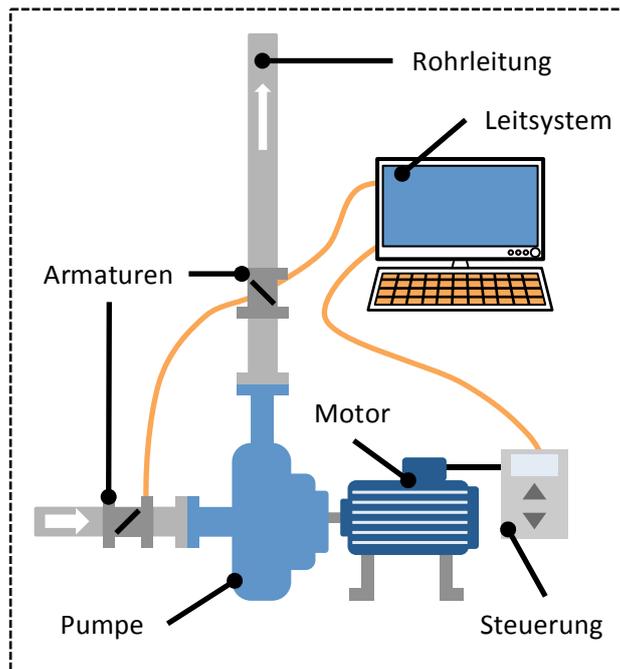


Abb. 26 Systemebene: Die umfassendste Betrachtungsebene mit der Berücksichtigung von zusätzlichen Aspekten der Armaturen, Rohrleitungen sowie des Leitsystems. Diese komplexe Betrachtungsebene hat sowohl die meisten Stellglieder als auch die Aussicht auf größtmögliches Optimierungspotential.

5.2. Installationsmöglichkeiten

Um eine umfassende Aussage über den Zustand einer Pumpe zu machen, sollen ausgewählte Pumpen mit Sensoren ausgestattet werden, deren Messdaten wiederum durch entsprechende Algorithmen ausgewertet werden. Um den Aufwand bei der Installation und auch eventueller Deinstallation nach einer Pumpenmessung möglichst gering zu halten, sollte – wenn vorhanden – möglichst viel der bestehenden Elektro- und Leittechnik zugunsten einer zügigen Lösung herangezogen werden.

Generell wird bei Messungen maschinentechnischer Geräte zwischen verschiedenen Installationslösungen entschieden. Ist eine Permanentüberwachung gewünscht, kann eine – jedoch meist aufwändige – Einbindung in das vorhandene Leitsystem erfolgen. Der Firma LIFETEC-SYSTEMS GmbH liegen Unterlagen vor, welche bestätigen, dass der programmiertechnische Aufwand einer Einbindung, zusätzlich zu den notwendigen Hardwarekomponenten, die Investitionskosten der Sensoren, Datenlogger und Messsysteme um ein vielfaches übersteigen. Zugunsten einer wirtschaftlich interessanten Alternative wird daher eine sogenannte „Insellösung“, wie in Abb. 27 schematisch dargestellt, bevorzugt.

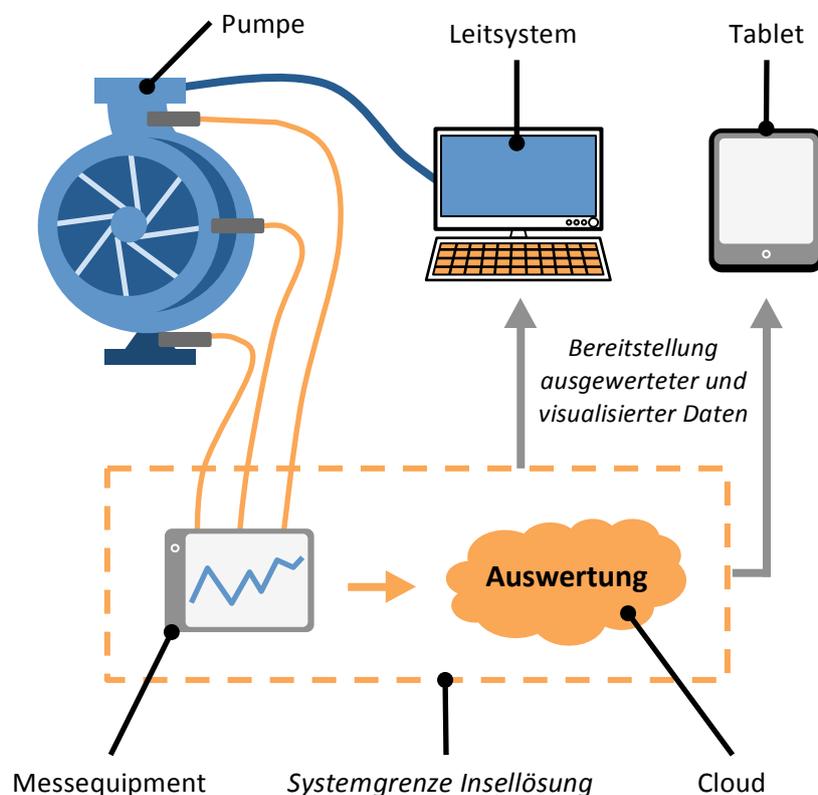


Abb. 27 Messsystem als Insellösung: Die Systemgrenze der Insellösung greift nicht in das vorhandene System der Steuer- und Leitebene ein. Daher entfallen aufwändige Implementierungsleistungen. Die Auswertung erfolgt cloudbasiert auf einem externen Server und kann in ausgewerteter und visualisierter Form auf den Endgeräten bereitgestellt werden.

Durch die klare Systemgrenze wird ein eigenes System als „Insel“ an den maschinentechnischen Komponenten installiert und umgeht das vorhandene Leit- und Steuersystem der Anlage vollständig. Dabei gleicht diese Insellösung einer Minimalanforderung an ein Cyber-Physisches System durch Vorhandensein einer Pumpe als Physisches System. Die Cloud liefert in diesem Szenario sowohl den Datenspeicher als auch einen Teil der Verarbeitungseinheit. Die verschlüsselte Verbindung an das Internet ist das entsprechende Kommunikationsinterface. Die Zusammenstellung und Entwicklung eines Konzepts für ein Messsystem für die LIFETEC-SYSTEMS GmbH wird im Kapitel 5 beschrieben, welches den Bogen von der Theorie in die umsetzbare Praxis schlägt.

5.3. Theoretische Grundlagen zu den Pumpenmessungen

Im Folgenden werden einige grundlegenden Messgrößen, sowie deren notwendiges Messequipment zur Bestimmung von Betriebszuständen von Pumpen vertieft erläutert.

5.3.1. Druckmessung

Die simpelste und günstigste Art der Pumpenüberwachung stellt seit Jahren die Druckmessung mit einem Manometer dar, welche als eine im Verhältnis zu den heute überwiegend computerisierten Messmitteln eine recht primitive Methode verkörpert. Diese ist in Abb. 28 schematisch skizziert. Nichtsdestotrotz ist ein Manometer ein unverzichtbares und simples Hilfsmittel um den Pumpenbetrieb zu überwachen.



Abb. 28 Druckmessung: Ein Manometer – analog oder digital – zeigt den vorherrschenden Druck an der Messstelle an. Digitale Druckmesser können diese Daten direkt in das Leitsystem einspeisen.

Das moderne Pendant zum klassisch analogen Manometer stellen elektronische Druckgeber dar. Diese können ihre Messwerte direkt in Diagnose- und Leitsysteme einspeisen und geben auch von Fern Aufschluss über den Pumpenbetrieb.

5.3.2. Durchflussmessung

Eine Durchflussmessung, schematisch in Abb. 29 visualisiert, kann nicht nur Indizien über den aktiven Pumpenbetrieb liefern, sondern auch über die notwendigen Daten, um die charakteristischen Pumpen- und Anlagenkennlinien erstellen und deuten zu können.



Abb. 29 Durchflussmessung: Die einfachste Art den Durchfluss sichtbar zu machen, ist durch ein rotierendes Schaufelrad, welches in Fließrichtung montiert wird. In der Praxis werden überwiegend MIDs verwendet, die auch entsprechende Signale und quantitative Werte in das Leitsystem einbinden können.

Durchflussmessgeräte sind in verschiedenen Bauarten erhältlich und unterscheiden sich nach verschiedenen Messprinzipien. Am weitesten verbreitet im Bauwerksbereich sind magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte (MID), welche auf der Leitfähigkeit des Messmediums beruhen und in das Rohrleitungssystem eingebaut werden. MIDs benötigen eine möglichst laminare Strömung für einen engen Messtoleranzbereich. Daher ist auf den Einbau einer Beruhigungsstrecke zu achten, die häufig mit dem fünffachen Nenndurchmesser bemessen ist.

Entscheidender Punkt für den Einsatz einer Durchflussmessung ist die Aussage, welche die Messung über den tatsächlichen Betriebspunkt der Pumpe liefert.

5.3.3. Betriebspunktmessung und –anzeige

Obwohl eine Betriebspunktmessung nicht standardmäßig zusammen mit den weiteren in diesem Kapitel erläuterten Messverfahren genannt wird, ist dieses Messmittel vorteilhaft für das erweiterte Situationsbewusstsein des Werkers 4.0. Da der Betriebspunkt den genauen Betriebszustand der Pumpe wiedergeben kann, sind bereits Geräte auf dem Markt, die exakt zu diesem Zweck entwickelt worden sind. Als Beispiel ist hier der PumpMeter der Firma KSB zu nennen, welcher den Betriebspunkt ohne die sonst übliche Durchflussmessung bestimmen kann. Eine schematische Skizze einer Betriebspunktmessung ist in Abb. 30 dargestellt.

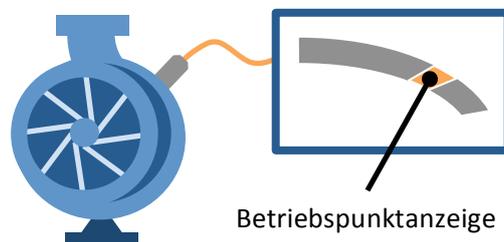


Abb. 30 Betriebspunktmessung: Um das Betriebsverhalten der Pumpe auf einen Blick zu erfassen, bedient man sich der Betriebspunktanzeige. Dort wird sichtbar, welche Wertepaarung von Fördermenge und Förderhöhe zum Betrachtungszeitpunkt anliegen und ob die Pumpe in Teil- oder Überlastbereichen läuft.

Für die Anzeige und Analyse des Betriebspunkts durch den PumpMeter sind lediglich zwei Drucksensoren für die Saug- und Druckseite der Pumpe erforderlich. Über einen im Messgerät hinterlegten Algorithmus wird, über den Differenzdruck der Drucksensoren und die zuvor durch proprietäre Software einprogrammierte Kennlinie der Pumpe, der Durchfluss sowie der Betriebspunkt errechnet und grafisch angezeigt.

5.3.4. Schwingungsmessung

Erhöhte Schwingungsmesswerte weisen auf einen ggf. vorherrschenden Fehler der Pumpe hin. Eine beispielhafte Abbildung einer Schwingungsmessung ist in Abb. 31

dargestellt. Eine einfache Schwingungsmessungen kann mit kompakten Handgeräten durchgeführt werden. Diese geben Effektivwerte, sowie Minima und Maxima z.B. in der verbreiteten Einheit für Geschwindigkeiten im Schwingungsbereich [mm/s] an.



Abb. 31 Schwingungsmessung: Über Beschleunigungssensoren kann das Schwingungsverhalten der Pumpen analysiert werden. Während im einfacheren Szenario lediglich Effektivwerte mit den herstellerseitigen erlaubten Maxima abgeglichen werden, wird bei komplexen Schwingungsuntersuchungen das Frequenzspektrum auf bekannte Eigenschwingungen untersucht, die wiederum Aufschluss über Fehler geben können.

Vertiefte Untersuchungen der Schwingungen können auch Aussagen über Lagerzustandswerte liefern. Sowohl bei Überlastungen, Montage- sowie Ausrichtungsfehlern, aber auch durch den altersbedingten Verschleiß, können die Laufflächen zum Schwingen angeregt werden. Diese Messungen liefern Beschleunigungswerte in $[mm/s^2]$ oder als Vielfaches der Erdbeschleunigung [g].

Neben den o.g. mobilen Verfahren für Schwingungsmessungen können auch Langzeitüberwachungen implementiert werden. Dafür wird für eine stationäre Überwachung die entsprechende Sensorik direkt an den Messstellen der Pumpe angebracht. Bei kritischen Werten kann über die Schwinggeschwindigkeiten und Schwingbeschleunigungen hinaus auch eine Frequenzanalyse weiteren Aufschluss über etwaige Störungsfälle liefern. Voraussetzung für diese Analysen ist jedoch eine stationäre Montage von Sensoren, sowie die Anschaffung einer komplexeren Geräteklasse. Moderne Geräte unterscheiden direkt zwischen verschiedenen Störungsarten, beispielsweise Kavitation, Unwucht oder Antriebswellenausrichtung.

5.4. Entwicklung des Messkonzepts

Generell muss bei der Wahl der Implementierung eines Messsystems bedacht werden, ob dies eine permanente Installation oder eine flexible Implementierung mit der Option auf eine nachträgliche Festinstallation darstellen soll. Permanente Installationen kommen aus Kostengründen häufig nur für größere und teurere Aggregate in Frage, die einer permanenten Überwachung bedürfen, wie beispielsweise Pumpen aus der Chemie- oder Pharmagroßindustrie.

Um belastbare Aussagen über den Zustand einer Pumpe im Betrieb zu machen, ist eine minimale Betrachtungsdauer von vier bis acht Wochen anzustreben. Dies ist besonders für das Messkonzept der LIFETEC-SYSTEMS GmbH interessant, welche diese Messungen als Dienstleistungen anbieten wollen.

Im Allgemeinen ist das Implementieren und Aufschalten nachträglich verbauter Technik mit viel Zeit, Kosten und Aufwand verbunden. Der Firma LIFETEC-SYSTEMS liegen Zahlen vor, aus denen Implementierungskosten den Wert der Aggregate um bis das Fünffache übersteigen. Gründe für diese hohen Implementationskosten liegen darin, dass die Kabelkanäle wenig Kapazitäten und Reserven besitzen, um zusätzliche Kabel zu verlegen. Überwiegend sind die Pumpwerke, welche die Grundlage dieser Analyse bilden, Tiefbauwerke mit Tiefen von bis zu 30m. Die nachträgliche Installation von weiteren Kabelkanälen ist daher nur mit beträchtlichem Aufwand möglich. Softwareseitig ist auch der Begriff einer „*offenen Schnittstelle*“ nicht zwangsläufig mit einer einfachen Integration gleichzusetzen. Der programmiertechnische Aufwand um eine bidirektionale und sichere Verbindung zwischen Diagnosesystem und vorhandenem Leitsystem herzustellen ist sehr zeit- und daher auch sehr kostenintensiv.

Eine permanente Maschinenüberwachung- und Diagnose ist zum aktuellen Stand dieser Thesis und auf Grundlage von Dokumentationen und Erfahrungswerten der Firma LTS im *Kommunalbereich* sehr wenig verbreitet. Mögliche Gründe dafür sind beispielsweise die auslaufende Generation von Werkern und Pumpenmeistern, die es gewohnt sind mit einem Stethoskop die Pumpen abzuhören. Diese Werker wurden in den letzten Jahrzehnten permanent mit den o.g. Restriktionen und hohen Kosten für hard- und softwareseitige Implementierungen konfrontiert. Ohne entsprechende

Weiterbildungsmaßnahmen und Kenntnisse über den aktuellen state-of-the-art im Bereich der IT-Technik sind diese Werker nicht in der Lage das volle Potential dieser Diagnosemaßnahmen zu ergreifen, wie auch im Kapitel 3.3 im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion bereits vertieft erläutert.

Aufgrund der in Kapitel 5.2 bereits erläuterten Vorteile, wurde sich seitens der LTS für die Konzeption einer Insellösung entschieden. Ziel eines Konzepts mit Insellösung sollte demnach eine möglichst simpel gestaltete, schnell zu installierende aber zeitgleich auch sichere Lösung sein. Eine Lösung mit einem Datenlogger vor Ort könnte über einen festzulegenden repräsentativen Zeitraum alle Daten aufnehmen und speichern. Durch die Direktanbindung von Speichermedien können hohe Abfrageraten realisiert werden. Anschließend würde der Datenlogger ausgelesen, die Daten abgefragt und im Anschluss analysiert und aufbereitet zur Verfügung gestellt. Diese Abfragen könnten beispielsweise wöchentlich durch den Pumpenbetreiber erfolgen oder alternativ einmal monatlich durch einen externen Dienstleister, der seltener Zugang zu den Pumpen hat.

Eine auf aktuellem state-of-the-art in der Kommunikationstechnologie verankerte alternative wäre die Permanentüberwachung mit Live-Auswertung über eine bestehende Internetverbindung. Diese würde in einer cloudbasierten Umgebung eine Auswertung der Daten vornehmen, sowie diese aufbereitet grafisch darstellen und in einer Datenbank ablegen. Auf diese Weise entfallen die Abfragen eines Datenloggers zugunsten eines durchgängigen *Live-Feeds* des Messsystems.

Durch die vollständige Umgehung des Leitsystems und die Auswertung und Speicherung in einer cloudbasierten Umgebung, kann die aufwändige Programmierung in das jeweilige Leitsystem vollkommen entfallen. Ein weiterer Vorteil dieser Insellösung ist, dass die Daten jederzeit im Nachhinein über eine offene Schnittstelle bei Bedarf eingebunden werden können. Interessant für Projekte, in denen ein mobiles Messsystem im Nachhinein vollkommen integriert werden soll.

Der Datenweg des Konzepts bedarf durch die baulichen Restriktionen einer gesonderten Betrachtung. Das Messkonzept dieser Thesis nutzt die zum Stand der Thesis weit ausgebauten Mobilfunkstandards zur Datenübertragung der Messparameter zur cloudbasierten Speicherung und Auswertung. Dabei wird der

Datenweg in zwei Teilstrecken unterteilt: Einmal die Strecke von der Pumpe zum Sender/Empfänger am Bauwerk und einmal die Strecke vom Bauwerk zur Cloud.

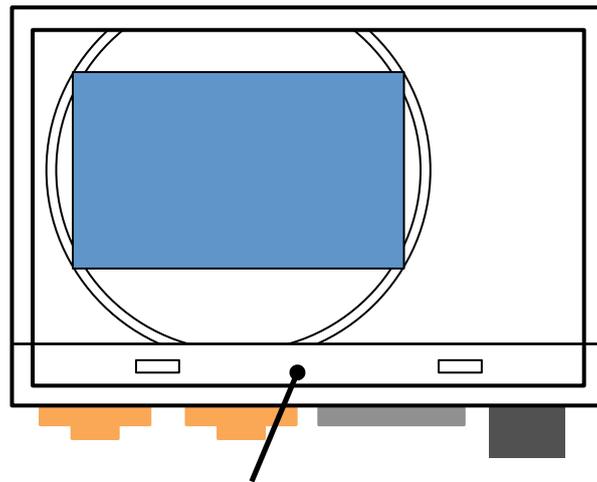
Während der Datenweg vom Bauwerk zur Cloud über aktuelle Mobilfunkstandards von der Umsetzung nur weniger Bauteile bedarf, ist für die Datenverbindung innerhalb des Bauwerks wegen der hohen Diversität der Bauwerke ggf. mit Komplikationen zu rechnen. Es ist denkbar, die Datenwege innerhalb des Bauwerks – falls vorhanden – über die bestehende Internetverbindung zu übertragen. Falls dies über einen öffentlichen Internetzugang erfolgt und nicht über eine interne Intranetverbindung, sind Ver- und Entschlüsselungspunkte von hoher Wichtigkeit.

Betrachtungen der Betriebssicherheit innerhalb dieses Konzepts ergeben bei Datenwegen über das Internet oder das Mobilnetz stets ein Risiko der Sabotage oder dem Datenklau. Die Version mit Datenlogger ist hiervon weniger betroffen, da die ausgelesenen Daten auf Geräten genutzt werden können, die nicht zwangsläufig mit dem Internet verbunden sind. Auch im Falle einer Internetverbindung sind die Daten demselben Risiko ausgesetzt wie in einem Szenario ohne das Messsystem, die Datensicherheit ist in diesem Fall Aufgabe der gesicherten Kommunikationsebene des Betreibers.

In beiden Szenarien ist auch seitens der Übertragung über Mobilfunknetze ebenfalls eine Verschlüsselung erforderlich, damit die Daten sicher übertragen werden können.

5.4.1. Weitere Rahmenbedingungen des Messkonzepts

Um für die Firma LTS ein geeignetes Messkonzept aufzubauen, sollen neben effektiven Messgeräten auch der Kostenfaktor berücksichtigt werden. Daher wurde sich für eine Betriebspunktanzeige entschieden, welche auch über eine hinterlegte Kennlinie weitere Daten bereitstellen kann. Die Wahl des primären Messgeräts fiel daher auf das bereits erwähnte PumpMeter Modul der Firma KSB, wie auch in Abb. 32 grafisch dargestellt. Zukünftig soll das Messequipment der Firma durch ein Schwingungsmessgerät ergänzt werden.



PumpMeter Pumpendiagnosegerät

Abb. 32 PumpMeter Diagnosegerät: Die Wahl des Diagnosegeräts für die Anzeige des effektiven Betriebspunkts der Pumpen fiel auf ein PumpMeter Modul des Herstellers KSB. Dieses Messgerät ist in der Lage, durch Programmierung der Pumpenkennlinie und zwei Sensoren auf Saug- und Druckseite sowohl den Betriebspunkt als auch einen errechneten Durchsatz anzuzeigen.

Um dieses Messkonzept einem ersten Messdurchgang zu unterziehen, wurden bei einem Kunden in einem kleinen Abwasserpumpwerk zwei Pumpen ausgewählt. Im Normalbetrieb werden dort drei Pumpen je nach anfallender Abwassermenge variabel geschaltet. Sukzessive werden diese Pumpen bedingt durch Alterung und Verschleiß ersetzt. Bislang wurde dies bereits bei einer Pumpe umgesetzt. Somit ergibt sich die Möglichkeit, eine Messung an der alten Pumpe, als auch am vorgesehenen Ersatzaggregat durchzuführen. Durch diese Gegenüberstellung kann ggf. auch die Auslegung und die Fahrweise der Pumpen überprüft werden.

Prinzipiell sind beide Pumpen von ähnlicher Bauart. Sie unterscheiden sich lediglich marginal in den technischen Daten, der Kennlinie und dem Antrieb – die neuere Version ist direktgetrieben, die ältere Pumpe ist über einen Riemen angetrieben.

5.4.2. Vorbereitende Arbeiten

Zur Arbeitsvorbereitung für die Messung mit dem PumpMeter gehört vorrangig das Sammeln und Aufbereiten der erforderlichen Daten, sowie die Programmierung des Geräts über eine proprietäre Software.

In dieser Phase wurde laut Herstelleranweisungen²¹ die Software PACTware auf einem Notebook mit Treibern und Modulerkennung installiert. Anschließend wurde über eine Kombination von Schnittstellenadaptern, wie in Abb. 33 dargestellt, eine funktionierende bidirektionale Verbindung zwischen PC (Notebook) und PumpMeter hergestellt.

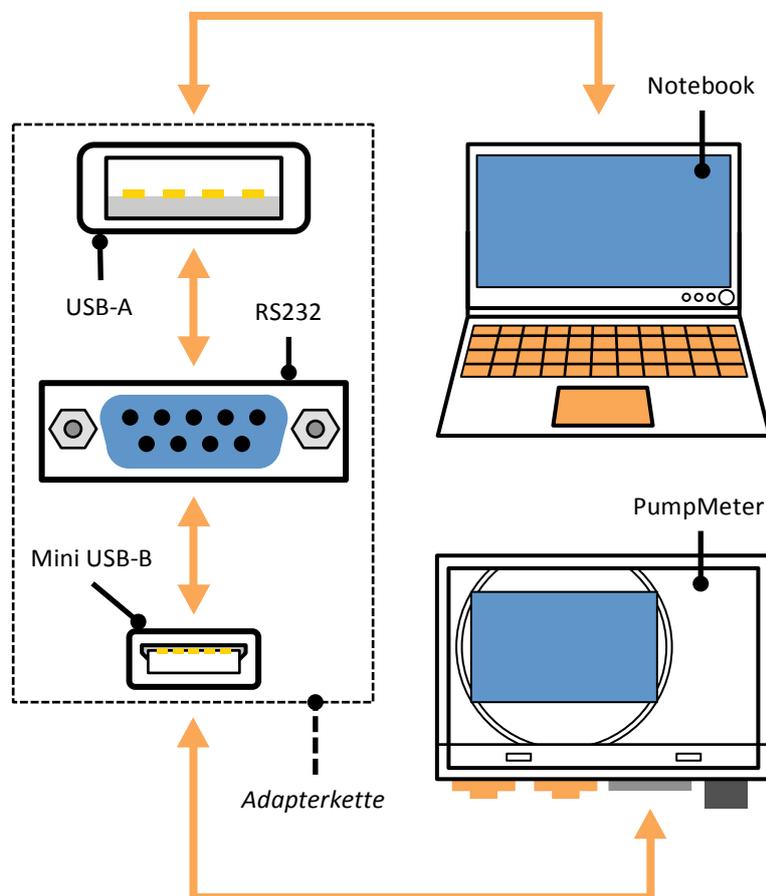


Abb. 33 Verbindung PumpMeter mit Laptop: Durch die Nutzung von in der Industrie verbreiteten RS232-Steckern und -Protokollen, über die der genutzte Laptop nicht nativ verfügte, musste eine Adapterkette genutzt werden, um den PumpMeter zu programmieren.

²¹ vgl. KSB Aktiengesellschaft, "Software: Sie suchen die passende Software für Ihre Automationstechnik?," 2017, https://www.ksb.com/ksb-de/Produkte_Leistungen/automation/software/, accessed May 2017.

Der Umweg über die RS232-Schnittstelle war unumgänglich, da die Programmierung über die bestimmten Ports der RS232 erfolgte. Dieser Anschluss gehörte bei früheren Laptops und PCs zur Standardausstattung und wird in der Industrie nach wie vor häufig für Updates und zu Programmierzwecken genutzt. Da der genutzte Laptop nicht über diese Schnittstelle verfügte, wurde diese Adapterkette genutzt. Der Versuch mit einem Direktkabel von USB-A nach Mini USB-B blieb erfolglos. Um das RS232-Interface mit dem Notebook zu nutzen, welches nativ nicht über diese Schnittstelle verfügte, musste nach Anbringen des ersten Adapters USB-A auf RS232 ein separater Treiber installiert werden, der die RS232-Schnittstelle und -Protokolle emuliert.

Das Interface innerhalb der Software PACTware ist sehr umfangreich und es sind vielfältige Einstellungsmöglichkeiten vorhanden. Nach Sichtung der erforderlichen Einstellungen, wurden die zu programmierenden Parameter mit den zur Verfügung stehenden technischen Daten entsprechend aufbereitet.

Ein Alleinstellungsmerkmal des PumpMeters ist, dass über den Differenzdruck zwischen Saug- und Druckseite in Zusammenhang mit der hinterlegten Pumpenkennlinie der Durchfluss bestimmt werden kann. Für eine höchstmögliche Genauigkeit ist daher eine möglichst exakte Hinterlegung der Kennlinie erforderlich.

Weitere Schritte beinhalten die Wahl der Sensoren. In dem vorliegenden Messszenario sind keine Werte von mehr als ± 2 bar zu erwarten. Daher wurde auf der Saugseite ein Sensor mit einem Messbereich von -1bar bis +3bar verwendet, auf der Druckseite fiel die Wahl auf einen Sensor mit Messbereich von -1bar bis +10bar.

5.4.3. Programmierung des Messgeräts

Die individuelle Pumpenkennlinie wird über die PACTware Software modelliert. Dabei sind insgesamt sieben Tripel von Förderstrom [m^3/h], Förderhöhe [m] sowie Leistung [kW] aus dem herstellerseitigen Kennliniendiagramm zu entnehmen. Beide Kurven der betrachteten Aggregate sind im Anhang zu finden.

Bei relativ gerade verlaufenden Kennlinien wie im vorliegenden Fall, können die Abschnitte auf der Abszisse in gleichmäßigen Abständen gewählt werden. Weist die Kennlinie hingegen charakteristische Abschnitte auf, z.B. Plateaus oder Extrempunkte, sollten sich die Paarungen in diesem Bereich konzentrieren, ähnlich einem Polynom welches anhand der charakteristischen Punkte modelliert werden soll. Die vom Hersteller angegebene optimale Förderhöhe wird ebenfalls als Datenpunkt mit eingepflegt. Als grafisches Beispiel wird dieses Vorgehen anhand der vorliegenden technischen Daten von Pumpe #1 in Abb. 34 erläutert.

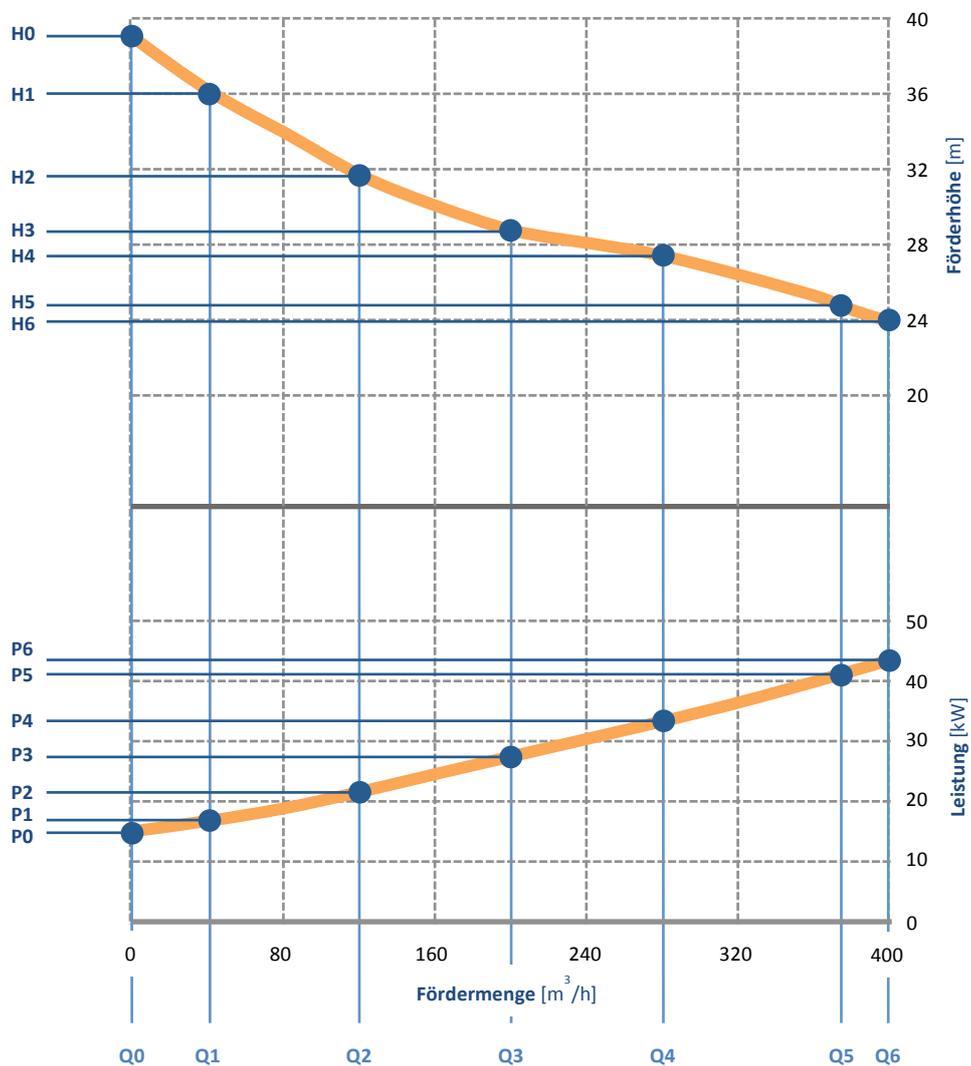


Abb. 34: Diagrammauswertung und Tripelfindung: Anhand der skizzierten Leistungsdaten von Pumpe #1 wird das Prozedere der Tripelfindung der Werte von Durchflussmenge, Förderhöhe und Leistung verdeutlicht. Der erste Schritt beinhaltet die Wahl der Abschnitte nach der Fördermenge, danach werden die entsprechenden Punkte auf dem Diagramm der Förderhöhe und Leistung abgelesen.

Da die Abszisse überwiegend auch im Bereich der Motorwellenleistung samt Skalierung dupliziert wird oder häufig Wellenleistung als zusätzliche Ordinate in das Kennliniendiagramm eingefügt wird, werden dieselben Abschnitte auf der Abszisse genutzt, um auch sieben charakteristische Punkte zwischen Förderstrom [m^3/h] und Wellenleistung [kW] zu bestimmen und in die Software zu übertragen.

Insgesamt wurden in der PACTware Software pro PumpMeter die zuvor bestimmten sieben Tripel aus Durchfluss, Leistung und Förderhöhe, sowie die vom Hersteller gelieferte Optimale Förderhöhe als Basis für den optimalen Betriebspunkt programmiert. Um die Unterschiede zwischen den Pumpenparametern besser sichtbar zu machen, sind in Tab. 1 gleiche Einstellungen zwischen Pumpe #1 und Pumpe #3 wie gewohnt in schwarzer Schrift und unterschiedliche Parameter farblich in blau gekennzeichnet.

	Pumpe #1 (alt)	Pumpe #3 (neu)
Durchmesser saugseitig D1	0,200 m	0,150 m
Durchmesser druckseitig D2	0,150 m	0,150 m
Durchmesser Messstelle druckseitig D2x	0,175 m	0,150 m
Delta z Messstellen	0,700 m	0,700 m
Saugdruck 4mA	- 1,000 bar	- 1,000 bar
Saugdruck 20mA	3,000 bar	3,000 bar
Enddruck 4mA	- 1,000 bar	- 1,000 bar
Enddruck 20mA	10,000 bar	10,000 bar
Umrichter Freq. 0V	0 Hz	0 Hz
Umrichter Freq. 10V	50Hz	50Hz
Typ Analogausgang	4...20 mA	4...20 mA
Förderstrom Q0	0,000 m ³ /h	0,000 m ³ /h
Förderstrom Q1	40,000 m ³ /h	40,000 m ³ /h
Förderstrom Q2	120,000 m ³ /h	120,000 m ³ /h
Förderstrom Q3	200,000 m ³ /h	200,000 m ³ /h
Förderstrom Q4	280,000 m ³ /h	280,000 m ³ /h
Förderstrom Q5	380,000 m ³ /h	380,000 m ³ /h
Förderstrom Q6	400,000 m ³ /h	400,000 m ³ /h
Förderhöhe H0	38,200 m	40,500 m
Förderhöhe H1	36,200 m	38,400 m
Förderhöhe H2	31,800 m	33,600 m
Förderhöhe H3	28,400 m	29,400 m
Förderhöhe H4	27,700 m	25,000 m
Förderhöhe H5	24,400 m	21,200 m
Förderhöhe H6	24,000 m	19,000 m
Förderhöhe Optimal	29,600 m	27,800 m
Leistung P0	15,000 kW	19,500 kW
Leistung P1	17,000 kW	21,000 kW
Leistung P2	21,000 kW	24,500 kW
Leistung P3	27,000 kW	29,500 kW
Leistung P4	33,000 kW	34,000 kW
Leistung P5	40,500 kW	40,000 kW
Leistung P6	42,500 kW	42,500 kW

Tab. 1 Ausgewählte Programmierparameter PumpMeter: Diese Parameter wurden im vorliegenden Szenario über die Software PACTware in den PumpMeter programmiert. Durch die hohe Ähnlichkeit der älteren Pumpe #1 und der neueren Pumpe #3 sind sich unterscheidende Werte farblich gekennzeichnet.

Um noch weiter in die Tiefe der Programmiererebenen zu gelangen, bedarf es nach Herstellerangaben einem USB-Key der Firma KSB²². Dieser Key ist laut Hersteller nur für Mitarbeiter der Firma KSB gedacht und steht daher externen Dienstleistern nicht zur Verfügung. Alle weiteren Werte innerhalb der Software, die für die vorhandenen freigeschalteten Programmiererebene als variabel deklariert sind, wurden nicht verändert sondern in den empfohlenen Einstellungen des Herstellers belassen.

5.4.4. Installation der Hardware

Die Positionierung der Sensoren stellte eine weitere Herausforderung dar. Häufig verfügen Pumpen dieser Größe über keinen expliziten Zugang für eine saugseitige Druckmessung. Daher wurde mit dem Betreiber abgesprochen, dass in den Deckel der Wartungskappe auf der Saugseite ein entsprechendes Gewinde geschnitten werden sollte. Die Sensoren verfügen werksseitig über ein M8-Gewinde, sowie etliche Adapter auf gängige Maße. Im Falle der Wartungskappe wurde direkt ein M8-Gewinde in die Kappe geschnitten und die Verschraubung des Drucksensors mit Dichtband sowie Teflon-Gel abgedichtet.

Auf der Druckseite ist werksseitig an der Pumpe ein Manometer verbaut. Dieser Ausgang wird über mehrere Adapterstücke genutzt, um den Drucksensor zu verbauen. Dafür wurde ein Kugelhahn montiert, der über eine GEKA-Kupplung verfügt. Um diese vorhandenen Anschlüsse zu nutzen, war es erforderlich, über eine Verkettung von Adapterstücken den Sensor mit M8-Gewinde über einen Adapter M8 auf 3/8 Zoll, sowie einen Adapter von 3/8 Zoll auf 1/2 Zoll und abschließend einen Adapter von 1/2 Zoll auf die GEKA-Kupplung zu installieren, wie in Abb. 35 grafisch verdeutlicht.

²² vgl. Ibid.

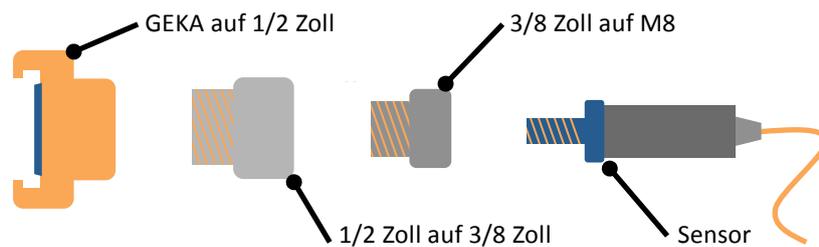


Abb. 35 Adapterkette bei der Sensorinstallation: Auf der Druckseite konnte die vorhandene Bohrung für das alte Manometer genutzt werden. Vom Betreiber wurde dort ein Kugelhahn mit GEKA-Kupplung montiert. Anschließend wurde der Sensor, welcher über ein M8-Gewinde verfügt, über drei Adapter auf diesem Kugelhahn montiert.

Beide Maßnahmen zur Sensorinstallation an Saug- und Druckseite waren sowohl bei der älteren Pumpe als auch bei der bereits installierten neueren Version identisch. Da bei der Wahl der Pumpen die äußeren Pumpen des Pumpentripels ausgewählt wurden, mussten sowohl die Sensor- als auch die Stromkabel sorgfältig verlegt werden, um den Vibrationen im Betrieb standzuhalten. Eine weitere Darstellung der Installation vor Ort ist in Form von Fotos im Anhang enthalten.

Da für die Montage der Sensorik sowohl Manometer, als auch Wartungsdeckel abmontiert werden mussten, wurden alle Pumpen am Hauptschalter des Schaltschranks außer Betrieb genommen. Auf diese Weise konnte sich in dem vorgeschalteten Speicherbecken mit einem Volumen von über 3.000m³ genug Abwasser sammeln, um mehrere Testläufe bei der Inbetriebnahme mit Sensoren zu ermöglichen. Am Installationstag herrschte Trockenwetter, dementsprechend war ohne die rechtzeitige Aufstauung nicht mit genug Wasser für die Tests zu rechnen.

Als letzte Maßnahme wurden die PumpMeter Module installiert. Sie verfügen über eine L-Halterung, mit der Sie direkt an der Pumpe installiert werden können. Dies stellt den Auslieferungszustand dar, falls eine Pumpe der Marke KSB ab Werk mit diesem Messinstrument ausgerüstet ist. Die Halterung mit Bohrung wird wie eine Unterlegscheibe an der Druckseite der Pumpe montiert. Da es sich in diesem Fall jedoch um keine KSB-Pumpe, sondern um ein Aggregat der Firma Herborner Pumpen handelt, passen die Borlochgrößen nicht zusammen und es wurde sich für eine

Anbringung an den Kabelkanälen auf Pumpenhöhe im Bauwerk entschieden, da auf Restriktionen bezüglich der verfügbaren Kabellängen geachtet werden musste.

Der Anschluss der Strom- und Sensorkabel an das PumpMeter Modul, welches zuvor programmiert wurde und nach diesem Schritt autark ist, ist im Prinzip eine *Plug&Play*-Lösung und funktionierte direkt nach Anschluss an das Stromnetz einwandfrei.

Die Frequenzumrichter der Pumpen, welche im überirdischen Teil des Pumpwerks in Schaltschränken untergebracht sind, verfügen über nach außen verlegte Potentiometer, durch welche die Pumpendrehzahl der individuellen Pumpen stufenlos geregelt werden kann. Auf diese Weise konnte jedes Aggregat mit der Messinstallation einzeln auf Funktion überprüft werden. Zeitgleich konnten durch die Betriebspunktanzeige des Messgeräts sofort überprüft werden, in welchem Lastbereich die Pumpen laufen. Dies ist insofern interessant, da der direkte Vergleich zwischen der älteren Motor-Pumpe-Kombination, sowie der nachfolgenden Generation gezogen werden kann.

In Abstimmung mit dem Betreiber vor Ort wurde sich für die Langzeitmessung darauf geeinigt, dass obwohl nur zwei Pumpen mit den Sensoren ausgerüstet worden waren, alle drei Pumpen weiterhin im Regelbetrieb laufen sollten, um ein möglichst realistisches Bild der effektiven Pumpenlaufzeiten und -belastungen zu erhalten. Das Leitsystem hätte durch seine programmierte Notfallschaltung alternativ die mittlere Pumpe #2 außer Betrieb genommen und die anfallende Abwassermenge wäre auf die Pumpen #1 und #3 verteilt worden. Dies hätte jedoch zu keinen korrelierbaren Ergebnissen geführt, da im Regelbetrieb die Pumpen abwechselnd und sukzessive geschaltet werden, um auf ähnliche Betriebsstunden zu kommen und den Verschleiß besser einschätzen zu können.

5.5. Ergebnisse nach Inbetriebnahme

Direkt nach der Inbetriebnahme des Messequipments wurde primär die Betriebspunktanzeige des PumpMeters genutzt. Hierfür wurden beide Pumpen mit dem Potentiometer des Frequenzumrichters auf 90% Leistung eingeregelt. Dies entspricht dem typischen Wert, welcher auch durch das Leitsystem in der

Automatikschaltung vorgegeben wird. Durch die Modellierung der individuellen Kennlinien und deren Abgleich mit den anfallenden Werten aus den Drucksensoren war unmittelbar grafisch auf der Anzeigeeinheit ersichtlich, dass die Pumpen bei gleicher Leistungseinstellung in unterschiedlichen Betriebspunkten laufen.

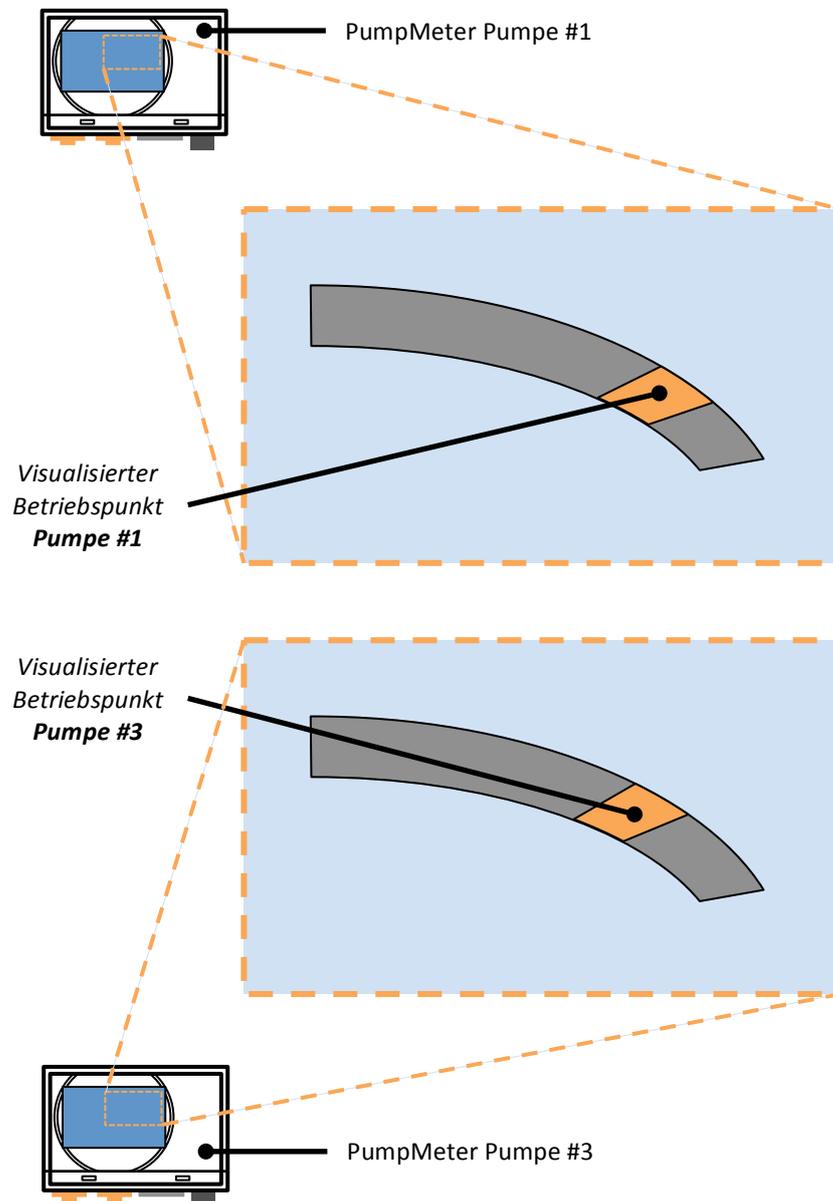


Abb. 36 Ergebnisse der Betriebspunktanzeige: Erste Ergebnisse unmittelbar nach Inbetriebnahme zeigten, dass beide Pumpen nicht im Optimum laufen, jedoch bereits eine Besserung von der älteren Pumpe #1 zu Pumpe #3 sichtbar ist.

Seitens der Firma LIFETEC-SYSTEMS wurde nach Absprache mit dem Betreiber ein repräsentativer Messzeitraum von acht Wochen gewählt. Daher ist die Sammlung und Erfassung der geloggtten Daten sowie deren Auswertung kein Bestandteil dieser Thesis.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Erarbeitung der Konzepte ist vorrangig die Rolle des Menschen in zukünftigen Arbeitsszenarien aufgefallen und in den Vordergrund der Betrachtung gerückt. Entgegen der häufigen Annahme, dass der Mensch zukünftig aufgrund der Massendigitalisierung und dem vermehrten Einsatz von Robotik und Automation eine untergeordnete Rolle spielt, wird in diesen Konzepten für den Kommunalbereich deutlich, dass der Mensch nicht ohne Weiteres ersetzt werden kann. Vielmehr sollte der technologische Fortschritt genutzt werden, um dem zukünftigen Werker, dem *Werker 4.0*, umfangreiche Hilfsmittel zur Seite zu stellen. Durch eine entsprechende Entlastung und Optimierung kann der Wirkungsgrad eines *Werkers 4.0* gezielt gesteigert werden. Dabei ist die Schnittstelle zwischen dem Mensch und der Technik, die Mensch-Maschine-Interaktion, eine wichtige Kernaufgabe für die Zukunft. Denn ohne entsprechende Ausrüstung, Schulung und Weiterbildung kann auch die neuste technische Ausrüstung nicht vollständig genutzt werden.

Auch in einem Alarm-Szenario kann auf die Entscheidungsfähigkeit und auch das Betriebswissen des Mitarbeiters im Kommunalbereich im Prinzip nicht verzichtet werden. Es kann dem Mitarbeiter jedoch durch einen erweiterten Informationshorizont eine bessere Entscheidungsgrundlage geliefert werden. An dieser Stelle wird der Begriff des erweiterten Situationsbewusstseins, der *Enhanced Situational Awareness* nochmals aufgegriffen. Zeitgleich fällt die Gefahr Informationsverlusts auf, wenn Informationen von den älteren Werkergenerationen nicht auf die nachfolgenden Generationen übertragen werden können.

Bezüglich der in dieser Thesis vertieften Konzeptansätze ist als „gemeinsamer Nenner“ der Oberbegriff *Industrie 4.0* sehr gut durch die Interkompatibilität der Konzepte verdeutlicht. Die Konzepte bauen dabei teilweise aufeinander auf oder ergänzen sich entsprechend gut. Diese vereinfachte Form eines „Proof of Concept“ kann der Skizze in Abb. 37 entnommen werden.

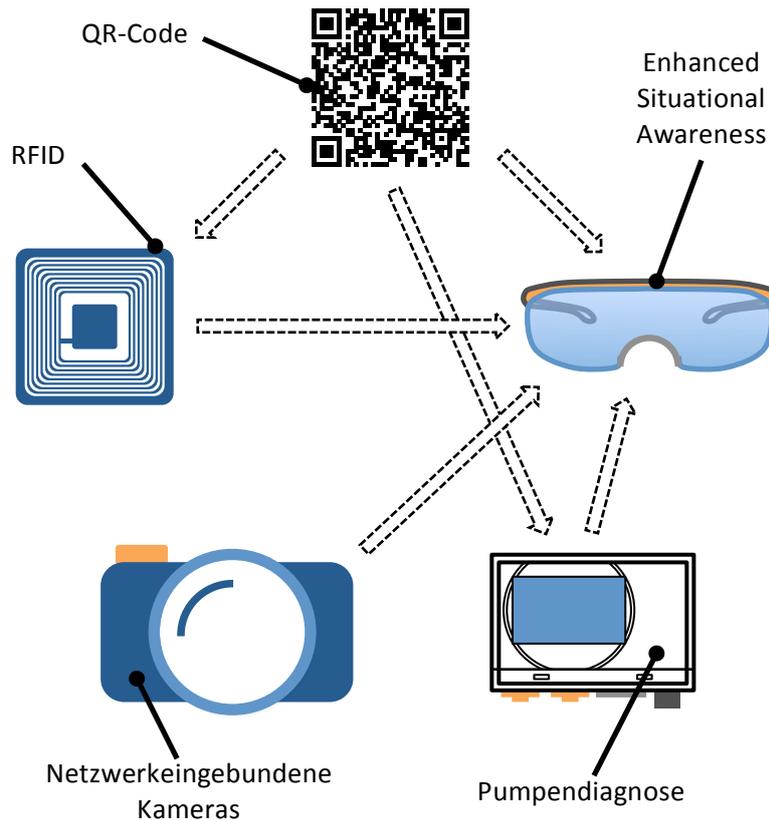


Abb. 37: Zusammenfassende Skizze aller Konzepte: In dieser Skizze sind alle Konzepte, sowie ihre Verbindungen untereinander dargestellt. Während der QR-Code viele Grundlagen für andere Konzepte liefert, laufen viele Verbindungen im Konzept Enhanced Situational Awareness zusammen - ein weiteres Indiz für die Wichtigkeit der Rolle des Menschen in zukünftigen Industrie- und Kommunalprozessen.

Es ist zu erkennen, dass all diese Konzepte im Punkt der *Enhanced Situational Awareness* zusammenlaufen bzw. eine Grundlage für dieses Konzept schaffen. Dies stellt erneut die Wichtigkeit des Werkers der Zukunft in den Vordergrund. Die Lieferung von situationsgerechten, aufbereiteten Daten – besonders in Wartungs- und Instandhaltungsszenarien – an den *Werker 4.0* stellt daher in zukünftigen Szenarien laut dieser Thesis einen besonderen Schwerpunkt dar.

Des weiteren zeigen die Transferkonzepte, welche aus dem Komplex Industrie 4.0 im Laufe dieser Thesis auf den Kommunalbereich übertragen wurden, ein hohes Potential. Der Kommunalbereich liefert eine solide Grundlage für zukünftige und

hochtechnologisierte Projekte aus diesem Bereich. Diese Annahme wurde während der Bearbeitung voll bestätigt.

Die Konzeption sowie die Inbetriebnahme der Messgeräte zur Pumpendiagnose für die LIFETEC-SYSTEMS GmbH lieferte sofort Aufschluss über den errechneten Betriebspunkt der Pumpen. Beide betrachteten Pumpe liefen nicht optimal, wobei eine Besserung von der alten zur neuen Generation zu verzeichnen ist. Eine vertiefte Analyse der Pumpendiagnose wird nach Ende der Thesis erfolgen, wenn die Diagnosegeräte ausgelesen und ausgewertet werden. Zusammen mit den Daten eines Schwingungsmessgeräts wird ein komplettiertes Gesamtbild über den Zustand der Pumpen erreicht werden können.

Glossar

<i>Airliner</i>	Verkehrsflugzeug.
<i>Augmented Reality</i>	Erweiterte Realität.
<i>Badewannenkurve</i>	Typische Diagrammkurve aus dem Bereich der Komponentenlebensdauer. Ausfallraten an den Randbereichen sind höher durch Fehler bei der Montage (linker Rand) oder beim Erreichen der Endlebensdauer der Komponenten (rechter Rand). Durch den relativ flachen Verlauf in der Kurvenmitte verkörpert dieser Kurvenverlauf insgesamt das Bild einer Badewanne.
<i>Big Data</i>	Massenhafte Ansammlung von Daten.
<i>Cloud</i>	ein über das Internet nutzbarer Datenspeicher auf externen Servern, welcher die Grundlage für Zwischenspeicherungen sowie Fernauswertungen liefert.
<i>Condition Monitoring</i>	Überwachung des Zustands einer Betrachtungseinheit durch Sensorik und Auswertungsalgorithmen.
<i>Datenlogger</i>	Aufzeichnungseinheit für Daten eines Messsystems.
<i>Datenpool</i>	Große gesammelte Datenmenge, welche dem Betrachter zur Verfügung steht.
<i>digital native</i>	Generation von Menschen, welche mit dem Internet als allgegenwärtig und selbstverständlich aufgewachsen sind.
<i>Enhanced Situational Awareness</i>	Die Erweiterung des Situationsbewusstseins des Menschen durch eine Bereitstellung aufbereiteter Daten.
<i>Erweitertes Situationsbewusstsein</i>	siehe Enhanced Situational Awareness.
<i>Feedback-Loop</i>	Daten, auf welche zurückgegriffen wird, werden anschließend wieder in revidierter Fassung in das System eingepflegt.
<i>Head Up Display (HUD)</i>	Display zum Einblenden von Informationen. Begriff ursprünglich aus der Luftfahrt.

<i>Head-Tracking</i>	Technologie, welche durch im Raum positionierte Sensoren die Bewegung des menschlichen Kopfes übersetzt und somit die Möglichkeit bietet, das Sichtfeld dynamisch der Blickrichtung anzupassen.
<i>Honeynet</i>	Zusammenschluss von mehreren Honeypots zur vertieften Analyse der Cyberangriffe.
<i>Honeypot</i>	Simuliertes Nebennetzwerk zur Anlockung von Hackern.
<i>Hotspot</i>	Eine lokale Bereitstellung eines Inter- oder Intranetzgangs durch eine zentrale Einheit.
<i>Insellösung</i>	Umgehung der Implementierung in vorhandene Systeme durch Schaffung einer klaren Systemgrenze als eigenständige Minimalkonfiguration eines Cyber-Physischen Systems.
<i>Interface</i>	Schnittstelle.
<i>IT-Sicherheit</i>	Sicherheit der Informationstechnologie durch verschlüsselte Kommunikationsebenen und sichere Verbindungen.
<i>Knowledgebase</i>	Wissens- und Erfahrungsschatz.
<i>Kommunalbereich</i>	Betrachtungszielgruppe dieser Thesis. Der Kommunalbereich bedeutet in diesem Zusammenhang ländlich angelegte Unternehmensformen, z.B. Zweckverbände, welche durch einen Grundstock an Technik eine Ausgangsbasis für übertragene Konzepte aus dem Bereich Industrie 4.0 liefern.
<i>Live-Feed</i>	Durchgängiges Liefern von Daten und Informationen.
<i>Modbus TCP</i>	Offenes Kommunikationsprotokoll, häufig in der Industrie genutzt.
<i>Near Field Communication</i>	Nahfeldkommunikation, eine Kommunikationsart, welche auf einen verhältnismäßig geringen Abstand zwischen Sender und Empfänger ausgelegt ist.
<i>Offene Schnittstelle</i>	Im IT-Bereich angesiedelter Begriff einer Schnittstelle, die sich keiner proprietären Protokolle bedient und somit von Systemintegratoren und Programmierern frei auf die entsprechende Hardware anzupassen ist.

<i>Overlay</i>	Überlagertes eines meist abstrakten Bilds auf einen Betrachtungsgegenstand.
<i>Plug&Play</i>	Begriff, welcher eine einfache und im Normalfall sofort funktionierende Technik beschreibt.
<i>Point of Interest (POI)</i>	Betrachtungspunkt besonderen Interesses.
<i>Redundanz</i>	Zusätzliches Vorhandensein eines meist baugleichen Aggregats identischer Funktion, damit auch im Versagensfall der Betrieb aufrecht erhalten werden kann.
<i>Reverse Engineering</i>	Die Tätigkeit, in bereits bestehende Systeme, Produkte oder Abläufe im Nachhinein Optimierungen einfließen zu lassen.
<i>ruggedized</i>	Robust gebaut, industriellen Anforderungen angepasst.
<i>S7COMM</i>	Proprietäres Kommunikationsprotokoll der Firma Siemens, häufig in der Industrie genutzt.
<i>situationsgerecht</i>	Der jeweiligen Situation entsprechend angepasst.
<i>state-of-the-art</i>	auf aktuellem Stand der Technik.
<i>step-by-step</i>	Schritt für Schritt.
<i>Virtual Reality</i>	Virtuelle Realität.
<i>Werker 4.0</i>	Der Mitarbeiter oder Werker der Zukunft. Ein Werker, welcher mit den nötigen aus der Industrie 4.0 inspirierten technischen Mitteln ausgerüstet ist, um zukünftige Konzepte aus der Industrie 4.0 umzusetzen.
<i>Zentrale</i>	Das Betriebsgebäude bzw. die Werkstatt oder Hauptwirkungsstätte eines Kommunalbetriebs.

Literaturverzeichnis

- acatech. "acatech STUDIE März 2012: agendaCPS." Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, 2012.
https://www.bmbf.de/files/acatech_STUDIE_agendaCPS_Web_20120312_superfinal.pdf, accessed May 2017.
- Bauernhansl, Thomas, Michael ten Hompel, and Birgit Vogel-Heuser, eds. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8>.
- CHIP Digital GmbH. "Die Unterschiede von GPRS, EDGE, UMTS und LTE." 2016. http://praxistipps.chip.de/die-unterschiede-von-gprs-edge-umts-lte_10079, accessed May 2017.
- dena Deutsche Energie-Agentur GmbH. "Informationsblätter zu Pumpensystemen: Messtechnik bei Pumpen und Pumpensystemen." Druckmessung, Durchflussmessung, Thermometer und Stethoskop, Schwingungsmessung.
- DENSO WAVE INCORPORATED. "Error Correction Feature."
http://www.qrcode.com/en/about/error_correction.html, accessed May 2017.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Grundlagen der Instandhaltung, 2012.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung, 2015.
- Institut für Umweltverfahrenstechnik der Universität Bremen. "Wasser-, Abwasser(zweck)verbände: in Deutschland, Österreich, der Schweiz und Liechtenstein." <http://www.wasserwissen.de/linklisten/abwasserzweckverbaende.htm>.
- Kelkar, Oliver. "Beschäftigt sich Ihr Unternehmen bereits mit Industrie 4.0?", MHP - A Porsche Company, 2014.
https://www.mhp.com/fileadmin/mhp.de/assets/PDF/DrOliverKelkar_Industrie4.0_V2.0.pdf, accessed May 2017.
- KSB Aktiengesellschaft. "Software: Sie suchen die passende Software für Ihre Automationstechnik?", 2017. https://www.ksb.com/ksb-de/Produkte_Leistungen/automation/software/, accessed May 2017.
- Sendler, Ulrich, ed. Industrie 4.0 grenzenlos. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48278-0>.
- Surek, Dominik. Pumpen für Abwasser- und Kläranlagen: Auslegung und Praxisbeispiele. s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
<http://lib.mylibrary.com/detail.asp?id=645267>.
- TEC-IT Datenverarbeitung GmbH. "ONLINE BARCODE GENERATOR: Code-128." 2017. <http://barcode.tec-it.com/de/Code128?data=Industrie%204.0>, accessed May 2017.
- TEC-IT Datenverarbeitung GmbH. "ONLINE BARCODE GENERATOR: QR Code." 2017. <http://barcode.tec-it.com/de/QRCode?data=Industrie%204.0%20Konzepte%20situationsgerechter%20Wartung%20und%20Instandhaltung%20im%20Kommunalbereich>, accessed May 2017.
- TÜV SÜD. "Das Honeynet-Experiment: Hackerangriffe auf virtuelles Wasserkraftwerk belegen Gefahren für Industrie 4.0." 2015. <http://www.tuev-sued.de/management->

systeme/newsletter/2015/4/das-honeynet-experiment-hackerangriffe-auf-virtuelles-wasserkraftwerk-belegen-gefahren-fuer-industrie-4.0, accessed May 2017.

Wilko Hartz. "Basiswissen QR-Code." 2013. <http://qrcode.wilkohartz.de>, accessed May 2017.

WITTENSTEIN SE. "Cyber-Physische Produktionssysteme (CyProS): Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik." 2012. <http://www.projekt-cypros.de/definition-cps.html>, accessed May 2017.

Anhang

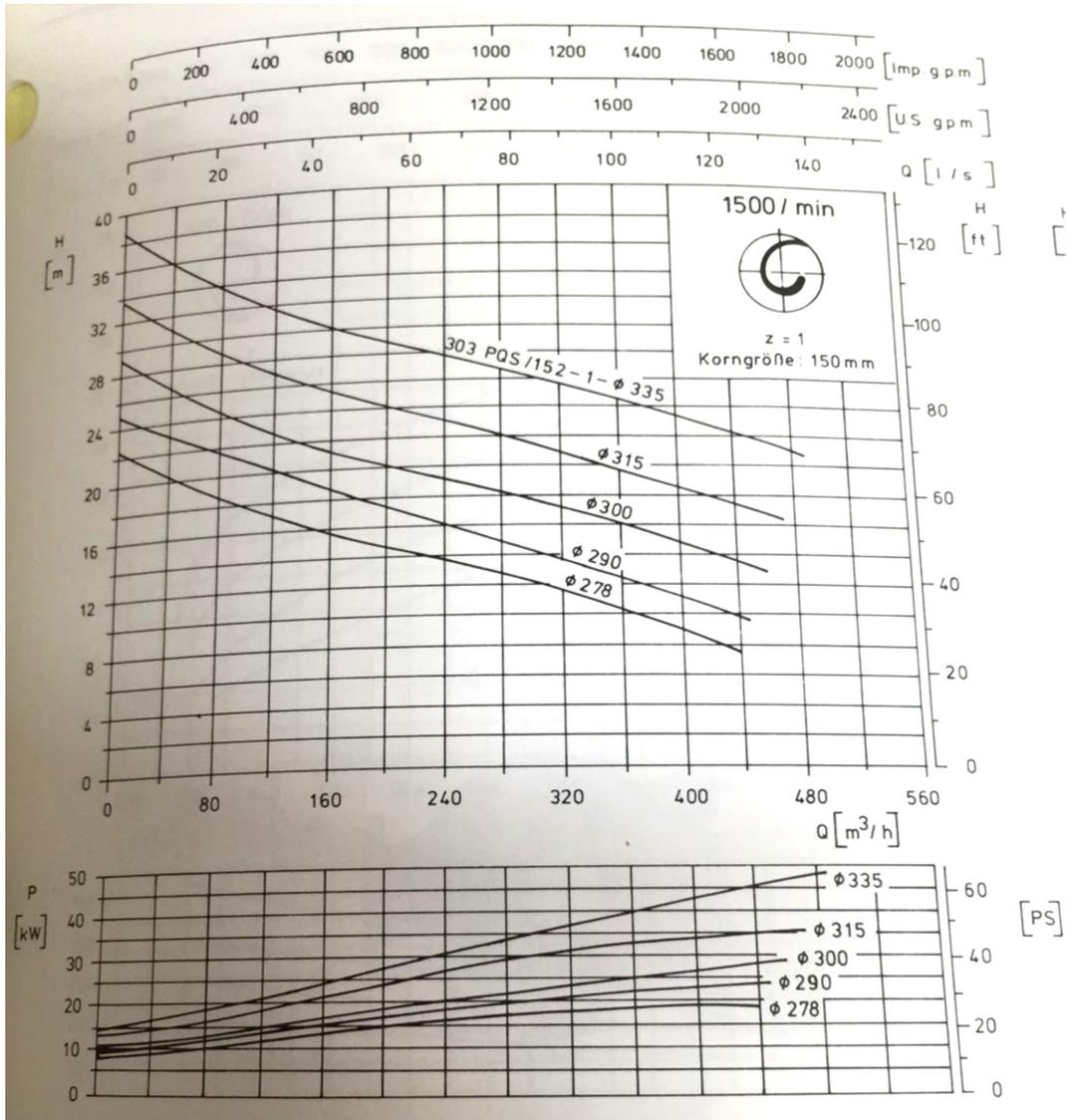


Abb. A Kennlinie der Pumpe #1 (Fa. Hornbacher Pumpen)

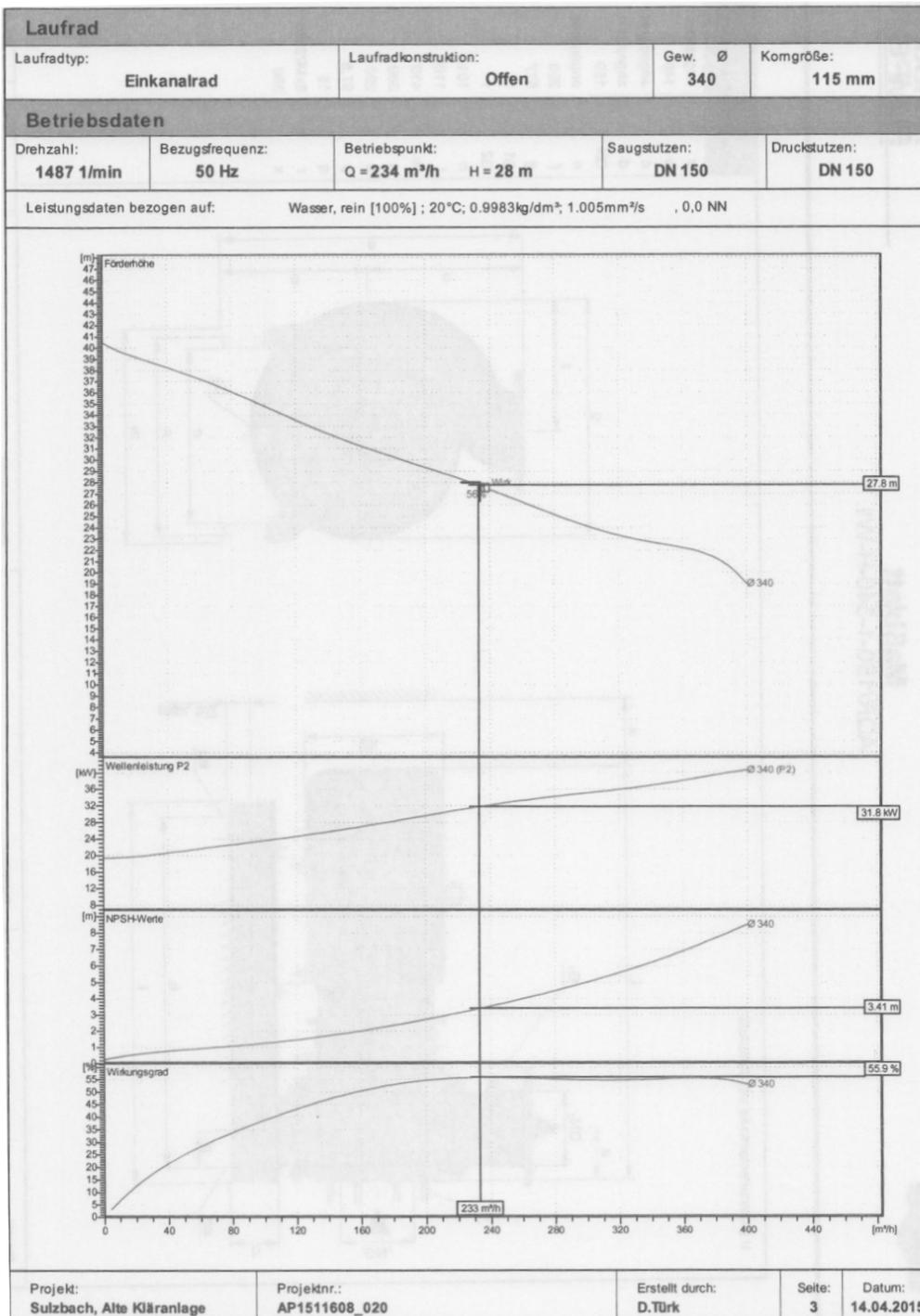


Abb. B Charakteristische Kennlinie der Pumpe #3 (Fa. Hornbacher Pumpen)

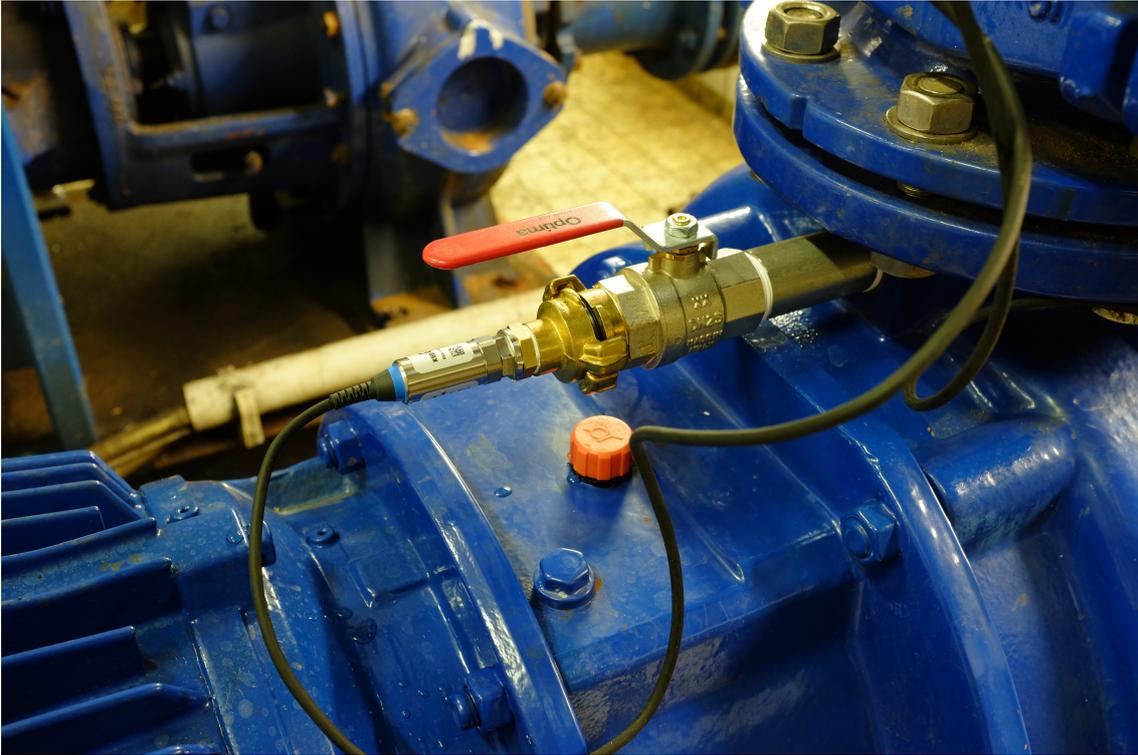


Abb. C Montage des druckseitig montierten Sensors am Kugelhahn.



Abb. D Montage des saugseitig montierten Sensors im Wartungsdeckel.

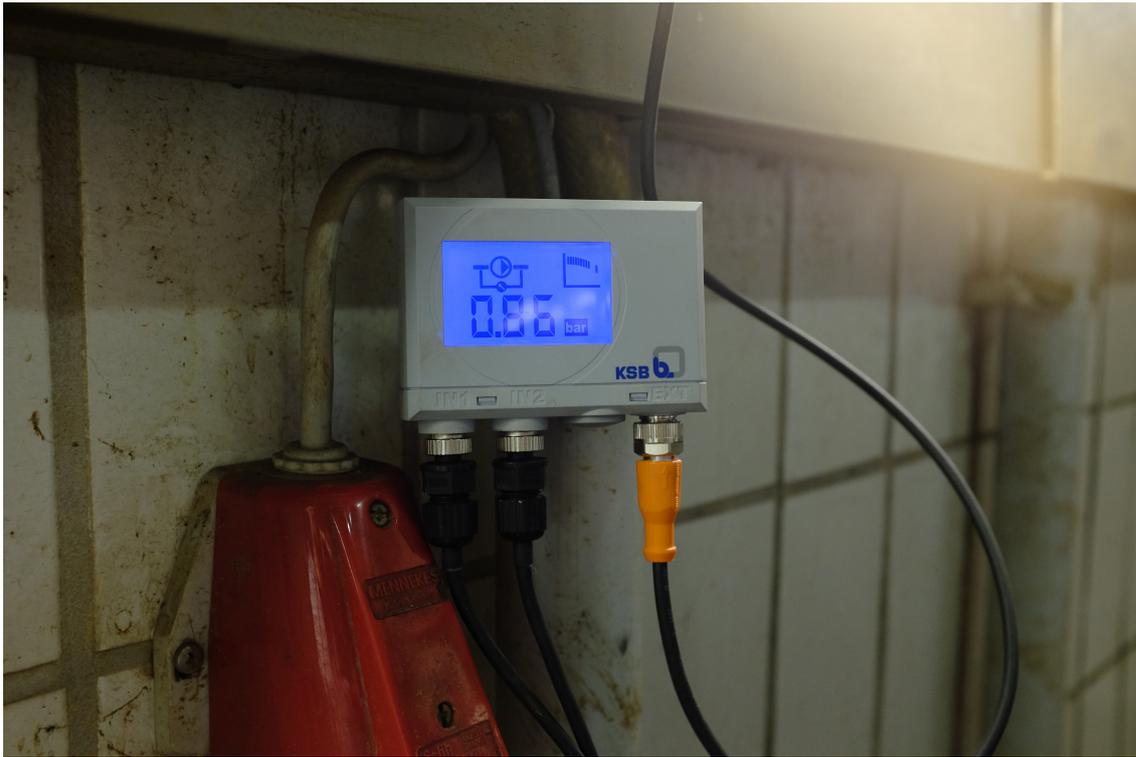


Abb. E Montage des PumpMeter Moduls zur Pumpendiagnose.



Abb. F Blick in das Pumpwerk: Die ältere Pumpe (links) und neuere Pumpe (rechts).